

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA



**Sistema de Posicionamiento y
Autolocalización para Sillas de
Ruedas Autónomas**

TESIS DOCTORAL

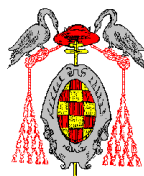
Juan Carlos García García

Ingeniero de Telecomunicación

2001

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
ESCUELA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA



Sistema de Posicionamiento y Autolocalización para Sillas de Ruedas Autónomas

TESIS DOCTORAL

Autor: **Juan Carlos García García**

Ingeniero de Telecomunicación

Directores: Manuel Mazo Quintas

Doctor Ingeniero de Telecomunicación

Jesús Ureña Ureña

Doctor Ingeniero de Telecomunicación

2001

*A mi familia,
Pilar, Elena y Miguel,
por haber aguantado
todos estos años...*

Agradecimientos

En primer lugar, y ante todo, quiero dar gracias a todos aquellos que en uno u otro sentido han contribuido a dar cuerpo a este trabajo; es posible que alguno se me quede fuera a la hora de escribir esto, pero seguro que sí que los tengo presentes.

A lo largo de estos años, muchos de vosotros habéis estado detrás de conseguir que acabara por fin la tesis: pues bien, aquí está. Una dedicatoria especial va a mis codirectores, Manuel Mazo y Jesús Ureña. A Manolo por iniciarme, a trancas y barrancas, por este mundillo académico y de investigación, ¡cuántas discusiones sobre esto y aquello, lo divino y lo real!. Pero no hay de qué preocuparse, seguro que no nos pondremos de acuerdo ¡como siempre!. A ambos, agradecerles el último empujón, con la inestimable ayuda de Jesús tanto en consejos como en hechos.

Muchas otras personas colaboraron conmigo realizando trabajos y desarrollos que, aunque sólo en una pequeña porción hayan ido a parar a este documento en concreto, sí han colaborado a formar parte de un todo, del que la tesis es sólo una pequeña parte. A Marta, por sus trabajos de todo tipo en la ya famosa silla de ruedas, su compañía en los momentos malos, aguantarme en los congresos y en los artículos y, en suma, por todos estos años dedicados a hacer que algo funcione: ¡ánimo, ahora te toca a tí!. No se puede quedar detrás Marisol, con la que tantos palos a ciegas he compartido; espero que comprenda que de todo se aprende, tanto del éxito como de la desilusión.

A esos otros alumnos de proyectos y becarios que trabajaron en este negocio un recordatorio especial. Los suecos, por eso de la repercusión internacional, merecen una mención aparte: va por vosotros, Johan, Lars y Tobías. En lo que atañe a los sufridores, aquéllos que pasaron mi peor época de ánimo y resultados, que sepan no me olvido de ellos: Eduardo, y nuestras 'eléctricas' relaciones, llenas de chispas y olores a humo; Juan Antonio, el primero y más lejano, que junto a Marta experimentó los placeres de los Mosfet reventados y las pistas volatilizadas. ¡Gracias por no haberos dedicado sólo al *software*!

Gracias a todos mis amigos y compañeros del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, donde se ha elaborado esta tesis, y que han compartido conmigo estos años apoyándome. Del Departamento también quiero destacar la generosa política de ayudas económicas para los alumnos

de Doctorado, que tanto ha hecho por lanzar la investigación dentro del mismo.

Un recuerdo especial para Pedro Revenga, por nuestra mutua capacidad de aguante y comprensión y por su inestimable ayuda en hacer que algunas cosas funcionen. Gracias también a Sotelo, por compartir ciertos únicos y minoritarios puntos de vista, es agradable ver este tipo de coincidencias que pasarán, sin duda, por encima de cualquier otro condicionante de segundo orden. A Lázaro y Felipe por su apoyo, uno más ruidoso que el otro, pero ambos efectivos. Y, qué decir de Javi, con el que he compartido asignaturas, despacho, conversaciones...

Por último, aunque no lo último, una mención especial a las recientes incorporaciones a nuestro Departamento, que han aportado un nuevo aire a los pasillos de nuestro lustroso edificio, ya sea allá en el cielo o en las mazmorras. En particular, y en su nombre a todos los demás, a Sira, por sus últimos consejos y aportaciones al estilo, redacción e impresión final de este documento.

Y a mi familia, la más cercana y la más lejana, tantos años de privaciones y vacaciones recortadas parece que llegan a su fin. No se cómo podré compensar eso pero espero estar a la altura.

Muchísimas gracias a todos.

Resumen

La presente tesis doctoral tiene como objetivo global diseñar una arquitectura adecuada para la incorporación de prestaciones de navegación autónoma por interiores estructurados a sillas de ruedas motorizadas, teniendo en cuenta las particularidades inherentes a este tipo de vehículos y usuarios.

Del objetivo genérico anterior han derivado distintas aproximaciones a la solución del problema. En lo que respecta a la arquitectura *hardware*, se define una estructura modular basada en el uso de un Bus Serie estándar en automatización industrial y doméstica. Las principales novedades del uso de tal arquitectura derivan de su capacidad de intercambiar información, mediante el uso de las interfaces adecuadas, con el propio entorno, lo que facilita las tareas de carga de mapas topológicos del entorno incluso en aquellos que no han sido previamente visitados.

La misma arquitectura permite el diseño de módulos de interfaz hombre-máquina (HMI, *Human Machine Interfaces*), reconfigurables y adaptables a las necesidades particulares de cada usuario de silla de ruedas, incluso en aquellos casos de discapacidad grave. El interés de esta aproximación es el de mantener, en lo posible, la prioridad del usuario sobre la máquina pues, en su caso, la conducción directa debe ser preferible a la asistida.

Para aquellos casos en los que una navegación plenamente autónoma sea necesaria, la arquitectura definida permite añadir tales prestaciones, sin cambiar de plataforma base con el consiguiente beneficio económico. El núcleo fundamental de esta tesis se concentra en el diseño de un Sistema de Posicionamiento y Localización (SPL) con características idóneas para su incorporación a bordo de sillas de ruedas motorizadas, con un coste e impacto mínimo sobre la infraestructura de los edificios que lo equipen.

Elemento fundamental del SPL es una marca artificial codificada (Marca de Posicionamiento y Localización, MPL), diseñada por el autor bajo las siguientes premisas: bajo coste y alta eficiencia tanto en la densidad de información encerrada como en los procedimientos de recuperación de tal información. La MPL presenta características que la hacen única, dentro del presente conocimiento del autor, entre sistemas comparables documentados por otros equipos de investigación, por la conjunción de parámetros geométricos, para el posicionamiento local, y parámetros codificados,

para la localización global dentro de un mapa topológico del entorno.

El círculo se cierra con el diseño de un modelo de navegación apropiado para interiores estructurados y que aprovecha la codificación recuperada de la MPL para establecer, sin ambigüedades, la localización global del vehículo. A continuación, la elaboración del plan de ruta se ve facilitada por el conocimiento de un mapa topológico del edificio el cual, gracias a las capacidades de intercomunicación entre móvil y entorno, puede ser cargado *on-line* durante el paso por los puntos de acceso principales; de esta forma pueden recorrerse autónomamente incluso edificios nunca visitados antes, con lo cual se contribuye notablemente al avance de las tecnologías en Asistencia a la Movilidad.

Abstract

This Ph. D. thesis is aimed at the global objective of designing an appropriate architecture to add autonomous navigation through structured indoors performances to powered wheelchairs, but always keeping in mind the type of vehicle and the special needs of potential users.

Starting from that generic objective, different approaches to a solution have been derived. About the hardware architecture, a modular one has been defined by using a standar Serial Bus coming from the world of industrial and home automation. Main contributions of such architecture come from the capabilities of exchanging information between vehicle and any indoor environment, by using appropriate interfaces; those performances make easier the uploading of topological maps of the environment, even those never visited before.

Such architecture allows the design of Human-Machine Interface modules, easy to be reconfigured in order to be adapted to the special needs of a wheelchair user, even in case of severe discapacities. A main porpouse of this approach is to keep user priority over the machine, if this is possible; this is because, from an user's point of view, allways is better a direct drive than an assisted one.

For those cases that need a fully autonomous navigation, the defined architecture allows to add such performances over the same basic platform; this characteristic is important from an economic point of view. Main block of this thesis is focused on the design of a Localization and Positioning System (LPS) with appropriate characteristics to be installed on board of powered wheelchairs and with a minimal impact and cost over the infrastructure of buildings.

Basic component of the LPS is an codified artificial landmark (known as Localization and Positioning Mark, LPM), that have been designed by the author under the following rules: low cost and high efficiency in terms of information density and recovery of information procedures. The LPM has got unique characteristics, in the actual author's knowledge, among similar systems documented by other research groups; this is because the combination of geometric parameters, local positioning parameters, and codified informations aimed to get a global localization in a topological map of the indoor environment.

Cycle closes with the design of a navigation model aproprate to structured indoor environments;

this model uses the recovered codified information from the LPM in order to know, despite any kind of indetermination, the global localization of the vehicle. Afterwards, route and path planning is easier to make by knowing a topological map of the building or indoor environment, that can be uploaded on-line while passing through main access points, so it is possible to navigate autonomously even in buildings never visited before; that one is a new performance that highly contributes to the advance in the Assisted Mobility technologies.

Índice General

Resumen	v
Abstract	vii
1 Introducción	1
1.1 Objetivos planteados	2
1.2 Estructura de la tesis	3
2 Investigaciones destacadas en Asistencia a la Movilidad	7
2.1 Tecnologías de Rehabilitación-Integración	8
2.1.1 Algunas soluciones atípicas al problema de la movilidad	9
2.1.2 Sillas escaladoras y equilibristas	10
2.1.3 Sillas de geometría variable	17
2.2 Ayuda a la Movilidad aumentando la Autonomía	18
2.2.1 El CALL Centre y la <i>Smart Wheelchair</i>	19
2.2.2 Proyecto OMNI	21
2.2.3 KIPR y las sillas <i>Tin-Man</i>	25
2.2.4 <i>Wheelesly</i> , del Mobot Group del M.I.T.	27
2.2.5 La silla <i>deíctica</i> de la Universidad del Nordeste	30
2.2.6 Otras sillas de equipos europeos y americanos	33
2.3 Autolocalización y Navegación Autónoma	37
2.3.1 Sensores para comportamientos básicos	39
2.3.2 Sensores para la autolocalización	40
2.3.3 Sensores de Visión en autolocalización y navegación	41
2.3.4 Guiado y navegación con Marcas Artificiales	44
2.3.5 Conclusiones	49

3	Contexto de desarrollo de la tesis: proyectos UMIDAM y SIAMO	51
3.1	En busca de un <i>lugar común</i>	52
3.1.1	Qué define al Usuario de un Sistema Autónomo	53
3.1.2	Lo que se le pide al Sistema Sensorial	54
3.1.3	Qué debe tener el HMI	55
3.1.4	Otras prestaciones	56
3.2	Definición de la arquitectura <i>hardware</i>	57
3.2.1	La experiencia del proyecto <i>UMIDAM</i>	60
3.2.2	La elección del Bus del sistema	62
3.3	Arquitectura del <i>SIAMO</i>	64
3.3.1	Sistema mínimo y adaptación a nuevas necesidades	66
3.4	Interfaz Hombre-Máquina (HMI)	68
3.4.1	Alternativas al <i>joystick</i> lineal	69
3.4.2	El <i>joystick</i> digital	69
3.4.3	La unidad de soplo	70
3.5	Sistema sensorial: prestaciones de navegación autónoma	75
3.5.1	Componentes del Sistema de Navegación	76
3.5.2	La Marca Artificial	76
3.5.3	El Mapa de Descripción del entorno	80
3.5.4	Solución al problema de la auto-localización y el posicionamiento	85
3.6	Recapitulación	88
4	Detección y segmentación de las Marcas Artificiales	91
4.1	Geometría del problema	91
4.1.1	Condicionantes de partida	92
4.1.2	Longitud en el Plano Imagen de un segmento vertical	94
4.1.3	Determinación del alcance del SPL	98
4.2	Detección de las MPL	101
4.2.1	Comprobación experimental y conclusiones	103
4.2.2	Ventajas del uso de códigos Barker unidimensionales	104
4.3	Diseño de la MPL	106
4.3.1	Aumento del alcance para la lectura del código de barras	108
4.4	Segmentación de la información de las MPL	109
4.4.1	Algoritmo base	109
4.4.2	Algoritmo de detección de candidatos a MPL	111

4.4.3	Segmentación de círculos y extracción de centroides	117
4.4.4	Lectura del código de barras	125
4.4.5	Comprobación experimental y discusión de los resultados	128
4.5	Recapitulación	134
5	Posicionamiento basado en marcas artificiales	137
5.1	Introducción	137
5.2	Recuperación de posición y orientación mediante Puntos de Fuga	139
5.2.1	Obtención de la orientación de la cámara	141
5.2.2	Solución inicial del vector orientación, Ω	143
5.2.3	Recuperación de la posición de la cámara	144
5.3	Prestaciones del algoritmo de posicionamiento mediante Puntos de Fuga	149
5.3.1	Óptica y sensor de referencia	149
5.3.2	Resultados de las simulaciones	150
5.3.3	Caracterización de los puntos de fuga	154
5.3.4	Sensibilidad en la elevación, ángulo α	157
5.3.5	Sensibilidad en el alabeo, ángulo β	163
5.3.6	Sensibilidad en el giro, ángulo γ	166
5.3.7	Discusión	170
5.4	Mejoras al sistema de posicionamiento: restricciones geométricas	172
5.4.1	Estimación de los errores de medida	176
5.4.2	Propagación del error de medida	182
5.4.3	Elipsoides de error	187
5.4.4	Influencia de otros parámetros sobre los errores de posicionamiento	191
5.4.5	Evolución de las componentes de la matriz de covarianza $\mathbf{Q}_\mu$	198
5.4.6	Estimación del alcance máximo del sistema de posicionamiento	208
5.4.7	Discusión sobre el emplazamiento de las marcas artificiales	213
5.5	Comprobación experimental del sistema	215
5.5.1	Resultados del modelo basado en puntos de fuga.	216
5.5.2	Resultados del modelo simplificado de posicionamiento	217
5.6	Recapitulación	219
6	Conclusiones y trabajos futuros	223
6.1	Aportaciones y conclusiones finales	223
6.2	Trabajos futuros	226

A Buses Serie en las Tecnologías de Rehabilitación	229
A.1 El sistema DX	229
A.2 El bus M3S	230
A.3 El problema de la interconectividad	234
A.3.1 Buses de aplicación en el entorno doméstico: Europa y Estados Unidos. . . .	235
A.3.2 El sistema LonWorks	238
A.3.3 Capa sobre capa	239
B Características del sistema de código de barras EAN-13	243
C Sistemas de referencia y ecuaciones fundamentales	247
C.1 Transformaciones de perspectiva de líneas y puntos	249
C.2 Proyecciones sobre el plano imagen: punto de fuga	251
C.3 Transformación de rectas entre el SCA y el PI	253
D Notas sobre la Esperanza matemática	255

Índice de Figuras

2-1	Esquema simplificado y prestaciones básicas de la Silla de ruedas con 'piernas-manipuladores', desarrollada en la Universidad de Pennsylvania.	10
2-2	El prototipo de la Universidad de Pennsylvania escalando un obstáculo.	11
2-3	Accesorio para subir bordillos: detalle y vista general de su ubicación.	12
2-4	Subir y bajar escaleras: (a) Banda rodante integrada en la silla <i>Explorer</i> , de la firma italiana TGR; (b) Accesorio independiente, también basado en banda dentada, para sillas de ruedas manuales.	13
2-5	El prototipo <i>Independence 3000</i> : (a) vista general de la plataforma; (b) prestaciones como vehículo todo-terreno (<i>4-wheel-drive</i>).	14
2-6	Silla <i>Independence 3000</i> , <i>iBOT</i> : (a) La silla en equilibrio pendular dinámico; su inventor, Dean Kamen, recibe la Medalla Nacional de Tecnología del año 2000 de manos del Presidente Clinton; (b) El <i>iBOT</i> subiendo o bajando escaleras.	15
2-7	Dos sillas de geometría variable en acciones de la vida diaria: un niño jugando, y un adulto tomando un café en la barra de un bar.	17
2-8	CALL Centre, la <i>Smart Wheelchair</i> : (a) La silla Smart usada por un niño con parálisis cerebral. (b) Demostración pública, conducción mediante pulsadores. (c) Una instalación permanente de línea reflectante para sillas de ruedas autónomas en Goteborg, Suecia.	20
2-9	Se observan claramente la planta motriz y las ruedas omnidireccionales. (b)-Vehículo de demostración. Son visibles los sensores US-IR y la pantalla LCD. (c)-Demostración del prototipo final. En la secuencia original (<i>*.avi</i>) puede comprobarse el movimiento omnidireccional de la plataforma.	22
2-10	Proyecto OMNI: (a) Módulo sensorial combinado US-IR. (b) Vista de la pantalla LCD de control.	23
2-11	Los prototipos <i>Tin-Man</i> del KIPR: (a) <i>Tin-Man I</i> ; (b) <i>Tin-Man II</i>	26

2-12	La <i>Tin-Man</i> en acción. Secuencia de imágenes mostrando una navegación sin intervención del usuario.	27
2-13	La silla <i>Wheelesley</i> : (a) Vista general. (b) Guiado por Electro-Oculografía (EOG). (c) Un detalle de los sensores EOG.	28
2-14	(a) La silla <i>Wheelesley</i> en el concurso celebrado dentro del IJCAI'95. (b) Una vista de la Interfaz de Usuario.	29
2-15	Silla <i>deíctica</i> de la Universidad del Nordeste. Vista general de los elementos de la misma y detalle del panel de control de comportamientos: las modificaciones introducidas detallan la trayectoria a seguir respecto al objetivo (dos ejemplos en la parte inferior).	31
2-16	Tres posibles objetivos de la silla <i>deíctica</i> , tanto en interiores como en exteriores: (a) el pico de una mesa; (b) el borde de una rampa de acceso para sillas de ruedas; (c) el extremo (como esquina) de un seto.	32
2-17	(a) <i>Navchair</i> , de la Universidad de Michigan. (b) Sistema de detección de obstáculos de la <i>INRO</i> , Universidad de Ciencias Aplicadas, Weingarten.	34
2-18	El Triángulo del Conocimiento Espacial (<i>Spatial Cognition Triangle</i>), traducido de [Krieg-Brückner 98].	38
2-19	Marca usada por la silla Bremen. A la izquierda, imagen de la marca en una estantería con revistas. A la derecha, esquema del proceso de segmentación e identificación de la marca.	46
2-20	Sistema de Marcas de Steven B. Skaar. (A) Situación de las marcas. (B) Versión aplicable a medidas de posición-orientación. (C) Situación de las cámaras en la SRA.	47
3-1	Sillas con arquitectura centralizada: (a) ROLLAND, silla autónoma de la Universidad de Bremen; (b) Silla construida en la Universidad de Plymouth.	57
3-2	Primer prototipo VAHM (1997), Universidad de Metz (Francia); la base es un robot móvil comercial.	58
3-3	Arquitectura <i>hardware</i> de la <i>Smart Wheelchair</i> , basada en un Bus Serie tipo <i>I²C</i>	60
3-4	Esquema de bloques y configuración física del sistema de control distribuido a bordo de las sillas <i>UMIDAM</i>	61
3-5	Concepción modular y esquema de bloques de las Silla de Ruedas Autónoma <i>SIAMO</i>	65
3-6	Configuración típica de un nodo de red Lon basado en el <i>NeuronChip</i>	66
3-7	Diagrama Funcional de la Arquitectura <i>SIAMO</i> : acceso al Bus mediante el micro-Controlador <i>NeuronChip</i> . Detalle del 'sistema mínimo'.	67

3-8	Vista general del prototipo: se muestran el alojamiento del sensor de soplo, el <i>joystick</i> , y el display LCD.	70
3-9	Diagrama de bloques del sistema de guiado por soplo.	71
3-10	Umbrales de transición de niveles.	71
3-11	Diagrama de estados de la validación de entradas del sensor de soplo.	72
3-12	Pantalla de entrenamiento del simulador.	73
3-13	Distribución de espacios en la tercera planta de la Escuela Politécnica de la Universidad de Alcalá.	75
3-14	Marca Artificial codificada: vista y detalle de sus componentes.	77
3-15	Método de codificación en la Marca Artificial.	79
3-16	Mapa jerárquico del entorno: (a) Niveles de jerarquía previstos. (b) Grafo parcial de nodos de la planta baja del Edificio Politécnico.	80
3-17	Asignación de número y tipos de nodo: (a) Plano de un sector de la primera planta, incluye los laboratorios de equipos pesados. (b) Grafo resultante.	82
3-18	Ejemplo de ruta seguida entre las <i>salas</i> 233 y 222 del Edificio Politécnico.	83
3-19	Subdivisión del edificio en mapas locales. Puntos de acceso y orígenes de coordenadas.	84
3-20	Ejemplos de planificación de ruta con transiciones especiales: (a) Cambio de planta, dentro de un mismo <i>mapa local</i> . (b) Ruta hacia otro edificio, con paso por los puntos de acceso o cambio de mapa.	85
3-21	Base de Datos de Marcas Artificiales: identificación geométrica y de mapa.	86
3-22	Concepto global del mapa autocontenido en el edificio: se usa un nodo de red sin contacto (RF o IR).	87
4-1	Geometría básica del problema: detección, en el PI, de una línea vertical en el SCA.	94
4-2	Simplificación: longitud l detectada en el PI en función de la distancia entre centro óptico y origen del segmento, D , y el ángulo de elevación, α	96
4-3	Longitud recuperada en el PI de un segmento de dimensión vertical L , en función de la distancia D , y normalizada respecto a la distancia focal λ . Gráficas con elevaciones $\alpha = 60^\circ$ y $\alpha = 90^\circ$	97
4-4	Alcance del SPL, normalizado respecto a $L = 1$ cm y por pixel de proyección en PI, tomando FOV como parámetro. A la izquierda, representación del alcance en centímetros respecto al ángulo de orientación relativo, ϕ . A la derecha, los mismos datos proyectados sobre el plano XY	100
4-5	Diseño de marcas con código Barker de 7 bits.	102
4-6	Salida del correlador: (a) con código Barker directo; (b) con código Barker modulado.	103

4-7	Marca a 3.4m: (a) imagen resultante, la linea de exploración se aprecia en vertical, próxima al marco de la puerta; (b) resultado de la detección.	105
4-8	Detalle de la imagen de prueba: (a) marca a 6m; (b) resultados de la detección de la misma.	105
4-9	Descripción de la MPL	106
4-10	Subsistema de Visión: detalle del conjunto de cámaras y posición de las marcas. . .	108
4-11	Núcleo del SPL: algoritmo base	110
4-12	Algoritmo de búsqueda de candidatos a MPL.	111
4-13	Algoritmo de búsqueda de códigos Barker de 7 bits.	112
4-14	Procesado de una columna de imagen; de arriba a abajo: perfil original en nivel de gris; salida del filtro-derivada; determinación del umbral.	114
4-15	Correlación de la secuencia de la columna de imagen con el código Barker-7 sintético. Para facilitar su visualización, el código Barker se representa al 50% de su magnitud real.	116
4-16	Puntos de búsqueda de códigos Barker-7 en una imagen real.	116
4-17	Segmentación de los círculos de las marcas. Condiciones de medida: distancia al centro, $R = 1$ m; ángulos de giro $\phi = 75^\circ$, en la imagen de la izquierda, y $\phi = 0^\circ$, en la de la derecha. Se aprecia además cómo se obvia la detección, como un Barker-7, de un subgrupo del código de barras.	118
4-18	Algoritmo de búsqueda de círculos y determinación de centroides.	119
4-19	Segmentación de círculos en subventana superior.	120
4-20	Segmentación de círculos en subventana inferior.	120
4-21	Segmentación final de uno de los círculos. Primera miniventana.	122
4-22	Obtención de los centroides de los círculos: aproximación parabólica a la curva de proyección.	123
4-23	Algoritmo de recuperación de los códigos de barras.	125
4-24	Recuperación del código de barras: subventana de búsqueda.	127
4-25	Reconstrucción del código de barras en una columna de datos de la imagen original. . .	127
4-26	Batería de 10 imágenes correspondientes al punto P_{5-45} : distancia 5 m, desviación angular $\phi = 45^\circ$. Se muestran aquí las diversas condiciones de luminosidad y las características del entorno de prueba, con las numerosas fuentes de ruido de imagen existentes.	129

4-27 Evaluación de la varianza de medida de centroides; imagen de prueba a 5 m, y con $\phi = 0^\circ$. Detalle ampliado de uno de los círculos, para observar la proyección de las diez pruebas realizadas en este punto.	130
5-1 Objetivo de los algoritmos de posicionamiento: (a) Posición-Orientación en tres dimensiones. (b) Simplificación del problema, proyección sobre el plano de rodadura (XY).	138
5-2 Detección de líneas horizontales y verticales en la marca artificial.	140
5-3 Posición relativa de la cámara respecto de la marca artificial: planteamiento inicial.	144
5-4 Marca artificial vista desde el SCC: recuperación de la posición relativa.	145
5-5 Recuperación de la posición: doble estructura triangular en la Marca Artificial.	148
5-6 Posiciones recuperadas en el plano XY , para distintas varianzas de medida de centroides. (a)-Varianza de medida de 0.0001 pixel^2 ; (b)-Varianza de medida de 0.1 pixel^2	150
5-7 Representación en coordenadas polares del plano XY . Posiciones recuperadas por el algoritmo bajo estudio, en un espacio polar (R, ϕ) . Condiciones de medida de centroides, de izquierda a derecha y de arriba a abajo, varianzas de: $0.0001, 0.01, 0.1$ y 0.5 pixel^2	151
5-8 Errores en la recuperación de los ángulos de elevación y alabeo, (α, β) . Datos de 1200 muestras, con $R \in [1..4]$ metros, y $\phi \in [15, 45, 75]$ grados. Varianza de medida de centroides $\sigma^2 = 0.1 \text{ pixel}^2$	153
5-9 Recuperación del ángulo de giro, γ . Datos de 1200 muestras, con $R \in [1..4]$ metros, y $\phi \in [15, 45, 75]$ grados. Varianza de medida de centroides $\sigma^2 = 0.1 \text{ pixel}^2$	154
5-10 Plano imagen normalizado: puntos de corte de las rectas visibles en el PI respecto a los ejes (u/λ) y (v/λ)	156
5-11 Sensibilidades $S_{m_1}^\alpha$ y $-S_{m_2}^\alpha$ respecto a la diferencia Δa , para valores de α iguales a $0, \pi/4$ (curva interior) y $\pi/2$. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: curvas para valores de β iguales a $5, 10, 15, 30, 45$ y 60 grados.	160
5-12 Sensibilidades $S_{m_1}^\alpha$ y $-S_{m_2}^\alpha$: gráficas respecto al alabeo β y a la diferencia Δa , para un valor de $\alpha = 45^\circ$. A la izquierda representación 3D; a la derecha proyección sobre el plano y curvas de nivel.	161
5-13 Sensibilidades $S_{b_1}^\alpha$ y $-S_{b_2}^\alpha$ respecto a la diferencia Δa , para valores de α iguales a $0, \pi/4$ (curva interior) y $3\pi/8$. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: curvas para valores normalizados de la abscisa $a_{1(2)}$ iguales a $0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ y 1	162

5-14	Sensibilidades $S_{b_1}^\alpha$ y $-S_{b_2}^\alpha$: gráficas respecto a cada abscisa (a_1 o $-a_2$, según el caso) y a la diferencia Δa , para un valor de $\alpha = 45^\circ$. A la izquierda representación 3D; a la derecha proyección sobre el plano y curvas de nivel.	163
5-15	Sensibilidades $S_{m_1}^\beta$ y $-S_{m_2}^\beta$: gráficas tomadas respecto a la abscisa a_i y a la diferencia $\Delta a = a_1 - a_2$. A la izquierda representación en curvas de nivel; a la derecha secciones para distintos valores de a_i	164
5-16	Sensibilidades $S_{b_1}^\beta$ y $-S_{b_2}^\beta$: gráficas tomadas respecto a la elevación α y a la diferencia entre las inversas de b_i , $\Delta B = (\frac{1}{b_1}) - (\frac{1}{b_2})$. A la izquierda representación en curvas de nivel; a la derecha secciones para valores $\alpha = [45^\circ, 60^\circ, 85^\circ]$	165
5-17	Elemento de sensibilidad $E_{m_i}^\gamma$ en función del ángulo de giro γ y de la diferencia $\Delta b = (b_2 - b_1)$. A la izquierda: falso color y curvas de nivel en incrementos unitarios. A la derecha: secciones en $\Delta b = [0.2, 0.4, 0.6, 0.8]$	168
5-18	Elemento de sensibilidad $E_{b_i}^\gamma$ en función del ángulo de giro γ y de la diferencia $\Delta b = (b_2 - b_1)$. A la izquierda: falso color y curvas de nivel en incrementos unitarios. A la derecha: secciones en $\Delta b = [0.2, 0.4, 0.6, 0.8]$	169
5-19	Método simplificado de posicionamiento: referencias geométricas.	173
5-20	Errores de posicionamiento en el plano XY , en coordenadas cartesianas y en función de la varianza de la medida de centroides. Condiciones: $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 0$. Varianzas: $\sigma^2 = 1, 0.5, 0.25$ y 0.1	177
5-21	Errores de posicionamiento en coordenadas polares, $f(R, \phi)$, y en función de la varianza de la medida de centroides. Condiciones: $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 0$. Varianzas: $\sigma^2 = 1, 0.5, 0.25$ y 0.1	179
5-22	Elipsoides de error, referidas a las variables $(R, S\gamma)$ con un 95.4% de fiabilidad, con errores en el PI de $\sigma^2 = 0.5$ pixel ² . Distancias de medida de 1 a 5 metros; $S\gamma$ correspondiente a fases ϕ de 15, 45 y 75 grados (de arriba a abajo).	189
5-23	Proyección de las elipsoides de error sobre una representación en coordenadas polares (R, ϕ)	190
5-24	Representación de los puntos de prueba recuperados en coordenadas cartesianas. . .	191
5-25	Comparación, en coordenadas polares, de las elipses de error con las salidas (R, ϕ) optimizadas por mínimos cuadrados recursivos.	192
5-26	Efecto de los errores en el ajuste del alabeo β : imágenes de la marca para R entre 1 y 5 metros, $\alpha = 90^\circ$, $\phi = 45^\circ$ y con errores en β de $+5^\circ$ (gráfica izquierda) y de $+10^\circ$ (gráfica derecha).	193

5-27	Efecto del error en el ajuste de β sobre la salida μ_s : elipses nominales y distribuciones de datos para un error en β de 5° (gráficas mitad izquierda) y de 10° (gráficas mitad derecha). Se incluyen sendos detalles de la dispersión más desviada en términos relativos.	194
5-28	Efecto del error en la estimación de α sobre la salida μ_s : elipses nominales y distribuciones de datos para un error en α de 5° (gráficas mitad izquierda) y de 10° (gráficas mitad derecha).	196
5-29	Evolución de las elipses de error en función de la posición y del ángulo de elevación, α , para una varianza de medida de centroides de 0.5 pixel^2	199
5-30	Representación de las componentes de $\mathbf{Q}_\mu$ en función del ángulo de elevación α . Condiciones de medida: ángulo de giro $\phi = 45^\circ$, varianza de medida de centroides $\sigma^2 = 0.5 \text{ pixel}^2$	200
5-31	Evolución de las componentes de $\mathbf{Q}_\mu$ en función de la distancia radial R . Condiciones de medida: $\alpha = 90^\circ$, varianza de medida de centroides $\sigma^2 = 0.5 \text{ pixel}^2$	202
5-32	Evolución de las componentes de $\mathbf{Q}_\mu$ en función del ángulo de giro ϕ . Condiciones de medida: $\alpha = 90^\circ$, varianza de medida de centroides $\sigma^2 = 0.5 \text{ pixel}^2$	203
5-33	Evolución de las elipses de error en función de la posición y del campo de visión horizontal, FOV . Condiciones de medida: $\alpha = 90^\circ$, varianza de centroides $\sigma^2 = 0.5 \text{ pixel}^2$. Variaciones en FOV entre 15 y 65 grados, en intervalos de 10°	205
5-34	Representación de las componentes de $\mathbf{Q}_\mu$ en función del campo de visión horizontal, FOV . Condiciones de medida: elevación $\alpha = 90^\circ$, giro $\phi = 45^\circ$, varianza de centroides $\sigma^2 = 0.5 \text{ pixel}^2$	206
5-35	Características de interés en la óptica usada. (a) Distancia focal necesaria para un FOV dado, dependiendo del tamaño del sensor, en pulgadas. (b) Relaciones entre la distancia focal y la varianza σ_{RR}^2 obtenida, con la distancia R como parámetro; datos para el sensor OV7610, de $1/3''$	207
5-36	Alcance máximo, en metros, del sistema de posicionamiento en función del cociente entre desviaciones típicas en R y de detección de centroides (σ_R/σ), ambas en metros. Parámetro de la familia de curvas: campo de visión horizontal, FOV , en grados. . .	212
5-37	Varianza de la estimación de la distancia a la marca, o radio R , en función del FOV y obtenida mediante la expresión aproximada, con $\sigma = 0.5 \text{ pixel}^2$	212
5-38	Notas sobre la ubicación de las MPL.	213

5-39	Sugerencia de ubicación de marcas en una ruta típica. Compruébese cómo las zonas de cobertura de las marcas se solapan convenientemente a lo largo del corredor y cómo se ubican las MPL en las paredes de un recinto dado.	215
5-40	Proyección de los centroides de todas las imágenes recuperadas (280 en total), sobre el plano imagen normalizado ($\lambda = 1$).	216
5-41	Resultados experimentales del modelo de posicionamiento basado en puntos de fuga.	217
5-42	Resultados experimentales del modelo de posicionamiento simplificado.	218
5-43	Resultados del modelo de posicionamiento simplificado en coordenadas polares. Detalle del punto P_{4-45} , para $R = 4\text{ m}$ y $\phi = 45^\circ$; distribución de posiciones recuperadas y elipsoide asociada a dicho punto.	219
A-1	Esquema de Bloques de una configuración completa de una silla de ruedas con el Bus DX, de Dynamic Controls Ltd. (Nueva Zelanda).	230
A-2	Esquema funcional del sistema M3S.	231
A-3	Prototipo construido por el TNO: módulos experimentales incorporados y vista del mismo.	232
B-1	Código de barras de un paquete de seis donuts.	244
C-1	Convenio de los sistemas de coordenadas implicados: (a) Sistema de Coordenadas Absoluto (SCA); (b) Sistema de Coordenadas del Vehículo (SCV); (c) Sistemas de Cámara (SCC) y de Plano Imagen (PI).	248
C-2	Transformación de la recta $\mathbf{L}$ sobre el SCC	250
C-3	Proyección de sendas rectas paralelas sobre el PI: punto de fuga.	252

Índice de Tablas

3.1	Acciones del joystick digital sobre el movimiento de la silla.	69
3.2	Acciones del soplo sobre el movimiento de la silla.	72
4.1	Resumen de resultados de la detección de los códigos Barker.	117
4.2	Resultados del algoritmo de detección de parámetros de las Marcas de Posicionamiento y Localización).	132
5.1	Desviaciones típicas, en grados, para los ángulos de elevación, alabeo y giro recuperados por el algoritmo de posicionamiento basado en puntos de fuga (aproximación gaussiana).	155
5.2	Constante de la elipsoide de error, en función del nivel de confianza y los grados de libertad.	187
5.3	Valores de las componentes de la matriz de covarianzas de salida, para las condiciones indicadas.	188
5.4	Valores, por defecto, de los parámetros de ajuste de la unidad de <i>pan-tilt</i> que afectan al algoritmo de posicionamiento.	197
A.1	Principales Buses de Campo en el entorno doméstico. Europa: European Home Systems (EHS), BatiBUS y European Installation Bus	236
A.2	Principales Buses de Campo en el entorno doméstico. América: Consumer Electronics Bus (CEBus), LonWorks y X10.	237
A.3	Nuevas tendencias en Interconectividad: comunicaciones inalámbricas e integración con Internet.	240
B.1	Codificación EAN primaria: dígitos del 0 al 9, tipos A, B y C. El carácter (.) simboliza una barra o espacio claro; mientras que el carácter (B) simboliza una barra o espacio oscuro.	244

B.2 Codificación EAN secundaria: tipos A o B de los seis primeros dígitos representados para poder obtener la primera cifra del prefijo.	245
---	-----

Capítulo 1

Introducción

En los últimos diez años (década de 1990) se ha podido constatar un considerable incremento de actividades y resultados en lo que se ha dado en llamar las *Tecnologías de la Rehabilitación*. En esto han influido múltiples factores, entre los que cabría destacar la mejor relación prestaciones/precio de sistemas electrónicos inicialmente concebidos para otros entornos, como los industriales. Así, entre otros avances, técnicas circunscritas a la robótica móvil han sido por fin aplicadas al incremento de la calidad de vida de colectivos tales como los ancianos o los discapacitados motrices o cognitivos, tan importantes como descuidados por los avances tecnológicos hasta estas fechas.

Muchos son los problemas que están todavía por resolver, no siendo el menor de todos el de la producción y comercialización de los sistemas diseñados y probados en los laboratorios y centros de investigación. Sin embargo, el futuro se plantea prometedor: sistemas microprogramables más potentes, baratos y pequeños, junto a la revolución en las comunicaciones que ha supuesto la extensión de Internet y los productos de informática doméstica, abren un abanico impresionante de nuevas posibilidades.

Distintas sociedades, como la norteamericana RESNA¹ (*Rehabilitation Engineering and assistive technology Society of North America*), en activo desde 1979, y la europea AAATE² (*Association for the Advancement of Assistive Technology in Europe*), fundada en 1995, fomentan las actividades orientadas a la transferencia de experiencias y tecnologías procedentes de campos diversos, como la robótica y la informática, a la mejora de la calidad de vida de aquellas personas que sufren carencias motoras o cognitivas, bien sean éstas permanentes o sólo temporales a causa de enfermedades y accidentes diversos.

En el ámbito Iberoamericano, estas inquietudes encuentran correspondencia en los trabajos que,

¹<http://www.resna.org/>

²No tiene sede permanente. En la actualidad puede contactarse en <http://www.fernuni-hagen.de/FTB/aaate.htm>.

realizados por numerosos grupos de diversos países de este entorno, se han centrado en la aplicación de la Tecnología a estos fines sociales. Como ejemplo destacado cabe reseñar los recientes trabajos del Primer Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad, *Iberdiscap2000*, celebrado en Madrid en Octubre de 2000 [Bellacasa 00].

En esta tesis se presentan las aportaciones y resultados de la investigación realizada por el autor en el campo de la *Asistencia a la Movilidad*, incluida a su vez en el gran área de las denominadas como *Tecnologías de la Asistencia* (o AT, de su acrónimo inglés). Estos trabajos se realizaron dentro del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, en el cual se han realizado varios proyectos de investigación en el área de las AT.

Durante el transcurso de los trabajos de investigación citados se han especificado, diseñado y construido varios prototipos de sillas de ruedas robotizadas (referencias principales en [Mazo 95a], [García 99b], y [Mazo 01]), que nos han permitido comprobar la bondad de nuestras aproximaciones.

1.1 Objetivos planteados

El conjunto de los objetivos planteados al inicio de los trabajos del autor en esta materia pueden resumirse en uno general, a largo plazo: la obtención de un sistema móvil autónomo, con una relación prestaciones/coste ajustada a su aplicación a la asistencia a la movilidad. Para ello se plantearon tres líneas de acción principales:

- El diseño y especificación de una plataforma móvil capaz de adaptarse, con rapidez y una mínima intervención sobre la configuración base, a las necesidades específicas de usuarios con discapacidades motrices muy variadas.
- El diseño y especificación de un interfaz hombre-máquina (*Human Machine Interface*, HMI) concebido desde el punto de vista de los potenciales usuarios, cuidando preferentemente cuestiones relacionadas con la facilidad de uso y la efectividad en la conducción.
- La incorporación de prestaciones de navegación autónoma, mediante el estudio y diseño de una estrategia global móvil-entorno que, tanto en medios materiales como de inversión en el entorno, quedase dentro de lo razonable para el colectivo de usuarios potenciales.

Durante la realización de la tesis estos objetivos se han concretado, principalmente, en el estudio, especificación y diseño de un Sistema de Posicionamiento y Localización (SPL) que permitiera a una Silla de Ruedas provista del mismo poseer las siguientes prestaciones:

- Conocer sin ambigüedades su localización global, dentro de un determinado conjunto de recintos incluido en un mapa predefinido del entorno.

- Establecer la posición absoluta del mismo, dentro del recinto considerado y con una precisión razonable para la aplicación dada.
- Cumplir las especificaciones citadas con un uso de recursos limitado, sean estos infraestructura a bordo de la silla o en el edificio en donde éste se encuentre.
- Mejorar los resultados obtenidos por sistemas similares, estudiados y especificados por otros grupos de investigación.

1.2 Estructura de la tesis

De entre todos los trabajos realizados por el autor, dentro del grupo de investigación en AT de la UAH, en la presente tesis se exponen aquellos directamente relacionados con los objetivos planteados y en especial los estudios previos realizados, modelos diseñados, resultados obtenidos y conclusiones pertinentes al Sistema de Posicionamiento y Localización que da título a esta tesis, resaltando las aportaciones correspondientes a cada una de las fases. En consecuencia, la estructura de este documento es la siguiente:

- Tras este capítulo de introducción, el segundo se dedica a exponer un estudio exhaustivo del Estado del Arte en la Asistencia a la Movilidad, en el campo específico de sillas de ruedas motorizadas. Se presentan algunas de las soluciones aportadas por la propia industria de sillas de ruedas motorizadas (algunas de ellas muy interesantes), en paralelo con los estudios y trabajos realizados por múltiples equipos de investigación. El estudio se concentra posteriormente en los métodos empleados en dichos trabajos para incorporar prestaciones de navegación en las Sillas de Ruedas Autónomas (SRA).
- El tercer capítulo se dedica a encuadrar los trabajos de esta tesis. Así, en primer lugar se realiza un somero estudio de las características que deben reunir los sistemas autónomos de asistencia a la movilidad, en función de las necesidades del usuario final, por un lado, y de las capacidades tecnológicas, por otro. Se presenta, posteriormente, la arquitectura *hardware* de la silla de ruedas SIAMO, cuyo diseño responde al de una base lo suficientemente flexible como para dar solución tanto a los problemas actuales como a los derivados de la previsible evolución de sistemas similares.

Especial énfasis se hace en los trabajos realizados por el autor de esta tesis en aumentar las capacidades de interacción con el entorno inmediato desde el propio vehículo, por el indudable aumento en la calidad de vida que esto aporta a la persona con discapacidades físicas. En esta línea se describen aquellos módulos de interfaz de usuario del sistema SIAMO especificados y

diseñados por el autor. Los módulos presentados en este capítulo son los correspondientes al guiado o *conducción mediante expulsión de aire* y al denominado *joystick digital*, que aporta nuevas soluciones a necesidades específicas de gobierno del vehículo para personas con restricciones severas o muy severas de su movilidad en las extremidades superiores.

El capítulo concluye con la definición de una solución global, propuesta por el autor, al problema de la auto-localización y posicionamiento del vehículo en entornos interiores estructurados, habituales para un usuario de SRA's, y que es aplicable no sólo a su propio domicilio sino también a aquellos otros recintos en los que normalmente podría desarrollar otras actividades, como son los centros públicos, de enseñanza y similares. Así, se describe una propuesta para un *sistema de navegación* que permite la elaboración y ejecución de un plan de ruta en interiores parcialmente estructurados, con la ventaja de poder ser cargado o descargado del móvil mientras éste entra o sale de secciones de edificios nunca antes visitados. Dicho sistema, aún pudiendo ser utilizado de forma independiente, aumenta notablemente sus prestaciones usado en conjunción con el *sistema de posicionamiento y localización* asociado. Su principal componente es una *marca artificial codificada* que se presenta también en este capítulo; como característica definitoria de esta marca, y para cubrir el objetivo de una identificación rápida de las mismas, se utiliza una codificación en forma de barras horizontales y patrones circulares con prestaciones superiores a las utilizadas en otros trabajos similares.

- El capítulo cuatro se concentra en las técnicas de visión artificial aplicadas a la detección, segmentación y extracción de características de la marca artificial (MA). En una primera parte se detallan, además, los estudios realizados para la especificación del tipo, número y dimensiones de los patrones incluidos en la marca con una idea central que es la de minimizar el número de marcas necesario para cubrir un determinado recinto. Así, se analiza la diferencia existente entre disponer de forma horizontal o vertical los citados patrones y el autor especifica finalmente una distribución que mejora la clásica distribución en horizontal de estas características.

En segundo lugar el autor propone un método de detección de la presencia de marcas rápido y fiable, de cara a su eficaz inclusión en un sistema en Tiempo Real tal y como puede ser considerada una SRA. El método se basa en un procesado unidimensional de la imagen, en busca de un patrón de identificación único para todas las marcas del sistema; el patrón de identificación diseñado deriva del código Barker de 7 bits, del cual se aprovecha la elevada relación entre su autocorrelación y la correlación con otros patrones habituales en entornos artificiales: zonas lisas, bandas uniformes, etc.

Conocida la geometría de la marca y las características del patrón de localización en una imagen dada, la segmentación del resto de patrones existentes sobre la marca artificial resulta

notablemente simplificada. Los procesos relacionados con esta segmentación continúan este capítulo cuarto. Así, la identificación de la marca (una vez localizada) se realiza mediante un código de barras, similar a los empleados en la codificación de precios (sistema EAN-13). Finalmente, se expone el método diseñado por el autor para la segmentación de los patrones de posicionamiento presentes en la marca artificial; estos patrones son cuatro círculos sólidos colocados en las esquinas de la marca cuya detección se complica, en el deseo de maximizar el rango de uso del SPL, al poder presentar una notable distorsión debido a la distancia y el ángulo de visión existente. De nuevo, el algoritmo de segmentación definido por el autor responde a las necesidades de rapidez de proceso y fiabilidad exigibles a un sistema en Tiempo Real.

- Las características geométricas del SPL, el fundamento del método de recuperación de la posición relativa respecto a la MA, el algoritmo básico diseñado, sus prestaciones previstas a partir de la matriz de covarianza asociada y los resultados obtenidos, se exponen en el capítulo quinto. Se comparan dos métodos que parten de la misma información básica, esto es, la procedente de los centroides de los círculos sólidos presentes en la MA.

En el primero de ellos, se obtienen todas las componentes de la posición-orientación relativa del vehículo en 3D, esto es, el vector de coordenadas y ángulos de orientación $\mathbf{C} = (X_0, Y_0, Z_0, \alpha, \beta, \gamma)$. Se estudia la precisión y las restricciones de este modelo y su aplicabilidad al campo de la Asistencia a la Movilidad. Dicho modelo presenta ciertas ventajas al extraer toda la información necesaria únicamente de la suministrada por los cuatro centroides detectados en la imagen, sin embargo, es precisa una muy alta precisión en la medida citada tal y como se demuestra en la sección correspondiente de este capítulo.

A partir de una simplificación del modelo original, aportada por el autor, y que consiste en esencia en la especificación de ciertas restricciones geométricas y posicionales, tanto en la MA como en el sistema de cámara, se obtiene una muy notable mejora en el rango de uso del modelo. Este método restringe el problema en 3D original a uno en 2D, y permite obtener la posición-orientación del vehículo, esto es, el vector $\mathbf{M} = (X_0, Y_0, \gamma)$, sobre el plano de rodadura, XY . En las secciones siguientes del capítulo quinto se detallan tales especificaciones y se realiza un completo estudio de la precisión del sistema, mediante la obtención de una matriz de covarianzas, $\mathbf{Q}$, asociada a los valores de las componentes del vector $\mathbf{M}$ y la covarianza σ_{pixel}^2 de detección de los centroides en la imagen. El capítulo finaliza con el contraste del modelo obtenido con una batería de situaciones de prueba, procedentes de una amplia muestra de imágenes obtenidas en diversas posiciones, orientaciones y condiciones de captura.

- Por último, el capítulo seis se dedica a recapitular las aportaciones principales de esta tesis,

junto con una serie de conclusiones finales, extraídas a partir de las experiencias y los resultados obtenidos. Así mismo, se presentan las líneas futuras de investigación abiertas a partir de la presente tesis.

Capítulo 2

Investigaciones destacadas en Asistencia a la Movilidad

Este capítulo presenta algunos de los trabajos más importantes que, tanto diversos grupos de investigación como la industria especializada, han llevado a cabo en el campo de las *Tecnologías de Asistencia a la Movilidad*.

En la primera sección se realiza un repaso general del estado de las Tecnologías de Rehabilitación, comenzando por estudiar algunas soluciones interesantes e incluso atípicas planteadas por ciertos centros de investigación y fabricantes de sillas de ruedas. Especial atención se le dedica a la silla equilibrista de Dean Kamen, tanto por sus peculiares prestaciones como por su propio proceso de gestación.

La segunda sección está dedicada a los resultados de los grupos de investigación más destacados en el estudio y diseño de Sillas de Ruedas Autónomas (ó SRA). Se resumen los resultados más interesantes y se detallan las características y propiedades más notables de los proyectos realizados por dichos grupos.

Por último, la tercera sección está centrada en las prestaciones de navegación incorporadas en los vehículos para que éstos sean realmente autónomos. En particular, se centra el estudio en los sistemas de localización y posicionamiento aplicables al problema específico planteado por las SRA; se estudian diversas alternativas planteadas por un cierto número de equipos de investigación y, en consecuencia, se elabora una síntesis de los resultados en busca de una mejor solución, la cual será planteada por el autor de esta tesis.

Intencionadamente, los diversos proyectos en Asistencia a la Movilidad realizados por el Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, en donde el autor ha desarrollado sus actividades

desde 1990, se excluyen de esta presentación general con idea de que formen parte de otro capítulo específico al entorno en el que esta tesis se ha circunscrito.

2.1 Tecnologías de Rehabilitación-Integración

La movilidad es un elemento esencial del comportamiento humano; aquéllos que por nacimiento, accidente, enfermedad o envejecimiento ven afectadas sus habilidades motrices sufren intensamente de todos los inconvenientes inherentes a su estado más todos aquellos derivados del sistema social en el que están inmersos.

No hace falta ir lejos de nuestro mismo entorno para observar todas las barreras que las personas con movilidad reducida han de afrontar. En primer lugar se encontrarían los obstáculos en sí mismos, tales como zanjas, barreras, muretes de escasa altura, etc. que en algún caso son insalvables hasta para personas de razonable agilidad; pero ciertos elementos como escaleras, bordillos y rampas que facilitan teóricamente el acceso a cualquier persona pueden llegar a ser obstáculos insalvables para aquellas otras con dificultades motoras. Y no es necesario ir específicamente en silla de ruedas para apreciarlo: ancianos con necesidad de ayudarse de bastones, ciegos o personas de visión reducida y otros colectivos con limitaciones transitorias (embarazadas, accidentados, etc.) sufren los mismos inconvenientes con las mismas barreras arquitectónicas.

Como tales barreras arquitectónicas también pueden ser considerados otros elementos naturales en nuestra vida diaria y que, por sus dimensiones o su ubicación impiden su acceso al colectivo de personas de movilidad reducida. Así, las dimensiones, sentido y forma de apertura de las puertas, la ubicación del mobiliario, la disposición interna y externa de los ascensores, la botonera de accionamiento de los mismos e incluso los sanitarios son objeto de estudio, adaptación y normalización. Un interesante trabajo, en el cual se resumen y detallan las normativas y acciones tomadas por los poderes públicos destinadas a favorecer la movilidad, en todos sus aspectos, se encuentra en [Juncà 97].

La *Tecnología* puede ayudar de múltiples maneras a las personas discapacitadas. El simple acceso al ordenador, rutinaria herramienta de trabajo, investigación y entretenimiento para una parte importante de la Sociedad actual es en sí mismo un campo de actuación de notable interés [Candelos 97]. En el campo de la *Movilidad Asistida*, en particular, numerosos grupos de investigación tanto académica como empresarial han estudiado, desarrollado y, en ocasiones, comercializado dispositivos, mecanismos o elementos estructurales orientados específicamente a resolver el problema humano derivado de la discapacidad motriz, en cada una de sus múltiples facetas.

Este es un interesante campo de desarrollo de aplicaciones para técnicas y soluciones procedentes de otros campos, como por ejemplo: la *Mecánica*, buscando elementos y subsistemas constructivos

apropiados; la *Electrónica*, suministrando y desarrollando herramientas de control, potencia y procesadores digitales portables; la *Inteligencia Artificial*, en el desarrollo de controles autónomos; la *Robótica* en general y en especial la *Robótica Móvil*; los *Sistemas Sensoriales*, orientados a un reconocimiento automático del entorno; etc.

En la presente tesis, el problema concreto que se estudiará y al que se aportará algún avance objetivo es el de los usuarios de Sillas de Ruedas, esto es, aquellos discapacitados en sus extremidades inferiores, impedidos por tanto de caminar y necesitados de un soporte mecánico de transporte autónomo. Así, en adelante, cuando se mencione genéricamente el problema de la Movilidad, se está referenciando a este colectivo del que forman parte personas de patología bien diversa: tetrapléjicos, hemipléjicos, afectados de parálisis cerebral, etc. A continuación se hará una somera descripción de algunas de las soluciones aportadas por diferentes equipos de investigadores en distintos países.

2.1.1 Algunas soluciones atípicas al problema de la movilidad

Una idea interesante para resolver el problema de la movilidad, aunque no ha tenido una solución adecuada hasta el momento, es la de utilizar algún tipo de mecanismo articulado similar a las piernas naturales. Las ventajas de esta solución parecen evidentes pues no es necesario un terreno regular para poder desplazarse, como es el caso de los vehículos (normalmente sillas) con ruedas convencionales.

Los vehículos con patas [Okhotsimski 77] [Hirose 92] [Kajita 96] no son extraños en el campo de la robótica móvil; el número de patas con el que suelen operar van desde seis hasta sólo dos, como los humanos. Un caso práctico de interés es el llamado ASV (Adaptive Suspension Vehicle) [Song 87], desarrollado en la Universidad Estatal de Ohio (EEUU) por encargo del ejército de los EEUU. Se trata de un vehículo de seis patas diseñado para llevar un operador o pasajero y cierta cantidad de carga en terrenos imposibles hasta para los tanques convencionales; su peso es de tres toneladas y mide unos tres metros de longitud. Con esas dimensiones, y su previsible coste, no cabe duda de que su posible aplicación civil no es abordable.

Un trabajo algo más realista en esta línea es el desarrollado por Venkat N. Krovi en la Universidad de Pennsylvania, en Filadelfia (EEUU) [Krovi 95] [Wellman 95]. La base de su diseño es una silla de ruedas más o menos convencional, esto es: dos ruedas motrices independientes con control diferencial del movimiento; a esta base se le han añadido dos suplementos mecánicos, a modo de brazos o apéndices suplementarios, que permiten al vehículo así equipado sortear obstáculos más o menos pronunciados.

En la figura 2-1 se muestra un esquema simplificado del diseño realizado, así como una breve descripción del procedimiento empleado para superar obstáculos, subir bordillos de aceras o simi-

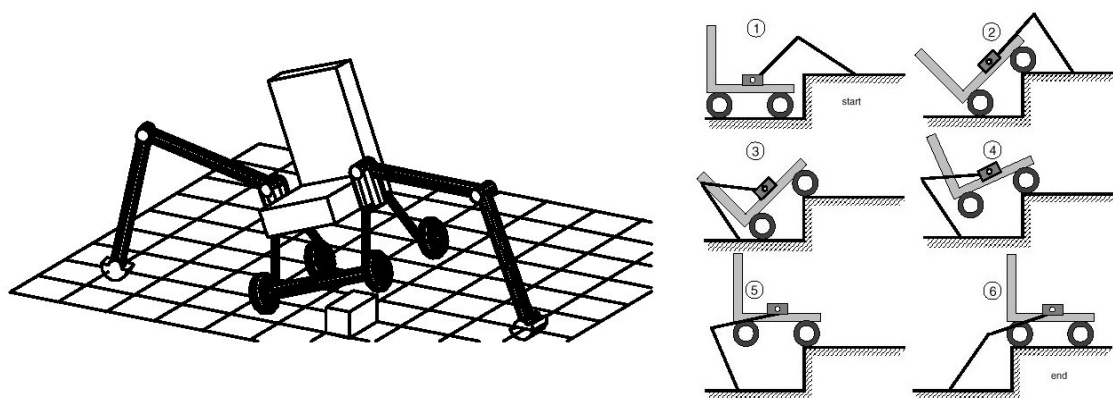


Figura 2-1: Esquema simplificado y prestaciones básicas de la Silla de ruedas con 'piernas-manipuladores', desarrollada en la Universidad de Pennsylvania.

lares. La figura 2-2 muestra una vista general del prototipo en acción, subiendo un bordillo de considerables dimensiones.

Es de destacar que los diseñadores también concibieron otras aplicaciones interesantes a tan notables manipuladores; entre otras, estas patas-manipuladores permitirían abrir puertas mediante la sencilla técnica de empujar mientras se avanza. No se contempló el incorporar un manipulador más complejo al extremo de la pata, al menos en una primera fase, con lo que la manipulación directa del picaporte no es posible; no obstante sus limitaciones prácticas, la idea base es en sí misma un notable avance en el propósito de mejorar la calidad de vida de los usuarios de sillas de ruedas.

2.1.2 Sillas escaladoras y equilibristas

Sin duda una de las prestaciones más demandadas por los usuarios de sillas de ruedas es la de poder afrontar los obstáculos típicos en su camino, inadvertidos para el resto de las personas: bordillos, escaleras, y acceso a puntos altos. Esto último es particularmente notable en muchos elementos de la vida diaria como cabinas telefónicas, cajeros automáticos y en general todos aquellos elementos del mobiliario, urbano o no, que se suponen 'a la vista' de los potenciales usuarios. ¿Podría un discapacitado en silla de ruedas acceder al mostrador, ventanilla o escaparate de muchos servicios? ¿Podría tomarse un café siquiera en la barra de un bar? La respuesta parece clara: no.

Si bien es verdad que, por ejemplo, existen teléfonos públicos situados a alturas y en posiciones a las que se puede acceder sentado, esta situación no es normal ni extensible al resto de los casos descritos en el párrafo anterior. A pesar de que las Normativas sobre Accesibilidad [Juncà 97] tratan de paliar en lo posible estos problemas en el caso de nuevas construcciones (rampas, bordillos reba-



Figura 2-2: El prototipo de la Universidad de Pennsylvania escalando un obstáculo.

jados, dimensiones de lugares de paso, posición de botoneras de ascensores y cajeros automáticos, etc.) parece claro que también puede actuarse sobre el propio *vehículo* del discapacitado motriz.

Pasando bordillos

Dejando aparte las soluciones atípicas que se comentaron en la sección 2.1.1, tanto la industria como los equipos de investigación en Asistencia a la Movilidad han tratado de solventar estos problemas de accesibilidad. Sin duda, el problema más sencillo de abordar es el de los bordillos de las aceras. En la figura 2-3 se puede ver un accesorio, comercialmente disponible en diversos suministradores, que permite 'escalar' un bordillo si éste se ataca de frente.

La forma de actuación de este accesorio es conceptualmente simple: al contactar con el bordillo, el accesorio funciona como un *pie* artificial el cual, al ejercer un esfuerzo de elevación de las ruedas delanteras de la silla y combinándose éste con una tracción de las ruedas motrices traseras, permite disponer la silla en posición de superar el obstáculo. No obstante, si el bordillo supera una determinada cota (más o menos, la mitad del radio de las ruedas motrices traseras) el obstáculo no puede subirse; en el caso concreto del representado en la figura 2-3, correspondiente al modelo *Power*, de Sunrise Medical GmbH, Heidelberg, RFA¹ el accesorio permite superar bordillos de hasta 10cm de alto, lo cual es inferior a la cota que se encuentra realmente en muchos casos.

Este inconveniente es superado por los manipuladores de la silla de la Universidad de Pennsylvania, pues tal y como se muestra en la figura 2-1, partiendo de la posición resultante a subir las

¹<http://sunrisemedical.de>

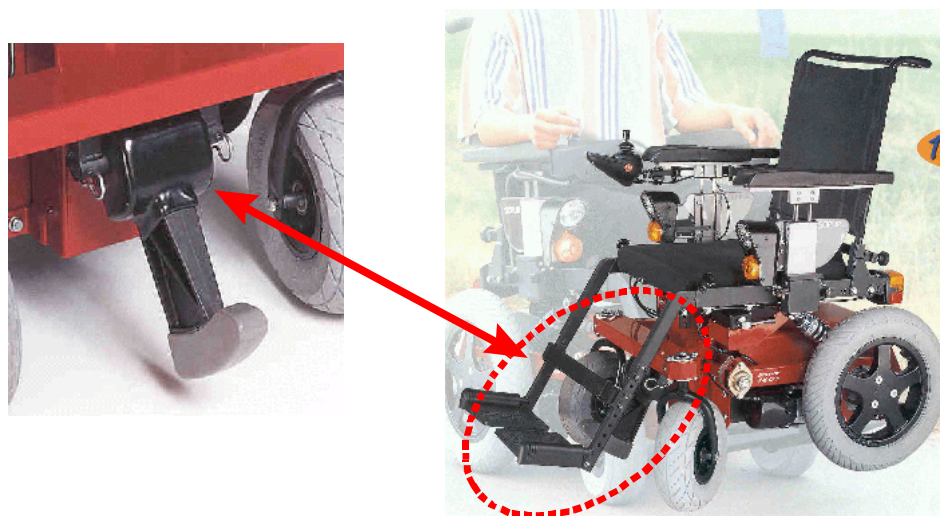


Figura 2-3: Accesorio para subir bordillos: detalle y vista general de su ubicación.

ruedas delanteras al bordillo los manipuladores se invierten, pasan a la posición trasera y levantan también el eje trasero de la silla.

Cabe destacar aquí que en las sillas de ruedas convencionales la mayor parte del peso se concentra sobre el eje de las ruedas motrices, no sólo por la posición del centro de gravedad del usuario sino también por el de baterías, motores y equipamiento de control en general. Precisamente una de las líneas de investigación en curso del grupo de Pennsylvania es la estabilización de la posición del usuario en los momentos de superar obstáculos de cierta altura y la de modificar además el centro de gravedad del vehículo para mejorar, entre otras cosas, el confort del usuario y la distribución de fuerzas durante el movimiento.

Subiendo escaleras

Para solventar el problema de las escaleras actualmente sólo existen dos alternativas: infraestructuras en el edificio (rampas, ascensores o elevadores especiales para sillas de ruedas) o muy complejas y costosas soluciones a bordo del vehículo. La forma más normal de abordar el problema es mediante bandas dentadas de rodadura, similares a los vehículos todo-terreno de cadenas (tanques, orugas, etc.); en la figura 2-4-a se ve una de estas plataformas autónomas, en este caso de la firma italiana TGR²; se trata de la silla *Explorer*, la cual incorpora dos sistemas alternativos de tracción: ruedas (internas) para terrenos lisos, y bandas dentadas (bien visibles) para subir y bajar escaleras.

²<http://www.tgr.it>

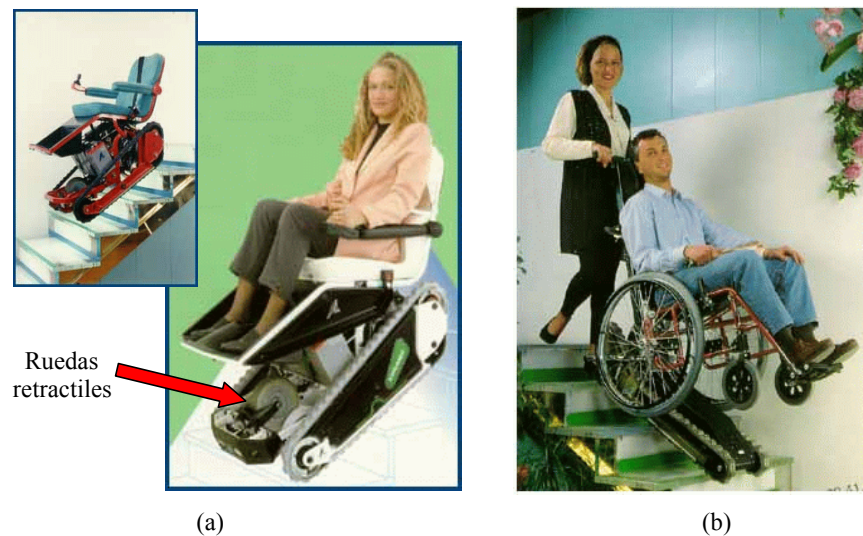


Figura 2-4: Subir y bajar escaleras: (a) Banda rodante integrada en la silla *Explorer*, de la firma italiana TGR; (b) Accesorio independiente, también basado en banda dentada, para sillas de ruedas manuales.

En el caso que nos ocupa en esta sección, la subida/bajada de escaleras, las ruedas se retraen y el asiento del usuario se nivela tanto para compensar el centro de gravedad como para un mayor confort y control del usuario. Esto evidentemente complica y encarece aún más la mecánica de la plataforma móvil. Las entalladuras de la banda dentada soportan adecuadamente el peso de usuario y plataforma encajando en los bordes de los escalones, o al menos eso se garantiza nominalmente.

El sistema de banda dentada de rodadura también puede usarse como 'suplemento autónomo', (figura 2-4-b) permitiéndose el transporte de cualquier silla de ruedas convencional (p.e., manual) eliminando la necesidad de instalaciones permanentes en el edificio o en las sillas.

Sube, baja, es todo terreno y además se pone de pie

Sin duda alguna la sensación de la feria REHA'99³ fué la exhibición de la silla *Independence 3000* (actualmente *iBOT*), presentada por la compañía *Indetech* (Independence Technology L.L.C.⁴).

La figura 2-5 muestra un par de vistas de este vehículo. En 2-5-a se muestra ésta en posición normal, lo que permite apreciar la plataforma motriz de cuatro ruedas tractoras; la peculiaridad del sistema motor es que las cuatro ruedas están emparejadas lateralmente formando un bastidor

³Esta feria se celebró en Düsseldorf, RFA, entre el 3 y el 6 de Noviembre de 1999, en conjunción con el Congreso AAATE'99 (*Association for the Advancement of Assistive Technology in Europe*), acontecimientos ambos a los que el autor de esta Tesis tuvo ocasión de asistir y participar.

⁴<http://www.indetech.com>

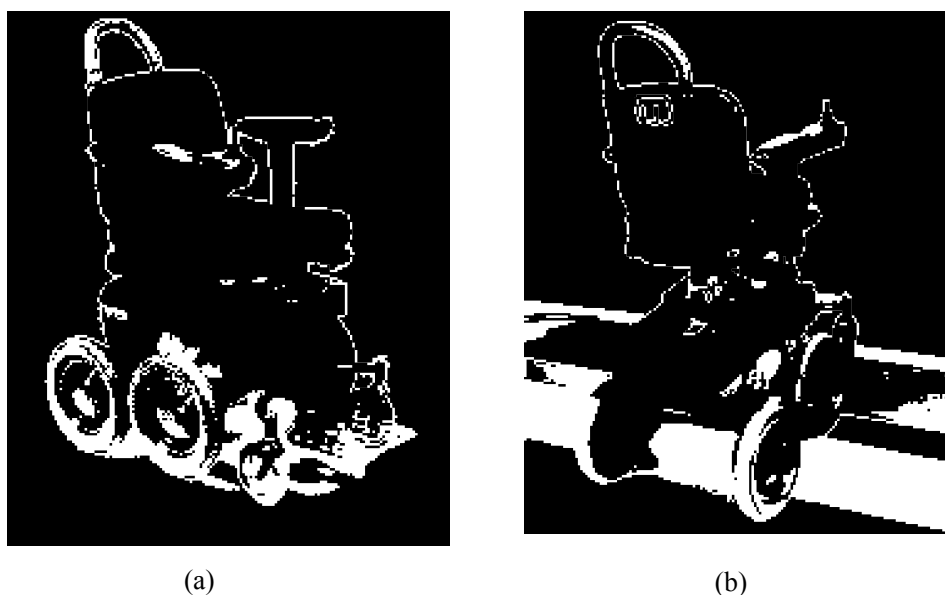
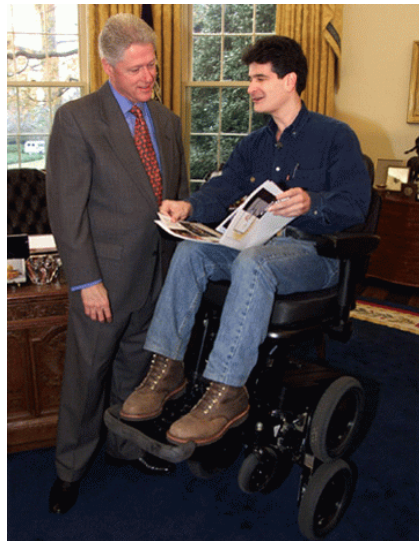


Figura 2-5: El prototipo *Independence 3000*: (a) vista general de la plataforma; (b) prestaciones como vehículo todo-terreno (*4-wheel-drive*).

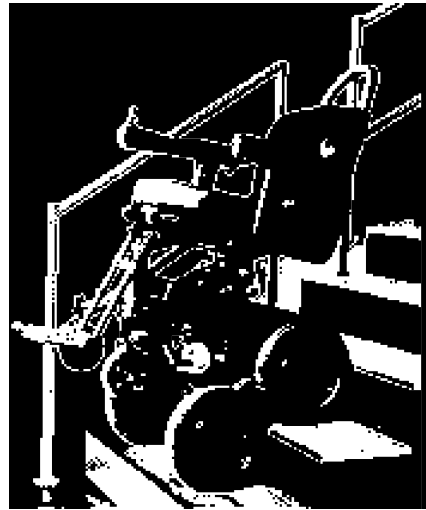
rotatorio **activo** (posee su propio conjunto de motores) alrededor de un punto intermedio a cada par de ruedas; es esta disposición peculiar de motores y bastidores la que le permite sus especiales habilidades.

En la propia figura 2-5-b puede verse a la *Independence* subiendo un bordillo de considerables dimensiones: a simple vista se aprecia que la altura del mismo es mayor que el radio de las ruedas motrices, situación insalvable para vehículos estándar. Esta prestación es posible precisamente por la característica de ser motrices las cuatro ruedas (*4-wheel drive* llama a este modo el fabricante) y además ser activo el bastidor de soporte de las ruedas.

Pero las habilidades más sorprendentes de la silla *Independence* son, sin duda, las de acceso a escaleras y la de adoptar una posición erguida. Es aquí en donde el avance tecnológico se hace notorio en el campo de los vehículos de asistencia a la movilidad; aunque no existe documentación científica de ningún tipo sobre los desarrollos o precedentes de esta silla, dado el secretismo del equipo investigador por razones de posibles espionajes industriales, sí se han hecho públicos algunos detalles de funcionamiento (véase su página *web*). Desde el punto de vista de control y seguridad, posee una estructura de dos procesadores de alta velocidad (no se especifica cuáles) trabajando en paralelo; a esto se añade algún tipo de sensor giroscópico que proporciona información sobre la actitud (orientación respecto al suelo) del vehículo. Unas baterías de *última generación* y un *software* especializado completan el conjunto electrónica-sensores-*software* de una auténtica plataforma



(a)



(b)

Figura 2-6: Silla *Independence 3000*, *iBOT*: (a) La silla en equilibrio pendular dinámico; su inventor, Dean Kamen, recibe la Medalla Nacional de Tecnología del año 2000 de manos del Presidente Clinton; (b) El *iBOT* subiendo o bajando escaleras.

robótica.

Así, el pasar de la posición *normal* (figura 2-5-a) a la posición *de pie* (figura 2-6-a) se realiza bloqueando la posición respecto al suelo de la rueda que en ese momento es trasera⁵ y pivotando *toda la silla*, manteniendo al usuario nivelado, hasta que el bastidor motriz queda en posición vertical. La verticalidad, a partir de entonces, se mantiene en una estrategia de *péndulo invertido*, siendo apreciables unas ligeras oscilaciones adelante-atrás en un permanente pero ligero vaivén. Es de destacar que la velocidad de reacción de los controladores es tal que es posible arrojar un objeto de varios kilos de peso para que sea cogido al vuelo por el usuario, situado a la altura de una persona normal, y la silla *Independence* no pierde en absoluto la verticalidad, de hecho ni siquiera parece inmutarse.

Precisamente la posibilidad de llevar al usuario a la altura de una persona normal, además de ocupar un reducido espacio en horizontal, permite al discapacitado ponerse a la altura de sus semejantes normales y, lo que es más importante, acceder a todos aquellos servicios que por su altura parecen únicamente reservados a ellos.

Una vez solucionado el tema de *ponerse de pie*, el subir escaleras es un asunto casi trivial. Como

⁵Recuérdese que las ruedas motrices también rotan alrededor del eje intermedio que las une; así la posición trasera o delantera es puramente relativa, según el instante considerado.

puede verse en la figura 2-6-b, cada rueda motriz ocupa un escalón distinto. En contraste al modo *todo-terreno* (figura 2-5-b) los escalones no son superados por la tracción de las cuatro ruedas. En lugar de ello, la silla bascula de nuevo alrededor del eje que une las ruedas motrices entre sí, casi como se subiría con los pies: la rueda que ocupa el escalón superior (si es que se está subiendo) es bloqueada y toda la silla pivota sobre ella llevando la rueda que ocupaba el escalón inferior hasta el siguiente de más arriba; el proceso se repite sucesivamente hasta terminar con todos los escalones. Análogamente, se invertiría el proceso si se quisiera bajar. Una curiosidad intrigante es que el proceso de subir o bajar escaleras **exige** que el usuario **tire de la silla** mediante una acción de sus manos (leve pero firme) sobre la barandilla.

Aunque su presentación pública fue en Junio de 1999 en EEUU, aún no está disponible para su adquisición; actualmente está en proceso de evaluación por la agencia federal de sanidad de los EEUU (FDA). La compañía estima que podrá salir a la venta a lo largo de 2001. Sólo entonces podrá evaluarse el avance real de esta novedosa arquitectura motriz y conocerse detalles sobre consumo, fiabilidad, comodidad de uso, etc.

Patrocinado por una empresa privada

Lo más chocante del proyecto *Independence* es la forma en la que se ha realizado. Cinco años antes de sacar el producto final (esto sería por 1994) el inventor del sistema, Dean Kamen, fundador de su propia empresa, DEKA R&D Corporation, consiguió fondos de la empresa farmacéutica y de cosméticos *Johnson & Johnson*⁶ con la que creó la empresa mixta *Independence T.L.L.C.* Durante estos cinco años, y es de prever con qué volumen de fondos y medios, se trabajó en el proyecto con el más absoluto de los secretos, quizás para impedir que otros equipos de trabajo u otras industrias copiaran la idea base, pues el *péndulo invertido* es de sobra conocido en la teoría de control de sistemas dinámicos.

A la pregunta de por qué no se había publicado nada sobre el tema en ninguna revista de ámbito científico, la lacónica respuesta fué: *esta es la diferencia entre la forma de hacer las cosas una empresa y un centro de investigación*. Cada cual que extraiga sus conclusiones.

Otro jarro de agua fría es el coste final del vehículo: éste se estima que será de \$20.000 a \$25.000 esto es entre tres y cinco veces el coste de una plataforma normal como las vendidas en España (que ronda el millón de pesetas) y más del doble de las sillas motorizadas actuales más avanzadas.

⁶<http://www.jnj.com>

2.1.3 Sillas de geometría variable

No cabe duda que la experiencia acumulada en la aplicación de la Tecnología a la Asistencia a la Movilidad lleva a mejoras constantes en la estructura mecánica de la silla, a ésto contribuye también el aumento del nivel adquisitivo en los países más avanzados. Así es posible encontrar vehículos adaptados y adaptables a multitud de entornos, y no sólo a interiores: exteriores, deportes, campo a través (por ejemplo, para caza), etc.

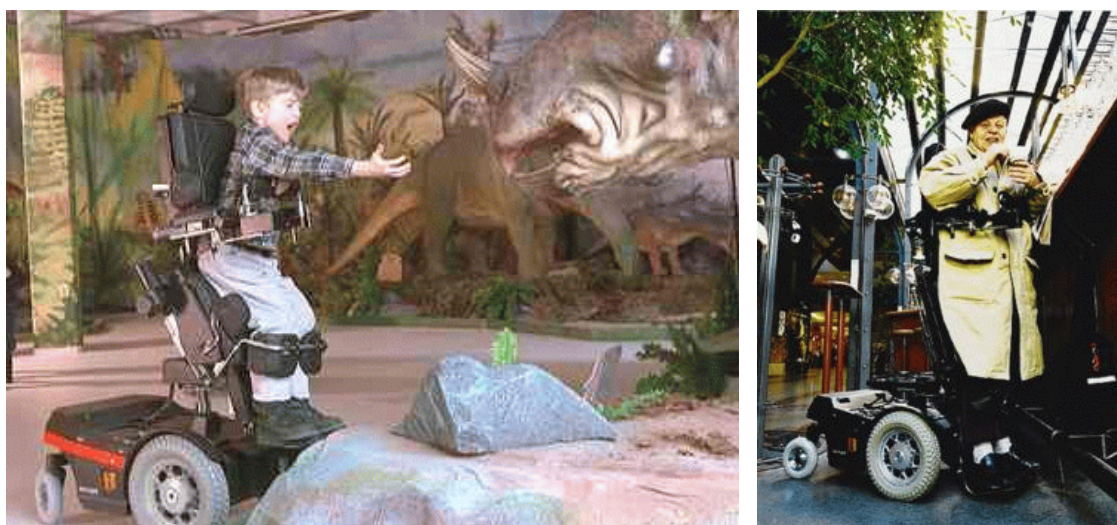


Figura 2-7: Dos sillas de geometría variable en acciones de la vida diaria: un niño jugando, y un adulto tomando un café en la barra de un bar.

Entre los casos más interesantes se encuentran las sillas de geometría variable: el asiento o soporte del usuario admite ser modificado, generalmente con actuadores eléctricos, a voluntad del usuario. La firma sueca Permobil⁷, posee un extenso repertorio de estos vehículos. Esta compañía, que sólo comercializa productos de alta gama con grandes prestaciones y coste en consonancia (sobre los 2.000.000 de pesetas, alrededor del doble de las sillas que se venden normalmente en España) dedica además especial atención a los niños, incorporando en catálogo muchos modelos de diferentes tamaños (*tallas*) y modos de comando, según sea la edad del niño. En la figura 2-7 puede verse un tipo de silla de geometría variable que permite al usuario, según su tamaño y edad, mantener actividades *casi* normales: así, el niño juega con un modelo de un dinosaurio en una exhibición, y el adulto puede realizar actividades tan relajantes como tomarse un café *en la barra* de un local de ocio.

⁷<http://www.permobil.se>

La figura 2-7 permite observar también el tamaño y estructura de la plataforma móvil; éste es bastante mayor que el de las sillas de ruedas motorizadas de inferiores prestaciones. El mayor gasto energético fuerza a incorporar baterías más grandes, pesadas y caras para mantener la autonomía de la silla, punto flaco de estos sistemas; además, la mayor complejidad mecánica se traduce en actuadores mayores y en elementos mecánicos adicionales de soporte. Una observación interesante es la del cambio de las ruedas motrices del eje trasero al delantero: el distinto reparto de cargas y la mejor maniobrabilidad de la plataforma aconsejan esta solución.

2.2 Ayuda a la Movilidad aumentando la Autonomía

En secciones anteriores se han descrito algunas aplicaciones de la Tecnología, tanto electrónica como mecánica, en el campo de la Ayuda a la Movilidad y que centraban su actuación en la **estructura de la plataforma móvil** más conveniente para resolver, o al menos afrontar, muchos de los problemas prácticos de accesibilidad encontrados por el colectivo de personas en silla de ruedas. Es ésta, además, una de las líneas de actuación preferente de las industrias del sector, empeñadas en mejorar constantemente sus modelos y de responder así a los deseos de la comunidad de usuarios.

En otra línea, distinta pero indudablemente complementaria, se encuentran un importante número de grupos de investigadores, entre los que se encontraría el propio del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá; esta línea particular se centra en conseguir un vehículo de asistencia más o menos autónomo. Una característica común de estos grupos es la de usar plataformas móviles estándar sobre las que se incorporan diversos sistemas Sensoriales y de Control con los que poder proporcionar el grado de autonomía necesario, según el caso.

Como podrá comprobarse según avance el contenido de la presente sección, las líneas de actuación de estos grupos de trabajo pueden encuadrarse en alguna en las siguientes grandes áreas:

1. **Sistema Sensorial:** estudio, desarrollo y aprovechamiento del conjunto de sensores que permitan incorporar, con el grado suficiente de **seguridad**, prestaciones de navegación autónoma y detección de obstáculos.
2. **Interfaz Hombre-Máquina (Human-Machine Interface, HMI):** con idea de proporcionar el mayor grado de control del Usuario sobre los movimientos de la plataforma con el mínimo esfuerzo posible, y estando de acuerdo con sus posibilidades motrices; esto se logra mediante órdenes de alto nivel, independizando la conducción del entorno, y/o mediante dispositivos de entrada/salida reconfigurables y adaptables.
3. **Arquitectura de Control:** orientada a la aplicación, buscando la mejor distribución y conjunto de elementos y subsistemas electrónicos de entre las opciones existentes.

A continuación se describirán algunos de los proyectos más interesantes, desarrollados en Centros de Europa y Estados Unidos, y centrados específicamente en la Ayuda a la Movilidad. Esta descripción permitirá comprobar las premisas anteriores y vislumbrar un entorno común de actuaciones. No obstante, el número de grupos de investigación dedicado a actividades específicas en este área es bastante elevado; por ello, en posteriores secciones y en función del contexto específico del que se trate, la lista de proyectos será ampliada .

2.2.1 El CALL Centre y la *Smart Wheelchair*

Uno de los primeros y más interesantes proyectos de Asistencia a la Movilidad se inició en el **CALL Centre** (*Communication Aids for Language and Learning*) de la Universidad de Edimburgo, Reino Unido⁸. Actualmente este Centro, depende de un Departamento de nueva creación en esa Universidad, situado en la Facultad de Educación, y llamado *Equity Studies & Special Education*, **ESSE**⁹.

El proyecto se originó como un medio de ayudar al desarrollo físico, cognitivo y social de niños con graves disfunciones neurológicas y/o motrices, línea de investigación principal del mencionado Centro. Observaron que la falta de movilidad en estos niños reduce sus posibilidades de jugar y explorar, con lo que están expuestos a menos estímulos y menos experiencias que, en definitiva, les ayudan a conocer y controlar su entorno. La falta de estímulos se traduce en frustración, la frustración en falta de interés y la falta de interés se convierte en ausencia de búsqueda de estímulos, con lo que se entra en un círculo vicioso de consecuencias graves en el desarrollo del niño discapacitado [Butler 86].

En consecuencia, diversos Centros educativos o de investigación (análogamente al CALL Centre) estudian cómo el uso de dispositivos de asistencia a la movilidad o similares pueden ayudar en este proceso de rehabilitación emocional en los niños [Aigner 99] [Bottos 99] [Salminen 99] [Ceres 00] [Nunes 00]. El CALL Centre, en lugar de usar sólo sillas motorizadas convencionales, decidió desarrollar una especialmente para aquellos casos graves en los que a los niños no les es posible manejar los dispositivos convencionales de control, esto es, un *Joystick*. Es así como surgió la idea de crear la *Smart Wheelchair* (la silla de ruedas lista).

Por ejemplo, en la figura 2-8-a, se puede ver una Smart Wheelchair siendo usada por un niño con parálisis cerebral; en lugar de *Joystick*, el niño dirige la silla mediante una caja de botones (*switch-box*); son visibles, rodeando la plataforma de sus pies, unos *bumpers* de seguridad para detectar colisiones del vehículo y poder reaccionar en consecuencia.

En una primera fase, entre 1987 y 1989, el CALL Centre construyó una serie de prototipos

⁸<http://callcentre.education.ed.ac.uk/>

⁹<http://www.education.ed.ac.uk/esse/>



(a)



(b)



(c)

Figura 2-8: CALL Centre, la *Smart Wheelchair*: (a) La silla Smart usada por un niño con parálisis cerebral. (b) Demostración pública, conducción mediante pulsadores. (c) Una instalación permanente de línea reflectante para sillas de ruedas autónomas en Goteborg, Suecia.

orientados a analizar cómo una mayor movilidad afecta a las actitudes sociales y a la relación con el entorno de niños con muy severos trastornos físicos y/o psíquicos (ver figura 2-8-b). Éste sigue siendo en la actualidad su campo de actuación, comercializando su sistema a un precio base de 7.000£ (unos 2.000.000 pesetas). No obstante, entre 1994 y 1996 el CALL Centre colaboró en un proyecto de gran envergadura, como fue el proyecto OMNI (detallado en la sección 2.2.2), y que se orientaba a la integración en el entorno laboral de discapacitados motrices.

Componentes de la *Smart Wheelchair*

La *Smart Wheelchair* [Nisbet 88] [Craig 93] se concibió como un conjunto de módulos elementales (componentes base o *Tools*) incorporados sobre una silla de ruedas motorizada convencional, con el mínimo de cambios sobre ella. Estos componentes pueden clasificarse dentro de alguno de los siguientes grupos:

1. **Protección del Usuario.** En este grupo se encuentran los detectores de colisión (*bumpers*) y los módulos de predetección de obstáculos, basados en ultrasonidos (US). Es de destacar que en la configuración comercial sólo se ofertan los *bumpers*.
2. **Interfaz de Usuario.** Son módulos específicamente diseñados para adaptarse a severas discapacidades, por lo que obvian el *Joystick* de la silla convencional conectándose *en paralelo* a él, esto es consecuente con la idea base de alterar lo mínimo la plataforma usada. Los dispositivos

especiales de entrada de comandos son de accionamiento simple, tipo pulsadores, *scanners*¹⁰, etc.; además, en su caso, pueden realimentarse al usuario los comandos aceptados mediante síntesis de voz o *displays* llamativos.

3. **Navegación autónoma.** Sólo incorpora la prestación de seguimiento de líneas reflectantes pintadas o instaladas en el suelo (figura 2-8-c). Estas marcas facilitan el paso por lugares estrechos, como por ejemplo suelen serlo las puertas de acceso a un recinto normal. También se menciona la posibilidad (no incorporada) de *marcar* con estas líneas zonas peligrosas o que deban ser evitadas por la silla. Recuérdese que la Smart Wheelchair se concibe para ser usada por niños entre 5 y 14 años, aproximadamente.
4. **Comportamientos de Control.** Se trata de prestaciones *software*, incorporadas en el controlador principal (actualmente un controlador específico) en función de los módulos instalados y se basa en un repertorio de *comportamientos* simples pre-programados. Así, por ejemplo, los comportamientos pre-seleccionables asociados al sistema de *bumpers* son, ante una colisión¹¹: **parar, parar e ir hacia atrás**, y por último **parar, ir hacia atrás y volver hacia adelante en otra dirección**. Incorpora diversos tipos de actuación (temporizada, permanente, *on-off*) en función de la *habilidad* del usuario.
5. **Interfaces electrónicas.** El controlador Smart se conecta a una silla convencional mediante una interfaz hacia *Joystick* tipo **DX**¹². Los diversos módulos del sistema se integran en el controlador mediante un bus *I²C*. Además, el controlador admite comandos desde un procesador jerárquicamente superior (por ejemplo, un PC) vía serie, RS-232.

2.2.2 Proyecto OMNI

Las siglas OMNI son el acrónimo de *Office Wheelchair with High Manoeuvrability and Navigational Intelligence for People with Severe Handicap*. Se trata de un proyecto europeo encuadrado dentro de las iniciativas TIDE (Technological Initiative for Disabled and Elderly People) de la Unión Europea, identificado con el número 1097 y que se desarrolló en el periodo comprendido desde el 1 de Diciembre de 1993 hasta el 10 de Agosto de 1996. Actualmente pueden consultarse algunos datos del proyecto OMNI a partir de su página *web* en Internet¹³, o en [Borgolte 95] y en el Informe Final [Hoyer 96].

Los objetivos principales de este proyecto fueron:

¹⁰En este tipo de sistemas, un *scanner* consta de un indicador cíclico (p.e. una matriz de LED's) y un actuador simple (p.e. un pulsador): cuando el indicador está sobre la opción deseada, el usuario la activa mediante el actuador.

¹¹Sólo se detectan colisiones frontales.

¹²<http://www.DynamicMobility.co.nz/dx/>

¹³<http://prt.fernuni-hagen.de/pro/omni/omni-eng.html>

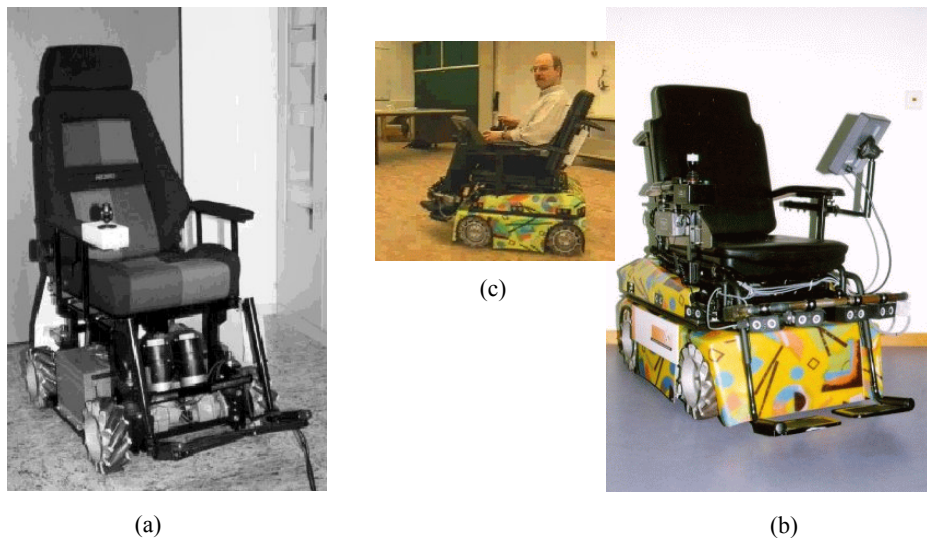


Figura 2-9: Se observan claramente la planta motriz y las ruedas omnidireccionales. (b)-Vehículo de demostración. Son visibles los sensores US-IR y la pantalla LCD. (c)-Demostración del prototipo final. En la secuencia original (*.avi) puede comprobarse el movimiento omnidireccional de la plataforma.

- El desarrollo de un vehículo tipo *silla de ruedas* capaz de moverse en cualquier dirección, *incluso lateralmente*, combinando simultáneamente movimientos lineales con rotaciones sobre cualquier punto dado (ver figura 2-9). El interés de esta inusual prestación es el de permitir el desplazamiento sin órdenes complejas de alto nivel.
- La incorporación de elementos adicionales que proporcionaran *Capacidades Aumentadas*, como por ejemplo prestaciones de Navegación Autónoma, evitación de obstáculos, etc. Esto implicaba, aparte de la existencia de un procesador de datos a bordo, la necesidad de una estructura sensorial y un adecuado interfaz hombre-máquina (**HMI**).

El proyecto estaba específicamente dirigido a la integración de los discapacitados en entornos laborales como oficinas o similares, de ahí la alta maniobrabilidad exigida para poder desplazarse en entornos estructurados pero no específicamente adaptados a las sillas de ruedas convencionales. En el *Consorcio OMNI* participaron siete entidades de diversa naturaleza:

- Dos Institutos Universitarios: el **PRT**, Departamento de Ingeniería Eléctrica, de la *FernUniversität* de Hagen, en la RFA, dedicado a tareas de coordinación, construcción de la silla e integración de sistemas; y la **SSSA**, *Scuola Superiore S. Anna*, de Pisa, Italia, encargada del diseño de los sensores combinados de Ultrasonidos e Infrarrojos (US-IR).

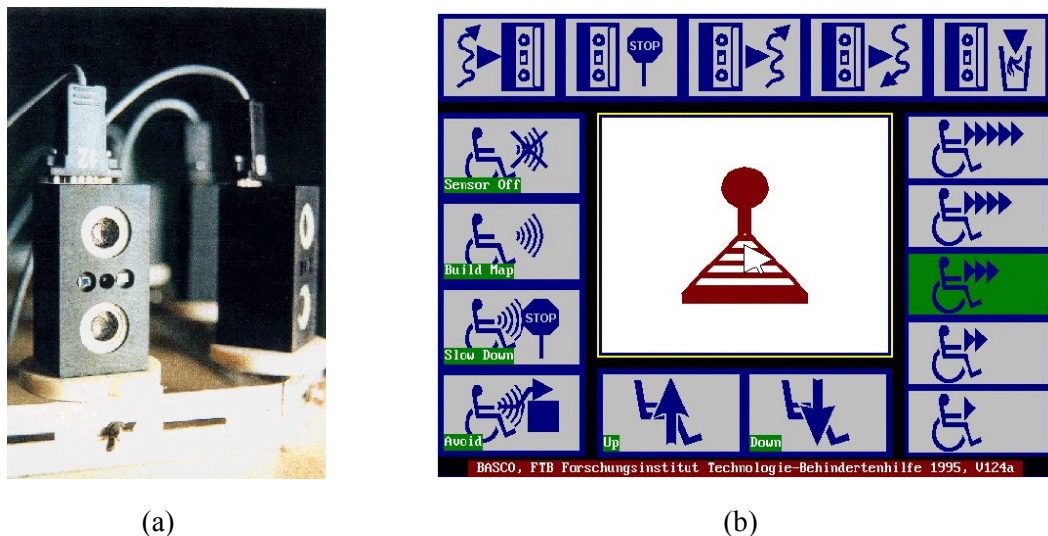


Figura 2-10: Proyecto OMNI: (a) Módulo sensorial combinado US-IR. (b) Vista de la pantalla LCD de control.

- Dos Institutos de Investigación: el **CALL Centre**, de la Universidad de Edimburgo, Reino Unido, especialista en ciencias de la rehabilitación y que se encargó del estudio, definición y evaluación del HMI; y el **FTB**, *Forschungsinstitut Technologie-Behindertenhilfe*, del *Evangelische Stiftung Volmarstein*, en la RFA, con 90 años de experiencia en las tecnologías de rehabilitación, encargado de realizar pruebas con usuarios y también de evaluar el HMI.
- Dos empresas de ingeniería (relacionadas con los Institutos Universitarios): **AIP**, *Institut für Automation, Information und Produktionsmanagement*, dependiente del PRT y encargado de la Administración y Gerencia del proyecto; y **SM**, *Scienza Machinale*, dependiente de la SSSA y dedicada a desarrollos en sistemas robóticos avanzados, y que se encargó de la producción de los sensores combinados US-IR.
- Un fabricante de sillas de ruedas: **OK**, *Ortopedia*, en Kiel, RFA; uno de los tres mayores fabricantes europeos de sillas de ruedas. Su función en el Consorcio OMNI consistía en la construcción de la silla de ruedas y en tareas de *Marketing*.

La ejecución de este proyecto, su definición y la coordinación de las distintas fases y entre los miembros del Consorcio es digna de ser destacada, si bien es necesario resaltar también el volumen e importancia de los medios y recursos disponibles. Las diversas fases en las que se dividió y ejecutó el proyecto fueron las siguientes:

1. Pruebas de las sillas de ruedas motorizadas existentes, lo que dio lugar a un conjunto de

sugerencias de modificaciones y líneas de actuación a tomar.

2. Construcción de un primer prototipo (ver figura 2-9-a), en el que ya se empleaban ruedas motrices omnidireccionales.
3. Desarrollo y construcción de las unidades sensoriales modulares combinadas US-IR (figura 2-10-a). Los diversos módulos sensoriales eran controlados por μ Controladores de la familia 68HC11, interconectados dentro del sistema mediante un Bus Serie.
4. Definición y desarrollo de la Estructura de Control. Ésta abarcaba una arquitectura *software* jerarquizada con un núcleo operativo en Tiempo Real.
5. Interfaz Hombre-Máquina, **HMI**, mejorada. Las ideas guía de esta fase fueron la creación de una interfaz rápidamente adaptable a cualquier usuario y de cómoda interconexión a otros módulos. Como notas destacadas cabe mencionar el desarrollo de un *joystick 3D* y de una completa interfaz gráfica de comando y control (figura 2-10-b).
6. Control del Entorno. Aunque en el prototipo final (figura 2-9-b y c) no se incluyeron estas prestaciones, sí se hizo un estudio previo del acceso, desde la propia silla de ruedas, a sistemas informáticos (ordenadores personales y similares) y a sistemas domésticos (electrodomésticos, etc.). Se especificó una interfaz IRDA con dichos entornos.
7. Gestión e integración de sistemas.
8. Evaluación del prototipo por posibles usuarios, incluso en entornos laborales reales.
9. Estrategias de *Marketing*.

A pesar del prometedor arranque y ejecución del proyecto OMNI, los resultados no parecen haber estado a la altura de las expectativas planteadas. Aunque se incorporaba en el Consorcio a uno de los mayores y más poderosos fabricantes de sillas de ruedas en Europa, no existe aún ninguna versión comercialmente viable de los sistemas desarrollados. Es más, el novedoso sistema de *Joystick 3D*, que en teoría permitía realizar acciones complejas con comandos 'sencillos', ha sido eliminado finalmente (oficialmente 'congelado') pues resulta 'demasiado difícil' de guiar para aquellos usuarios a los que precisamente iba más orientado el diseño: personas con elevado grado de discapacidad [Bühler 97]. En su lugar se ha debido adoptar un convencional *Joystick 2D*, acompañado de unos *switches* auxiliares; recuérdese que se trata de un móvil *omnidireccional*, con lo que la conducción no es tan evidente como con los vehículos estándar.

El problema de su conducción práctica se pretende paliar con un completo programa simulador, 2D, en el que el potencial usuario tiene ocasión de entrenarse en el peculiar manejo del vehículo,

antes de abordar esta misma tarea a bordo del mismo. Los estudios futuros del equipo OMNI han de insistir en esta línea, tratando de mejorar los algoritmos de control y guiado por el usuario.

Aprovechando las conclusiones del proyecto OMNI, puede extraerse una *premisa* importante para cualquier proyecto de investigación en *Sistemas de Ayuda a la Movilidad*: el Usuario (con mayúscula) es y debe ser el principal beneficiario y todo desarrollo debe centrarse en cuestiones como:

- **Seguridad:** activa, con un sistema de sensores fiables y redundantes; y pasiva, con el adecuado diseño mecánico de la plataforma móvil.
- **Confort:** dejando aparte el propio de la silla en sí, ha de pensarse en la facilidad de uso de los medios y métodos de comando e información de estado del vehículo, facilidad de acceso al vehículo en sí y de éste a su entorno.
- **Dominio:** el Usuario ha de sentirse *Dueño* del vehículo, y suficientemente seguro a bordo de él. Esto implica que sea fácil e intuitivo de manejar, y que el Usuario *sienta* que el vehículo le obedece.

Si las premisas anteriores no se cumplen, aunque se haya diseñado un potente y capaz *Sistema Robótico Autónomo*, puede ser que éste sea absolutamente inútil para su aplicación final como elemento de asistencia al colectivo de discapacitados motrices.

2.2.3 KIPR y las sillas *Tin-Man*.

El *KISS Institute for Practical Robotics* (**KIPR**¹⁴) radicado en Norman, Oklahoma, EEUU, es una organización sin ánimo de lucro cuyo propósito final es el de mejorar las capacidades y habilidades de aprendizaje de gentes de cualquier edad mediante la aplicación de la tecnología, particularmente con la *robótica*. Sus actividades comenzaron en 1993 y parte de ellas se dedican a colaborar con otros centros e investigadores en proyectos conjuntos. Entre sus líneas de proyectos se encuentran los de Asistencia a la Movilidad, en concreto las sillas apodadas *Tin-Man*.

El objetivo de los proyectos *Tin-Man* (nombre tomado de un episodio de la serie '*Star Trek*') es el desarrollo de sillas de ruedas *robotizadas* de bajo coste, con el propósito de ayudar a la gente con movilidad reducida. David Miller y Marc Slack señalan [Miller 95] que la línea base a seguir en el diseño de sillas de ruedas robotizadas, en contraste a la robótica móvil tradicional, estriba en un adecuado diseño de la interfaz hombre-máquina (HMI) y en razones de coste reducido.

¹⁴<http://www.kipr.org/>



Figura 2-11: Los prototipos *Tin-Man* del KIPR: (a) *Tin-Man I*; (b) *Tin-Man II*.

Hasta la fecha se han desarrollado dos prototipos: Tin-Man I y Tin-Man II (figura 2-11). El propósito de estos proyectos es el de reducir la carga sobre el usuario en la mayor parte de las tareas de esquivar obstáculos e incorporar algunas prestaciones de navegación. La electrónica de control se concibe 'en paralelo' a la existente a bordo de una silla de ruedas convencional, conectándose al *joystick* estándar de la misma. El controlador es específico, en el caso de la Tin-Man II se trata de una tarjeta comercial (Vesta Technologies) basada en un microprocesador 68332. Una red de sensores interconectados a esta tarjeta base proporciona la información sensorial necesaria; se incorporan a bordo 12 sensores IR, 7 de US, sendos *switches* de presión, para detectar colisiones frontales, y dos *encoders* en las ruedas motrices.

La idea de los diseñadores es que el sistema pueda incorporarse a cualquier silla de ruedas motorizada, con los mínimos cambios posibles. Con este bagaje, la *Tin-Man* o, más exactamente, la electrónica del KIPR permite por unos pocos cientos de dólares (al menos eso proclaman) realizar tareas más o menos complejas, como cruzar puertas y seguir pasillos, con el mínimo de intervención del usuario. En la figura 2-12 se muestran una serie de fotogramas de una secuencia de unos 20 segundos de duración durante los cuales, sin intervención alguna del usuario (salvo el comando inicial) la silla completa la ruta desde la cocina hasta el estudio de una vivienda, cruzando dos puertas y siguiendo automáticamente el corredor del *hall*. La grabación tiene fecha de Junio de 1996.

La *Tin-Man* se ha demostrado muy efectiva en interiores. Incorpora tres modos básicos de funcionamiento:

1. Guiado manual, con estructura sensorial desconectada.



Figura 2-12: La *Tin-Man* en acción. Secuencia de imágenes mostrando una navegación sin intervención del usuario.

2. Guiado manual, con esquite automático de obstáculos.
3. Guiado por botones (hacia adelante y giro), con esquite de obstáculos.

Actualmente tratan de incorporar conocimiento del entorno, a modo de mapas, para tareas de navegación como la mostrada en la figura 2-12.

El KIPR proporciona la base robótica desarrollada (electrónica y silla) a otros grupos de investigación de EEUU, liberando en cierto modo a éstos de las tareas de bajo nivel: construcción de prototipos, estructura sensorial, etc.

2.2.4 *Wheesly*, del Mobot Group del M.I.T.

El renombrado Artificial Intelligence Laboratory del Massachusetts Institute of Technology (**MIT-AI**¹⁵), dirigido por el Dr. Rodney Brooks, también tiene su proyecto dedicado a la aplicación

¹⁵<http://www.ai.mit.edu/>

de las técnicas avanzadas en robótica para la Asistencia a la Movilidad. Entre los 31 grupos de investigación actualmente dependientes del MIT-AI uno de ellos, el Mobile Robotics Group (Mobot G.) tiene entre sus trabajos en desarrollo una silla de ruedas autónoma: la llamada *Wheelesley*.

El nombre del proyecto es una especie de juego de palabras que alude al inicio del mismo, en Enero de 1995 en el *Wellesley College* de la localidad homónima de Massachusetts, EEUU. Su investigadora principal, Mrs. Holly Yanco, cambió al MIT en donde se continuó el proyecto.



Figura 2-13: La silla *Wheelesley*: (a) Vista general. (b) Guiado por Electro-Oculografía (EOG). (c) Un detalle de los sensores EOG.

El objetivo del proyecto es la creación de un completo sistema robótico, a bordo de una silla de ruedas, que pueda ser manejado por personas incapaces de maniobrar sillas de ruedas motorizadas estándar. La silla en sí fue montada por el KISS Institute for Practical Robotics, al igual que la Tin-Man II (ver 2.2.3), de la que difería en pequeños detalles: cuatro sensores de US, en lugar de siete, y sensores Hall para detectar las colisiones. Un sistema de visión para navegación en exteriores se encuentra actualmente en desarrollo, aunque no se han documentado aún resultados en este sentido. La HMI se basa en un ordenador portátil, tipo MacIntosh (figura 2-13-a).

El hecho de usar un Ordenador portátil como unidad de control permite la adaptación rápida y la consiguiente evaluación de distintos HMI. Uno de los más notables es el guiado por Electro-Oculografía o EOG [Gips 96], investigación realizada en colaboración con Mr. James Gips, del Computer Science Department del Boston College.

Las figuras 2-13-b/c permiten ver este sistema, patentado como *Eagle-Eyes*, en acción. Se utili-

zan cinco electrodos situados alrededor de los ojos (tres del izquierdo y dos del derecho, en posiciones asimétricas), los potenciales extraídos de las variaciones de posición de cabeza y ojos son transformados en comandos que, en su versión original, desplazan un puntero en la pantalla del ordenador. En una primera aplicación, el *Eagle-Eyes* permite a aquellos usuarios sin movilidad de las extremidades superiores manejar un ordenador a partir de los comandos extraídos del puntero activado con su mirada, análogamente a lo que hace un ratón convencional.

Sin embargo, obsérvese que en la figura 2-13 el usuario *no aparta* los ojos de la pantalla mientras conduce. Esta circunstancia plantea preguntas, sin contestación conocida, sobre la efectividad real de este sistema de conducción de sillas de ruedas. Los propios autores mencionan los peligros asociados al llamado **Síndrome de Midas** (*The Midas Touch*), esto es, que un cambio de mirada por otras razones que la conducción sea tomado como un comando y traducido en movimiento incontrolado de la silla. La solución pasa por prever los medios de validación de comandos necesarios para confirmar el **deseo real** de comandar el vehículo en una determinada dirección.

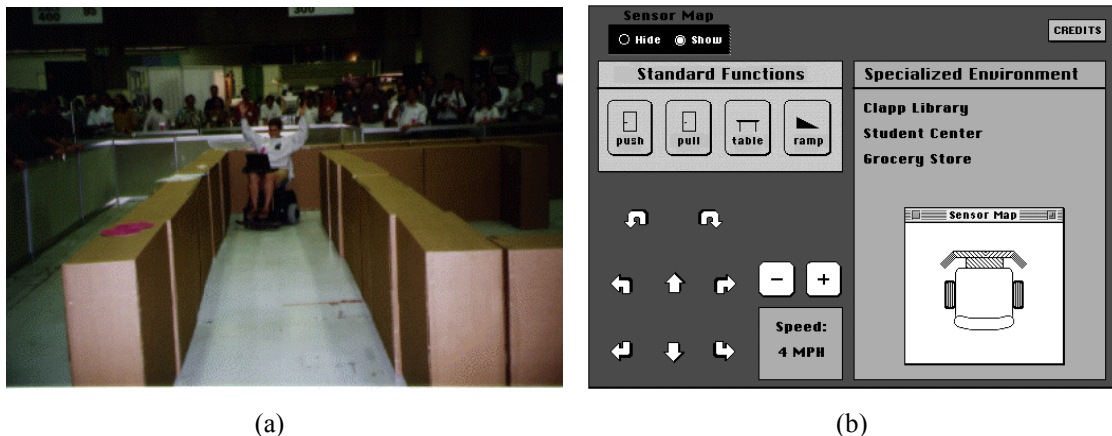


Figura 2-14: (a) La silla *Wheelesley* en el concurso celebrado dentro del IJCAI'95. (b) Una vista de la Interfaz de Usuario.

En su configuración más genérica, la HMI se diseñó para que con la ayuda del sistema sensorial incorporado puedan realizarse tareas de guiado semi-automático. Estas prestaciones se orientan a usuarios con **habilidad mecánica insuficiente** para accionar un *Joystick* convencional. La figura 2-14 muestra las prestaciones logradas y la HMI desarrollada. En la figura 2-14-a se ve la silla *Wheelesley* en el Primer Concurso de Sillas de Ruedas Robotizadas, celebrado dentro del IJCAI'95 (*International Joint Conference on Artificial Intelligence*); esta silla obtuvo el primer premio al ser capaz de pasar por los sitios más estrechos sin intervención del usuario.

Un detalle de una de las pantallas de la HMI se puede ver en la figura 2-14-b. Consta de varios

campos, activos en algún caso, pues se trata de una pantalla táctil. Las 8 flechas inferiores permiten seleccionar un movimiento elemental, mientras que los botones $\oplus$ y $\ominus$ incrementan o decrementan la velocidad lineal; en el ejemplo de la figura se indica una velocidad de 4 millas/hora (unos 6'4 km/h) bastante alta para este tipo de vehículos¹⁶. La velocidad real de la silla, no obstante, es modulada por el sistema de control, teniendo en cuenta la lectura de los sensores.

Como comportamientos de alto nivel incorpora ciertas **Funciones Estándar** y otras **Especializadas**. Las Funciones Estándar son aquellas realizables de forma metódica con un mínimo esfuerzo por parte del usuario. Estas funciones estándar son:

- **Entrar por puertas**, distinguiendo aquellas que sólo es necesario avanzar (*Push*) de las que además implican un momentáneo retroceso (*Pull*) por abrirse hacia afuera.
- **Meterse bajo una mesa**, o lo que es lo mismo *aparcar* en un puesto determinado de trabajo, comedor, ocio o similar.
- **Subir rampas**: aunque no se especifica, se sobreentiende que se trata de acceder, recorrer y salir de las rampas instaladas en ciertos edificios para acceder a los mismos. Algunas de estas rampas son notablemente estrechas, incluyen virajes muy fuertes y están rodeadas de muretes más o menos altos.

La gran ventana de la derecha identifica ciertas localizaciones fijas del entorno del MIT lo que permitiría la navegación entre los recintos pre-programados. Una subventana permite comprobar el estado de los sensores de distancia y colisiones.

Hay que destacar, no obstante, que en el momento de escritura de esta tesis aún no se ha documentado ningún resultado real respecto al funcionamiento efectivo tanto de las funciones Estándar como de las Especializadas. A este respecto, los propios autores señalan que las personas con movilidad tan reducida como para no poder manejar un *Joystick* convencional no parece que sean lo suficientemente capaces como para actuar sobre la pantalla táctil descrita.

2.2.5 La silla *deíctica* de la Universidad del Nordeste

El objetivo de este proyecto es el de contruir un robot *gopher*, esto es: uno que pueda ser comandado de forma fácil y precisa por un usuario humano, de una forma natural. Las habilidades de navegación de un robot de este tipo pueden ser usadas por una silla de ruedas autónoma convenientemente adaptada. En lugar de emplear un lenguaje natural (fácil para el humano pero no para la máquina)

¹⁶Por ejemplo, en la RFA la velocidad máxima permitida en interiores a una silla de ruedas motorizada es de 6'6 km/h.

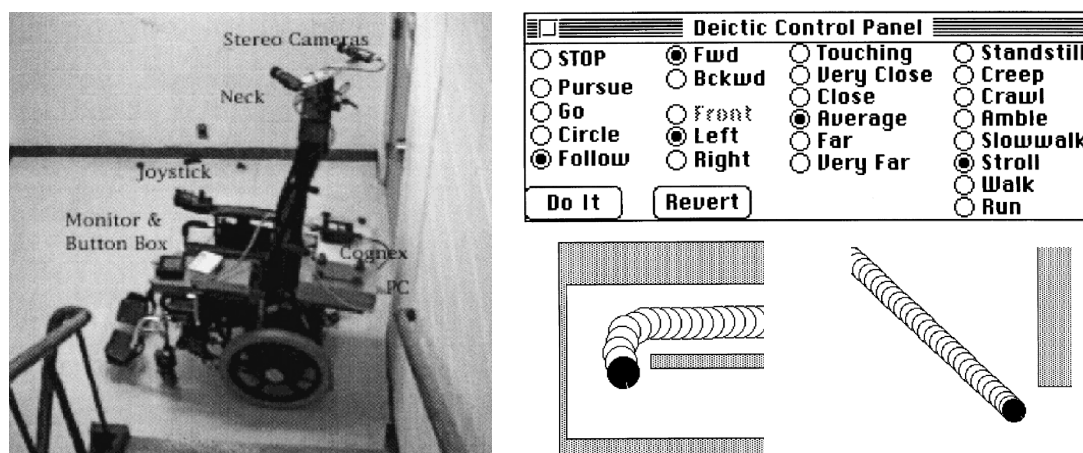


Figura 2-15: Silla *deíctica* de la Universidad del Nordeste. Vista general de los elementos de la misma y detalle del panel de control de comportamientos: las modificaciones introducidas detallan la trayectoria a seguir respecto al objetivo (dos ejemplos en la parte inferior).

o un lenguaje de programación (fácil para la máquina pero no para el humano) el concepto de robot móvil *deíctico*¹⁷ queda en esa nebulosa que puede llamarse *término medio*.

El equipo de la *Northeastern University*¹⁸, en Boston, EEUU, planteó un sistema en el que el usuario señalaba en una imagen el punto al que quería dirigirse, en la imagen debía reconocerse una primitiva de tipo *flanco* o tipo *esquina*, por ejemplo el borde de una pared o el pico de una mesa, respectivamente. El reconocimiento de esta primitiva por un sistema de Visión Artificial y el posterior *tracking* del móvil hacia ese objetivo señalado por el usuario es un problema planteado otras veces y resuelto en consecuencia, por lo que el seguir una ruta compleja sólo es cuestión de una especie de cooperación entre el humano y la máquina: el usuario marca los blancos intermedios y el móvil (la silla de ruedas) se limita a detectar *ese* blanco y seguirlo hasta llegar a él o hasta que se cambie el objetivo intermedio por un nuevo comando humano [Crisman 98].

El conjunto de la figura 2-15 muestra esta idea de control compartido *humano-máquina*. El sistema sensorial a bordo de la silla lo forman unos transductores de US, un *bumper* elástico basado en un *film* piezoeléctrico y un conjunto de dos cámaras de color con un procesador estándar Cognex, claramente visible en la vista general de la figura 2-15. Como procesador se incorpora una tarjeta industrial en formato PC104, 386 compatible. Aparte de indicar el blanco seleccionado, mediante un panel de botones es posible modificar y ajustar el comportamiento deseado al llegar al blanco;

¹⁷**Deíctico**: perteneciente o parte de la deixis. **Deixis**: 1-señalamiento que se realiza mediante ciertos elementos lingüísticos que muestran, como *este* o *esa*; 2-mostración que se realiza mediante un gesto, acompañando o no a un deíctico gramatical. (*Diccionario de la Lengua Española*, 21 edición, Real Academia Española 1992)

¹⁸<http://www.neu.edu>

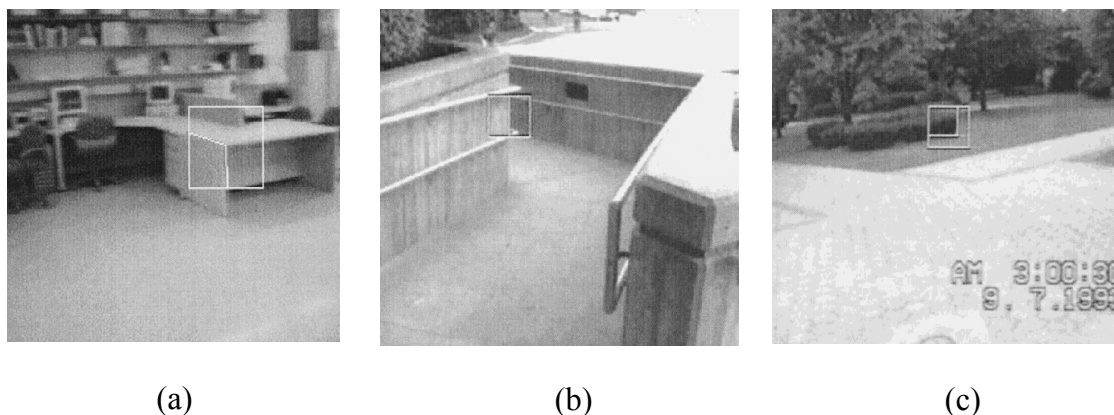


Figura 2-16: Tres posibles objetivos de la silla *deíctica*, tanto en interiores como en exteriores: (a) el pico de una mesa; (b) el borde de una rampa de acceso para sillas de ruedas; (c) el extremo (como esquina) de un seto.

por ejemplo, el comportamiento representado en la figura 2-15 (en su parte superior derecha, puntos negros en el menú de control) quiere decir, de izquierda a derecha: **sigue** el objetivo (posiblemente el perfil o flanco de un muro), yendo hacia **adelante**, por la **izquierda** del objetivo, a una distancia **media**, y a velocidad **moderada** (algo inferior a 4km/h, una velocidad normal de paseo).

Por último, en la figura 2-15 se incluyen también dos posibles trayectorias, simuladas, obtenidas con los siguientes criterios base, de izquierda a derecha: **en círculo**, **muy cerca**, y por la **derecha** del objetivo; y **ve (go)**, **muy cerca**, hacia la **derecha** del objetivo.

Los dos tipos de primitivas reconocidas por el sistema de visión, esquinas y bordes, son en principio suficientes para la aplicación considerada; además, se ha demostrado la viabilidad del sistema tanto en interiores como en exteriores, cuestión muy interesante para este tipo de vehículos. La figura 2-16 muestra tres ejemplos de navegación usando este sistema: en 2-16-a, el punto seleccionado es el pico de una mesa; mientras que en 2-16-b y 2-16-c se muestran dos ejemplos útiles de exteriores, una rampa para sillas de ruedas y un seto de un parque, respectivamente.

Los autores del trabajo sostienen que, en condiciones normales, un usuario sólo necesita cambiar de objetivo una vez al minuto, más o menos, lo cual no es una carga excesiva para un humano. Por otro lado, la máquina sólo necesita hacer tareas simples de procesamiento cuasi-elemental de imagen y *video-tracking*, evitándose tareas más engorrosas, costosas en términos de tiempo de proceso y difíciles de ejecutar eficientemente como son las de planificación de rutas y reconocimiento del entorno.

2.2.6 Otras sillas de equipos europeos y americanos

En las secciones anteriores se ha realizado una revisión detallada de algunos de los proyectos más significativos centrados en la investigación y desarrollo de sistemas robóticos, más o menos autónomos, a bordo de sillas de ruedas convencionales. Sin ánimo de ser exhaustivos, se mencionarán más brevemente en la presente sección a otros grupos de Centros radicados tanto en Europa como en Estados Unidos.

NavChair de la Universidad de Michigan

La Universidad de Michigan, y en concreto el Mobile Robots Lab¹⁹, dirigido por el Dr. Johann Borenstein, desarrolló entre 1990 y 1996, en diversas fases, la *Navchair* [Borenstein 90] [Bell 94]. Esta silla usa un sistema sensorial, basado en 12 sensores US situados en la parte frontal y en los laterales de una silla comercial, para incorporar ciertas prestaciones de asistencia a la conducción y navegación en interiores (figura 2-17-a). El procesador de control es un PC 80486 a 33MHz. El usuario puede controlar el sistema bien por un *joystick* convencional o **por voz**, en este último caso gracias a un programa específico corriendo en el PC.

Los modos de funcionamiento o, lo que es lo mismo, los comportamientos incorporados son:

- **Esquive de obstáculos.** La silla es comandada por el usuario pero se mantiene siempre una distancia de seguridad a los obstáculos detectados.
- **Paso de puertas.** Similar al anterior pero la distancia de seguridad cambia, haciéndose más baja, para poder pasar por aperturas reducidas.
- **Seguimiento de paredes.** Se mantiene a una distancia preestablecida del muro señalado por el *joystick*, mientras se esquivan obstáculos al frente y al otro lado de la silla.

La conmutación entre modos es automática, basada tanto en el deseo del usuario, manifestado por acciones sobre el *joystick*, como por el propio conocimiento del entorno mediante un *mapa topológico* obtenido por el sistema de US.

La *INRO*, de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Weingarten

La novedad de la silla *INRO* (del alemán **I**ntelligenter **R**ollstuhl, esto es *Silla de Ruedas Inteligente*) está en que es uno de los pocos grupos de investigación que afronta el gran problema de estos vehículos: los **obstáculos cóncavos**, o sea huecos como escaleras o similares; además, trata de dar

¹⁹<http://www.engin.umich.edu/research/mrl/index.html>

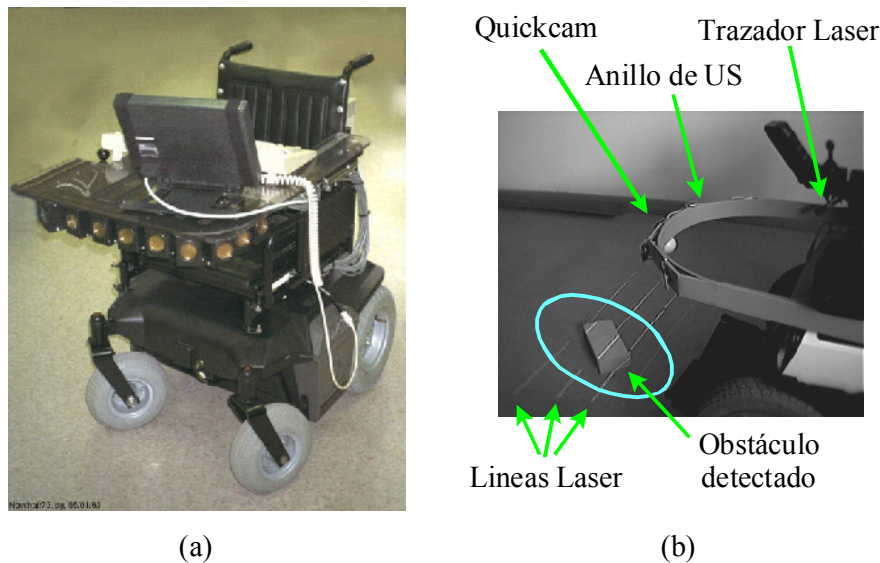


Figura 2-17: (a) *Navchair*, de la Universidad de Michigan. (b) Sistema de detección de obstáculos de la *INRO*, Universidad de Ciencias Aplicadas, Weingarten.

solución a este problema mediante componentes de bajo coste, en consonancia con las restricciones que deben aplicarse, a ser posible, en las Tecnologías de Asistencia [Schilling 98a].

Como controlador a bordo incorpora un PC y a éste se conectan todos los elementos de control mediante enlaces serie estándar; entre COM1 y COM4 se encuentran el control de motores, el anillo de ultrasonidos, un GPS y un enlace radio. Los dos últimos elementos, también una novedad en este tipo de vehículos, permiten enviar la localización, *a grosso modo*, de la silla a un control central para casos de emergencia.

El módulo de detección de obstáculos utiliza un sistema realmente económico: una cámara multimedia, tipo *Quickcam*, conectada al puerto paralelo del PC, y un trazador Laser, de tres líneas. El calibrado del sistema pasa únicamente por registrar la posición, en reposo y sin obstáculos, de las líneas laser en el plano imagen; una vez en marcha, la posición actual de las líneas es comparada con la de referencia: si existe diferencia mayor que un umbral dado se notifica al controlador de alto nivel como un obstáculo, sea éste cóncavo o convexo (ver figura 2-17-b).

Otras prestaciones añadidas son las de seguimiento: activado este modo, la silla mantiene una distancia preajustada con el objeto situado frente a ella, realizando la misma ruta que éste haga. La utilidad del sistema es permitir comandar, con un solo vehículo (el frontal, o *conductor*) un completo convoy de sillas como la descrita.

El proyecto *Tetranauta*.

En España, durante la década de 1990 y a la sombra de las ya mencionadas iniciativas TIDE de la Comunidad Europea (sección 2.2.2), varios grupos de investigación desarrollaron trabajos interesantes sobre Asistencia a la Movilidad. Uno de los trabajos más interesantes es el Proyecto *Tetranauta* que se resume a continuación. No se describen aquí (por el momento) otros proyectos nacionales, como por ejemplo los desarrollados dentro del equipo de la Universidad de Alcalá, al que pertenece el autor de esta tesis; estos y otros trabajos serán objeto de análisis en el siguiente capítulo, encuadrando dentro del mismo las decisiones, experimentos y premisas que incidirán directamente sobre la concepción y desarrollo de la tesis en sí.

Tetranauta se gestó en la Facultad de Informática y Estadística de la Universidad de Sevilla²⁰, en donde existe un Grupo de *Robótica y Tecnología de Computadores Aplicada a la Rehabilitación*, dependiente del Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores, y bajo la dirección del Dr. Antón Civit-Balcells.

Las actividades de este grupo comenzaron en 1990 con Ayudas Computerizadas a Discapacitados. En 1991 se firmó un primer convenio, con duración hasta 1994 y posteriormente renovado hasta 1996, y dentro del cual se desarrolló la silla *SIRIUS*²¹. En realidad, este primer proyecto se centró más bien en el estudio y evaluación de arquitecturas de control adecuadas para incrementar las posibilidades de navegación de una silla de ruedas estándar. Se construyeron tres prototipos de los cuales sólo el último de ellos tenía posibilidades reales de navegación mediante *dead reckoning* al incorporar *encoders* ópticos: el primer prototipo carecía de realimentación de posición y el segundo empleaba sensores de efecto Hall en las ruedas [Civit-Balcells 96] [Civit-Balcells 97].

Las investigaciones en este primer proyecto llevaron a la propuesta de una *Arquitectura de bajo coste*, que permitiera un control en lazo cerrado del móvil y ciertas prestaciones útiles para los discapacitados. El resumen de conclusiones de esta fase del proyecto es el siguiente:

- Utilización de *hardware* computacional estándar, basado en PC industrial (por ejemplo en formato PC-104), para mantener altas las prestaciones de cómputo con el mínimo coste de desarrollo.
- *Software* centralizado: el procesador corre las tareas de control mediante el soporte de un Sistema Operativo en Tiempo Real.
- Modularización de funciones. Las diversas prestaciones o sistemas sensoriales deben ser fácilmente incorporables o retraíbles del sistema; proponen para ello el uso de un Bus estándar (en

²⁰<http://www.fie.us.es>

²¹También denominada IASS-US, de las iniciales de *Instituto Andaluz de Servicios Sociales y Universidad de Sevilla*.

concreto, el ISA/PCI del PC) para la creación de módulos basados en tarjetas periféricas.

Cabe destacar que la información de posición para la realización del control en lazo cerrado sólo parte de los *encoders* ópticos de las ruedas [Rio 97]. No se documenta el uso de sensores de US en sus prototipos, aunque sí mencionan la necesidad de incorporar un sistema sensorial para prevenir y/o detectar colisiones mediante *bumpers*, IR y US.

Las labores del grupo continuaron a partir de 1996 con el llamado proyecto *Tetranauta I: Unidad de Control Inteligente acoplable a Silla de Ruedas Eléctrica Estándar*. Este proyecto se encuadra dentro de las iniciativas PITER (**P**royectos **I**ntegrados de la **T**ecnología de la **R**ehabilitación) de la Unión Europea y la CICYT. En este proyecto colaboran también la Universidad del País Vasco, el Hospital Nacional de Paraplégicos de Toledo y la empresa Bioingeniería Aragonesa, S. A.

En el proyecto *Tetranauta*, se incorporan *sugerencias* de los usuarios de sillas de ruedas, representados por el Hospital N. de Paraplégicos. Éstos solicitan prestaciones algo más fiables de seguimiento de las rutas más habituales en los sitios en los que se desplazan y además poder evitar las colisiones bruscas. Para ello, la solución que plantea este equipo es el seguimiento de líneas pintadas en el suelo, con identificaciones triangulares en los cruces para determinar el camino a seguir [Vicente Díaz 00]. Aunque no hay publicaciones recientes sobre este último sistema, un prototipo del *Tetranauta* se presentó en la **Semana de Puertas Abiertas** organizada por el CEAPAT (Centro Estatal de Autonomía Personal y Ayudas Técnicas) en su sede de Madrid entre el 3 y el 7 de Mayo de 1999, en donde el autor de esta tesis tuvo ocasión de comprobar algunos detalles del mismo.

A la vista del prototipo presentado, pueden destacarse las siguientes características del sistema de seguimiento de líneas: se utiliza una cámara de bajo coste situada bajo el asiento de la silla, mirando directamente al suelo. Para evitar problemas de segmentación de la imagen y para simplificar el tratamiento de la misma, la silla incorpora una especie de *faldones* que transforman toda la parte inferior de la misma en un entorno aislado del exterior; un sistema de iluminación al uso se encarga de proporcionar la luz necesaria para la detección de la línea.

Hasta aquí se han presentado varios de los trabajos más destacados en cuanto a la aplicación de la Tecnología a la Asistencia a la Movilidad. En capítulos y secciones posteriores se hará referencia a algunos trabajos no mencionados aún pero esto no debe ser objeto de extrañeza: el número y calidad de grupos dedicados a la aplicación de la Tecnología a la Asistencia es muy grande y rico, cubriendo múltiples disciplinas y aportando soluciones en ocasiones muy destacables.

En adelante, se tratará de resaltar específicamente aquel aspecto de mayor interés para el punto del que se trate, y en muchos casos las referencias que se aporten serán también de gran importancia en el campo de la Asistencia a la Movilidad.

2.3 Autolocalización y Navegación Autónoma

El problema de la autolocalización de un vehículo autónomo, como por ejemplo una SRA, en un entorno parcialmente estructurado como el interior de un edificio, es uno de los más importantes en el campo de la robótica móvil. Una revisión de las técnicas más comunes, tanto en entornos de Investigación como Comerciales, puede encontrarse en [Borenstein 96a]. La clasificación de los métodos de localización aportada por Borenstein es clara y precisa:

- **Métodos de Posicionamiento Relativo**, en los que sólo se puede estimar la posición actual respecto a una posición inicial dada usando para ello sensores internos al vehículo; las técnicas disponibles se pueden clasificar en alguno de los siguientes grupos:
 - **Odometría**, mediante el uso de medidas acumuladas de rotaciones de ruedas o similares mediante el uso de codificadores o *encoders*.
 - **Navegación inercial**, integrando las modificaciones y derivas leídas de acelerómetros, giróscopos y similares.
- **Métodos de Posicionamiento Absoluto**, que permiten conocer la posición del móvil en el entorno del mismo, para lo cual se debe disponer de elementos externos de referencia; las posibilidades existentes son:
 - **Rayos de localización activa** (*Active Beacons*). Los rayos o *beacons* permiten establecer la posición del móvil mediante el análisis de la dirección del haz procedente de varios elementos de localización externos. En este grupo se engloban tanto los sistemas de posicionamiento global (como los satélites GPS) como los de posicionamiento local (LPS) aplicables en otros entornos, como interiores [Eren 97].
 - **Reconocimiento de Marcas Artificiales** (*Artificial Landmarks*). Estas marcas son elementos introducidos en posiciones determinadas en el entorno del móvil con características tales que permiten la identificación y distinción de las mismas de manera fiable. A través de la información extraída de las marcas y, en su caso, de un mapa de su localización en el entorno es posible determinar la posición del móvil.
 - **Reconocimiento de Marcas Naturales** (*Natural Landmarks*). Similar al anterior excepto que se trata de reconocer la posición a través de características distintivas en posiciones conocidas del propio entorno, por lo que no se necesitaría de una intervención sobre el mismo para modificarlo con marcas artificiales.
 - **Correspondencia sobre Modelos** (*Model Matching*). En estas técnicas se trata de comparar la información aportada por los sensores del sistema con la registrada en una

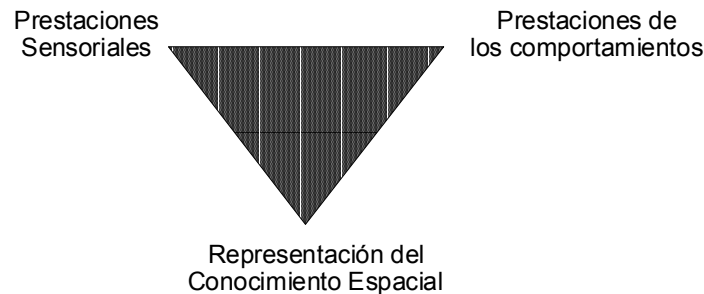


Figura 2-18: El Triángulo del Conocimiento Espacial (*Spatial Cognition Triangle*), traducido de [Krieg-Brückner 98].

base de datos, mapa o modelo del entorno, la máxima concordancia permitirá identificar la posición del móvil dentro del mapa o modelo dado.

Complementario al problema de la localización tenemos el de la navegación, esto es, el poder establecer de una forma unívoca la posición actual del móvil, dentro del entorno en el que se encuentra, poder conocer dónde se encuentra un destino dado, dentro del mismo entorno, y cuál sería la ruta a seguir para alcanzarlo. Se trata, pues, de un problema íntimamente ligado al de la localización.

En [Röfer 97] se realiza una revisión de las técnicas de navegación aplicables a sistemas en tiempo real, descartando de antemano los modelos tridimensionales del entorno por los impresionantes volúmenes de datos a manejar por lo que se limita, entonces, a modelos 2D sobre un plano de rodadura horizontal. Röfer distingue entre *Navegación Global*, que debiera dar solución al problema genérico de encontrar el camino entre un origen y destino dados, y *Navegación Local*, que se ocuparía de adaptar la solución aportada por el navegador global a las restricciones cinemáticas concretas del móvil. Centrando el actual estudio en los sistemas globales de navegación, en [Krieg-Brückner 98] se realiza una interesante clasificación, aplicable sobre todo a problemas como las SRAs.

La Taxonomía de la Navegación de Krieg-Brückner *et al.* parte del llamado Triángulo del Conocimiento Espacial (ver figura 2-18); en él se pretende ilustrar que el conocimiento espacial, su representación y su adquisición, están íntimamente relacionados con la información sensorial, por un lado, y con los comportamientos (o prestaciones) navegacionales, por otro. Esto se manifiesta claramente en la íntima relación que existe al adoptar o definir los sensores o métodos de reconocimiento del entorno y las prestaciones de navegación que se pretenden incorporar en el móvil.

2.3.1 Sensores para comportamientos básicos

Practicamente la totalidad de las SRAs incorporan sensores de ultrasonidos (US) e infrarrojos (IR) como elementos de bajo coste en la medición de distancias o detección de zonas libres. A pesar de sus limitaciones, estos sensores simples permiten obtener comportamientos básicos en un doble aspecto:

- **Seguridad**, como elementos detectores de obstáculos.
- **Navegación reactiva**, para realizar tareas simples (seguimiento de paredes, paso de puertas, etc.) en el nivel inferior de sistemas más complejos.

Obviando los sistemas de seguridad, casos notables de navegación reactiva se tienen por ejemplo en [Schilling 98a], en donde se presenta un sistema de conducción *en cola* de varios vehículos, siguiendo todos ellos al primero usando los sensores de ultrasonidos para ello. En [Röfer 98b] se documentan comportamientos básicos, como seguimiento de paredes y la estrategia de paso de puertas de la silla Bremen; un caso similar se encuentra en [Bourhis 01], en donde se presenta un algoritmo que permite, dando sólo un comando sobre la dirección deseada, seguir una trayectoria esquivando obstáculos y pasando por puertas con sólo 15cm más que el ancho del vehículo.

Un caso especial se encuentra en [Gomi 96], en donde se describe la arquitectura de una SRA enteramente basada en comportamientos [Brooks 86] [Connell 90]. En este vehículo la interacción entre las medidas de los sensores de US e IR con el movimiento de la SRA se realiza mediante nodos supresores que inhiben, en su caso, los comandos de niveles superiores basados en mapas y visión. Sólo el joystick, esto es, el propio usuario, tiene la jerarquía más alta inhibiendo a su vez a cualquier comando automático.

Sensores y *Scanners* laser

En algunos casos, los sensores US e IR se complementan con sensores y *scanners* laser. En el primer grupo pueden encuadrarse los detectores de obstáculos del vehículo INRO [Schilling 98a], cuyo modo de trabajo pudo verse en la figura 2-17. Un sistema de similar fundamento, pero con prestaciones métricas de precisión se describe en [Lázaro 98] y [Lázaro 01].

Otros equipos se limitan a usar un medidor de distancias comercial SICK²², modelo PLS. Este sensor proporciona una lectura de distancias a puntos en un plano semicircular de 4m de radio, con una precisión de 50mm y una resolución angular de 0°5' sobre un campo de medida total de 180°. Sistemas de este tipo se usan en las silla robóticas *MAid* [Prassler 01] y *SENARIO* [Beattie 98].

²²<http://www.sick.de>

El inconveniente de este sensor es que, a pesar de su coste elevado, no permite la detección de obstáculos fuera de su plano de emisión.

2.3.2 Sensores para la autolocalización

Los sensores de medidas de distancias se emplean también para tareas de autolocalización; en su forma más habitual un mapa de ocupación (sea éste local o global) es actualizado partiendo de las detecciones de los medidores de distancia; este mapa se hace corresponder con las características previamente memorizadas del entorno y de esta forma se trata de establecer la posición de forma unívoca. Dado que utiliza los mismos sensores que en la detección de obstáculos, ambas tareas se encuentran directamente relacionadas y coexisten en muchos de los vehículos analizados.

Así, *SENARIO* [Katevas 97] [Beattie 98] trata de autolocalizarse empleando un modelo de micro-características (*sic*) del entorno basado en las medidas en ocho vectores radiales equidistribuidos alrededor del móvil. Otra aproximación, más habitual, modela los obstáculos detectados en sucesivas medidas tratando de identificar *marcas naturales* en el entorno dado, por ejemplo una determinada longitud de muros y situación de huecos de puertas y demás, bien mediante técnicas de *matching*, más o menos elaboradas [Madarasz 86] [Kubitz 97] [Einsele 97] [Crowley 98] [Ward 98] [Bourhis 01], o mediante redes neuronales [Thrun 96] [Serradilla 97] [Bugmann 98] [Arahal 98].

Pero la información aportada únicamente por los sensores de distancia rara vez es suficiente para determinar la posición del móvil. Esta información suele combinarse con la procedente de otros sensores que permitan deshacer, en todo o en parte, las ambigüedades e indeterminaciones derivadas de la existencia de máximos locales de correspondencia en los procesos de *matching*. Prácticamente en todos los casos existe una unidad de posicionamiento relativo, a base de *encoders* en ruedas motrices y técnicas de estimación de posición acumulada o *dead reckoning*. El bajo coste de los *encoders* y su facilidad de integración en los sistemas móviles con ruedas justifica su uso masivo.

No obstante, la posibilidad de deslizamientos y la naturaleza acumulativa de los errores sistemáticos en las técnicas de *dead reckoning* fuerzan a su vez a usar técnicas especiales de fusión de datos y sensores complementarios. En [Borenstein 96b] se muestra una forma de combinar la información aportada por un giróscopo, de bajo coste, con la proporcionada por los *encoders* de las ruedas motrices a fin de minimizar errores. También se emplean giróscopos en [Bugmann 98] y [Hu 98].

En otros trabajos se usan ciertos elementos de señalización externos para confirmar la posición supuesta y deshacer, en su caso, posibles ambigüedades o pérdidas de referencias espaciales. Este es el caso de [Kubitz 97], en donde se emplean emisores de radio de autoidentificación o RFID (*Radio Frequency Identification Devices*). Estos dispositivos, fabricados por diversas compañías

(como por ejemplo Motorola²³ y CrossLink²⁴), consisten en pequeños emisores/receptores de radio, los cuales suelen ser pasivos (sin alimentación propia) y sólo entran en funcionamiento enviando un código propio y único de identificación cuando son telealimentados por el campo procedente de un dispositivo complementario activo, llamado *Interrogador*. Aunque no son direccionales, lo cual los invalida como sensores de posición, su reducido alcance (desde las decenas de centímetros en los más simples hasta unos pocos metros en los más sensibles) permite identificar al menos *la zona* en la que el móvil se encuentra.

2.3.3 Sensores de Visión en autolocalización y navegación

Entre los sensores de mayores posibilidades potenciales en robótica móvil destacan los sistemas que usan cámaras y procesadores de imágenes. Además, el auge de los sistemas multimedia ha provocado un descenso espectacular en el coste de estos sistemas y un aumento notable de sensores disponibles, destacando por ejemplo las excelentes relaciones prestaciones/coste de los sensores CMOS de salida digital directa, bien en paralelo, bien en bus serie de alta velocidad (*FireWire* - IEEE1394, USB1 y USB2, etc.).

Ya se ha mencionado anteriormente la posibilidad de realizar medidas de distancias usando luz estructurada (láseres de infrarrojo), tanto para propósitos de detección de obstáculos como de mapeo del entorno, a costes más competitivos y con prestaciones similares a los *scanner* láser habituales. Pero es igualmente muy común usar los sensores de visión para tareas de reconocimiento del entorno y navegación; de entre estos sistemas pueden encontrarse diversas maneras de interpretar la información recuperada en cada imagen y, en consecuencia, diversas formas de actuación a partir de la interpretación realizada. A grandes rasgos pueden clasificarse en alguno de los siguientes grupos:

- **Búsqueda y reconocimiento de marcas naturales**, en los que las tareas de localización y navegación se basan exclusivamente en la información presente en el propio entorno, sin modificaciones *ex profeso*.
- **Búsqueda y reconocimiento de marcas artificiales**, los cuales necesitan modificar el entorno añadiendo elementos de características y métricas conocidas, para una mejor y más fiable localización del móvil.

²³<http://www.motorola.com/smartcard/>

²⁴<http://www.crosslinkinc.com/>

Con marcas naturales

Aunque la tendencia a largo plazo debiera ser la navegación usando únicamente la información presente en el propio entorno (marcas naturales), la resolución práctica al problema planteado dista mucho, en la actualidad, de ser viable en un sistema como una SRA por razones de coste, tiempo de respuesta y fiabilidad en la detección.

Así, en [Gomi 96] se menciona el uso de dos cámaras CCD en color para reconocimiento de marcas naturales en el entorno, haciendo uso de mapas topológicos para la descripción e identificación de las marcas; sin embargo no se documentan los resultados conseguidos, lo cual plantea dudas sobre la consecución real de los objetivos planteados. Por contra, en [Trahanias 99] se describe un sistema mixto de navegación mediante un modelado del entorno, y una extracción de marcas naturales en el mismo. Para el modelado del entorno se parte de una segmentación de la imagen tomando como referencia inicial el punto de fuga de las líneas definidas por paredes, suelos y puertas; tomando como base las zonas detectadas de esta forma se determina, por ejemplo, la localización relativa en un pasillo. Para una mejor identificación de la localización real se segmentan a su vez uno o más objetos exclusivos en cada zona, como por ejemplo un extintor, una caja de luces o un cartel, siendo éstas en realidad las *marcas naturales* memorizadas; tras un proceso de *matching* con la base de datos de marcas se puede determinar qué pasillo o localización es la actual, de entre las iniciales candidatas.

El equipo del conocido como *Shirai Lab*²⁵ en Osaka, Japón, dirigido por el Dr. Yoshiaki Shirai ha desarrollado también una silla de ruedas que incorpora un algoritmo de navegación descrito en [Moon 99]. Utiliza estereo-visión, mediante dos cámaras CCD en color, para detectar la orientación relativa del móvil respecto a unas pocas *marcas naturales* de referencia. Debido a los largos tiempos de proceso (3s, en un computador sin especificar) la velocidad del móvil es sólo de 0'33m/s, incorporando además un método de retropropagación de la medida para evitar detenerse mientras la imagen se procesa.

Un método de posicionamiento muy usado es el de triangulación: vistas al menos tres marcas (sean éstas naturales o artificiales) se determina la posición del móvil por técnicas geométricas a partir de los ángulos de visualización de cada marca. En [Betke 97] se realiza una discusión de los errores sistemáticos posibles y se establecen criterios para la utilización óptima del método de triangulación. Por otro lado, en [Madsen 98] se describen los resultados de un método de triangulación aplicado a marcas naturales de un entorno en interiores, así mismo se establecen una serie de criterios en la selección de aquellas marcas de entre las visibles que den lugar a un mínimo error en la localización. No se detalla el tiempo de proceso empleado en determinar la posición en cada

²⁵<http://www-cv.mech.eng.osaka-u.ac.jp/index.html>

punto, pero el sistema descrito es necesariamente lento: una vez conocido el mapa de *landmarks* del recinto en cuestión, la cámara gira hasta orientarse hacia la tripleta de marcas óptima, para después computar la correlación de la imagen respecto a plantillas de las marcas memorizadas (*template matching*), corregidas según la deformación esperada. Sí se documenta que cada correlación emplea 0'5s en una *Silicon Graphics workstation*.

Imágenes panorámicas

Para optimizar el tiempo de respuesta y la fiabilidad y prestaciones de los sistemas de localización basados en marcas naturales, una solución interesante es la adquisición de imágenes panorámicas mediante configuraciones catadiópticas. En [Zhang 99] se usa un espejo cónico y una cámara blanco y negro; la imagen resultante se convierte a un rectángulo de sólo 80×20 pixels, el cual se compara con una base de datos de imágenes memorizadas usando un modelo neuro-borroso para la correspondencia. Un sistema similar, usando imágenes panorámicas como entradas, se encuentra en [Matsumoto 98] en donde la correspondencia entre imágenes se realiza por *hardware*. En ambos casos las vistas se reducen a interiores o espacios artificiales (p.e. en [Zhang 99] se usa una suerte de 'casa de muñecas', con pasillos y muros en miniatura). En [Cassinis 98], aparte de usar redes neuronales para tareas de *matching* se comprime la información panorámica en una sola dimensión, generando un array de 3×360 datos (1 color RGB por cada grado angular).

De gran interés es la aportación de Lin *et al.*, que en [Lin 98] muestran una técnica útil en exteriores, utilizando una compresión unidimensional de las imágenes panorámicas e integrando, en una suerte de 'ruta', el vector así obtenido para determinar más fiablemente, de forma robusta en fin, la localización del móvil. Sin embargo, la competencia que en exteriores plantea el uso de un GPS estándar limita sus posibles aplicaciones, aunque sería interesante una integración entre ambos sistemas, para compensar entre sí, por ejemplo, los casos de visibilidad limitada de satélites o la inevitable ambigüedad en el sistema de visión.

La SRA del equipo de Bremen incorporó también, en un principio, un sistema panorámico de localización. Este sistema, denominado *Panama* (de *Panorama Matching*) por su autor, Thomas Röfer, mejora las prestaciones de localización usando técnicas de flujo óptico para realizar un seguimiento entre imágenes consecutivas de las características definitorias de una ruta dada [Röfer 97]. La estrategia de navegación se basa en la memorización de una serie de rutas, usando las imágenes como *puntos de paso* en ellas; el sistema, a partir de una localización dada, computa la orientación y desviación del móvil respecto a la siguiente imagen de la ruta, elaborando los consiguientes comandos de guiado. Con esta estrategia fueron necesarias 76 imágenes, memorizadas tras un proceso de entrenamiento, para cubrir los desplazamientos necesarios en un piso simulado compuesto por tres

cuartos unidos por un pasillo. En las trayectorias definidas, el error de posicionamiento se mantiene por debajo de los 22cm, siendo algo mejores los resultados de orientación con errores por debajo de los 5°, aunque en pasillos esto aumenta hasta los 15°.

2.3.4 Guiado y navegación con Marcas Artificiales

En definitiva, el campo de soluciones disponibles y sus prestaciones, fiabilidad y coste, abarca desde los sistemas más económicos, como los *encoders*, hasta costosos sistemas de localización por balizas laser o similares; pero fuera de los equipos de investigación, esto es, en entornos reales como en la industria, edificios públicos o domicilios particulares, los sistemas debieran exhibir una muy alta fiabilidad, para evitar riesgos y accidentes, por un lado, y desorientaciones y comportamientos erráticos, por otro. Además, estos sistemas debieran permitir resolver el problema de la *localización global* dentro de entornos fuerte y regularmente estructurados (hospitales, edificios de oficinas, etc.) en los que incluso un humano puede desorientarse salvo por la existencia de detalles exclusivos como colores, carteles, etc.

Si a esto añadimos restricciones adicionales, como coste reducido y bajo tiempo de proceso, puede entenderse por qué en estos entornos siguen siendo preferidas soluciones un tanto más robustas, como son los sistemas filoguiados y similares. Es de destacar que en estos casos se distribuye la 'inteligencia' del sistema entre el edificio (infraestructura) y el vehículo.

Por otro lado, en el caso particular de las SRAs nos encontramos ante un sistema especialmente sensible al coste, dado que el colectivo de usuarios de estos vehículos no puede hacer frente a equipos caros ni puede realizar costosas inversiones en su entorno (domicilio o lugar de trabajo). Por añadidura se trata de un ejemplo claro de *sistema en tiempo real*, en donde el usuario desearía desplazarse, con seguridad, a velocidades relativamente altas, de unos 2m/s (unos 7km/h, correspondiente a un andar rápido) o incluso más.

Por su alto coste, tanto en instalación como en mantenimiento, deben dejarse aparte los sistemas filoguiados y similares; esto incluye a los sistemas activos de triangulación, basados en marcas codificadas y emisores láser [Borenstein 96a]. Además estos últimos, a pesar de su eficacia en entornos estructurados, presentan problemas prácticos de posicionamiento y visibilidad de balizas. Es por todo ello por lo que el estudio que sigue, respecto a las soluciones aplicables al problema de la localización de una SRA, se centrará en aquellos que utilizan sensores de visión y marcas artificiales pasivas.

Guiado mediante líneas pintadas en el suelo

Como primera opción, el uso de líneas pintadas en el suelo constituye una solución económica y fiable (ver figura 2-8-c), por lo que otros grupos de investigación en Asistencia a la Movilidad han adoptado un sistema similar [Craig 93] [Civit-Balcells 96] [Rio 97]. Sin embargo, las líneas en el suelo adolecen de problemas prácticos para un sistema realmente autónomo:

- La ruta trazada por la línea ha de estar siempre libre de obstáculos y ser objeto de un adecuado mantenimiento (repintado, limpieza, etc.).
- Caso de perder contacto con la línea, el vehículo se encuentra desorientado a menos que disponga de sistemas complementarios, como *encoders* u otros sistemas de apoyo a la navegación.
- Igualmente, son necesarios elementos complementarios de apoyo para que el móvil pueda determinar en qué punto de la ruta se encuentra.
- El mero hecho de seguir una línea no garantiza conocer **dónde** se encuentra el móvil en un entorno determinado. Esto es particularmente cierto en momentos tales como el encendido del sistema: no se puede garantizar que la posición actual coincida con la última conocida.

Para paliar alguno de estos inconvenientes, los propios autores de *Tetranauta* mencionan en [Vicente Díaz 00] la posibilidad de usar otros dispositivos, como los RFID, para determinar aproximadamente la localización del móvil dentro de una ruta dada.

Con todo esto el uso de líneas en el suelo como ayuda a una navegación autónoma resulta una solución rápida y eficiente sólo a corto plazo, pues no soluciona realmente los problemas planteados ni permite una autonomía real del vehículo. No obstante, las líneas pintadas en el suelo sí podrían ser una ayuda interesantísima a efectos de *seguridad*, pues permitirían establecer *áreas reservadas* o *zonas de peligro* (escaleras descendentes, huecos de fábrica, baches, rampas, bordillos, etc.) de forma más efectiva y fiable que las estructuras sensoriales actuales, tales como ultrasonidos o infrarrojos, por su inherente dificultad de funcionamiento en exteriores y con obstáculos cóncavos.

Marcas como señalizadores de ruta

El uso de marcas artificiales tiene capacidades más interesantes, bajo el punto de vista de localización, navegación y guiado, que las expuestas hasta aquí. Resulta llamativo comprobar cómo Thomas Röfer, al final de su tesis [Röfer 97], documenta una alternativa al uso de imágenes panorámicas y que consta de una cámara convencional montada sobre una unidad de *pan-tilt*. Con este sistema se pretende mejorar las prestaciones de autolocalización, esto es, eliminar las posibles ambigüedades presentadas al seguir una determinada ruta y evitar, en lo posible, la pérdida del móvil.

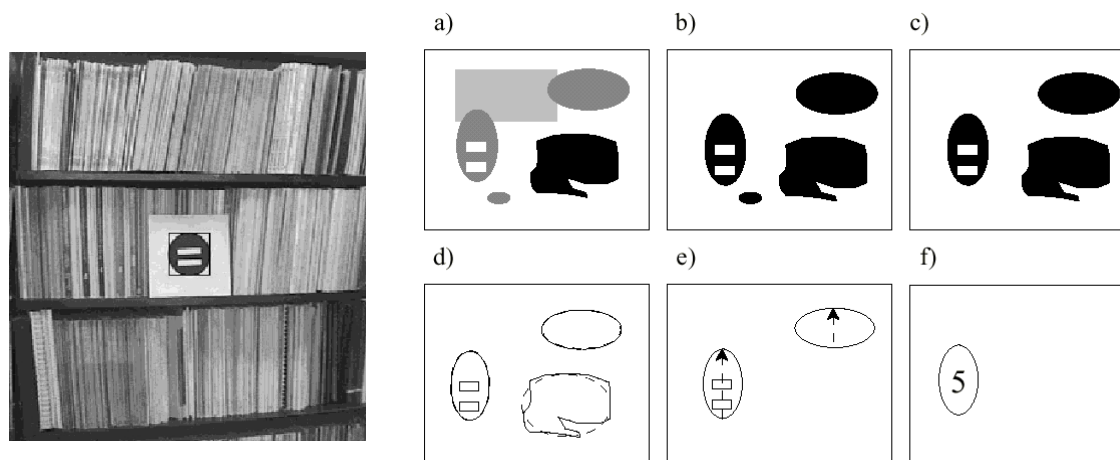


Figura 2-19: Marca usada por la silla Bremen. A la izquierda, imagen de la marca en una estantería con revistas. A la derecha, esquema del proceso de segmentación e identificación de la marca.

La figura 2-19 muestra la marca artificial definida, así como un esquema del proceso de segmentación e identificación incorporado. La marca contiene una suerte de código de barras, legible en vertical, y que encierra un número de un dígito. Sin embargo, no se recoge de la citada marca ningún tipo de información métrica, pues sólo se usa para que, en conjunción con varias marcas más en lo que Röfer denomina *constelación de marcas*, se *confirme* que la marca natural encontrada (p.e., una puerta o bifurcación) es una determinada de entre las posibles. De ahí el nombre de *routemark* (marca de ruta) dado a este sistema [Röfer 98a].

No obstante, los esfuerzos del grupo de Bremen parecen haberse desviado de la navegación autónoma hacia la conducción asistida, tal y como se documenta en [Lankenau 01], donde se hace más énfasis en la detección de obstáculos y en una suerte de navegación reactiva, basada principalmente en *dead-reckoning*, junto a comportamientos básicos con los sensores de US, tipo *seguimiento de paredes*, etc.

Marcas métricas

El hecho de usar marcas artificiales, de propiedades geométricas conocidas, habilita la posibilidad de extraer información sobre la orientación y/o posición del móvil. En la Universidad Carlos III de Madrid se ha desarrollado uno de estos sistemas [Armingol 98]. Como marca se usa un círculo negro colocado en posiciones conocidas de las paredes de un recinto dado; para la detección del círculo se usa una correlación normalizada sobre toda la imagen. La velocidad máxima del móvil en el experimento fue de 30cm/s (aprox. 1km/h), notablemente inferior a la deseada para una SRA;

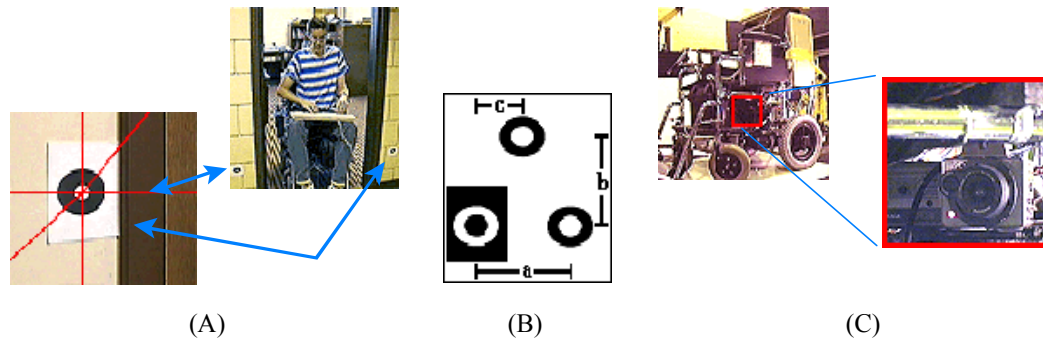


Figura 2-20: Sistema de Marcas de Steven B. Skaar. (A) Situación de las marcas. (B) Versión aplicable a medidas de posición-orientación. (C) Situación de las cámaras en la SRA.

para un recinto de 12×7 m se usaron 7 marcas, todas ellas idénticas entre sí, lo que obliga a realizar una inicialización del sistema para deshacer ambigüedades y poder realizar el seguimiento adecuado de la ruta trazada. Además, la única información métrica extraída de la marca es su orientación relativa respecto a la cámara.

Con el fin de acelerar el procesamiento de imágenes, tanto Kim y Cho [Kim 94] como Taylor y Kriegman [Taylor 98] usan una exploración unidimensional de la imagen, sólo en las líneas horizontales (filas), siendo la marca un conjunto de barras de propiedades geométricas conocidas. Utilizando una propiedad invariante de la proyección de imágenes, como son las dimensiones relativas de las barras (*cross-ratio*) es posible discriminar fiablemente la marca del fondo. Taylor y Kriegman necesitan dos marcas al menos para estimar la posición del móvil, pues sólo recuperan información de orientación siendo la distancia a la marca meramente estimada por su dimensión en la horizontal. Sin embargo, Kim y Cho sí extraen ambas informaciones, aunque el error en la medida de la distancia es considerable (± 15 cm a 1'5 m de la marca).

El equipo del *Automation and Robotics Laboratory*²⁶ de la Universidad de Notre Dame, Indiana, U.S.A., liderado por Steven B. Skaar, utiliza por su parte marcas circulares para mejorar y corregir, en su caso, el posicionamiento del vehículo en puntos de paso difíciles como las puertas, usando *dead reckoning* para la navegación normal [Yoder 96]. En este sistema se posicionan dos marcas, a ambos lados de los puntos de paso, con alturas fijas tales que sendas cámaras miniatura, en los laterales del vehículo, puedan verlas sin problemas al pasar cerca de ellas (ver figuras 2-20-A y C). Por triangulación en ambas imágenes, y sólo sobre el plano XY (de tierra), se realiza la corrección fina de la posición estimada.

La marca elegida es mucho más rápida de segmentar que en el caso de [Armingol 98] y es similar,

²⁶<http://www.nd.edu/NDInfo/Research/sskaar/Home.html>

por su fundamento geométrico, al caso de las unidimensionales de Kim y de Taylor. Dado que la proyección de los círculos concéntricos mantienen una forma elipsoidal si la distancia es mucho mayor que la distancia focal de la cámara, un procesamiento simple de líneas en las direcciones vertical y horizontal (columnas y filas) permite identificar un patrón regular cuyo centroide es fácil de determinar (figura 2-20-A). En otros trabajos del mismo laboratorio (con actividades en el campo de la Ingeniería Aeroespacial) se usa una versión extendida de la marca, la cual se muestra en la figura 2-20-B; al disponer de más puntos (tres en este caso) se puede establecer con cierta precisión la orientación y posición relativas entre cámara y marca, partiendo de las distancias 'a-b-c' entre centros.

Un sistema parecido se presenta en [Amat 99]. Aquí, la marca usada es un rectángulo del cual se extraen datos de al menos tres de sus esquinas usando un sistema de visión estereoscópica. Con estos puntos se recupera la posición y orientación en 3D del móvil (en este caso, un minisubmarino no tripulado de mantenimiento).

Una solución conceptualmente similar se emplea en [Coelho 99], sólo que en esta ocasión la marca consiste en tres círculos negros, sobre fondo blanco, cuyos centros forman un triángulo rectángulo. Además sólo se usa una cámara para determinar la posición/orientación relativas entre cámara y marca, si bien en ésta ocasión la cámara es fija y la marca está en el móvil (un dirigible autónomo).

Llama la atención la función de la marca usada en [Martens 01]. Se trata de cuatro círculos (uno de ellos más grande) cuyos centros dibujan un rectángulo; esta marca, por lo demás de pequeño tamaño, se adhiere a pequeños objetos, como vasos o botellas, destinados a ser manejados por un brazo robótico de asistencia a minusválidos. Una minicámara en el manipulador del brazo robótico permite localizar con precisión y rapidez el objeto deseado.

Marcas codificadas

Adicionalmente al posicionamiento geométrico, el uso de marcas artificiales también posibilita la inclusión de alguna información adicional sobre su identidad, usando para ello algún tipo de codificación fácilmente recuperable por un sistema de visión. Ya en [Madarasz 86], en donde se describe una de las primeras sillas de ruedas robóticas documentadas, se utiliza una marca circular negra, con una serie de puntos blancos en su interior que codificaban el número de la habitación en cuya puerta se instalaban las citadas marcas. También Röfer usaba marcas codificadas, como ya se indicó anteriormente, aunque sin recuperar información geométrica detallada de las mismas, sólo una cierta idea de distancia a la marca basada en su tamaño relativo en la imagen.

El uso de códigos de barras resulta muy útil en entornos altamente estructurados en donde incluso un humano puede perder su orientación; así P. Beattie, de la Universidad de Reading, UK,

implicado en el proyecto de la silla *SENARIO*, manifiesta en [Beattie 95] la posibilidad de usar tales códigos en la auto-localización del móvil, aunque finalmente la estrategia adoptada fuera otra [Beattie 98], basada en un *scanner* láser SICK.

A pesar de sus posibilidades no es fácil encontrar ejemplos de uso de los códigos de barras y sistemas de visión pasivos en la auto-localización de robots móviles (recuérdese que los sistemas activos, con *scanners* láser están excluidos de este estudio); Jörg *et al.*, de la Universidad de Kaiserslautern (RFA), presentan en [Jörg 99] un sistema de localización de un robot móvil en ambientes fuertemente estructurados. Para ello, emplean un código de barras, legible en sentido horizontal, codificado con arreglo al estándar alfanumérico *Code 39*. El código encerrado es, en principio, simplemente la identificación de un recinto cualquiera (en su puerta o muro) sin ningún propósito métrico, de una forma similar a lo realizado por Madarasz *et al.* en [Madarasz 86].

2.3.5 Conclusiones

Del estudio de los distintos sistemas de localización y posicionamiento usados por numerosos equipos de investigación, y tomando en cuenta las prestaciones necesarias y las restricciones marcadas para su aplicación realista a una Silla de Ruedas Autónoma, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Una SRA debe ser capaz de desplazarse en entornos muy variables, incluso en algunos no visitados previamente, y con velocidades adecuadas a las que un usuario real desea.
- En ocasiones, la estructura del entorno al móvil será altamente repetitiva (p.e. hospitales, edificios de oficinas, etc.) con pasillos, puertas y habitaciones indistinguibles entre sí con sensores exclusivamente de medida de distancias.
- Para evitar ambigüedades en la auto-localización del móvil, consecuencia de lo dicho en el punto anterior, algún sistema de reconocimiento de marcas distintivas ha de ser incorporado.
- Entre los sistemas de localización que usan marcas naturales y los que usan marcas artificiales, estos últimos son de una flexibilidad y fiabilidad notablemente superior.
- En todo caso, el sistema ha de poseer unas prestaciones suficientes y un coste asumible por un posible usuario de SRA's, lo que excluye ciertos sistemas activos (p.e. balizas láser y demás).
- Si es posible, el sistema debiera ser fácilmente portable a cualquier entorno en el que un usuario de SRA pudiera querer desplazarse, lo que de nuevo incide negativamente sobre los sistemas activos por su alto coste de implantación incluso en un edificio o centro público (p.e. hospitales, ministerios, etc.).

Entre todas las posibilidades presentadas, el autor de esta tesis considera más apropiada la utilización de marcas artificiales pasivas, en conjunción con un sistema de visión a bordo del vehículo. Las razones que avalan esta opción son las siguientes:

- Los sistemas de visión disponibles en la actualidad pueden aprovecharse de los costes reducidos generados por las tecnologías multimedia: procesadores baratos, como los PC estándar, y cámaras de prestaciones suficientes y coste muy reducido.
- Es previsible una mejora aún más radical en los sistemas citados, incorporando buses serie rápidos capaces de manejar, si fuera necesario, más de una cámara con un único interfaz, como es el caso del IEEE-1394 (*FireWire*), todo ello manteniendo un coste muy aceptable.
- Usando marcas pasivas, p.e. un patrón impreso en una hoja de papel, cualquier usuario podría marcar su entorno más inmediato. Además, el coste de implantación en otros entornos sería muy escaso.

Además, el autor propone combinar, en una sola marca, propiedades métricas de precisión con algún sistema de codificación fácilmente reconocible por un sistema de visión artificial. Para ello es suficiente incluir, de una forma adecuada, los siguientes elementos:

1. patrones geométricos de localización rápida y suficientemente precisa,
2. un código de barras, que incorpore la información necesaria.

En lo que el autor ha podido contrastar en la literatura científica a la que ha tenido acceso, no existe actualmente ningún sistema que combine precisión en la localización con una información codificada detallada, pues, como se demostrará en los siguientes capítulos, los sistemas con precisión aceptable no incluyen codificación, mientras que los sistemas que sí tienen codificación carecen de precisión.

Capítulo 3

Contexto de desarrollo de la tesis: proyectos UMIDAM y SIAMO

El Grupo de Asistencia a la Movilidad del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, en el que el autor de esta tesis desarrolló sus principales tareas de investigación, ha realizado numerosas aportaciones al campo de la Asistencia a la Movilidad entre el año 1991, fecha de comienzo de las mismas, y la actualidad; uno de los frutos de estos esfuerzos es, precisamente, el presente trabajo. Las actividades principales se han encuadrado dentro de una serie de proyectos denominados *UMIDAM* en sus diversas fases, y finalmente *SIAMO*.

Los proyectos *UMIDAM* (acrónimo de *Unidad Móvil Inteligente De Ayuda a la Movilidad*) comienzan en 1991 mediante un contrato con la empresa Ciberveu S.A., dependiente de la Fundación ONCE, siendo su propósito inicial el desarrollo de una silla de ruedas controlable por voz. Para este primer prototipo se modificó una silla de ruedas motorizada estándar añadiendo una unidad de control mediante un PC-AT y un módulo de reconocimiento de voz, dependiente del usuario, por *matching* de las características vocales con una serie de comandos pregrabados. La unidad de control se conectaba en paralelo con el *joystick* original de la silla no existiendo más realimentación del estado del vehículo que el propio usuario; se trataba en suma de una unidad de guiado [Maíllo 93] [Méndez 93]. Este vehículo, a pesar de las premuras y escasez de medios en su fase inicial, se expuso en el *stand* que la ONCE mantuvo en la EXPO'92 de Sevilla.

La buena acogida de los resultados del proyecto entre los responsables del Grupo ONCE motivaron la continuación de la idea *UMIDAM* en dos proyectos posteriores, desarrollados en 1992 y en el periodo 1993-94, respectivamente. En ambos casos los prototipos diseñados y construidos, conocidos como *UMIDAM-I* y *UMIDAM-II*, representaron un avance notabilísimo, al incluir una

completa estructura sensorial de seguridad (con ultrasonidos e infrarrojos) y una nueva arquitectura distribuida basada en módulos con microControladores de la familia 8051, unidos mediante un Bus Serie [Mazo 95b] [Mazo 95a].

La experiencia acumulada, por un lado, y el contraste de las soluciones del equipo *UMIDAM* con las planteadas por otros equipos de investigación, por otro, cuajaron en los prototipos *SIAMO* (acrónimo de **Sistema Integral de Ayuda a la MOvilidad**). El proyecto *SIAMO* se desarrolló entre los años 1996 y 1999, con financiación CICYT y del IMSERSO con referencia TER96-1957-C03-01. Su propósito fue el de aportar soluciones avanzadas en aspectos clave para cualquier silla de ruedas con pretensiones de poseer una autonomía de movimientos real. Es en este punto en el que se encuadra el **Sistema de Autolocalización y Posicionamiento** descrito en esta tesis, aunque las aportaciones de su autor dentro del proyecto *SIAMO* abarcan algunos campos de desarrollo complementarios y que serán descritos brevemente en su contexto.

En las siguientes secciones se realizará un estudio y exposición de las premisas necesarias para el diseño de una SRA, como el sistema *SIAMO*, detallando a continuación las características definitorias de las soluciones adoptadas y, en su caso, las aportaciones que el autor ha realizado en el conjunto del proyecto, excepción hecha de ciertos detalles específicos del sistema de localización objeto principal de esta tesis, los cuales se detallarán en capítulos posteriores.

3.1 En busca de un *lugar común*

En el capítulo anterior se hizo hincapié en las tres líneas de actuación fundamentales para el desarrollo de un Sistema Robótico Autónomo de Asistencia a la Movilidad. Estas líneas son:

- Arquitectura de Control.
- Interfaz Hombre-Máquina.
- Sistema Sensorial.

No todos los grupos de investigación han abordado todos los aspectos planteados ni lo han hecho de la misma forma; pero en muchas ocasiones las soluciones adoptadas parecen converger hacia un punto similar, incluso a partir de orígenes distintos y de forma independiente; esto parece indicar la existencia de una suerte de *lugar común* en donde se ubicaría la solución si no óptima sí, al menos, la más conveniente. Esta sección se ocupa de sintetizar diversas experiencias para encontrar ese lugar común en la especificación de un vehículo de asistencia a la movilidad, como es una SRA.

Ante todo hay que tener muy presente que se trata de un vehículo *para* una persona, con restricciones motrices o cognitivas más o menos severas, pero con necesidades específicas que espera

ver resueltas por la SRA. En definitiva, el diseño debe comenzar por el *Usuario*, con mayúscula, y por él comienza el siguiente estudio.

3.1.1 Qué define al Usuario de un Sistema Autónomo

Nunca hay que perder de vista que se trata de afrontar y proponer soluciones al problema de la Autonomía de discapacitados motrices graves. Aquellos que su única discapacidad es la parálisis en las extremidades inferiores, pero poseen una capacidad normal tanto en sus brazos como en su intelecto, **no necesitan** una ayuda motriz autónoma o inteligente. Sus intereses más bien se dirigen a detalles fácilmente resolubles por la industria [Friman 99]: tamaño reducido, fiabilidad de los componentes, duración de las baterías, comodidad del asiento, surtido de colores, organización de los servicios de repuestos y mantenimiento, etc.

Acceso al entorno

Otros intereses del colectivo de discapacitados motrices son los de accesibilidad al entorno; aquí encontramos dos tipos de problemas o necesidades:

- Accesibilidad física a lugares y recintos. Su solución pasa por la eliminación de barreras arquitectónicas y por la mejora de las plataformas motrices.
- Control del entorno. Todos los usuarios de sillas de ruedas han visto en la Tecnología un campo de enormes posibilidades para el control directo de su entorno inmediato: electrodomésticos, iluminación, ascensores y rampas automáticas, etc.

En concreto, el problema que desearían ver resuelto es el de un **interfaz común** a ese entorno, que les permitiera actuar sobre el mismo con un único dispositivo a bordo de su vehículo. Traduciendo el deseo de prácticamente el 100% de usuarios de sillas de ruedas a términos tecnológicos se abren dos líneas de actuación:

1. Investigación sobre Arquitecturas de Control con el propósito de ser Universales y permitir el uso de un único Interfaz entre todos los elementos del Entorno, doméstico o público, del usuario.
2. Desarrollo de un Interfaz Hombre-Máquina que permita ese control del usuario sobre el entorno de una forma fácil, intuitiva y con un único terminal.

Por ejemplo: actualmente es muy común observar cómo los usuarios de sillas de ruedas mantienen adherido al *joystick* o en sus proximidades (esto es: fácilmente a su alcance) un teléfono móvil, muy

frecuentemente con dispositivo de manos libres. Aunque no existen estudios sobre esta cuestión es fácil suponer lo que la revolución de la telefonía móvil ha supuesto para estas personas.

Necesidades de los discapacitados severos

El verdadero campo de acción de los Sistemas Robóticos Autónomos son aquellos cuyas capacidades, tanto motoras como intelectuales, están notablemente disminuidas. Aunque aparentemente este colectivo es mucho más reducido que el anterior, la tendencia puede ser de notable aumento en el futuro por culpa del notable envejecimiento de la población en los países más avanzados.

La mayor longevidad no viene acompañada, desgraciadamente, de una garantía de mayor calidad de vida: el deterioro físico e incluso psíquico hace de ésta una etapa dura. Este colectivo de personas ancianas **sí necesita** en muchas ocasiones de un apoyo que puede ser brindado por la Tecnología de la Asistencia a la Movilidad.

Las prestaciones deseables por este colectivo abarcan algunas de las siguientes:

1. Actuación fácil y a ser posible automática sobre los movimientos de la silla, obedeciendo en todo caso los deseos del usuario.
2. Si fuera posible, desplazarse entre dos localizaciones especificadas por el usuario sin necesidad de intervenciones posteriores y/o correcciones de ruta.
3. Por supuesto quieren desplazarse a velocidades normales, esto es, como una persona andando o más rápido, si se puede. Una velocidad máxima de 5-6m/s (hasta 20km/h) y al menos de 1m/s (como un paseo, a 3.6km/h) debe ser garantizable.
4. Seguridad: evitar accidentes de cualquier naturaleza, sea por choque contra elementos fijos u otros móviles o bien por caídas.

Este último caso es por excelencia el problema número uno de las SRA, en general: evitar caídas por huecos, como los de escaleras y similares, o de las aceras, por superar el límite de los bordillos lateralmente con lo que la silla puede hasta volcar y el usuario quedar tendido en mitad de la calzada.

3.1.2 Lo que se le pide al Sistema Sensorial

El sistema sensorial a bordo de la SRA debe dar respuesta a las necesidades de Seguridad y Autonomía, detectando obstáculos de forma fiable, principalmente obstáculos cóncavos (huecos) y reaccionando eficazmente ante los inevitables choques. El reconocimiento del entorno es deseable, pero lo es más la idea más genérica de *saber dónde* se encuentra el vehículo y *cómo llegar* al destino.

Las prestaciones más inteligentes, como reconocimiento automático del entorno, auto-elaboración de un mapa de navegación, etc. parecen secundarios, pues una alternativa válida puede ser la pre-carga del mapa por medios automáticos e inclusive manuales. Así, recorrer y grabar una ruta dada con la propia SRA es perfectamente asumible [Craig 93] [Levine 99].

Sin embargo, no es admisible una inadecuada estructura sensorial, tanto por defecto como por exceso.

- Una estructura sensorial deficiente hace inútil a efectos prácticos la SRA: pocos sensores de distancia, ausencia de detección de choques, navegación exclusiva por *dead-reckoning*, son algunos ejemplos. Un usuario nunca toleraría el quedarse bloqueado contra la pata de una mesa por no haberla detectado.
- Una estructura sobredimensionada puede acarrear el efecto contrario, por ejemplo: los sistemas de medida de distancias, *range-finder*, láser comerciales poseen un coste comparable e incluso superior al de la propia silla; el coste final sería prohibitivo sin garantizar además el 100% de éxito en situaciones peligrosas.

Debe equiparse al sistema con un número y tipo de sensores adecuado para un balance prestaciones-coste más ajustado al existente en aplicaciones de otro tipo, como industriales, militares o aeroespaciales. Esta estructura sensorial debiera ser fácilmente reconfigurable para que una única arquitectura base pueda servir a distintos colectivos y aplicaciones.

3.1.3 Qué debe tener el HMI

Los usuarios piden ante todo poder gobernar los movimientos de la silla de la forma más cómoda posible. En el caso de no poder actuar sobre un *joystick* lineal, se prefieren dispositivos de ayuda a la conducción que no exijan una atención excesiva, que permitan libertad de movimientos y de visión y con un tiempo de reacción suficientemente rápido como para poder evitar choques y/o caídas.

Si hubiera prestaciones programables, el interfaz al usuario debe ser claro e intuitivo, recuérdese que muchos de los potenciales usuarios son personas de edad avanzada con escasos conocimientos de informática y poco interés en aprenderla; otros usuarios son incapaces además de actuar con precisión sobre objetos estáticos, cuanto menos de accionar el menú de un programa gráfico, aunque la pantalla sea táctil. Los usuarios de sillas de ruedas motorizadas son muy prácticos: aprecian las prestaciones reales del HMI, no *el aspecto* del mismo.

Pero si hubiera que definir las especificaciones en una sola frase esta sería: **dominio, con seguridad**. Los usuarios de sillas de ruedas motorizadas suelen reaccionar con mucha cautela ante cualquier avance, fuera de las soluciones estándar adoptadas por la industria. En esto no son

distintos del resto de los conductores de un vehículo motorizado: el vehículo **debe** obedecer los comandos del usuario y satisfacer así su deseo de desplazarse a otra localización. Lo que diferencia a este colectivo es su indefensión en caso de peligro o de simple colisión: su rapidez de reacción unida a la del sistema delimita claramente su confianza en el vehículo ante esas circunstancias.

Como conclusión, desde el punto de vista del tecnólogo puede establecerse que HMI y Estructura Sensorial han de ir unidas: a la hora de conducir el vehículo el usuario debe sentirse seguro, confiando en que el vehículo reaccionará siempre bien ante situaciones imprevistas. En cuanto a la definición del HMI en sí hay que tener en cuenta las limitaciones reales del usuario y pensar en su confort, por ejemplo usando procedimientos de programación o actuación **simples, fáciles de recordar** y, en consecuencia, fáciles de incorporar al subconsciente **como un acto reflejo más**, casi como es el andar para el resto de las personas.

3.1.4 Otras prestaciones

Desde el punto de vista del usuario de una SRA son aspectos intrascendentes la estructura *hardware* o *software* del sistema; pero sí es cierto que cada discapacitado quiere una solución adaptada a **su** problema específico, y la variedad de los mismos es amplia.

Desde el punto de vista tecnológico esto hace aconsejable adoptar **soluciones modulares**, fácilmente reconfigurables para cada caso particular. Si el sistema se basa en mensajes, en vez de en tensiones o corrientes, el cableado se universaliza, valiendo un sólo interfaz para casi todo. Si además los mensajes son en serie, el cableado se minimiza. Si el Bus usado es además algún estándar industrial, el número de empresas que puedan desarrollar periféricos y, en consecuencia, el coste de los mismos se reducirá. Si, por último, los periféricos son programables, podrán ser modificados y *ajustados* específicamente al usuario del que se trate.

Las prestaciones de **navegación autónoma** son muy apreciadas por las personas con graves discapacidades, para los que cualquier movimiento *controlado a su voluntad* representa una sensación altamente gratificante. No obstante, y precisamente por razones de seguridad, no existen todavía a su disposición Sillas de Ruedas Autónomas, fuera de los grupos de investigación. Lo más parecido a una autonomía de movimientos es el seguimiento de líneas en el suelo: para ellos es suficiente, aunque tecnológicamente podría ofrecérseles más. No obstante, la **velocidad de desplazamiento** debe ser acorde con la aplicación: vehículos que se muevan a algunos centímetros por segundo pueden ser también inútiles para este colectivo, por muy inteligentes que sean los controladores incorporados por el sistema.

3.2 Definición de la arquitectura *hardware*

Pueden distinguirse dos niveles en las diferentes arquitecturas de SRA existentes: el nivel físico (*hardware*) y el nivel lógico (*software*), siendo éste último parcialmente independiente del primero. No obstante, las posibilidades funcionales y el coste del sistema está más ligado al nivel físico que al lógico, por lo que el primer criterio de decisión es la definición del *hardware* del sistema. A grandes rasgos, las arquitecturas a nivel físico de los diferentes sistemas de SRA responden a alguna de las siguientes líneas:

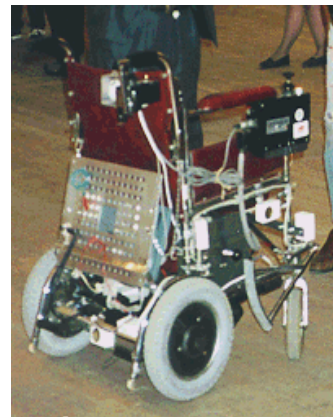
- Control centralizado, monoprocesador.
- Control centralizado, multiprocesador.
- Control distribuido, multiprocesador.

Control centralizado, monoprocesador

La solución más común parte de una silla motorizada comercial básica a la que se le añade una unidad de control basada en un PC comercial. A este esquema pertenecen los sistemas *INRO* y el *NavChair* de la Universidad de Michigan, entre otros ya descritos, y *ROLLAND*, que no es otra cosa si no la segunda versión de la silla Bremen (figura 3-1-a).



(a)



(b)

Figura 3-1: Sillas con arquitectura centralizada: (a) *ROLLAND*, silla autónoma de la Universidad de Bremen; (b) Silla construida en la Universidad de Plymouth.

Una gran ventaja derivada del uso de recursos ligados al sistema PC son bajo coste y alta potencia de cálculo en la unidad central, así como un amplio repertorio de recursos *software*. Pero el

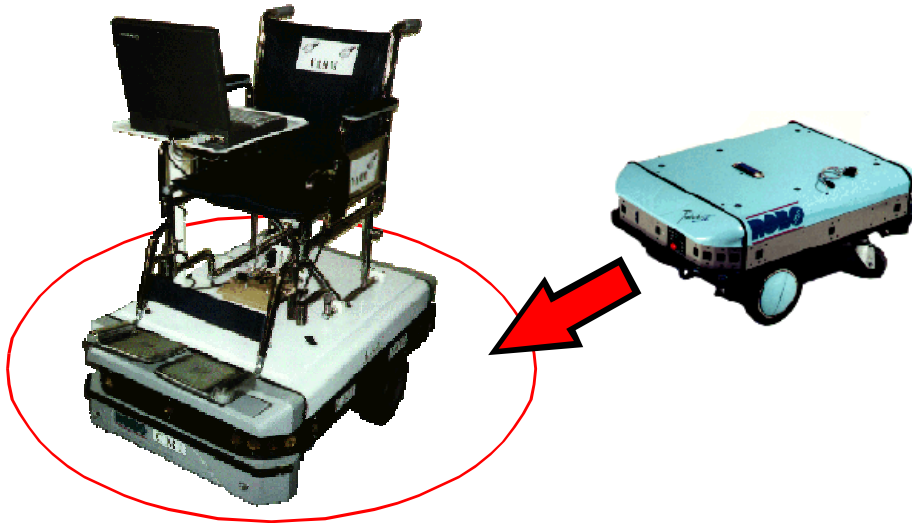


Figura 3-2: Primer prototipo VAHM (1997), Universidad de Metz (Francia); la base es un robot móvil comercial.

inconveniente estriba en su propia estructura centralizada. La conexión entre las unidades sensoras y los actuadores del sistema (motores, etc.) se realiza mediante cableado dedicado usando puertos específicos de Entrada/Salida [Schilling 98b] o mediante tarjetas periféricas de E/S diseñadas al uso [Civit-Balcells 96]; de esta forma resulta difícil modificar o actualizar el *hardware* del sistema para adaptarse a nuevas necesidades, nuevos sensores o a cambios en la configuración del mismo.

En definitiva, el control centralizado monoprocesador puede ser aconsejable como medio de desarrollo rápido de prototipos, con un coste reducido en el sistema procesador y abundantes herramientas tanto *software* como *hardware*. Estas características inciden favorablemente cuando se pretende principalmente probar otros subsistemas de la SRA, como por ejemplo el sistema sensorial, estrategias de navegación, etc. Este es el caso concreto del prototipo de la Universidad de Plymouth (UK) el cual incorpora un PC portátil basado en un Pentium y equipado con una estructura sensorial restringida (ver figura 3-1-b) únicamente para poder probar ciertos algoritmos de control neuronales [Bugmann 98].

Control centralizado, multiprocesador

El principio de diseño coincide en principio con el anterior: se parte de una plataforma estándar a la que se le añaden las interfaces de E/S necesarias para acceder a las informaciones de los sensores y elementos de mando y poder actuar sobre las unidades motoras. Un sistema centralizado multiprocesador típico se basa en sistemas de Bus Paralelo como el VME.

En esta línea se encuentran los trabajos del grupo del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISAM) de la Universidad Politécnica de Madrid [Matía 98b] y el *Vehicule Autonome pour Handicapés Moteurs* (VAHM: Vehículo Autónomo para Discapacitados Motrices) [Bourhis 98] del Laboratoire d'Automatique des Systèmes Coopératifs de la Universidad de Metz, en Francia. Ambos sistemas se encuentran montados, literalmente, sobre una plataforma de robot móvil genérica, como es el *Robuter* de la empresa francesa Robosoft (fig. 3-2). La unidad de control de este sistema es un bastidor VME con tarjetas dedicadas de control de motores y sensores.

Su máxima ventaja, inherente a los sistemas VME, reside en la utilización de componentes y sistemas estandar en robótica industrial y en la posibilidad de paralelización de procesos mediante el uso de varios procesadores independientes. Sin embargo, el uso de esta arquitectura se liga, casi de forma exclusiva, con la experimentación de estructuras *software* de control, pues se trata de una solución claramente desventajosa frente a la anterior, principalmente en términos de coste, compartiendo además todos sus inconvenientes: escasa flexibilidad y compleja configuración *hardware*. Una desventaja adicional es el elevado consumo típico de las tarjetas procesadoras y periféricas VME estándar, lo cual limitaría la autonomía del vehículo y, en consecuencia, su utilidad práctica.

Control distribuido, multiprocesador

Las soluciones más flexibles y con mejor relación prestaciones/coste se basan en sistemas distribuidos en los que la inteligencia del sistema reside en múltiples *Unidades de Proceso Dedicadas*, intercomunicadas por uno o varios canales serie.

En el sistema *OMNI* [Hoyer 96][Borgolte 98], la estructura sensorial está constituida por una red de microcontroladores HC11 en un sistema de bus serie síncrono SPI, unidos mediante un canal adicional asíncrono RS232 a una unidad central de proceso basada en un PC industrial, que realiza tareas de fusión de datos y mapeo del entorno.

La arquitectura de la silla *Smart*, segunda versión, que se detalla en la figura 3-3, también consta de una unidad central comunicada con el resto de los subsistemas de la silla de ruedas mediante sendos canales serie; cabe destacar que la mayor parte de los subsistemas sensoriales y de comando (módulo seguidor de líneas, sensores de distancia, joystick, etc.) se encuentran conectados a un Bus de Campo serie, tipo I^2C , sólo se exceptúa un sintetizador de voz y una interfaz genérica a otros dispositivos mediante los puertos serie asíncrono RS232.

Las arquitecturas distribuidas tienen como principal ventaja la de operar vía mensajes; esto es: las informaciones de configuración, estado y comandos entre los elementos del sistema, se realizan mediante el intercambio de datos siguiendo un protocolo prefijado. La actualización o reconfiguración de los diversos subsistemas se facilita grandemente al no ser necesario realizar recableados de

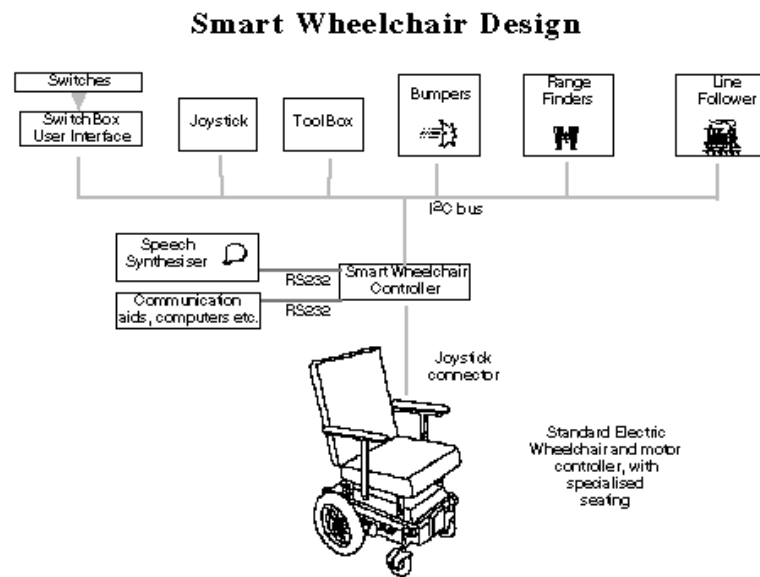


Figura 3-3: Arquitectura *hardware* de la *Smart Wheelchair*, basada en un Bus Serie tipo I^2C .

conexiones físicas sino sólo lógicas: añadir, quitar o cambiar una determinada prestación del sistema se logra insertando un nuevo elemento en el Bus y reconfigurando la programación, simplemente.

El aumento objetivo de las prestaciones de una silla de ruedas que siga esta estructura justifica la elección de esta configuración como la óptima de entre las enumeradas anteriormente, tanto a nivel *hardware* como a nivel *software*.

3.2.1 La experiencia del proyecto *UMIDAM*

Como ya se ha presentado en la introducción de este capítulo, el Grupo de Asistencia a la Movilidad del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, y tras la primera experiencia en control centralizado con PC [Mañillo 93], abordó la construcción de un sistema distribuido basado en una red de μ Controladores de la familia 8051; en [Mazo 95b] se describe el sistema de Bus Serie que incorpora *UMIDAM-I*, un protocolo basado en una unidad *Master* que controla el acceso al canal del resto de los nodos del sistema, que actúan como *Slaves*. Una evolución de la anterior estructura, presente en *UMIDAM-II* [Mazo 95a], eleva todos los nodos al mismo nivel jerárquico, usando un acceso múltiple al Bus, sin necesidad de nodo *Master*, mediante un protocolo tipo CSMA/CD. En ambos casos, el estudio, definición y desarrollo de los Buses Serie corrió a cargo del autor de esta tesis.

La figura 3-4 ilustra la arquitectura de la *UMIDAM-I*; la versión *II* es idéntica, salvo por la exclusión del módulo central y ciertos detalles menores tanto en *hardware* como en *software*. Desde

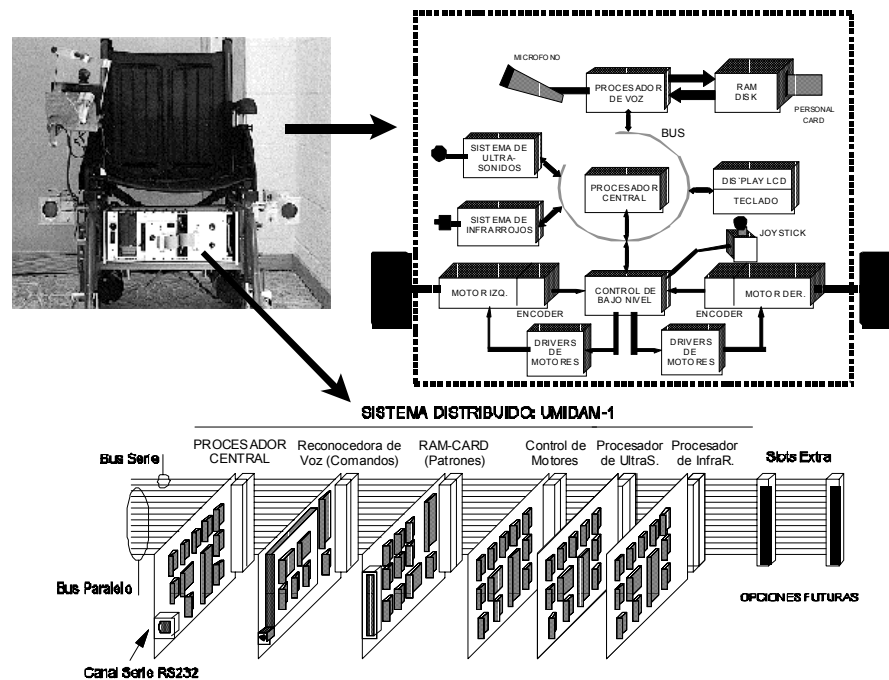


Figura 3-4: Esquema de bloques y configuración física del sistema de control distribuido a bordo de las sillas *UMIDAM*

el punto de vista de la Arquitectura *hardware* del sistema, las experiencias extraídas en las tres fases del proyecto fueron las siguientes:

- El uso de módulos funcionales independientes es altamente positivo, por diversos motivos, como por ejemplo la simplificación de especificaciones en el desarrollo de cada módulo y la mayor flexibilidad del sistema.
- La fiabilidad del sistema global es función directa de la del sistema de comunicaciones, esto es, del Bus Serie usado.
- El Bus Serie debiera corresponderse con alguno de los estándar en sistemas similares (industriales y/o domésticos) con objeto de hacer factible la interconectividad del sistema a bordo de la silla de ruedas en un doble frente: respecto a equipos y/o accesorios de sillas de ruedas motorizadas procedentes de distintos fabricantes; y en relación con el entorno en el que está inmerso el vehículo.

3.2.2 La elección del Bus del sistema

Las conclusiones anteriores se derivan de una de las premisas de la concepción de cualquier silla de ruedas práctica: la *versatilidad* necesaria para admitir modificaciones al diseño base y adaptarse a las particularidades de cada usuario rápidamente. Caso de tratarse de una SRA, en la que el uso de técnicas de robótica móvil permiten la incorporación de prestaciones avanzadas, un diseño modular permite esta adaptación en términos razonables de coste y tiempo, tanto de desarrollo como de montaje y mantenimiento.

No obstante, las ventajas inherentes a un diseño modular se ven diluidas si cada módulo resultase ser un bloque estanco, con entradas/salidas particularizadas. Aún siendo ésta la solución preferente en sillas de ruedas comerciales éstas poseen, en el mejor de los casos, un número reducido y bien definido de módulos:

- Unidad de potencia: entre batería y motores de ruedas y/o accesorios como los asientos reconfigurables.
- Unidad de comando: sea ésta un *joystick* convencional o adaptado (de mentón, de boca, etc.), o un sistema de pulsadores convencionales.

En consecuencia, la mayor parte de los sistemas comerciales existentes consisten en unos pocos módulos entre los que se establecen conexiones dedicadas, esto es: un conector para cada función. Pero si se trata de construir un sistema robótico, con gran número de unidades sensoras, actuadores y de comando la situación cambia. Con conexiones dedicadas:

- Cada interfaz requiere un repertorio de especificaciones distinto.
- La fiabilidad se reduce debido al número de cables y conectores necesario.
- Cualquier modificación o reconfiguración del sistema instalado acarrea un alto coste y/o un replanteo del sistema completo.

En caso de ser posible, la mejor forma de interconectar numerosos módulos entre sí, de forma rápida y flexible, es mediante un Bus Serie, utilizando además mensajes en lugar de señales dedicadas. Las ventajas son notables:

- Un único interfaz y una única especificación de acceso para cada módulo.
- Mayor fiabilidad *hardware* del sistema, al reducirse el número y volumen de las interconexiones.
- Facilidad de adaptación a nuevas necesidades, mediante la inserción o extracción de los módulos precisos sobre el Bus.

- Facilidades añadidas de reconfiguración y/o mantenimiento, inclusive a distancia, mediante mensajes especiales para tal fin.

Pero aún reconociendo la conveniencia de la adopción de un Bus Serie, la determinación de cuál ha de ser éste no parece ser una tarea trivial. Además, en lo que atañe al objetivo de la Ayuda a la Movilidad mediante una SRA, se debe particularizar a aquellos Buses embarcables en un vehículo de este tipo.

En el *Anexo A* se hace una revisión detallada de los Buses estándar más extendidos tanto en el campo de las sillas de ruedas motorizadas como, abriendo un nuevo campo, en el entorno del discapacitado motriz: domicilio, trabajo, etc. Dentro de los estándar en sillas de ruedas motorizadas (el Bus DX y el M3S), no existen dispositivos comerciales, al menos lo suficientemente extendidos, como para optar claramente por ellos. Así mismo, en lo que atañe a la interconectividad con otros sistemas, principalmente del entorno doméstico y de edificios inteligentes, no existen interfaces directos desde DX y M3S hacia los previsiblemente más extendidos estándar, como el CEBus y el LonTalk. De todas formas, es posible algún tipo de solución multiplataforma, en coherencia con las nuevas tendencias derivadas del salto de Internet hacia el entorno doméstico.

De entre las opciones señaladas, un detalle importante es que sólo LonTalk abarca todos los campos de aplicación potencialmente de interés para el colectivo de personas con movilidad reducida:

- El entorno doméstico, el más inmediato al usuario, pudiendo telecontrolar electrodomésticos, iluminación y unidades de climatización en su hogar.
- El entorno industrial o los edificios inteligentes, permitiendo el acceso tanto a puntos de trabajo automatizados como a recursos comunes (ascensores, etc.), existentes en otros edificios habituales en la actividad diaria: comercios, hospitales, centros públicos, etc.
- El transporte, permitiendo el acceso físico a transportes públicos (p. e., puertas del metro, etc.) o a otros servicios existentes a bordo del vehículo colectivo o privado.

Además, la alta integración hardware/software de LonWorks, y sus propiedades específicas en el campo del control distribuido, decidieron al equipo de investigación de UMIDAM, a adoptar el bus LonTalk en sus nuevos desarrollos. Otros grupos también han aplicado LonWorks en sus investigaciones; así, el asistente robótico PARTNER [Giuffrida 98], diseñado para desplazamiento de materiales en Hospitales, incorpora buses LonTalk tanto dentro del robot como en un sistema de localización externo de infrarrojos; también la Universidad de Reading, UK, dentro del proyecto Ariadne¹, estudia el bus LonTalk para grandes edificios con la función de proporcionar una ayuda

¹<http://www.cyber.rdg.ac.uk/DSRG/ariadne/ariadne.htm>

a la orientación en edificios públicos, sobre todo de personas con movilidad reducida o a bordo de sillas de ruedas.

Es cierto que en la fecha de la elección del bus (en 1995) por parte del grupo de Alcalá de Henares, no todos los parámetros expuestos en esta sección eran conocidos; no es menos cierto también que las circunstancias pueden cambiar notablemente en el futuro, pero a la vista de la evolución de los sectores afectados en estos últimos cinco o seis años la elección tomada ha demostrado ser viable y acertada.

Sin embargo, y para finalizar la discusión en este punto, debe señalarse que el bus en sí no debe ser el fin último de este estudio ni de los diseños e investigaciones futuras. En definitiva lo importante es la demostración de la viabilidad y potencialidades de una solución al problema de la Asistencia a la Movilidad bajo los siguientes supuestos:

- *Organización modular*, para poder adaptar el sistema al usuario, sean cuales sean las carencias motrices y/o cognitivas del mismo.
- Consecuentemente con el punto anterior, interconexión de módulos via un *interfaz serie normalizado*, con el fin de simplificar todos los procesos de adaptación tanto al usuario como al entorno.
- *Capacidad de interacción con el entorno*, sea el más cercano al usuario (su propio hogar) o aquel en el que desarrolle su actividad diaria (trabajo, comercio y transporte).

3.3 Arquitectura del *SIAMO*

La figura 3-5 muestra un esquema de bloques de la SRA *SIAMO*. Lo primero a destacar es la estructura modular del sistema, distinguiéndose a *grosso modo* una serie de grandes bloques funcionales, cada uno de ellos constituido por uno o más módulos e interconectados entre sí mediante el Bus Serie EIA-709, *LonWorks*. Los bloques funcionales presentes en la arquitectura definida son:

- **Control de Bajo Nivel**, relacionado directamente con la plataforma motriz. Esto incluye los *drivers* de motores, *encoders*, etc.
- **Interfaz Hombre-Máquina (HMI)**, que contiene los elementos de interacción de *SIAMO* con el Usuario.
- **Control de Alto Nivel**, que incluye los módulos de Navegación e Integración Multisensorial.

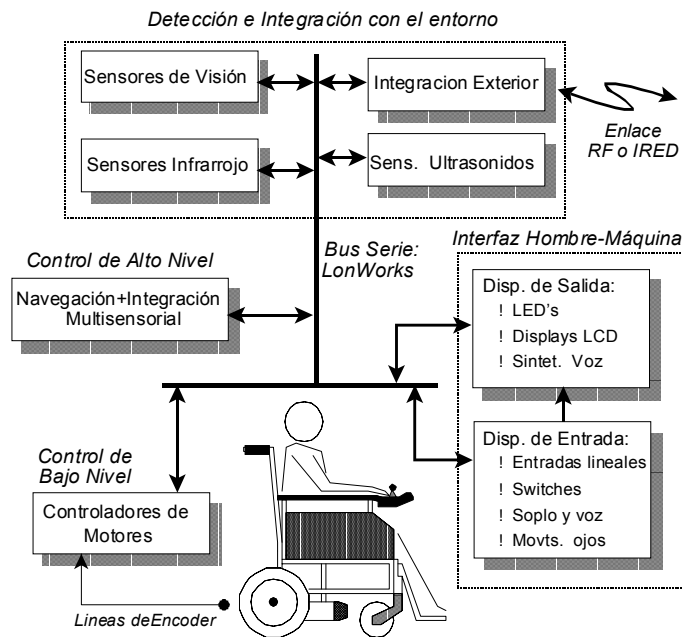


Figura 3-5: Concepción modular y esquema de bloques de las Silla de Ruedas Autónoma *SIAMO*

- **Detección e Integración con el entorno**, en donde se encuentran tanto los módulos sensoriales convencionales (US e IR, por ejemplo) como un módulo específico de comunicación inalámbrica con el exterior, bien sea por enlace infrarrojo o por radiofrecuencia.

La configuración del sistema puede adaptarse con rapidez a necesidades particulares o cambiantes sin más que escoger número y tipo de módulos adecuados, existiendo algunos módulos básicos (como los nodos motores) y otros que pueden incorporarse para extender, adaptar o cambiar el comportamiento de los ya instalados. Así, por ejemplo, la función HMI puede ser equipada o no con un *display* LCD, dependiendo de la voluntad del usuario para poder recibir información textual del estado de otros módulos, como por ejemplo la unidad reconocedora de voz.

Por otro lado, los Sensores de Visión pueden ser procesadores dedicados que entreguen sólo información de alto nivel por el Bus (caso ilustrado en la figura 3-5) o bien formar un sólo conjunto con otras unidades (por ejemplo el módulo de Navegación) si esta unidad tiene capacidad de cómputo suficiente, por ejemplo si se trata de un SBC (*Single Board Computer*). Aunque no es necesario disponer de un SBC para obtener prestaciones de Navegación; así, en [Lázaro 01] se describe un módulo de navegación construido por parte del equipo *SIAMO* y basado en un DSP TMS320C31.

El Bus *LonWorks*, en su versión más simple usando cable de *par trenzado* como medio de transmisión, sólo necesita de tres líneas para funcionar, pero este número se ha elevado para aumentar

la flexibilidad y seguridad del sistema. Así, el número de líneas del Bus *SIAMO* se eleva a seis [García 99b] al igual que en la especificación M3S:

- Dos líneas exclusivas de datos, transmitidas en modo diferencial.
- Dos de distribución de energía, con alimentación de batería y masa.
- Una línea de activación (ON), con funciones complementarias de seguridad.
- Una línea de sincronización temporal *hardware*.

3.3.1 Sistema mínimo y adaptación a nuevas necesidades

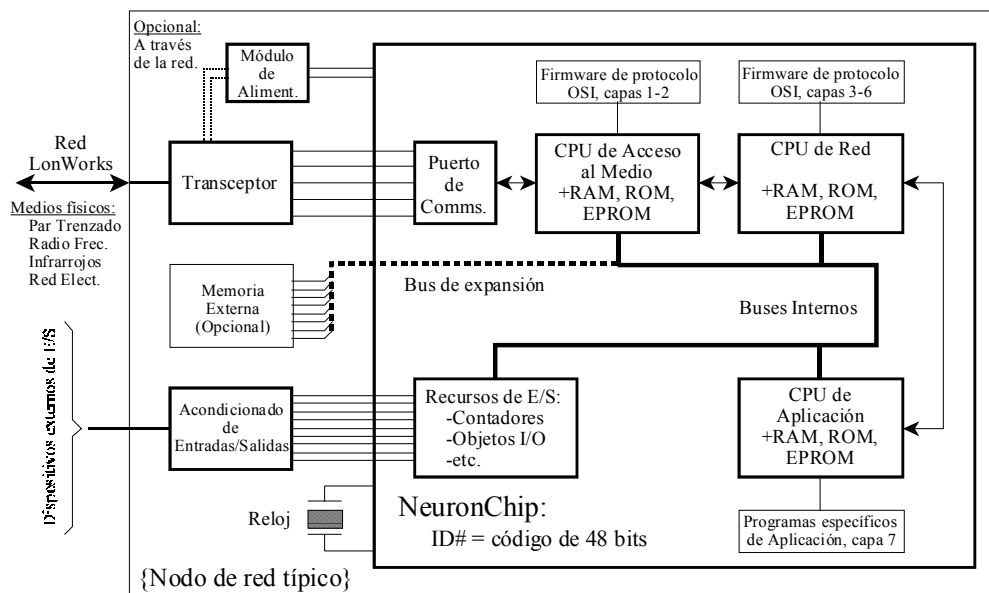


Figura 3-6: Configuración típica de un nodo de red Lon basado en el *NeuronChip*.

En los módulos desarrollados hasta la fecha se ha preferido realizar el acceso al bus mediante el chip específico *NeuronChip*². Una de las principales razones estriba en que el propio *NeuronChip*, además de servir de acceso directo al bus, está diseñado para realizar tareas de control digital mediante un repertorio de hasta 32 objetos de entrada/salida, programables directamente en alto nivel³ (en lenguaje *Neuron C*), de esta forma, los módulos con necesidades de cómputo más reducidas,

²Recuérdese que este chip facilita el acceso a *LonWorks* mediante el *firmware* incorporado. No obstante, puede accederse al mismo con cualquier procesador que incorpore funciones de compatibilidad con el estándar EIA-709.

³Más información a partir de <http://www.echelon.com>

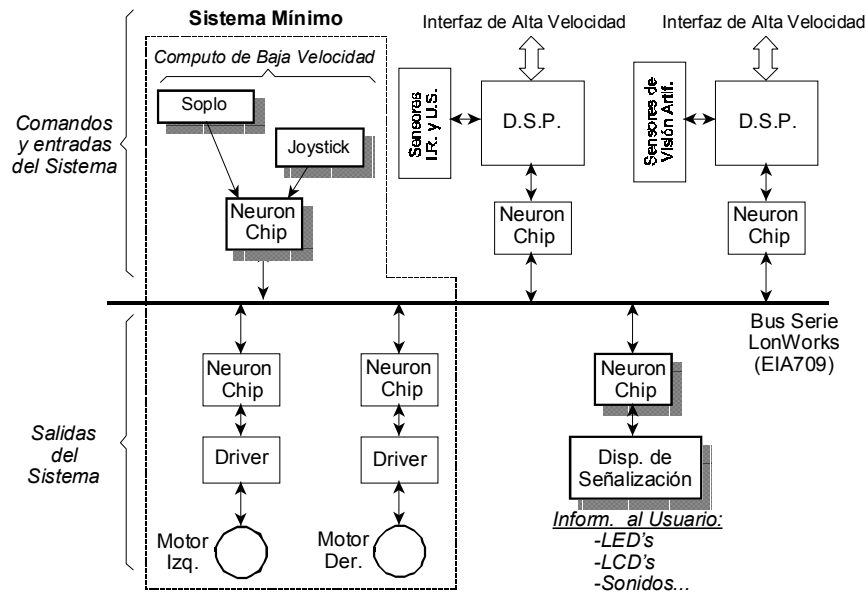


Figura 3-7: Diagrama Funcional de la Arquitectura *SIAMO*: acceso al Bus mediante el microControlador *NeuronChip*. Detalle del 'sistema mínimo'.

como pueden ser por ejemplo el *joystick* o un *display* LCD, están contruidos usando únicamente este procesador con lo que resulta una solución muy compacta.

La figura 3-6 muestra un diagrama de bloques interno de uno de estos nodos. Cabe destacar la presencia de tres CPU's en el interior del C.I., siendo dos de ellas las encargadas de llevar (por *firmware*) toda la gestión de red entre los niveles 1 y 6 del estándar OSI, de forma transparente al programador; éste sólo tiene que programar la tercera CPU a nivel de Aplicación, accediendo a la información presente en Red (tanto en entrada como en salida) directamente en el nivel 7.

El autor de esta tesis, como parte de sus trabajos iniciales dentro del proyecto *SIAMO* y en progresión natural de sus trabajos anteriores dentro de los proyectos *UMIDAM*, desarrolló en primer lugar los módulos del control del bajo nivel de la SRA [García 97], demostrando la viabilidad de controlar en lazo cerrado los motores del vehículo usando sólo un *NeuronChip* en cada módulo motor, mediante los objetos E/S estándar tipo '*lectura de encoder*' y '*salida PWM*'. No obstante, el algoritmo de control no puede ser más ambicioso que un PID con protección *anti-wind-up*, dadas las restricciones en velocidad y capacidad del procesador en tareas de cómputo aritmético.

La principal ventaja de la modularidad de *SIAMO* estriba en que a partir de un sistema mínimo (figura 3-7), que abarca sólo motores y joystick al igual que cualquier silla motorizada convencional, añadir nuevas prestaciones es tan simple como insertar el módulo correspondiente en el Bus y reconfigurar (via mensajes) la funcionalidad del sistema global. Así mismo, cualquier modificación

software puede ser incorporada a través de la propia red.

De esta forma el *SIAMO* se presta perfectamente a dar servicio adecuado a usuarios afectados de enfermedades degenerativas, como la Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA), pues independientemente de la etapa de su enfermedad pueden hacer uso del mismo vehículo (incluso cuando sólo los ojos son activos), sin necesitar de gastos mayores que los necesarios para una actualización [Mazo 01].

Por otro lado, aunque el sistema mínimo dentro de *SIAMO* incluya los nodos motores, es posible utilizar sólo el *joystick* como nodo de interfaz entre una silla convencional y una red LonWorks, habilitando una salida directa hacia las etapas motrices de un vehículo cualquiera, creciendo a partir de ahí el sistema como en el caso anterior. Cabe resaltar que el *joystick SIAMO* no es una unidad carente de inteligencia pues admite formas de manejo novedosas que aportarían valor añadido a cualquier silla convencional; como ejemplo se dispone de guiado por soplo y como controlador discreto [García 00b], lo que permitiría manejar la silla de forma casi convencional (conducción directa) a usuarios con restricciones motrices parciales en los miembros superiores. Esta unidad también ha sido desarrollada por el autor, dentro de los módulos de HMI de *SIAMO*, como contribución al guiado de una SRA por personas severamente discapacitadas; la siguiente sección se detendrá brevemente en los objetivos cubiertos y en sus prestaciones.

3.4 Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

Al igual que en otros grupos de investigación similares, uno de los puntos centrales de los proyectos *UMIDAM* y *SIAMO* fue el estudio y desarrollo de apropiadas Interfaces Hombre-Máquina (*Human-Machine Interfaces*, HMI). Y es que una SRA ha de considerarse como un caso muy particular de la robótica móvil, pues podrá añadirse más o menos inteligencia a la máquina pero siempre hay que dar preferencia al control directo del usuario sobre el vehículo, independientemente de su grado de discapacidad.

Como ya se ha señalado anteriormente, una de las principales ventajas de la adopción de soluciones modulares, como las descritas, es que a partir de la misma estructura básica puede adaptarse rápidamente cualquier silla de ruedas motorizada a las necesidades particulares de cada usuario. Así, incluso en casos severos de discapacidad, los nuevos esfuerzos de diseño pueden centrarse específicamente en aportar soluciones novedosas al problema de la conducción o guiado del vehículo por parte de este grupo de usuarios, limitándose los diseñadores a cumplir con las especificaciones de conexión a una única plataforma base.

Dentro del proyecto *SIAMO*, varios miembros del grupo han abordado el problema de la conducción aportando diversas soluciones, aprovechando para ello cualquier movimiento voluntario del usuario, como son los movimientos de cabeza detectables por una cámara [Bergasa 99] [Bergasa 00],

Movimiento del <i>joystick</i>	Parámetro controlado	Acción
frente	Vel. lineal, V	Incremento
atrás	Vel. lineal, V	Decremento
izquierda	Vel. angular, Ω	Giro Izquierda
derecha	Vel. angular, Ω	Giro Derecha

Tabla 3.1: Acciones del joystick digital sobre el movimiento de la silla.

o los movimientos de ojos [Barea 00] [Barea 01]. En las siguientes secciones, se muestran las aportaciones del autor en este aspecto y que se refieren a modos de conducción que, aún siendo similares al accionamiento directo de un *joystick* convencional, permiten el uso del vehículo a ciertos sectores concretos de discapacitados, adaptándose en lo posible a sus capacidades reales.

3.4.1 Alternativas al *joystick* lineal

Indudablemente, si la capacidad motriz del usuario es suficiente, el mejor método de comando es el *joystick* lineal: el usuario gobierna directamente el vehículo mediante su acción sobre la posición de la palanca. El problema llega cuando el usuario posee también limitaciones motoras en las extremidades superiores, sean estas limitaciones parciales o totales.

La industria especializada dispone de abundantes recursos ante este problema: sistemas *scanner*, *joysticks* de mentón y de dedo [Easy Rider], e incluso un sorprendente sistema de comando por la lengua, usando detectores de contacto en una especie de prótesis dental situada en el paladar [Oraltec].

Como solución novedosa, y aprovechando las características programables del *joystick* desarrollado por el autor dentro del proyecto *SIAMO*, se incorporó a éste una alternativa de guiado, no disponible en el mercado e interesante para aquellos usuarios que no poseen fuerza o precisión de movimientos suficiente para guiar un *joystick* convencional.

3.4.2 El *joystick* digital

El llamado *joystick* digital es sólo un comportamiento más, seleccionable por *software*, del *joystick* estándar incluido en la configuración base de la figura 3-7. La tabla 3.1 ilustra el funcionamiento de este modo de trabajo: los movimientos del *joystick* se traducen en acciones de incrementos-decrementos sobre las velocidades actuales del vehículo, siguiendo un determinado patrón. En todo caso, estas acciones son filtradas por una serie de máquinas de estado internas que garantizan, por ejemplo, el paso por cero de velocidades y comandos antes de procesar otros nuevos.

Así, si la silla estuviera moviéndose hacia adelante con velocidad constante, una acción momen-

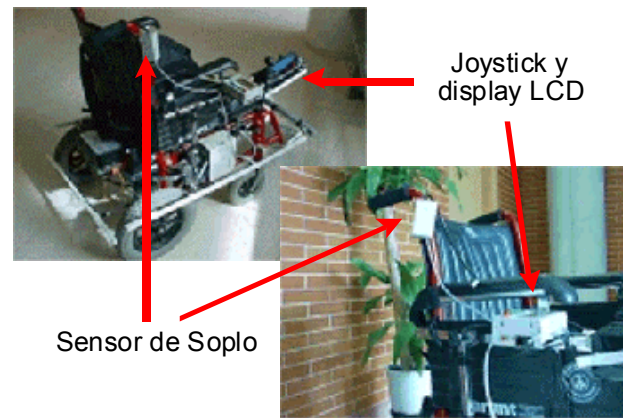


Figura 3-8: Vista general del prototipo: se muestran el alojamiento del sensor de soplo, el *joystick*, y el display LCD.

tánea hacia la izquierda desvía la silla hacia ese lado; al cesar la acción sobre el mando la silla vuelve a ir en línea recta. Si el usuario quiere parar, tira hacia atrás del mando hasta que la silla se detenga; la silla sólo podrá volver a moverse si el mando vuelve al cero. El giro sobre la posición (sin desplazamiento) es posible en este momento, accionando el *joystick* hacia izquierda o derecha [Sebastián 99].

3.4.3 La unidad de soplo

Con el simple añadido de un sensor de flujo de gases y un circuito adaptador, aparte del módulo *software* correspondiente, el mismo *joystick* incorpora la conducción directa por soplo⁴. La figura 3-8 ilustra el montaje de ambas unidades a bordo del prototipo *SIAMO*.

La conducción por soplo desarrollada por el autor de esta tesis no tiene nada que ver con lo que convencionalmente se entendía como tal; en otros sistemas el usuario acciona en realidad un pulsador o conmutador de presión ayudado por un conducto flexible, sobre el cual sopla en el momento en que, por lo general, un sistema *scanner* indica el patrón o comportamiento que el usuario desea activar: ir hacia adelante, atrás, etc.

Conducción real por soplo

La concepción y posterior desarrollo del sistema de soplo se orienta hacia la creación de una unidad real de conducción del vehículo, la cual permita al usuario centrarse en la conducción en sí; esto lo

⁴Patente en progreso

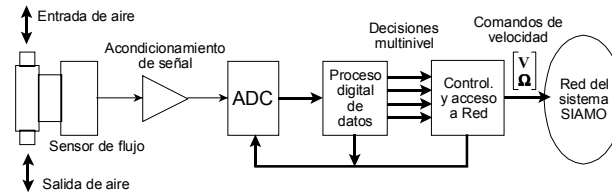


Figura 3-9: Diagrama de bloques del sistema de guiado por soplo.

diferencia radicalmente con los sistemas *scanner*, en donde el usuario ha de prestar continua atención al estado del mismo, manifestado generalmente de forma óptica (pantalla, LED's o lámparas, etc.).

La figura 3-9 muestra un esquema de bloques del sistema. La clave del mismo es un sensor diferencial de flujo capaz de detectar tanto el sentido como la fuerza del flujo de aire que lo atraviesa. Esta señal es digitalizada y procesada por el controlador programable de la unidad *joystick*; hay que precisar que aunque podría haberse tomado como un módulo separado (se trata de una función independiente) la sobrecarga tanto *hardware* como *software* que el sistema de soplo ejerce sobre la unidad *joystick* es tan escasa que el mismo NeuronChip es capaz de ejecutar ambas tareas.

La señal digital del sensor, con vistas a obtener un modo de comando fácil para el usuario, es discretizada y clasificada en cinco niveles, según su intensidad y sentido; las etiquetas lingüísticas aplicadas son por orden de intensidad: "**Soplar fuerte**", "**Soplar flojo**", "**Reposo**", "**Aspirar flojo**" y "**Aspirar fuerte**". Los umbrales entre cada zona son programables y poseen una cierta histéresis para evitar falsas detecciones (figura 3-10).

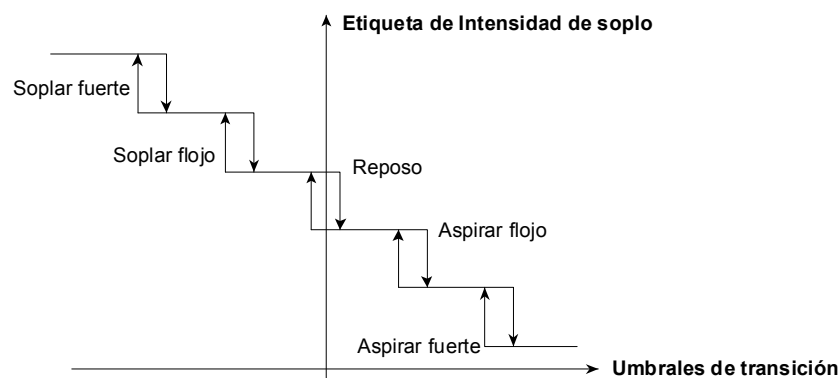


Figura 3-10: Umbrales de transición de niveles.

Las entradas discretizadas pasan por varias máquinas de estado, las cuales filtran temporalmente las transiciones de comando y elaboran las correspondientes consignas de velocidad lineal y angular.

Etiqueta de entrada	Parámetro controlado	Acción
Soplar Fuerte	Vel. lineal, V	Incremento
Aspirar Fuerte	Vel. lineal, V	Decremento
Aspirar Flojo	Vel. angular, Ω	Giro Izquierda
Soplar Flojo	Vel. angular, Ω	Giro Derecha

Tabla 3.2: Acciones del sople sobre el movimiento de la silla.

La figura 3-11, por ejemplo, muestra el diagrama de estados simplificado del validador de niveles de entrada.

Una vez validadas las entradas, el estado del vehículo es modificado teniendo en cuenta tanto el comando introducido por el usuario como el estado actual del vehículo. El nuevo comando así elaborado se envía a través de la Red LonWorks al resto del vehículo, en forma de vector de velocidades $[V, \Omega]$. La actualización de este vector se realiza cada 120ms; la forma en la cual se afecta a las velocidades reales de la silla es o puede ser dependiente de la configuración del sistema (figura 3-7) y de si éste incluye otras unidades de seguridad, navegación y/o detección de obstáculos.

Prestaciones del sistema

A nivel de usuario, la conducción es muy sencilla y no exige un aprendizaje largo, pues se ha tratado de seguir un proceso más o menos intuitivo entre las acciones del usuario y el comportamiento final del vehículo. La tabla 3.2 ilustra esta circunstancia; salta a la vista inmediatamente la similitud entre esta tabla y la del *joystick* digital y esto es así porque tales secuencias de acciones se han demostrado como las más fáciles y cómodas de seguir para el accionamiento, con sólo cuatro órdenes discretas, de la silla de ruedas.

Las entradas se agrupan en dos tipos básicos: fuertes y débiles (flojas). Las acciones fuertes, bien soplar o aspirar, actúan sobre la velocidad lineal de la silla y equivalen a accionar el *joystick* digital hacia adelante o atrás. Las acciones débiles gobiernan el giro y su sentido, como si se accionara el *joystick* digital a izquierda o derecha. La ausencia de sople, en 'Reposo', equivale a la posición cero.

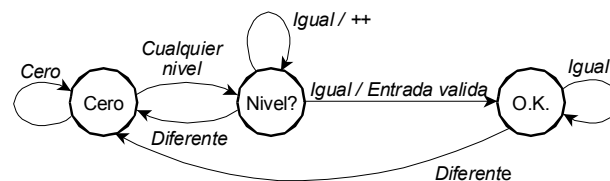


Figura 3-11: Diagrama de estados de la validación de entradas del sensor de sople.

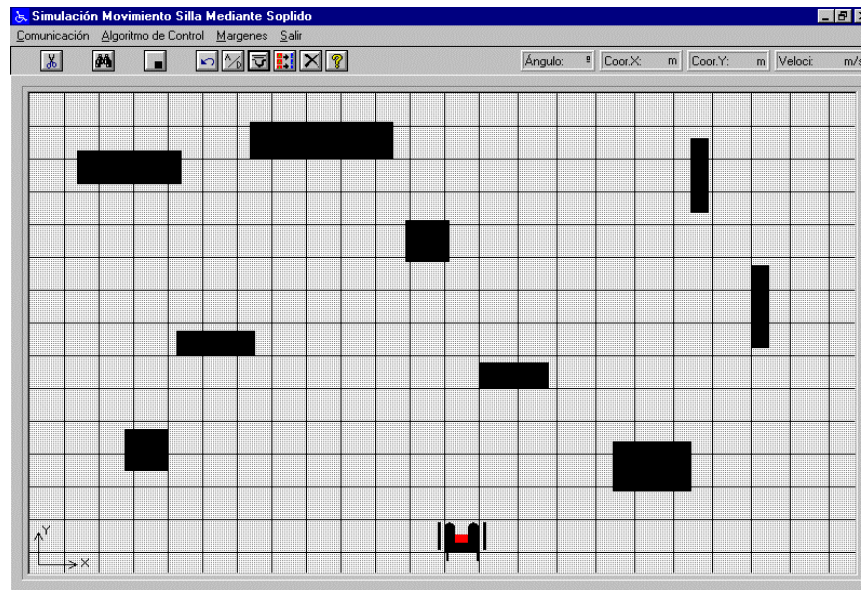


Figura 3-12: Pantalla de entrenamiento del simulador.

La facilidad de uso y el corto tiempo de respuesta permite desplazarse, sin necesidad de otros complementos (detectores de obstáculos, etc.), por entornos amplios como espacios abiertos (jardines, etc.), salones, pasillos de anchura suficiente (sobre 1.5m), en incluso permite el paso por puertas algo más estrechas. En general, el usuario fija la velocidad lineal deseada (soplando o aspirando) mediante una primera acción de soplado energética; después, las correspondientes desviaciones o cambios de dirección sólo necesitan de una acción más suave sobre el sensor.

Un factor de seguridad añadido es que, por *software*, la aceleración de parada (independientemente de si se avanza o se retrocede) es mayor que la de arranque; así, ante situaciones de emergencia es posible parar la silla en un menor espacio.

Simulador de entrenamiento

La figura 3-12 muestra la pantalla de un simulador de entrenamiento, diseñado como complemento al sistema de conducción por soplado. Consta de un programa en PC, y una tarjeta, basada en el $\mu\text{C-68HC11}$, la cual se conecta al puerto serie del PC y al sensor de soplado [Sebastián 99].

En un entorno 2D, un potencial usuario puede entrenarse en el uso del sistema, sin necesidad de montarlo sobre la silla de ruedas. No obstante, la conducción es tan fácil de aprender y es lo suficientemente fiable como para que, en general, las personas que han probado el sistema de soplado se decidan directamente por el uso a bordo de la silla en sí. Cabe señalar que un simulador equivalente,

pero en 3D, fue descartado por resultar más difícil y engorroso de usar para los usuarios.

Aplicación a otras sillas motorizadas

El *joystick* avanzado (digital+soplo) se probó en la silla de ruedas *SIAMO*, la cual está equipada con *encoders* en las ruedas motrices; de esta forma se puede saber con cierta seguridad si la silla sigue o no los comandos de velocidad deseados. Además la salida estándar del sistema es vía mensajes a un Bus de comunicaciones. Esto no es un obstáculo importante para el uso del sistema propuesto en otras sillas de ruedas motorizadas que no dispongan de la Arquitectura *SIAMO*.

El problema más fácil de resolver es el de la salida a otras sillas. Normalmente los *joystick* de los vehículos comerciales gobiernan directamente la etapa de potencia mediante un nivel analógico de señal; basta un conversor DAC, junto con la modificación *software* adecuada, para adaptarse a este tipo de sistemas. Otras interfaces, más o menos normalizadas, pueden ser adaptadas en forma similar.

Más problemático es el asunto de mantener la línea recta, pues las sillas comerciales no poseen *encoders*, lo que ocasiona derivas en la trayectoria real. Para solucionar esto sólo hay una opción fiable: la incorporación de *encoders* en algún punto del vehículo. Sin embargo, empresas como HMC [Easy Rider], en Bélgica, comercializan un compensador giroscópico (el *Gyrostar*) que permitiría realizar una estimación de la deriva del vehículo.

Otra posibilidad, quizás con mejores perspectivas de fiabilidad y prestaciones, es la de incluir *encoders* pasivos mediante ruedas auxiliares sin tracción situadas en posiciones convenientes y próximas a las motrices [Chong 99]. Esta solución permite:

- Acoplar de forma económica un sistema de *encoders* a cualquier silla de ruedas estándar, sin necesidad de intervenir físicamente sobre los motores.
- Mejorar la precisión del sistema odométrico al minimizar los efectos de los deslizamientos inherentes a las ruedas motrices.

Cabe señalar que los deslizamientos en una silla de ruedas son mucho más difíciles de controlar y evitar que en un robot móvil convencional por diversas razones: suelos muy dispares, modos de conducción dependientes de cada persona, desgaste de las bandas de rodadura impredecibles, etc. En la actualidad, el autor está evaluando las prestaciones de un sistema de *encoders* pasivo y espera aportar conclusiones al respecto en un futuro cercano.

3.5 Sistema sensorial: prestaciones de navegación autónoma

La concepción de un vehículo realmente autónomo, como las SRA's experimentadas tanto por el grupo de la Universidad de Alcalá como el resto de los grupos presentados aquí, pasa indudablemente por la incorporación de un sistema sensorial eficiente con una doble función: seguridad y detección del entorno.

Al igual que en el caso del HMI, han sido varias las soluciones que el equipo *SIAMO* ha aportado en este campo. Pueden destacarse aquí los trabajos del Dr. Ureña en el campo de los sensores de Ultrasonidos [Ureña 98] y del Dr. Lázaro en la aplicación de un subsistema de visión artificial, con iluminación estructurada laser, al reconocimiento de obstáculos y planificación de trayectorias libres entre los mismos [Lázaro 98].

Con el propósito de incorporar prestaciones de navegación a la SRA, el autor de esta tesis plantea un completo sistema de autolocalización y posicionamiento para interiores de edificios fuertemente estructurados. Como ejemplo de tales entornos se escogió la propia Escuela Politécnica de la Universidad de Alcalá, en donde se encuentra el Departamento de Electrónica; se trata de un edificio de cuatro plantas, dividido en cuatro sectores con varios pasillos idénticos distribuidos alrededor de un patio circular (figura 3-13). La extremada regularidad del edificio hace que la orientación en su interior sea difícil incluso para las personas que aquí desarrollan su actividad, a pesar del código de colores y la numeración de recintos empleada. Todo un desafío para un sistema robótico autónomo.

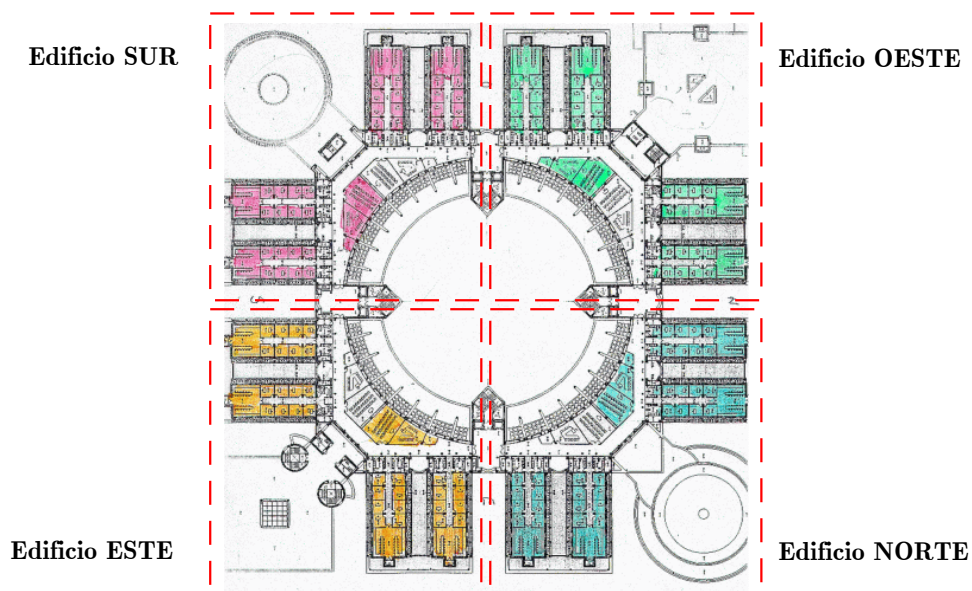


Figura 3-13: Distribución de espacios en la tercera planta de la Escuela Politécnica de la Universidad de Alcalá.

Como ya se destacó en el capítulo segundo, la solución más conveniente para un problema como el planteado consiste en un posicionamiento relativo por odometría, utilizando un *dead reckoning* más o menos convencional, y la utilización de marcas artificiales, en conjunción con el apropiado sistema de visión a bordo de la SRA, para la localización y posicionamiento absoluto del móvil y la corrección de la estimación de la odometría.

3.5.1 Componentes del Sistema de Navegación

La principal ventaja del uso de Marcas Artificiales es la de poder conocer *a priori* qué información va a encontrarse en el entorno y de qué manera ésta ha sido encerrada en la marca; por otro lado, el uso de un subsistema de Visión Artificial ha dejado ya de ser un elemento costoso: las nuevas cámaras digitales procedentes del campo de los equipos multimedia, bien de salida digital directa o bien con salida por bus serie de alta velocidad⁵, como el USB o el *Fire Wire*, han permitido pensar en los sensores de visión como una opción razonablemente económica para usos sensibles al coste. Esto se acompaña con procesadores de datos (DSP o μ Ordenadores) cada vez más potentes y económicos, con lo que las restricciones marcadas a una SRA se cumplen con creces

Tres son los componentes del sistema de localización y posicionamiento propuesto:

1. El subsistema de Visión Artificial, a bordo de la SRA.
2. La Marca Artificial, a colocar en determinadas posiciones sobre los muros del entorno.
3. El Mapa de Descripción del citado entorno.

El peso principal del sistema propuesto recae sobre el subsistema de Visión Artificial; su configuración, las condicionantes ópticas implicadas en su diseño, los algoritmos de segmentación y extracción de características, la justificación de las soluciones elegidas, su fundamento matemático y sus prestaciones reales serán, pues, objeto de un muy detallado estudio en los capítulos siguientes.

Los otros dos aspectos, aun siendo también muy importantes en el concepto del sistema de localización, recibirán un tratamiento diferenciado en las siguientes secciones, con vistas a dar una adecuada visión general del mismo antes de entrar en el núcleo central de esta tesis y sus aportaciones principales.

3.5.2 La Marca Artificial

Este es el componente clave de todo el sistema. La figura 3-14 muestra el modelo de Marca Artificial adoptado, tras varias pruebas con marcas alternativas [García 99a] [García 00a]. Se trata de una

⁵Más detalles en páginas *Web* de fabricantes de estos sensores, como: <http://www.ovt.com>, <http://www.photobit.com> y <http://www.vvl.co.uk>.

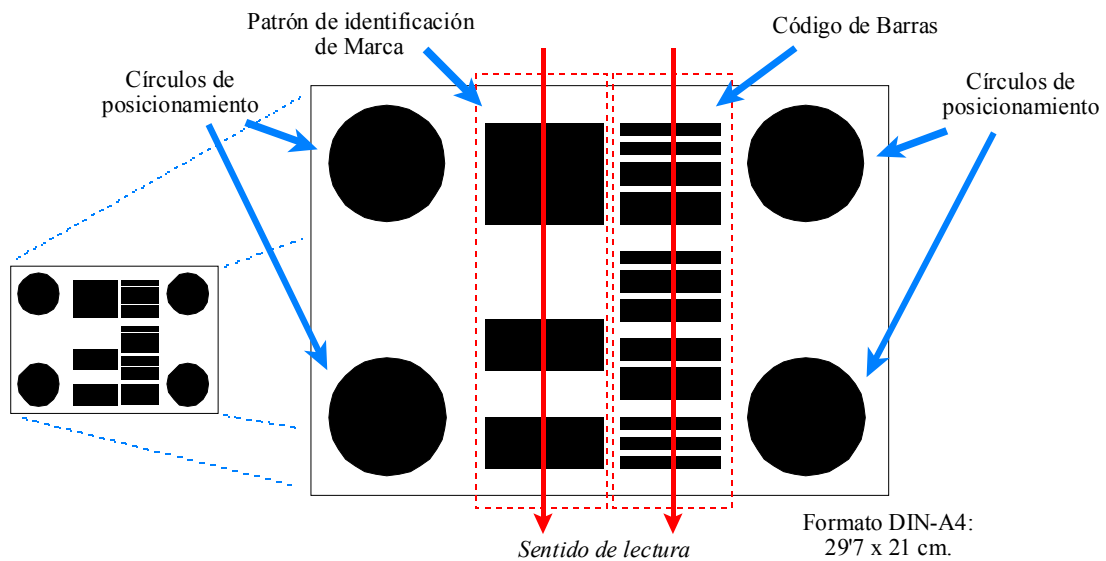


Figura 3-14: Marca Artificial codificada: vista y detalle de sus componentes.

hoja de papel, formato DIN-A4, impresa con unos patrones blanco y negro formados por:

- Cuatro círculos negros, situados en posiciones calibradas próximas a las esquinas.
- Un patrón vertical de identificación (barras gruesas, grupo central-izquierdo), único para todas las marcas, que permite la detección y segmentación de la misma en cada imagen.
- Un código de barras de n dígitos (barras finas, grupo central-derecho), propio y distinto para cada marca, el cual se lee en dirección vertical, en sentido descendente.

De esta forma, se conjuntan en una sola marca características geométricas (los cuatro puntos) y codificadas (el código de barras derecho) lo que permite aunar precisión en la localización con una identificación unívoca de la marca por el código impreso en ella. Por otro lado, el patrón de identificación, al ser común a todas las marcas, simplifica y acelera el proceso de extracción de las mismas de entre el resto de componentes de una imagen dada.

En otro orden de cosas, y a pesar de que una marca en 3D tiene en teoría mejores posibilidades [Haralick 93] [Romero 00], la elección de una marca plana, en blanco y negro y de dimensiones como las señaladas se fundamenta en las siguientes razones:

- La precisión del sistema se demostrará que es suficiente para la aplicación definida,
- La colocación de una marca plana presenta menos problemas que una tridimensional,

- Cualquier usuario, técnico o terapeuta puede imprimir las marcas definidas con un equipo informático a su alcance, lo que facilitaría su implantación práctica.

El patrón de localización y los círculos de posicionamiento serán objeto del estudio necesario en los capítulos que siguen. En lo que respecta al código de barras, ésta y otras secciones posteriores del presente capítulo detallarán su concepción y la información codificada en él.

Método de codificación e información presente en la Marca Artificial

La primera consideración es la de la elección del método de codificación; a este respecto las opciones posibles, sólo considerando aquellas dentro de los estándar actuales, ya son en sí numerosas⁶. Una primera gran división es la existente entre los códigos unidimensionales, como los ya familiares códigos de barras de precios de productos, y los bidimensionales, como el PDF-417 presente en nuestras declaraciones de IRPF.

A pesar de la muy alta densidad de información presente en los códigos bidimensionales, estos códigos resultan ser idóneos sólo cuando las condiciones de visibilidad [Ottaviani 99] están medianamente garantizadas: distancias acotadas a la cámara, situaciones coplanares con el plano imagen, etc. Por ello, su aplicación a marcas de posicionamiento en robótica móvil sería altamente problemática al estar sujeta a ciertos problemas de visibilidad, pues una marca adherida al muro de una habitación podrá, en muchas ocasiones, verse notablemente deformada.

De entre los códigos unidimensionales son descartables los códigos postales, como el *PostNet* americano, por su escasa densidad de información. Otros códigos necesitan caracteres extra de arranque y parada como los *Code128* ó *Code39*, además, no es idónea una interpretación lingüística del código como en [Jörg 99], sino que resulta más interesante aumentar la densidad de información dado el escaso espacio disponible y el objetivo de poder leer el código a grandes distancias. Así, el código EAN-13, estándar en el sistema de precios europeo, puede resultar idóneo por su alta densidad y, además, por poder incluir un carácter secundario gracias a un sistema alternativo de codificación [Palmer 89] [Krummel 96].

Qué se usa del EAN-13 en la marca artificial

En el *Anexo B* se dan algunos detalles interesantes de la codificación EAN-13 de la cual se usan sólo ciertas características básicas en la marca definida; en concreto:

- La definición de símbolos, como una secuencia de siete barras (oscuras o claras) de ancho uniforme.

⁶ Algunos enlaces de interés son: <http://www.adams1.com> y <http://www.barcodeman.com>.

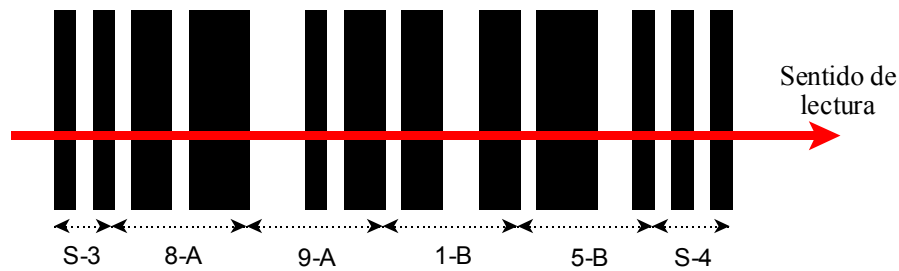


Figura 3-15: Método de codificación en la Marca Artificial.

- El uso de codificaciones alternativas (los tipos A y B) para incorporar un dígito adicional.
- La presencia de barras de sincronismo, para facilitar la recuperación del ancho de barra.

Particularizando al diseño de la marca artificial, se tiene que, a efectos prácticos, la anchura de cada barra limita el rango máximo de visibilidad usando cámaras y sistemas de visión artificial de propósito general. Así, en la marca artificial propuesta, y con el fin de disminuir las necesidades de identificación y aumentar en lo posible el tamaño de los símbolos, el código de barras se contempla sólo como una entrada unívoca a una base de datos, en la cual se indicarían todos aquellos detalles geométricos y parámetros de navegación que se estimaran como necesarios.

Es por ello que el número de dígitos que se contempla actualmente es $n = 4$, con lo que el número de barras necesario es de 28; añadiendo símbolos de sincronismo y zonas libres (o 'de silencio'), la dimensión de cada espacio se aproxima a los 0.5cm. En la marca experimental de la figura 3-14 se fijó esta dimensión precisamente en esta longitud, dando lugar a la codificación mostrada en la figura 3-15.

Se han empleado los códigos A y B para los cuatro dígitos, por lo que cada uno de ellos siempre empieza por blanco y acaba en negro. Además se ha incluido un sencillo, pero efectivo, *check-sum* que se codifica usando un método similar al primer dígito de un EAN-13 (ver anexo B). En el ejemplo de la figura 3-15 el número codificado es el **8915**, siendo la suma de sus dígitos igual a 23. Se toma entonces la última cifra de esta suma, el **3**, y se codifica en binario como 0011. Asignando el valor binario 0 al tipo de codificación A y el valor binario 1 al tipo B, resulta el patrón AABB. De esta forma, el número 8915 será codificado con el dígito y tipo siguientes: 8-A, 9-A, 1-B, 5-B; tal y como se ilustra en la figura citada.

Al comienzo y al final del código se incluyen dos patrones de sincronismo: el primero es de tres barras (S-3) y el segundo es de 4 (S-4), pues al acabar en negro el último dígito se hace necesario una barra blanca adicional. En total existen $(4 \times 7) + 3 + 4 = 35$ barras que ocupan 17.5 cm de los 21 cm de la altura de la Marca, dejando un espacio en blanco total de 3.5 cm distribuidos arriba y abajo

del código. El número total de codificaciones posibles con esta versión es de **9999** con *check-sum* de comprobación; tal número de localizaciones unívocas se estima como más que suficiente para las aplicaciones marcadas como objetivo, esto es, en el entorno doméstico o laboral de los usuarios de sillas de ruedas autónomas.

3.5.3 El Mapa de Descripción del entorno

El tercer elemento del Sistema de Posicionamiento es el Mapa de Descripción del entorno; éste encierra la información mínima necesaria para poder establecer estrategias de navegación, esto es: distribución de recintos; su interconexión; y posición absoluta de marcas y recintos respecto a un origen dado. La base de datos del mapa de descripción es elaborada *off-line* a base de la información proporcionada por un conocimiento *a priori* del entorno en donde se desplazará habitualmente el vehículo autónomo.

Con objeto de mantener un número reducido de datos, por razones que luego se aportarán, la organización del mapa se basa en un *grafo nodal*, en el que cada nodo se asigna aprovechando la alta estructuración habitual en los edificios por los que normalmente se desplazará una SRA. Los criterios seguidos para la asignación de nodos son:

- Cada nodo se asignará a una sala, un acceso a un pasillo o a un cruce entre pasillos.
- Los nodos se organizarán siguiendo una *jerarquía*, lo cual facilitará la planificación de rutas.

De esta forma, el entorno se modela como un *mapa jerárquico de nodos* [Marrón 00], en el que la ruta a seguir se encuentra encerrada en los propios nodos del grafo.

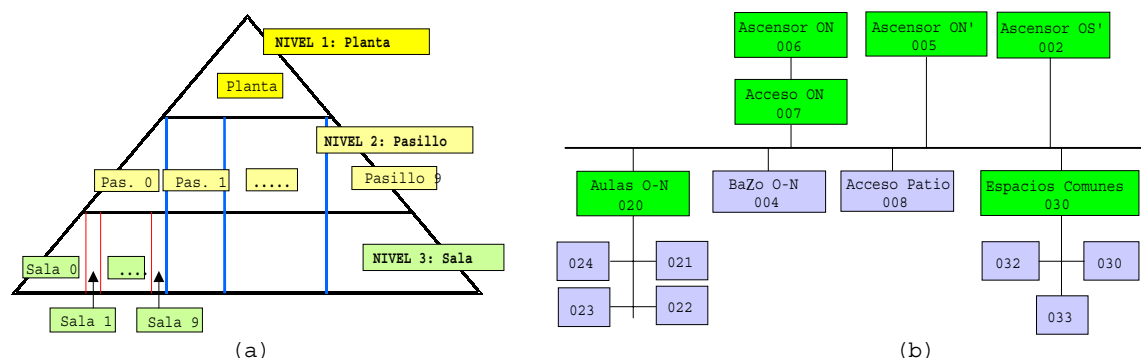


Figura 3-16: Mapa jerárquico del entorno: (a) Niveles de jerarquía previstos. (b) Grafo parcial de nodos de la planta baja del Edificio Politécnico.

La figura 3-16-a resume los criterios señalados. Se pretende reflejar de forma eficiente la estructura jerárquica habitual en la distribución de los espacios en un edificio cualquiera: *planta* →

pasillos o distribuidores $\rightarrow$ *salas*. Así se ha definido una secuencia de tres guarismos para la identificación dentro del mapa de cualquier nodo, correspondiendo cada uno de ellos a un número de orden dentro de cada rama del grafo, asignado durante la elaboración del mapa. Actualmente, por sencillez descriptiva además de por no ser necesarios en este caso, sólo se han previsto dígitos, del 0 al 9, con lo que el máximo número de nodos en cada nivel jerárquico es de 10; sin embargo, el método puede generalizarse usando, por ejemplo, códigos ASCII.

En la figura 3-16-b se muestra parte de la estructura jerárquica de los mapas elaborados para la Escuela Politécnica, que sirve de modelo en la especificación y pruebas del sistema. Puede verse la conectividad entre los diversos recintos (aulas), zonas de paso y acceso a la Planta Baja (número 0) del edificio, ala Oeste. La asignación de números a cada nodo del sistema sigue un estricto orden; así, por ejemplo, el recinto 024 se sabe que está en la planta 0, pasillo 2, sala 4. Este criterio facilita la planificación de la ruta adecuada entre dos nodos sin más que seguir la lista de nombres del mapa.

El mapa nodal realizado no posee una descripción detallada de la geometría del edificio, sólo las coordenadas absolutas de cada punto de entrada al nodo (puerta o paso obligado) y cierta información complementaria como, por ejemplo, el tipo de acceso (puerta o paso libre) y la dirección de entrada o cruce por el nodo considerado. La planificación de trayectoria se realiza mediante tramos rectos o circulares uniendo, de forma conveniente, los nodos elegidos por el planificador de ruta. Otras tareas de navegación como evitar obstáculos o pasar por el arco de la puerta necesita de una estructura sensorial que proporcione suficientes detalles del entorno más próximo al móvil, siguiendo un modelo reactivo.

En la codificación de los nodos entran en juego ciertos criterios secundarios que facilitan el seguimiento del grafo. Para clarificar la estructura elegida se presenta un detalle del edificio, perteneciente a la primera planta, y su correspondiente grafo en la figura 3-17. Los nodos definidos son de alguno de estos tres tipos:

1. Nodos de *sala*, que se corresponden con los orígenes y destinos posibles de cualquier ruta: despachos, habitaciones, salas de lectura o reuniones, etc.
2. Nodos de *conexión*, o de *jerarquía*, los cuales indican puntos de comienzo de cada rama o nivel jerárquico. Se trata de puntos de paso obligado para ir entre dos *salas* en ramas distintas del grafo. Su nombre siempre acaba en un 0, lo que excluye este número final como identificador de sala.
3. Nodos de *transición*, que dan solución al problema de la planificación de ruta en caso de conflicto de jerarquía, para conformar la ruta en espacios muy abiertos ó cuando no hay un camino directo entre dos nodos del mapa. Se codifican asignando un signo negativo al número de nodo.

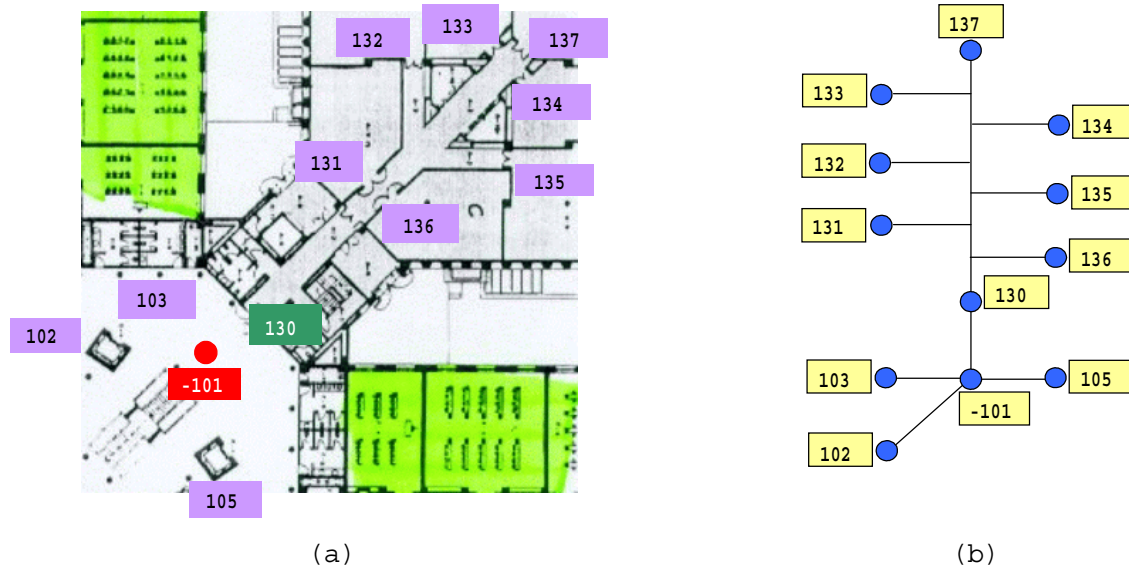


Figura 3-17: Asignación de número y tipos de nodo: (a) Plano de un sector de la primera planta, incluye los laboratorios de equipos pesados. (b) Grafo resultante.

Así, en el grafo de la figura 3-17-b, el nodo 137 identifica la sala 7 del pasillo 3 de la planta 1. Para llegar a él desde un nodo de otro pasillo (p.e., el nodo 127), hace falta pasar obligatoriamente por el nodo 130, que es el punto de acceso obligado al pasillo 3 (su puerta). Los nodos 102, 103 y 105 reflejan *salas* que se encuentran en el *hall* común a todos los pasillos; en concreto, 102 y 105 son los ascensores de acceso y 103 es el aseo de minusválidos. Finalmente, el nodo -101 es el punto de paso obligado para el trazado de rutas entre los pasillos o *salas* del hall de esta planta.

Prestaciones del sistema

El sistema descrito se ha probado en el prototipo *SIAMO* con los resultados que se ilustran en la figura 3-18. En ella puede verse la ruta planificada y seguida entre la *sala* 3, del pasillo 3 y la *sala* 2, del pasillo 2 (nodos 233 y 222, respectivamente), ambas en la segunda planta de la Escuela Politécnica.

Los círculos representan los puntos de control de ruta elaborados por el planificador de trayectorias diseñado en [Marrón 00]. En cada uno de los puntos mencionados se especifica un vector $[x, y, \theta]$, de posición/orientación objetivo, representado en la figura por una flecha. Puede comprobarse la estrategia de planificación de ruta adoptada, siendo claramente visibles los tramos rectos y los arcos circulares trazados entre cada par de puntos de control.

La ruta así planificada resulta bastante eficiente, y muy similar al comportamiento *natural* que

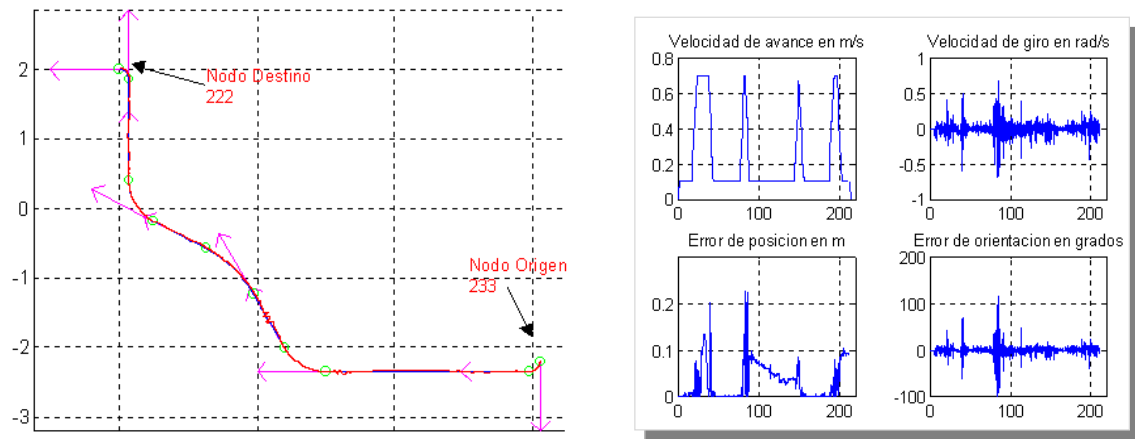


Figura 3-18: Ejemplo de ruta seguida entre las *salas* 233 y 222 del Edificio Politécnico.

un usuario de silla de ruedas realizaría entre los objetivos marcados. En concreto, son claramente visibles los tramos circulares de salida y entrada a las *salas* y la forma en la que se inicia y acaba la trayectoria, recta, en ambos pasillos; la zona intermedia, curvada, sigue el trazado que los distribuidores centrales del edificio presentan, alrededor del patio circular central.

En la misma figura 3-18 se pueden ver los datos obtenidos de las dos variables de control de la SRA: la velocidad lineal o de avance y la velocidad angular o de giro. Así mismo se representan los errores instantáneos en ambas variables durante el seguimiento de la trayectoria planificada. La ausencia de errores de deslizamiento en la lectura de odometría se justifica por ser ésta una demostración únicamente del sistema de navegación: las lecturas de los *encoders* de las ruedas motrices se tomaron con el vehículo "*en dique seco*", esto es con las ruedas girando en vacío. La obtención de la posición en el caso real se elabora fusionando la información presentada por el subsistema de *dead reckoning*⁷ junto con la del sistema de localización y posicionamiento descrito en esta tesis.

Mapas locales y cambios de contexto

Por otro lado, en el caso de edificios de grandes dimensiones, como hospitales, centros públicos o la propia Escuela Politécnica, resulta eficaz descomponer la estructura total en *mapas locales*, con el fin de simplificar la planificación de rutas. Esto es aún más cierto en el caso que nos ocupa; tal y como

⁷Recuérdese que está pendiente de evaluación un sistema de *encoders* pasivos pues, en la práctica, la diversidad de suelos y el estado de las cubiertas hacen más problemático de lo habitual el uso de las ruedas motrices de una silla de ruedas para esta tarea.

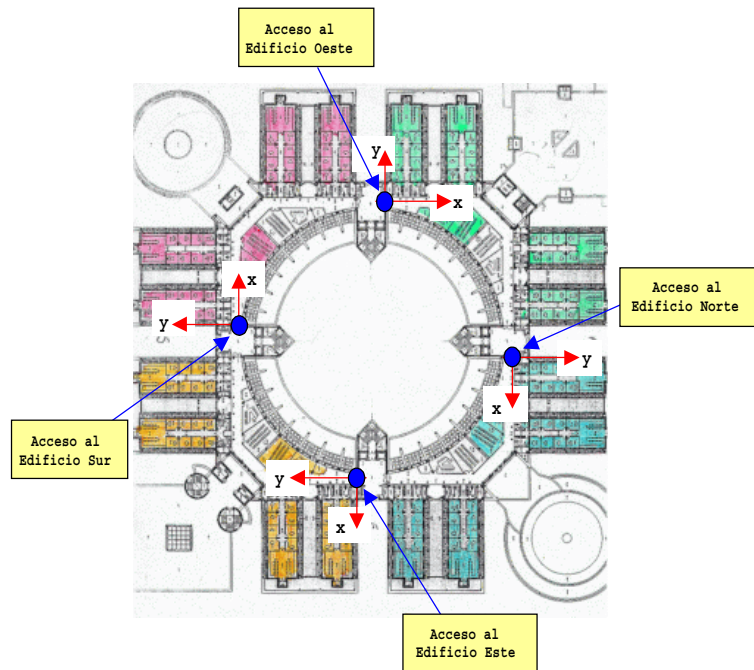


Figura 3-19: Subdivisión del edificio en mapas locales. Puntos de acceso y orígenes de coordenadas.

muestra la figura 3-19, la propia estructura del edificio responde a cuatro bloques independientes con accesos limitados entre ellos; en concreto, si se trata de un robot con ruedas, por ejemplo una SRA, sólo existe un punto de acceso o paso obligado entre cada bloque, cuatro en total, los cuales se usarán como nodos de conmutación de mapa local. Así, dentro de un edificio con varios mapas locales como éste, cada número de nodo se complementa con un sufijo de identificación de mapa local.

En lo que respecta a cada mapa local, éste puede codificar más de una planta de un mismo edificio pues esta información está presente en el primer dígito del nombre de nodo. Particularizando al caso del Edificio Politécnico, cada uno de los cuatro bloques más o menos independientes del mismo constituye un único *mapa local*, abarcando las cuatro plantas de cada uno de ellos.

El sistema de planificación de rutas desarrollado permite resolver, fácilmente, los problemas que plantean orígenes y destinos situados en plantas o edificios (*mapas locales*) diferentes. En la figura 3-20 se muestran dos ejemplos de rutas generadas por el planificador; el caso más sencillo se presenta en 3-20-a, en donde el origen está en la *sala* 112, de la primera planta. Se plantean dos destinos, en las *salas* 313 y 345, respectivamente; puede observarse cómo ambas rutas siguen una lista de nodos diferente pues en cada caso se toma el ascensor mejor situado (ruta más corta). Así, para llegar a la *sala* 313 se toma el ascensor x01 (nodo 101 en la planta 1, y nodo 301 en la planta 3), mientras

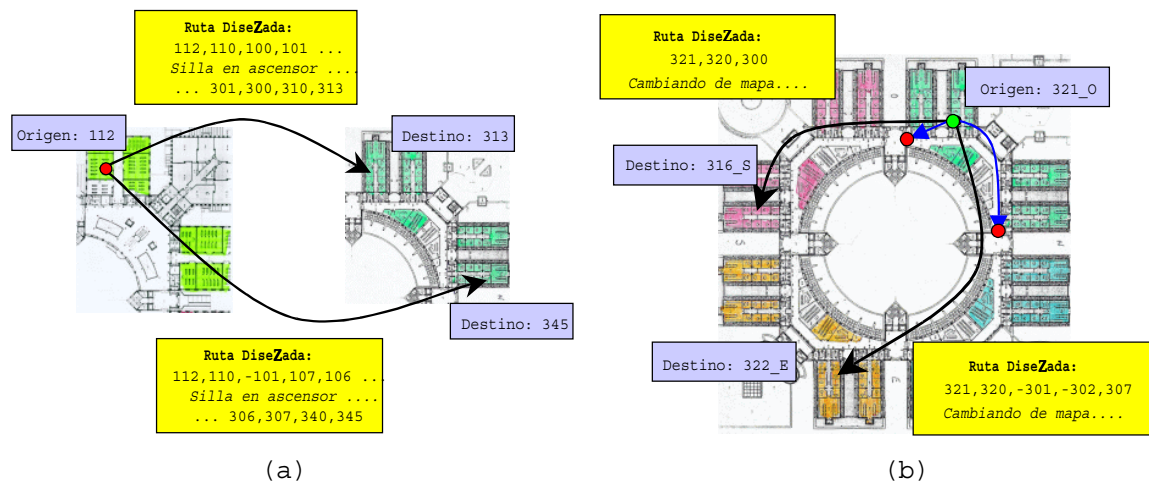


Figura 3-20: Ejemplos de planificación de ruta con transiciones especiales: (a) Cambio de planta, dentro de un mismo *mapa local*. (b) Ruta hacia otro edificio, con paso por los puntos de acceso o cambio de mapa.

que para llegar a la *sala* 345 se toma el ascensor x06 (nodos 106 y 306). En ambos casos se trabaja sobre el mismo *mapa local*.

En la figura 3-20-b se ilustra un caso con cambio de mapa; obsérvese el sufijo añadido a cada nodo para establecer esta distinción. Al necesitar de un cambio de edificio, el planificador de ruta elabora una ruta parcial hacia el acceso más próximo en dirección al edificio destino considerado, se tenga o no cargado en memoria el mapa completo del edificio destino. En el caso planteado en la figura, la ruta diseñada sólo abarca hasta el punto de cambio de mapa, pues sólo se dispone del *mapa local* del edificio origen; a partir de ese nodo de acceso, y una vez cargado el nuevo *mapa local*, la ruta es re-elaborada hasta llegar al objetivo final.

3.5.4 Solución al problema de la auto-localización y el posicionamiento

El sistema de navegación aquí expuesto (gestor de procesos más planificadores de rutas y trayectorias) a pesar de su eficiencia no soluciona, por sí solo, el problema de la navegación en un edificio de las dimensiones de la Escuela Politécnica. Centrándose en uno sólo de los cuatro bloques que constituyen el mismo, el número de nodos (despachos, laboratorios, pasillos, ascensores, aseos para minusválidos, etc.) está entre 25 y 60 por planta, contando sólo los accesibles desde una silla de ruedas. En total se obtienen alrededor de 170 nodos por edificio. Este número es, desde el punto de vista de tamaño de la base de datos del mapa, bastante reducido pero desde el punto de vista de autolocalización el número de pasillos o recintos similares es enorme. Por otro lado, el seguimiento de

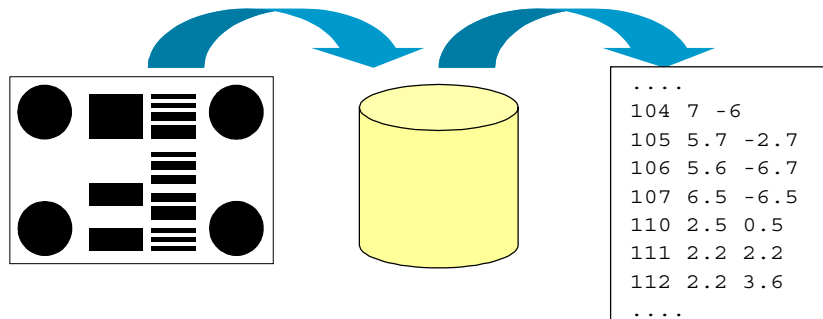


Figura 3-21: Base de Datos de Marcas Artificiales: identificación geométrica y de mapa.

la ruta y las trayectorias planificadas sólo puede hacerse comprobando, con una precisión suficiente, los datos estimados por el sistema odométrico.

Éstas son las dos tareas que permite afrontar eficientemente el sistema de Marcas Artificiales propuesto. Así, la Base de Datos necesaria a bordo de la SRA se complementa con la tabla de asignación de marcas. Como se ilustra en la figura 3-21, el código de barras codifica una entrada a la Base de Datos de Marcas, en la cual se encuentran los parámetros necesarios para recuperar la posición y orientación del móvil (vector de coordenadas $[x, y, \theta]$) dentro de cada *mapa local* y, a su vez, la identificación del mismo dentro de un edificio o agrupación mayor (sufijo de identificación de mapa).

Volviendo al objetivo de cubrir el Edificio Politécnico (45.000m² de superficie y unos 600 posibles nodos distintos), la marca propuesta, con capacidad para localizar unívocamente 9999 posiciones, se muestra como una solución muy idónea, conceptualmente simple pero bien sobrada, para el gran objetivo marcado. Bajo el punto de vista del sistema de navegación, sus puntos a favor son los siguientes:

- Al ser el código una mera entrada a una base de datos, la cantidad de información encerrada en la marca es mayor que la presente en el código de barras.
- Aún si fuera necesario incluir una marca para cada nodo, el sistema podría codificar 9999 nodos en un sólo edificio. Como idea de escala, manteniendo la densidad de nodos del Edificio Politécnico podría cubrirse un edificio de ¡750.000m²!
- Las bases de datos son dinámicas, por lo que la información puede modificarse o aumentarse sin problemas, e incluso puede cargarse *en tiempo de ejecución*, dado el tamaño acotado de la misma.

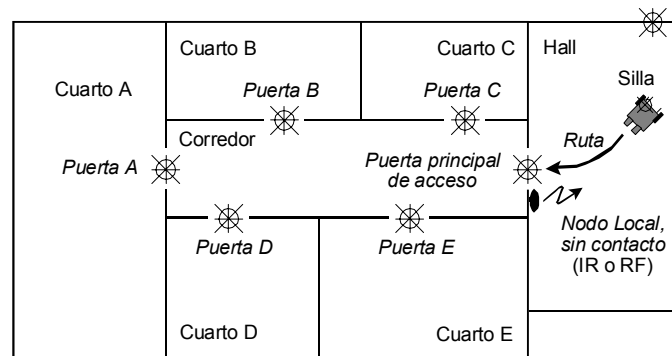


Figura 3-22: Concepto global del mapa autocontenido en el edificio: se usa un nodo de red sin contacto (RF o IR).

El reducido tamaño de las bases de datos asociadas a marcas y a mapas de descripción permiten la generalización de este sistema de navegación a cualquier SRA en cualquier entorno: basta con tener cargado el mapa apropiado. La afirmación anterior, dentro de su obviedad, no es trivial en la especificación del sistema concebido por el autor de esta tesis.

Obsérvese la situación ilustrada en la figura 3-22: partiendo de la base que una SRA sólo puede acceder a edificios o secciones de edificios por unos puntos de paso obligado (ascensores, *hall* principal, etc.) las Bases de Datos necesarias para navegar por esa sección o edificio pueden cargarse *al vuelo*, según la silla atraviesa dicho punto de paso obligado, permitiendo navegar incluso *por edificios nunca visitados*. Esta prestación es posible por las siguientes razones:

- La SRA presenta una arquitectura compatible con su integración a un sistema de automatización de edificios, como es el sistema *LonWorks*
- A pesar de la baja velocidad de transferencia de datos (sobre los 78kbit/s) de los nodos sin contacto actualmente disponibles (por Radio Frecuencia o Infra-Rojos), el reducido tamaño de las Bases de Datos permite su carga sin detener el vehículo.
- El bajo coste del sistema, unido a la escasa intervención necesaria sobre un edificio dado, posibilita su implantación en edificios habitualmente usados por minusválidos: hospitales, centros públicos, empresas, etc.

3.6 Recapitulación

El presente capítulo resume varias de las aportaciones del autor al problema de la Asistencia a la Movilidad, la mayor parte de ellas ligadas a sus trabajos dentro de los proyectos *UMIDAM* y *SIAMO*, los cuales se desarrollaron en conjunción con los correspondientes grupos de investigación del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá.

En primer lugar, y como consecuencia del estudio realizado sobre las arquitecturas *hardware* aplicables y de los Buses Serie más extendidos en el entorno a considerar, se ha propuesto una arquitectura modular bajo dos criterios fundamentales:

- La escalabilidad del diseño, esto es la capacidad de adaptación de una misma plataforma móvil a diferentes situaciones, lo cual se considera esencial para este tipo de aplicaciones.
- La interconectividad con el entorno, o sea la capacidad de la arquitectura definida para intercambiar información o parámetros de control, dentro de un estándar común, con el entorno doméstico, público o laboral del usuario.

Dentro de los trabajos del autor en el campo de los interfaces Hombre-Máquina, se encuentran los métodos de guiado asistido mediante los cuales personas, con movilidad limitada o nula en los miembros superiores, pueden conducir la silla de ruedas de una forma similar a la de aquellos que sí son capaces de manejar un *joystick* convencional. Así, se han presentado dos alternativas de guiado:

- *Joystick* discreto, para personas con limitaciones motrices parciales (tales como temblores o pérdida progresiva de fuerza) pero capaces de cierta movilidad voluntaria en sus manos. Este método de conducción es casi tan eficaz como el *joystick* convencional.
- Conducción *por soplo* con asistencia del vehículo, lo que constituye una novedad importante frente a los sistemas *scanner* convencionales, pues con el sistema desarrollado se puede manejar la silla de ruedas sin que el usuario distraiga su atención de la conducción en sí, lo que incide en un mejor y más rápido control del móvil.

En último lugar, se han presentado los componentes principales del sistema de navegación, concebido por el autor para permitir el desplazamiento fiable de una SRA en interiores fuertemente estructurados. Tomando como ejemplo directo el edificio de la Escuela Politécnica, se ha especificado un método de navegación por el mismo con las siguientes características principales:

- El entorno se describe mediante un mapa topológico de nodos, en el que el propio código de cada nodo encierra una descripción parcial de sus conexiones y lugar jerárquico dentro del mapa. Entornos complejos o con secciones similares pueden descomponerse en mapas locales, dotados, en su caso, de una cierta interconectividad a través de los puntos de paso obligado para el vehículo.
- El planificador de rutas, a partir del mapa anterior, elabora rutas suficientemente eficientes incluso con cambios de planta o cambios de mapa local.
- El planificador de trayectorias descompone la ruta en tramos rectos y circulares, siguiendo un comportamiento dinámico próximo al de un conductor humano en parecidas circunstancias.
- Para la auto-localización del móvil dentro del edificio, independientemente del mapa de nodos, se emplea un sistema de marcas artificiales codificadas las cuales, en complemento con una base de datos adecuada, permiten conocer detalles respecto a la localización global del vehículo, esto es: planta, pasillo o recinto actual.
- La marca diseñada también permite obtener la posición absoluta del móvil, respecto al mapa local correspondiente y en conjunción con la base de datos asociada al código de cada marca.
- El reducido tamaño de las dos Bases de Datos necesarias (mapa y marcas), permiten la carga *'al vuelo'* de las mismas mediante nodos de red sin contacto situados en los puntos de acceso principales al edificio o a un sector del mismo. La incorporación de esta prestación en edificios inteligentes de nueva generación no representaría un coste excesivo, máxime si se emplea un sistema de comunicaciones común (bus estándar).

La definición del sistema de localización y posicionamiento propuesto se concluirá en los siguientes capítulos, en donde se justificarán los fundamentos teóricos del sistema y se demostrarán sus prestaciones reales, resultado de los experimentos prácticos realizados.

Capítulo 4

Detección y segmentación de las Marcas Artificiales

La clave del Sistema de Posicionamiento y Localización propuesto (en adelante, se hará referencia al mismo por sus iniciales *SPL*) está en la eficiente recuperación de la información encerrada en la Marca Artificial. Puede considerarse, en suma, que gran parte de las prestaciones del SPL se encuentran ligadas a la propia marca, por lo que no está de más dar a ésta un nombre apropiado tal como *Marca de Posicionamiento y Localización* (en adelante, *MPL*).

El presente capítulo se centra en el estudio y exposición de los distintos parámetros que justifican el diseño de la MPL y las técnicas y algoritmos empleados en su detección, de entre el resto de objetos en una imagen dada, y en la posterior segmentación e interpretación de toda la información encerrada en la misma.

4.1 Geometría del problema

La información presente en la MPL es múltiple, pues se pretende incorporar en una sola marca parámetros geométricos idóneos para dos funciones distintas:

- Obtener la localización del móvil, esto es, la identificación unívoca del recinto en el que se encuentra, mediante un sistema de codificación único para cada marca en un conjunto de recintos dado (mapa global).
- Recuperar la posición relativa del móvil respecto a la marca e, indirectamente, la absoluta respecto al recinto.

Adicionalmente, la detección de la MPL, la segmentación de la información encerrada y su procesamiento deben hacerse con la eficiencia y rapidez suficiente como para poder incorporarse a bordo de un móvil, como una SRA. El conjunto de estos y otros condicionantes, tal y como se expondrá en las siguientes secciones, justifican los elementos presentes en la marca, así como sus dimensiones.

4.1.1 Condicionantes de partida

Como ya se dejó claro en el capítulo anterior, las dimensiones de la MPL se encuentran limitadas, en principio, a los de una hoja estándar DIN-A4, imprimible con cualquier equipo informático al alcance del colectivo de usuarios de SRA's, hacia el cual se orienta este sistema. Aunque esta restricción podría obviarse en otros ambientes (industriales, de investigación, etc.), el objetivo de facilitar la diseminación del sistema obliga a no imponer condicionantes o limitaciones adicionales en este punto.

Por otro lado, se trata de incorporar en la marca tanta información como sea posible y con la facultad de poder ser recuperada a distancias lo más grandes posible, todo ello con equipos de visión artificial de propósito general lo que implica un coste en ópticas y dispositivos dentro de lo razonable.

La necesidad de una exactitud geométrica suficiente con coste reducido, fuerza la opción de cámaras en blanco y negro, pues en el caso de los sensores de color de coste inferior la exactitud a nivel de pixel se ve perturbada por la distribución en mosaico de los pixels sensibles a diferentes colores. De todas formas, el uso de marcas impresas y detectadas en blanco y negro incide favorablemente en dos de los condicionantes establecidos:

- Coste reducido de equipos e infraestructura, por la propia naturaleza monocroma del sistema.
- Tiempo de proceso inferior al caso de color, por el mero hecho de procesar menor cantidad de información.

Decidida esta cuestión, resta por definir el número y dimensiones de las características a incluir en la MPL. En esta decisión entran en juego razones de visibilidad y las restricciones posicionales aplicables al problema.

En primer lugar, y dado que se trata de un SPL diseñado para vehículos autónomos rodantes, cabe suponer un único plano de movimiento preferente, o de rodadura, y que coincidirá con el plano XY del SCA. Respecto a la marca, ésta debe ser visible en un amplio repertorio de posiciones y dar una información geométrica, por sí misma, lo más completa posible. Esto descarta su posicionamiento en el techo por los siguientes motivos:

- No permiten discriminar la orientación real sobre el plano XY , sin disponer de alguna información adicional.
- No se descarta el uso de sistemas de seguimiento (como una unidad de *pan-tilt* para la cámara) pues no se puede garantizar su visión en todo momento.
- El uso y caracterización de tales unidades de seguimiento se complica al no haber una relación unívoca entre la posición-orientación del móvil y los parámetros de control de posición de la cámara.
- Por último, aunque no menos importante, su instalación por neófitos o en domicilios particulares entraña problemas prácticos difícilmente justificables.

Todo ello lleva a desaconsejar el uso de marcas artificiales en el techo de los recintos, aunque esto no excluye el uso de otras referencias ya existentes en el edificio, tales como luces, tubos de ventilación y/o servicios, pero formando parte de otros sistemas totalmente distintos al SPL aquí expuesto. Así pues, el lugar preferente para la instalación de las MPL serán las paredes del recinto a cubrir.

Decidida la ubicación, ¿de qué forma será mejor distribuir la información en la marca? Curiosamente muchos sistemas comerciales basados en marcas artificiales usan patrones que se leen en horizontal [Borenstein 96a], e incluso algunos trabajos de investigación propugnan esta distribución [Kim 94] [Taylor 98] [Jörg 99] [Scharstein 01]. Sin embargo, esta distribución no resulta óptima para ser detectable en orientaciones distintas de la perpendicular a la marca artificial, lo que delimita una zona de visibilidad en el plano XY menor a la realmente utilizable; sólo resulta realmente útil la distribución horizontal de características si se realiza una exploración en un único plano, como es el caso de los sistemas de triangulación laser, pero en los demás casos:

- Al variar la orientación respecto de la marca, ésta se *comprime* horizontalmente, siendo más difícil la distinción de características geométricas en esta dirección.
- La dimensión vertical experimenta una menor variación, pero esta característica se desaprovecha.
- El rango de utilización del sistema (en distancia-orientación) se reduce al no admitirse desviaciones grandes desde la perpendicular a la marca, a pesar de haber suficiente resolución en la dirección vertical de la imagen.

Estas limitaciones se hacen patentes realizando un estudio formal de la visibilidad de un segmento de línea colocado en dirección vertical, en función de la ubicación de la cámara.

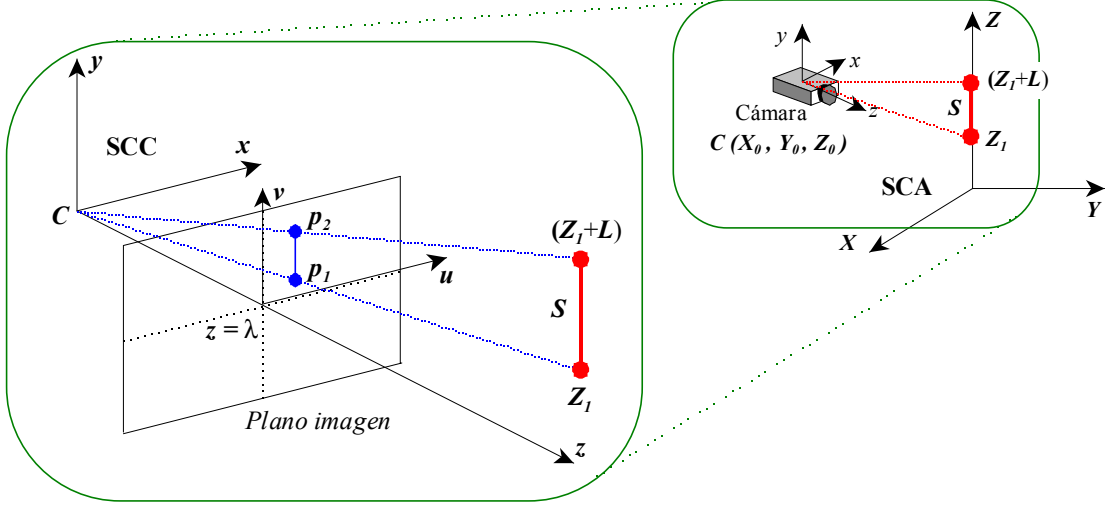


Figura 4-1: Geometría básica del problema: detección, en el PI, de una línea vertical en el SCA.

4.1.2 Longitud en el Plano Imagen de un segmento vertical

En el *Anexo C* se describen los criterios y nomenclaturas elegidos, tanto para los sistemas de coordenadas como para las transformaciones geométricas de interés en todos los procesos que afectan al subsistema de visión del SPL. En consonancia con tales definiciones, la geometría genérica del problema planteado, esto es la longitud recuperada en el Plano Imagen (PI) de un segmento vertical, se ilustra en la figura 4-1; en ella puede verse un segmento **S**, de longitud **L**, con su origen en el punto $(0, 0, Z_1)$ del Sistema de Coordenadas Absoluta (SCA) y orientado en el sentido del eje **Z**; tal segmento se observa desde una cámara situada en $C = (X_0, Y_0, Z_0)$, y orientada de tal forma que **S** esté en su campo visual.

La matriz de rotación correspondiente a la posición de la cámara respecto del SCA queda definida como:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & -\sin \gamma \cos \alpha + \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha & \sin \gamma \sin \alpha + \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \cos \gamma \cos \alpha + \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha & -\cos \gamma \sin \alpha + \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix}$$

siendo α , β y γ los ángulos de rotación de la cámara respecto a los ejes **X**, **Y** y **Z**.

Tomando la situación marcada en la figura 4-1, el segmento **S**, con origen en el punto $(0, 0, Z_1)$ y con cosenos directores $(a_Z, b_Z, c_Z) = (0, 0, 1)$, puede describirse por la ecuación:

$$\mathbf{s} = Z_1 + kc_Z \quad (4.1)$$

siendo $\mathbf{s}$ las coordenadas de todos los puntos de $\mathbf{S}$, para $0 \leq k \leq L$. En el PI, los puntos $\mathbf{s}$ se transforman en sus proyecciones $\mathbf{p}$, de coordenadas (u, v) , las cuales dependen de la distancia focal λ . Dividiendo (u, v) por λ , se obtendrían las proyecciones normalizadas, por ejemplo, en las direcciones verticales se obtendría $\bar{\mathbf{v}}$ como:

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{(X_i - X_0)r_{12} + (Y_i - Y_0)r_{22} + (Z_i - Z_0)r_{32} + k(a_X r_{12} + b_Y r_{22} + c_Z r_{32})}{(X_i - X_0)r_{13} + (Y_i - Y_0)r_{23} + (Z_i - Z_0)r_{33} + k(a_X r_{13} + b_Y r_{23} + c_Z r_{33})}. \quad (4.2)$$

El problema planteado puede simplificarse notablemente, sin perder generalidad, realizando un par de consideraciones previas. La primera, parte del hecho de que la longitud proyectada en el Plano Imagen (PI) del segmento considerado resulta ser la misma, considerando una posición cualquiera dentro de un mismo plano paralelo al XY . La segunda es una condicionante de montaje: la cámara debe instalarse de tal forma que no haya alabeo (inclinación lateral). Ambas condiciones permitirían establecer ángulos β y γ más favorables; por ejemplo, si la cámara se sitúa en el plano XZ , en coordenadas $\mathbf{C} = (X_0, 0, Z_0)$ y mirando directamente al segmento $\mathbf{S}$, resulta que $\beta = 0$ y $\gamma = 3\pi/2$, con lo que se obtendría la matriz $\mathbf{R}$ siguiente:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix},$$

expresión que sólo depende de α , al haberse transformado el problema espacial, en 3D, en un problema plano, en 2D, tal y como se ilustra en la figura 4-2.

Así, la longitud l_v del segmento vertical detectado en el PI sólo depende de la coordenada $\mathbf{v}$; además, el valor de $\bar{\mathbf{v}}$ indicado por la ecuación 4.2, en combinación con los datos del segmento $\mathbf{S}$ (ecuación 4.1) puede simplificarse como:

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{-X_0 r_{12} + (Z_1 - Z_0)r_{32} + k c_Z r_{32}}{-X_0 r_{13} + (Z_1 - Z_0)r_{33} + k c_Z r_{33}} = \frac{-d r_{12} + H r_{32} + k c_Z r_{32}}{-d r_{13} + H r_{33} + k c_Z r_{33}},$$

en donde $d = X_0$ es la distancia más corta a la vertical de $\mathbf{S}$, y H es la diferencia de alturas Z entre cámara e inicio del segmento.

Para averiguar la longitud l_v detectada en el PI se han de tomar los dos puntos extremos, esto es, para $k = 0$ y $k = L$, respectivamente; en consecuencia se tiene:

$$\bar{l}_v = \bar{\mathbf{v}}_L - \bar{\mathbf{v}}_0 = \frac{-d \cos \alpha + (H + L) \sin \alpha}{d \sin \alpha + (H + L) \cos \alpha} - \frac{-d \cos \alpha + H \sin \alpha}{d \sin \alpha + H \cos \alpha},$$

en donde $\bar{l}_v$ indica su normalización respecto de λ . En la anterior expresión, H puede ser sustituido

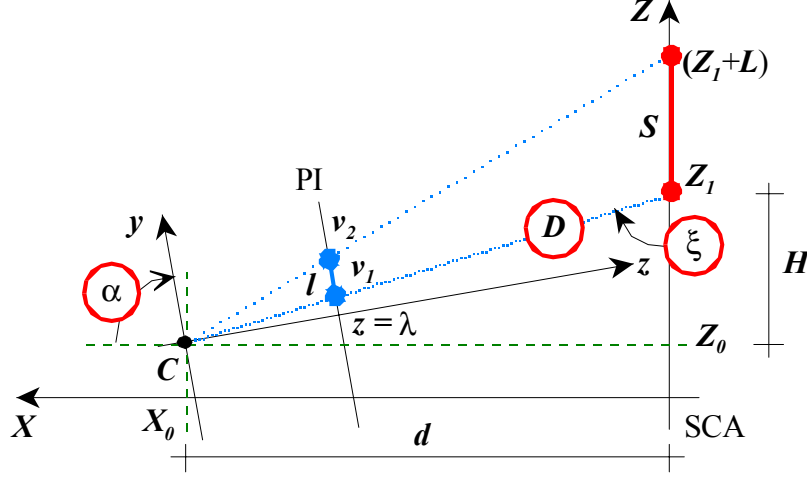


Figura 4-2: Simplificación: longitud l detectada en el PI en función de la distancia entre centro óptico y origen del segmento, D , y el ángulo de elevación, α .

por su equivalente en función de d ; en efecto, observando la estructura geométrica de la figura 4-2 se tiene que $H = d \tan^{-1} \xi$. Lo notable es que, para el caso bajo estudio, en el cual interesa fundamentalmente cómo se visualiza el segmento a gran distancia, este ángulo ξ y el ángulo de elevación α tienden a ser iguales, pues si $d \gg$, el eje óptico de la cámara, z , prácticamente coincidirá con el segmento $\overline{CZ_1}$ con objeto de poder tener la proyección de S dentro del PI. En cualquier caso, el problema genérico de la proyección de perspectiva se encuentra excelentemente estudiado por Daniel DeMenthon en [DeMenthon 92].

Considerando, entonces, que $\xi \rightarrow \alpha$, la expresión de $\overline{l_v}$ se simplifica notablemente y queda como:

$$\begin{aligned} \overline{l_v} &= \frac{-d \cos \alpha + d \cos \alpha + L \sin \alpha}{d \sin \alpha + d \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} + L \cos \alpha} - \frac{-d \cos \alpha + d \cos \alpha}{d \sin \alpha + d \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha}} \\ &= \frac{L \sin^2 \alpha}{d \sin^2 \alpha + d \cos^2 \alpha + L \sin \alpha \cos \alpha} = \frac{L \sin^2 \alpha}{d + L \sin \alpha \cos \alpha}, \end{aligned}$$

expresión que queda aún más compacta si en lugar de emplear la distancia más corta, d , se emplea la distancia D entre el centro óptico y la base del segmento S considerado. En efecto, de las relaciones observables en la figura 4-2, una vez admitido que $\xi \simeq \alpha$, también se puede extraer que $d = D \sin \xi \simeq D \sin \alpha$, con lo que finalmente se obtiene una expresión cómoda para l_v :

$$l_v = \frac{\lambda L \sin \alpha}{D + L \cos \alpha} \Big|_{\substack{D \gg L \cos \alpha \\ \xi \simeq \alpha}} \simeq \frac{\lambda L}{D} \sin \alpha. \quad (4.3)$$

en donde las condiciones $D \gg L \cos \alpha$ y $\xi \simeq \alpha$ se cumplen precisamente en la zona de mayor interés,

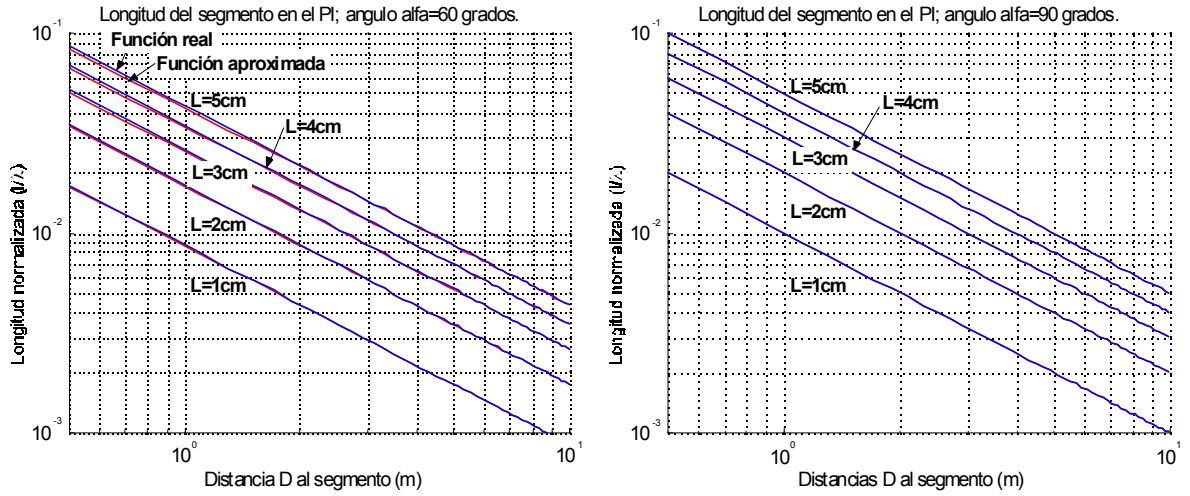


Figura 4-3: Longitud recuperada en el PI de un segmento de dimensión vertical L , en función de la distancia D , y normalizada respecto a la distancia focal λ . Gráficas con elevaciones $\alpha = 60^\circ$ y $\alpha = 90^\circ$.

esto es a grandes distancias, pues simultáneamente se tienen valores de D del orden de los metros, frente a los pocos centímetros que podría tener un patrón determinado en la marca, y además $\alpha \rightarrow 90^\circ$ cuando se trata de obtener imágenes de marcas lejanas.

La figura 4-3 muestra los resultados obtenidos aplicando las relaciones obtenidas en 4.3, una vez normalizadas respecto al valor de λ ; las condiciones de trazado de las gráficas mostradas son:

- distancias D , al segmento, entre 0.5 y 10 metros;
- longitudes L , del segmento, entre 1 y 5 centímetros;
- ángulos de elevación, α , de 60° , para la gráfica de la izquierda y 90° , para la gráfica de la derecha.

El efecto de la aproximación señalada en la ecuación 4.3 sólo puede observarse en la gráfica para $\alpha = 60^\circ$; aún a pesar de forzar un ángulo relativamente elevado para la observación de marcas lejanas, el efecto de tal aproximación no resulta apreciable para $D > 1.5\text{ m}$. En consecuencia, la relación $l_v = \frac{\lambda L}{D} \sin \alpha$ puede considerarse válida para la determinación del alcance máximo del SPL, una vez conocidos los datos de cámara (resolución en pixels y óptica usada) y marca (longitud L del patrón vertical a detectar).

El problema del uso de segmentos horizontales en la detección de patrones

Si realizamos los mismos supuestos para la observación de un segmento L situado en horizontal, paralelo al plano XY , puede llegarse a una expresión similar a la ecuación 4.3, sin más que cambiar la coordenada v del PI por la u (en horizontal) y el ángulo α , de elevación, por el γ , de giro alrededor del eje vertical, Z , imponiendo como restricciones un alabeo $\beta = 0$, y una elevación $\alpha \rightarrow 90^\circ$. Con estas restricciones, bastante próximas al caso práctico de observar una marca a gran distancia, se obtiene la siguiente expresión:

$$l_h = \frac{\lambda L \sin \gamma}{D + L \cos \gamma} \Big|_{D \gg L} \simeq \frac{\lambda L}{D} \sin \gamma, \quad (4.4)$$

en donde también puede despreciarse el efecto del segundo sumando en el denominador a efectos de determinar la distancia máxima, D , de visualización del segmento considerado. Es de destacar que, debido al criterio de sistemas de coordenadas elegido, los valores posibles de γ son $\pi \leq \gamma \leq 2\pi$, correspondiendo el valor $\gamma = 3\pi/2$ a la posición frontal respecto a la marca, la cual se considerará situada en el plano vertical YZ . Esto da lugar a una *inversión* en la dimensión horizontal, que indica sólo una posición de la marca *a espaldas* de la posición de referencia inicial de la cámara.

Una variación a la ecuación 4.4, más conveniente para su manejo práctico, sería transformar γ en otro ángulo, ϕ , más intuitivo y que podría denominarse como *ángulo de orientación relativa*, pues se refiere al existente entre el eje óptico y la normal a la MPL. Si se toma la posición frontal a la marca como $\phi = 0$, se tiene que $\phi = \gamma - \frac{3\pi}{2}$, con lo que 4.4 se transforma en:

$$l_h = \frac{\lambda L}{D} \cos \phi, \quad (4.5)$$

con un rango de valores de ϕ dado por $-\frac{\pi}{2} \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$.

4.1.3 Determinación del alcance del SPL

Como alcance del SPL puede definirse la distancia máxima a la cual es posible detectar la marca artificial y extraer la información encerrada en ella. Tal alcance depende, en suma, de la resolución de la cámara (en pixels), del tamaño del sensor, de la óptica instalada y del tamaño y ubicación de los patrones grabados sobre la MPL. A partir de las expresiones obtenidas para la longitud de un segmento, vertical u horizontal, proyectado en el PI (ecuaciones 4.3 y 4.5) y de la información disponible de la cámara, se puede hacer una estimación del alcance.

En primer lugar cabe considerar cuál de entre las dimensiones vertical y horizontal de un patrón dado será la primera en limitar el alcance; a la vista de las expresiones 4.3 y 4.5 se observa una única diferencia: el seno/coseno de un cierto ángulo. En el caso de un segmento vertical, tal factor

es $\sin \alpha$, siendo α el ángulo de elevación del eje óptico, definido desde la vertical (eje Z). El valor de este ángulo, suponiendo que la MPL se encuentre, como será habitual, en el mismo plano horizontal que la cámara o ligeramente por encima, tendrá un valor próximo a $\alpha = 90^\circ$. Esta afirmación es tanto más cierta cuanto más lejos esté la marca, pues en tal caso la influencia de la diferencia de alturas entre marca y cámara tenderá a ser mucho menor que la propia distancia; en concreto el valor de α puede aproximarse como

$$\alpha \simeq \arctan \frac{R}{\Delta h},$$

siendo R la distancia a la marca y Δh la diferencia de alturas entre marca y cámara¹. Con todo ello, el factor $\sin \alpha \rightarrow 1$, con lo que su efecto sobre la reducción de la longitud l_v no es notable.

Por contra, el factor $\cos \phi$ correspondiente a la expresión de l_h sí tiene una influencia notable, pues tal ángulo no está limitado a un valor concreto sino que puede variar notablemente (en principio, entre $-\frac{\pi}{2}$ y $\frac{\pi}{2}$), según sea la posición-orientación del móvil respecto a la marca, y con ello su efecto sobre l_h .

Queda demostrado, entonces, que la dimensión que restringe la visibilidad de un determinado patrón es, en mayor medida, la horizontal, por lo cual habrá que disponer los parámetros más críticos en **sentido vertical** a fin de aumentar el alcance hasta el máximo posible. Por consiguiente, se tomará la ecuación 4.5 como la de referencia para determinar el alcance del SPL.

Despejando D de 4.5 y normalizando la expresión obtenida respecto de una longitud unitaria de $L = 1$ cm, se obtiene:

$$\overline{D} = \frac{\lambda}{l} \cos \phi.$$

El valor de λ , en sí mismo, no es significativo a menos que se sepa el tamaño y la resolución del sensor de imagen. Un criterio más oportuno es usar el dato del campo de visión horizontal (*Field of View*, FOV), medido en grados, pues así se tienen en cuenta, en un solo valor, la distancia focal y las dimensiones del sensor de imagen. La relación entre el valor del FOV , la distancia focal λ , y el ancho del sensor de imagen W , es:

$$FOV = 2 \arctan \left(\frac{W}{2\lambda} \right). \quad (4.6)$$

Por otro lado, la dimensión l , correspondiente a la longitud proyectada en el PI, como tal dato no resulta significativo en sí mismo. En efecto, lo que permite detectar o no una determinada

¹En la aproximación realizada se considera la cámara con su eje óptico paralelo al plano XY (cámara horizontal).

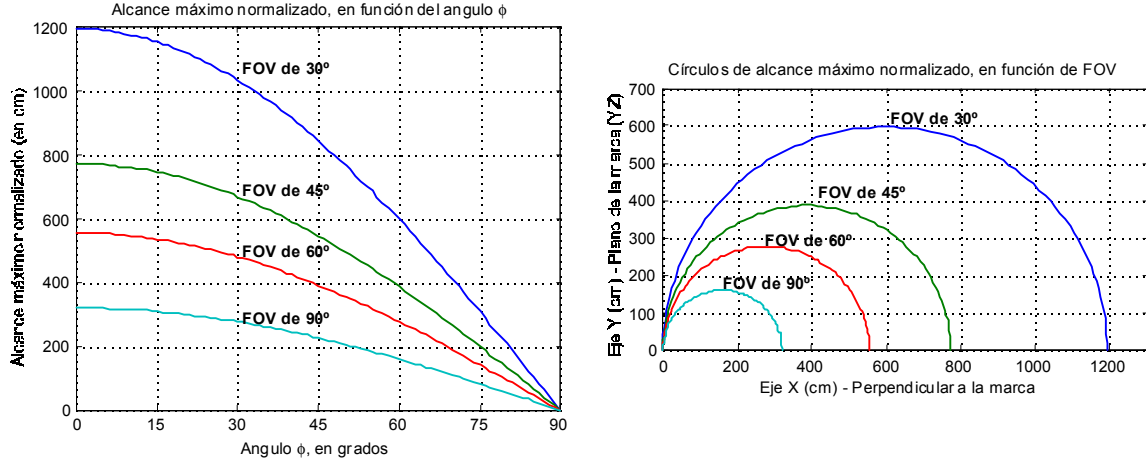


Figura 4-4: Alcance del SPL, normalizado respecto a $L = 1$ cm y por pixel de proyección en PI, tomando FOV como parámetro. A la izquierda, representación del alcance en centímetros respecto al ángulo de orientación relativo, ϕ . A la derecha, los mismos datos proyectados sobre el plano XY .

característica en una imagen es el número de pixels, $\#p$, sobre el que l se proyecta, por lo cual será este valor el que habrá de ser tomado como entrada a una expresión útil para el alcance. Así, sustituyendo W en la expresión 4.6 por P_h , siendo este valor *el número de pixels en horizontal* del sensor de imagen y despejando λ , se obtiene:

$$\lambda_p = \frac{P_h}{2 \tan(\frac{FOV}{2})},$$

en donde λ_p vendría dada en unidades de pixel. Sustituyendo este valor en la expresión de $\overline{D}$ y tomando l en pixels, se obtiene la expresión final:

$$\overline{D} = \frac{P_h}{\#p} \cdot \frac{\cos \phi}{2 \tan(\frac{FOV}{2})}. \quad (4.7)$$

La expresión 4.7 puede representarse gráficamente, de una forma cómoda, tomando FOV como parámetro y relativizando el resultado respecto al número de pixels en el PI, tomando $\#p = 1$. Respecto a P_h , resulta evidente que el alcance se aumenta simplemente tomando sensores con un número de pixels alto, para un mismo tamaño y óptica. Usando como referencia un sensor VGA estándar (640×480 pixels) se obtienen los resultados que se muestran en la figura 4-4; la gráfica de la izquierda muestra el alcance máximo, en centímetros, por unidad de longitud L (en cm), y por pixel proyectado en el PI. Así, por ejemplo, si se considera que 3 pixels son suficientes para garantizar la detección, con una óptica de $FOV = 45^\circ$ se obtendría un alcance de $\frac{772 \text{ cm}}{3} = 2.57 \text{ m}$, por cada

centímetro de L . Dada la simetría del problema respecto a ϕ , sólo se representan los resultados para $\phi \geq 0$.

Proyectando los datos anteriores sobre el plano XY , se obtiene la gráfica derecha de la figura 4-4; se observan, como cabría esperarse, sendos círculos que definen un área de utilización efectiva del SPL sobre el plano de rodadura. El límite exterior de los círculos es el alcance máximo, en las condiciones aplicables a cada caso, siendo tal alcance a su vez el diámetro del círculo en cuestión, y estando la marca situada en uno de los extremos del citado diámetro.

En resumen, el alcance del SPL debe determinarse en función de la longitud proyectada en el PI de la dimensión más restrictiva del patrón de la imagen a detectar. De las dimensiones horizontal y vertical, es la horizontal la más restrictiva en igualdad de condiciones, al depender de la orientación relativa, ϕ ; en todo caso conviene no ignorar de antemano la influencia de la dimensión vertical en la determinación del alcance. Una vez determinado el valor del alcance D , éste experimenta una reducción respecto al ángulo ϕ la cual delimita una zona circular, correspondiente al **área de cobertura del SPL**, que tiene un diámetro igual al alcance y la MPL situada en uno de sus extremos.

4.2 Detección de las MPL

Una vez demostrada la ventaja de usar patrones situados en dirección vertical, en cuanto se trata de aumentar la zona de cobertura de un sistema de marcas para vehículos autónomos rodantes, una segunda condicionante a tener en cuenta en el diseño de la marca artificial es la de la eficiencia en la detección, esto es: la incorporación de alguna característica definitoria y, a ser posible, excluyente para poder establecer, con un mínimo coste computacional, la presencia de una marca válida.

Por un lado las marcas deben destacar sobre el entorno. Por ello es oportuno que estén constituidas por una determinada secuencia de franjas oscuras sobre un fondo blanco². Además, la localización de las marcas debe lograrse incluso en condiciones de iluminación o de ruido poco favorables. En esta tarea, y dado que el proceso de la imagen se reduce al de líneas aisladas, son aplicables técnicas de procesamiento de señal robustas en problemas equivalentes a éste, como es el procesamiento de ecos codificados de ultrasonidos en sistemas multisensores o de precisión [Sarwate 80] [Ureña 99].

En consonancia con las conclusiones de los trabajos referenciados, se ha escogido, como patrón de búsqueda inicial, un diseño en las marcas que representa mediante barras negras y blancas un código Barker de 7 bits. La estructura de tal código es: $[1, 1, -1, -1, 1, -1, 1]$, y cumple la propiedad

²Recuérdese que una condición adicional, compatible con la aquí indicada, es la de poder ser impresa por cualquier usuario con medios informáticos comunes.

de tener una autocorrelación que presenta un pico acusado, cuando coincide la secuencia de forma exacta, junto a unos lóbulos laterales reducidos, en ausencia de tal coincidencia.

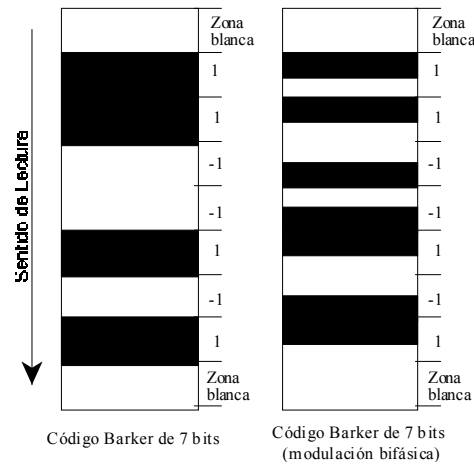


Figura 4-5: Diseño de marcas con código Barker de 7 bits.

Se han estudiado dos posibles formas de codificar, en forma visual, tal código (ver figura 4-5); tales posibilidades son:

- codificación directa, esto es, franja negra = 1 y franja blanca = -1;
- modulación bifásica, codificando el código en las transiciones entre negro y blanco, en la forma $[\text{franja negra} \rightarrow \text{franja blanca}] = 1$, y $[\text{franja blanca} \rightarrow \text{franja negra}] = -1$.

El proceso de la detección de un código Barker en la imagen, dado el gran margen de distancias a cubrir y los diversos ángulos desde los que se puede ver tal patrón, debe tener en cuenta la imposibilidad de saber el periodo básico de bit del código a detectar. Así, el algoritmo de búsqueda constará de dos fases, procesándose cada línea vertical (columna de imagen) aisladamente, dado el carácter unidimensional del código patrón definido. Estas fases son, genéricamente:

- **Sincronización:** tras una búsqueda de flancos importantes en cada columna de la imagen (transiciones blanco-negro), se debe recuperar de la secuencia de entrada a comprobar el periodo básico de bit del código Barker.
- **Correlación:** Si existe alguna posible secuencia temporal que se corresponda con el código Barker usado, se realiza la correlación con el patrón Barker, sintetizado a partir del periodo de bit recuperado en la fase anterior.

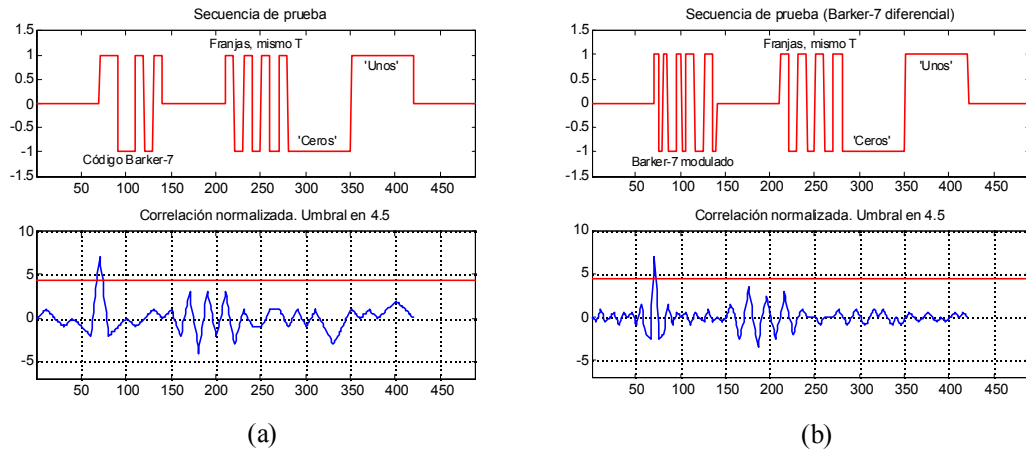


Figura 4-6: Salida del correlador: (a) con código Barker directo; (b) con código Barker modulado.

La figura 4-6-(a) muestra el resultado de la correlación³ para el caso de una línea donde se ha detectado un código Barker directo y en la figura 4-6-(b) si éste está codificado con modulación bifásica. En este último caso existen más transiciones lo que permite una mejor sincronización del patrón pero a costa de disminuir a la mitad el grosor de las franjas. Esto reduce la distancia máxima a la que la marca es detectada.

En ambos casos la detección de la marca es reportada por un pico en la salida del correlador; como consecuencia de las propiedades del código Barker [Ureña 98], este pico no sucede ni siquiera cuando se detectan franjas homogéneas con el mismo período de repetición que el código en sí, lo cual puede ser habitual en entornos fuertemente estructurados (persianas, baldas, etc.).

4.2.1 Comprobación experimental y conclusiones

Para apoyar la decisión sobre la definición más idónea del patrón de identificación de marca, se realizaron varias pruebas con imágenes reales. La figura 4-7-(a) muestra una de ellas, en la que se han colocado varias marcas en posiciones y distancias diversas. Diversos elementos introducen ruidos, brillos y franjas indeseadas. La cámara usada es una CCD, tipo Sony XC-73CE, de 1/3 in, equipada con una óptica de $\lambda = 4.8$ mm; la imagen se capturó en formato VGA, lo que da una resolución de 640×480 pixels, para un ancho efectivo del sensor de 4.7 mm. Con estos datos, y mediante la relación definida en 4.6, se tiene que el *FOV* es de 52° .

Se presenta el resultado de la detección de la marca que, en escorzo, se encuentra más próxima a la puerta; la distancia hasta ella es de 3.4 m. La figura 4-7-(b) ilustra el resultado tanto de la

³Correlación normalizada al tamaño de un símbolo.

umbralización de la línea marcada en la imagen de la figura 4-7-(a) como la salida del correlador para dicha línea: se aprecia claramente un pico destacado en la posición de comienzo del código, con lo que la marca es detectada sin problemas.

Un resultado similar se tiene para la marca más distante, visible en la misma imagen pero situada a unos 6 m, bajo la ventana a la derecha en la figura 4-7-(a); un detalle de la misma se muestra en la figura 4-8-(a). Con objeto de aumentar el ruido en la línea a detectar se posicionó la marca bajo las persianas y junto a un bloque de archivadores negros con titulares blancos. El resultado de la detección de esta segunda marca, más distante, se muestra en la figura 4-8-(b); la marca es de nuevo fácilmente identificable en la salida del correlador, habiéndose eliminado el ruido de la persiana y soportando el aportado por los archivadores.

En la misma figura 4-8-(a) es visible una prueba de códigos (marca en el centro, sin círculos) usando las versiones Barker-7 directa (a la izquierda en la marca) y modulada (a la derecha). La degradación de la imagen hace imposible la recuperación del código Barker-7 modulado a esa distancia. Este hecho, unido a la escasa diferencia práctica en la salida del correlador (ver figura 4-6) desaconsejan la adopción de esta versión, decantándose la decisión final por la codificación directa.

4.2.2 Ventajas del uso de códigos Barker unidimensionales

El hecho de usar códigos unidimensionales para detectar la presencia de una marca artificial en una imagen dada presenta las siguientes ventajas:

- El procesado de la imagen es más rápido que en el caso de pretender detectar patrones bidimensionales.
- La dirección elegida, en vertical, independiza más la detección de la marca de la orientación actual del móvil.
- No es necesario, en primera aproximación, barrer la imagen línea a línea. De hecho, para eliminar espúreos en la detección, el autor propone fijar el número de códigos detectados a dos, en columnas vecinas, antes de validar una detección. Así, una primera exploración puede hacerse sólo en una de cada dos columnas, acelerando el proceso inicial en un 50%.
- En su caso, la detección de las marcas podría acelerarse aún más si se paralelizan los procesos de adquisición de la imagen y la exploración por columnas. Una forma sencilla de realizar esto sería rotando la cámara 90° , alrededor de su eje óptico, de tal forma que la exploración por líneas de la cámara se convierta en exploración por columnas de la imagen del entorno.

En lo que respecta a la decisión de adoptar la codificación directa, en lugar de la modulada, a su favor se tiene el mayor alcance logrado. En efecto, usando las relaciones definidas en 4.7, con

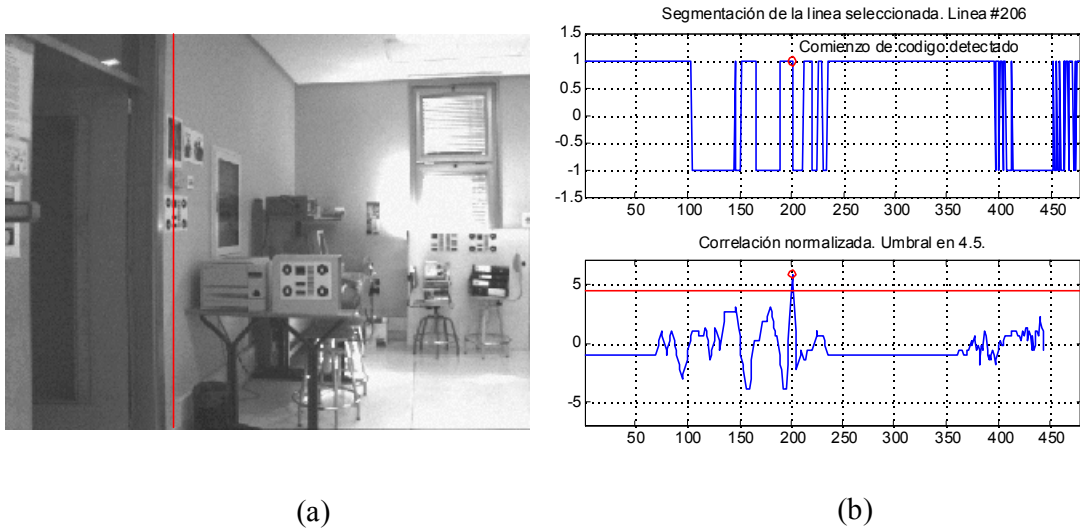


Figura 4-7: Marca a 3.4m: (a) imagen resultante, la línea de exploración se aprecia en vertical, próxima al marco de la puerta; (b) resultado de la detección.

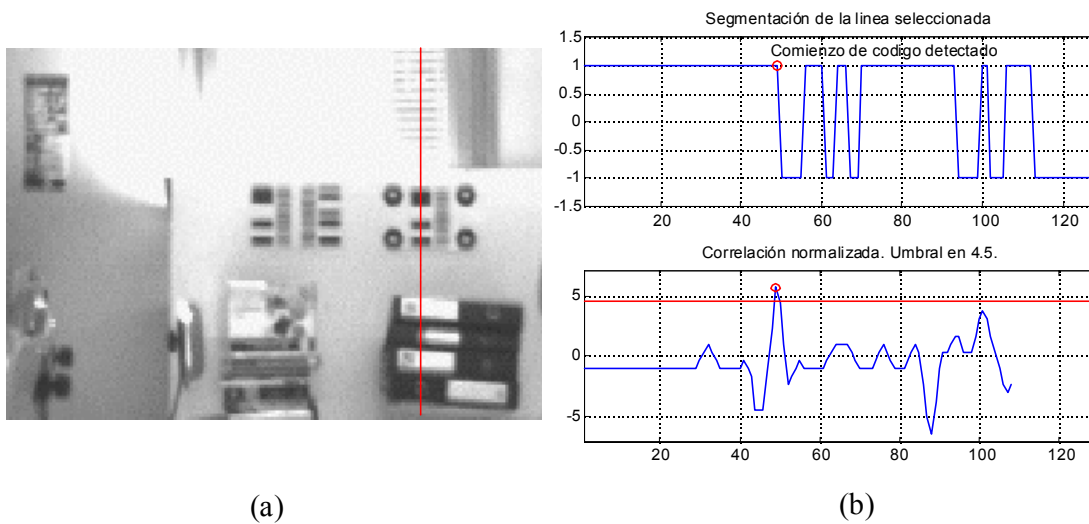


Figura 4-8: Detalle de la imagen de prueba: (a) marca a 6m; (b) resultados de la detección de la misma.

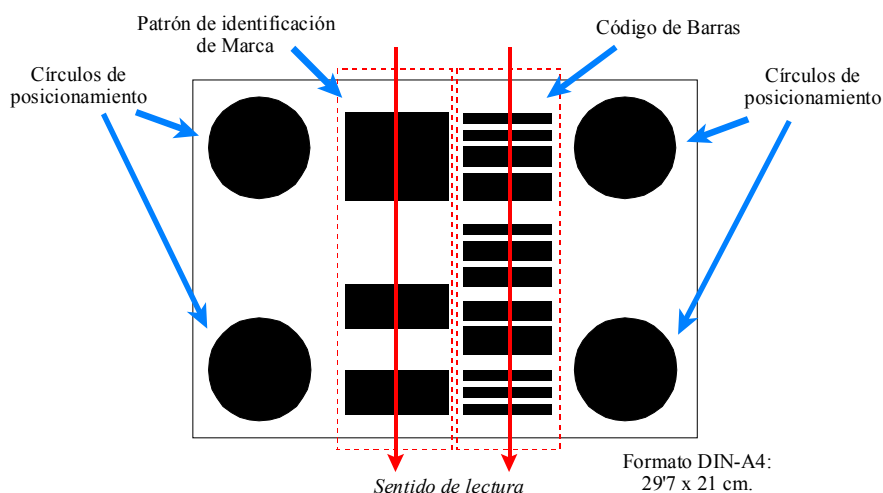


Figura 4-9: Descripción de la MPL

los datos de la cámara usada en la captura de las imágenes de prueba de esta sección, se tiene una alcance teórico de 2.13 m por cada centímetro de altura del segmento a detectar, supuesta una proyección necesaria de tres⁴ pixels en el PI.

Descartando de antemano la versión modulada del código Barker, el ancho de la franja más estrecha, equivalente al tamaño de bit, de las marcas mostradas en los ejemplos de las figuras 4-7 y 4-8, es de 2.5 cm; este dato resulta en un alcance máximo teórico garantizado de 5.32 m. No obstante se comprueba que la marca situada a 6 m, se detecta sin dificultad aparente, al menos en este caso. Cabe señalar que, simplemente con bajar el número de pixels exigido a dos, el alcance teórico llega hasta los 8.2 m, distancia dentro de la cual se encuentra la marca ejemplo; de hecho, su tamaño en la imagen es de unos 19 pixels, lo que equivale a 2.7 pixel/cm. Esta reducción en el tamaño puede causar dificultades en la detección en toda condición, por lo que el autor considera más razonable adoptar como criterio el límite entero de 3 pixels.

4.3 Diseño de la MPL

Justificadas las decisiones más importantes respecto al diseño de la marca artificial asociada al SPL, en la presente sección se detallarán los aspectos geométricos más importantes de la misma. La figura 4-9 reproduce, de nuevo, su aspecto con objeto de facilitar su descripción detallada.

El patrón de identificación de marca, correspondiente a un código Barker de 7 bits, tal y como

⁴Si sólo fueran dos pixels, se corre el riesgo de un muestreo inadecuado de los niveles de luminosidad de la imagen, impidiendo la detección garantizada del patrón (imagen borrosa).

se justificó en la sección anterior, presenta una altura mínima por símbolo (bit) de 2.5 cm, con un ancho en horizontal de 6 cm. De esta forma, en igualdad de condiciones para la detección de parámetros verticales y horizontales, se admite una reducción por visión lateral hasta un 41.7% de su dimensión original (resultante de 2.5/6). Aplicando la condición marcada por 4.7, el ángulo de desviación admisible respecto a la normal de la marca puede ser de hasta 65.3° .

Dado que el alcance del SPL está relacionado directamente con la detección del patrón de identificación, es razonable tomar a esta distancia como referencia para los otros valores; este alcance máximo será identificado como D_0 .

Los círculos de posicionamiento tienen 6 cm de diámetro, por lo que su visibilidad estará limitada a la misma condicionante que el código Barker de identificación, del mismo ancho. La distancia horizontal entre centros de los círculos es de 21.5 cm, mientras que la distancia vertical es de 13 cm. Al respecto del sistema de posicionamiento, la dimensión a maximizar es la horizontal, dado que será la que experimente una reducción significativa con el ángulo de visión; esto justifica la especificación en sentido horizontal del formato DIN-A4 para la MPL. En todo caso, estas distancias entre centros serán siempre visibles dentro del rango D_0 , dado que para poder encontrar los círculos, primero debe encontrarse el código Barker de identificación, cuyas dimensiones globales son menores.

El aspecto más crítico resulta ser el código de barras: no es posible incluir información suficiente con el mismo alcance D_0 que el código Barker. La razón es evidente, en su tamaño, el código Barker sólo encierra 7 bits de información; si se adoptara este mismo ancho de bit para el código de barras, y en igualdad de condiciones ópticas, sólo podrían usarse $2^7 = 128$ combinaciones distintas, sin paridad ni chequeo de errores, lo cual se manifiesta insuficiente para el modelo de navegación por interiores estructurados definido en el capítulo anterior.

La decisión finalmente adoptada por el autor fué la de reducir sus dimensiones para incluir, al menos, cuatro dígitos con un *checksum* de verificación (ver capítulo 3). Así, las dimensiones de la barra básica se fijaron en: 0.5 cm en vertical y 5 cm en horizontal. Esto da un alcance teórico de $0.2D_0$, cinco veces inferior al del código de identificación de marca. En lo que respecta a la reducción por desviación angular, esta es muy superior a la del código Barker, admitiéndose una reducción en un factor 0.1, lo que equivaldría a una desviación angular de $|\phi| \simeq 84.27^\circ$.

En el diseño final de la MPL se ha pretendido maximizar las dimensiones de todos los patrones encerrados en ella, dejando además las zonas en blanco necesarias para poder distinguir los elementos negros del fondo blanco del papel. No obstante, en la medida de lo posible se aconseja situar la marca en paredes claras y lisas, a fin de aprovechar éstas como zonas libres de ruido o '*zonas de silencio*', en la terminología asociada a los códigos de barras.

4.3.1 Aumento del alcance para la lectura del código de barras

La reducción en cinco veces, aproximadamente, del alcance relativo entre la detección de la marca y la decodificación del código encerrado en la misma, puede ser fácilmente superable si se dispusiera de una forma de realizar un *zoom* óptico de la imagen de la marca.

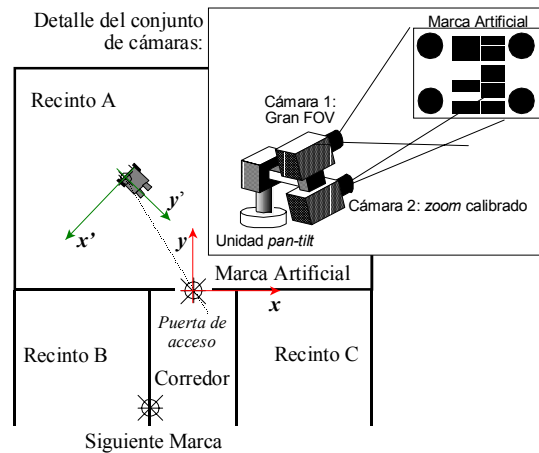


Figura 4-10: Subsistema de Visión: detalle del conjunto de cámaras y posición de las marcas.

En la resolución de este dilema incide favorablemente el bajo coste actual de los sensores de visión; así se ha abierto la posibilidad de que éstos puedan utilizarse en sistemas sensibles al coste como es este caso. La propuesta del autor es la siguiente: a bordo de la silla de ruedas se dispone de dos cámaras montadas sobre una unidad *pan-tilt* que permite orientarlas en la dirección requerida (figura 4-10). La misión de estas cámaras es:

- La primera, con distancia focal (λ_1) pequeña y, por tanto, gran ángulo de visión dispone de una amplia imagen del entorno, lo cual facilita, en una sola vista, la identificación y localización de las posibles marcas ubicadas en él. La detección de la marca permite accionar la unidad *pan-tilt* de modo que ésta se sitúe, aproximadamente, en el centro de la imagen⁵.
- La segunda cámara, de $\lambda_2 > \lambda_1$, se ajusta para que su campo de visión coincida sólo con la parte central de la imagen de la primera cámara. Su función sería doble: permitir efectuar la lectura de los códigos de barras a distancias comparables, e incluso mayores, a la de la propia detección de marca y aumentar la exactitud de la medida de la posición de los círculos. Para cumplir ambos objetivos basta con que el *zoom* equivalga a aumentar por cinco la imagen.

⁵ Este posicionamiento de la unidad *pan-tilt* no es crítico

Las cámaras propuestas para esta solución son del tipo CMOS, de salida digital directa⁶ en formato VGA, y con un coste minorista inferior a los 100\$. Esto hace ventajoso el usar dos cámaras en lugar de una óptica convencional motorizada para realizar *zooms* de imágenes, por múltiples motivos, el más importante de los cuales es la dificultad de mantener una adecuada calibración con ópticas variables, como las de los *zoom* mecánicos.

4.4 Segmentación de la información de las MPL

Una vez detalladas las bases del diseño elegido para la MPL, sus parámetros geométricos y modelado su alcance teórico, en esta sección se presentan los algoritmos propuestos para la segmentación de las informaciones encerradas en ella.

En las siguientes subsecciones se describen los mismos y se ilustran mediante esquemas en pseudo-código, a fin de hacer patente la estructura interna de los algoritmos descritos. En el pseudo-código mencionado los comentarios se hacen preceder del símbolo `'*/'`, mientras que las líneas largas se prolongan con tres puntos seguidos, de forma análoga a la sintaxis correspondiente en entorno Matlab. Para el resto de las funciones se han escogido sentencias de control de flujo identificadas en negrita y delimitadas por una estructura: **sentencia ... endsentencia**.

4.4.1 Algoritmo base

El núcleo del SPL, o algoritmo base, se ilustra en la figura 4-11. El inicio o llamada al algoritmo comienza con la captura de la imagen a tratar. Sobre esta imagen se localizarán los posibles sectores que contienen códigos Barker, correspondientes a las MPL definidas. Si existen candidatos a ser MPL's, y mientras exista alguno de ellos en la imagen, se efectúa la segmentación de los cuatro círculos que forman parte de la misma.

Para cada MPL, en caso de detectarse el centroide de tres o más círculos, se procede a pasar el algoritmo de posicionamiento, el cual se detallará en profundidad en el siguiente capítulo de esta tesis. Este algoritmo no puede determinar la posición si no dispone de, al menos, tres de los cuatro puntos del patrón de posicionamiento. No obstante, tal y como se aprecia en el listado de la figura 4-11, antes de obtener la posición se realiza una *calibración de centroides*. A este respecto hay que destacar las siguientes cuestiones:

- Para la detección y segmentación de la MPL, la imagen de la cámara no necesita estar calibrada, con el consiguiente ahorro en tiempo de proceso.

⁶Ver, por ejemplo, Omnivision en <http://www.ovt.com>

```
*/Algoritmo: Base
*/Inicio
captura_de_imagen
busqueda_de_candidatos_Barker
while hay_candidatos
    busqueda_de_circulos
    if numero_de_circulos > 2
        calibracion_de_centroides
        obtener_posicion
        if distancia < limite_lectura_codigo
            leer_codigo_barras
        endif
    endif
enwhile
salida_del_algoritmo ...
    (posicion-orientacion,codigo_barras)
```

Figura 4-11: Núcleo del SPL: algoritmo base

- Para obtener la posición sólo se necesita convertir, como máximo, ocho coordenadas, correspondientes a las dimensiones (u, v) de cada uno de los cuatro centroides en el plano imagen. Con ello, puede tenerse un modelo de calibración de cámara notablemente complejo, incluyendo por ejemplo factores de distorsión radial y tangencial, sin afectar en demasía al tiempo de proceso pero sí favorablemente a la precisión en el posicionamiento del SPL

El modelo de calibración de cámara elegido se fundamenta en los trabajos de Jean-Yves Bouguet [Bouguet 99], en el California Institute of Technology (Caltech), de Pasadena, EEUU. Este investigador proporciona, gratuitamente, en su página web⁷ una interesante herramienta de calibración *off-line* de cámara para entorno Matlab en base a una plantilla de escaques blancos y negros. El modelo de calibración deriva, a su vez, del clásico de Tsai [Tsai 87] y de la aproximación más moderna de Heikkilä [Heikkilä 96]. Este modelo incluye hasta un coeficiente de sexto orden, en distorsión radial, y de segundo orden, en distorsión tangencial.

El último paso del algoritmo base es la lectura del código de barras. Como puede comprobarse en la figura 4-11, esta lectura sólo podrá hacerse si la distancia está dentro del margen definido por las características de óptica y cámara. La limitación de esta distancia puede obviarse sólo en el caso de adoptar una solución similar a la propuesta en la sección 4.3.1.

⁷http://newbologna.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/

4.4.2 Algoritmo de detección de candidatos a MPL

Éste es llamado por el algoritmo base descrito en la subsección anterior, el cual le entregaría como parámetro la imagen a ser tratada; su estructura se muestra en la figura 4-12. La imagen será barrida por columnas, en intervalos de dos, por ejemplo sólo las columnas pares (o impares); así se reduce aproximadamente a la mitad el tiempo de barrido necesario.

```
*/Algoritmo: busqueda_de_candidatos_Barker
*/Inicio
input imagen          */Organizada en (filas,columnas)
while numero_de_columna < maximo_cols_imagen
    leer_columna_2n          */solo columnas pares
    busca_codigos_Brk7
endwhile
if num_codigos > 0
    for todos_los_codigos_posibles
        leer_columnas_contiguas    */facilita eliminar ruidos
        busca_codigos_Brk7
    endfor
    agrupar_posiciones_de_codigos
    for todos_los_grupos_encontrados
        if (hay dos o mas codigos por grupo) & ...
            (cumple la relacion de aspecto) & ...
            (es el mayor de la zona)
            validar_grupo
        else
            eliminar_grupo
        endif
    endfor
endif
salida_del_algoritmo ...
    (num_grupos_validos,coordenadas)
```

Figura 4-12: Algoritmo de búsqueda de candidatos a MPL.

En cada columna se realiza la exploración en busca de códigos Barker-7, anotándose los posibles candidatos a ser tales códigos. Sólo si en una columna dada se encuentra un candidato, se exploran las columnas contiguas a cada uno de ellos en busca del mismo código, lo cual indicaría la posible presencia de alguna MPL.

Para descartar en lo posible falsas detecciones, los posibles códigos se agrupan, en función de parámetros como la similitud de dimensiones y su proximidad, y se descartan aquellos grupos que no cumplan las siguientes condiciones:

- El grupo esté formado por dos o más códigos, para descartar espúreos.

```

*/Algoritmo: busca_codigos_Brk7
*/Inicio
  input columna          */Columna de la imagen capturada
  filtro_y_derivada_de_columna
  busqueda_picos(umbral=2*potencia_media_columna)
  if num_picos >= 6
    grupo = columna(agrupar_6_picos)
    while grupo <> vacio
      obtener_Ts_entre_picos
      comparar_Ts_con_TsBarker
      if diferenciasTs < 5%
        Brk7 = sintetizar_codigo_Barker_ideal_con_Ts
        Secuencia = datos_grupo_en_grises
        C = correlacion(Brk7*Secuencia)
        if C > 4          */compensa a operar con niveles de gris
          validar_grupo
        else
          descartar_grupo
        endif
      endif
    endwhile
  endif
  salida_del_algoritmo ...
    (num_codigos_Barker_validos, coordenadas)

```

Figura 4-13: Algoritmo de búsqueda de códigos Barker de 7 bits.

- La relación de aspecto (ancho/alto) corresponda con el del código Barker de la marca, lo cual elimina los ruidos debidos al código de barras, más ancho relativamente que el código Barker.
- En la zona de cobertura de la posible MPL no existe un grupo Barker mayor, con lo que se refuerza la condición anterior cuando, por fuerza de una visión lateral, el ruido de los códigos de barras pudiera cumplir la relación de aspecto.

La eficiencia del algoritmo propuesto depende de la propia complejidad de la imagen, por lo que no se puede determinar ésta más que a través de una estimación, dependiente del tipo de entorno e iluminación existente en cada momento. En todo caso, esta eficiencia depende directamente del algoritmo de búsqueda de códigos Barker-7, el cual se detalla en la figura 4-13.

La entrada a este algoritmo es la columna de datos unidimensionales (array 1D de niveles de gris) procedente de la imagen a procesar. El primer paso es el filtrado, en 1D, y diferenciación de los datos de la columna. En este paso, la función aplicada es notablemente simple y se deriva del clásico algoritmo Sobel de búsqueda de flancos en 2D, bastante efectivo tanto en su propia

función de detectar las transiciones más notables como en eliminar ruidos de fondo. En concreto, el filtro+derivada realizado es de la forma:

$$O(k) = I(k + 1) - I(k - 1), \quad (4.8)$$

en donde $I(n)$ es el dato $n_{ésimo}$ de entrada y $O(n)$ es el dato $n_{ésimo}$ de salida. La principal propiedad de esta aproximación es su sencillez de implementación, conservando una notable eliminación de ruido aleatorio de fondo y capacidad de detección de cambios bruscos.

La salida, así filtrada, servirá para determinar los flancos más notables de la columna dada, mediante la detección de aquellos picos máximos que superen un umbral dado. La determinación de este umbral se realiza teniendo en cuenta la potencia media de la señal filtrada, multiplicando ésta por un factor que se ajustó empíricamente; en la presente realización del SPL, este factor es de dos. Así, los picos se detectan como aquellos valores de $O(k)$ que cumplen:

$$O(pico) = \text{signo}[O(k)] \cdot [(|O(k)| > U_p) \& (|O(k)| \geq |O(k-1)|) \& (|O(k)| < |O(k+1)|)]$$

$$\text{con } U_p = \sqrt{2 \cdot \frac{1}{N} \sum_1^N O^2(n)}, \quad (4.9)$$

siendo N la longitud total de los datos de la columna de imagen. Nótese que se conserva también el signo del pico, lo que equivale a conocer el tipo de transición observado: de blanco a negro o viceversa.

La figura 4-14 muestra el resultado de aplicar las ecuaciones 4.8 y 4.9 a los datos de entrada, $I(n)$, de una columna de una imagen real. En el ejemplo mostrado, la localización del código Barker puede ser deducida a simple vista, entre las filas 200 y 250 de la imagen original (gráfica superior).

La gráfica central de la figura 4-14 se corresponde con la salida del filtro de la ecuación 4.8, sobre la que se han señalado con asteriscos los picos que cumplen la condición 4.9. Las líneas horizontales representan los umbrales aplicados, en función del signo de $O(n)$. Finalmente, la tercera gráfica es una representación de la potencia instantánea de la señal filtrada, esto es: $P(n) = O^2(n)$. Sobre ella se ha representado el umbral como U_p^2 ; la escala se ha representado en logaritmos, para hacer más visible el resto de picos de potencia y la relación de este umbral con el factor de cresta mencionado de dos veces su potencia media.

Una vez extraídos los picos significativos del array de datos 1D, se eliminan aquellas combinaciones que no correspondan a un posible código Barker. El criterio escogido para este primer filtrado es el de descartar toda aquella secuencia de picos menores a seis flancos detectados, y además en la secuencia correcta; esto es, si designamos por -1 el pico correspondiente a la transición blanco-negro y

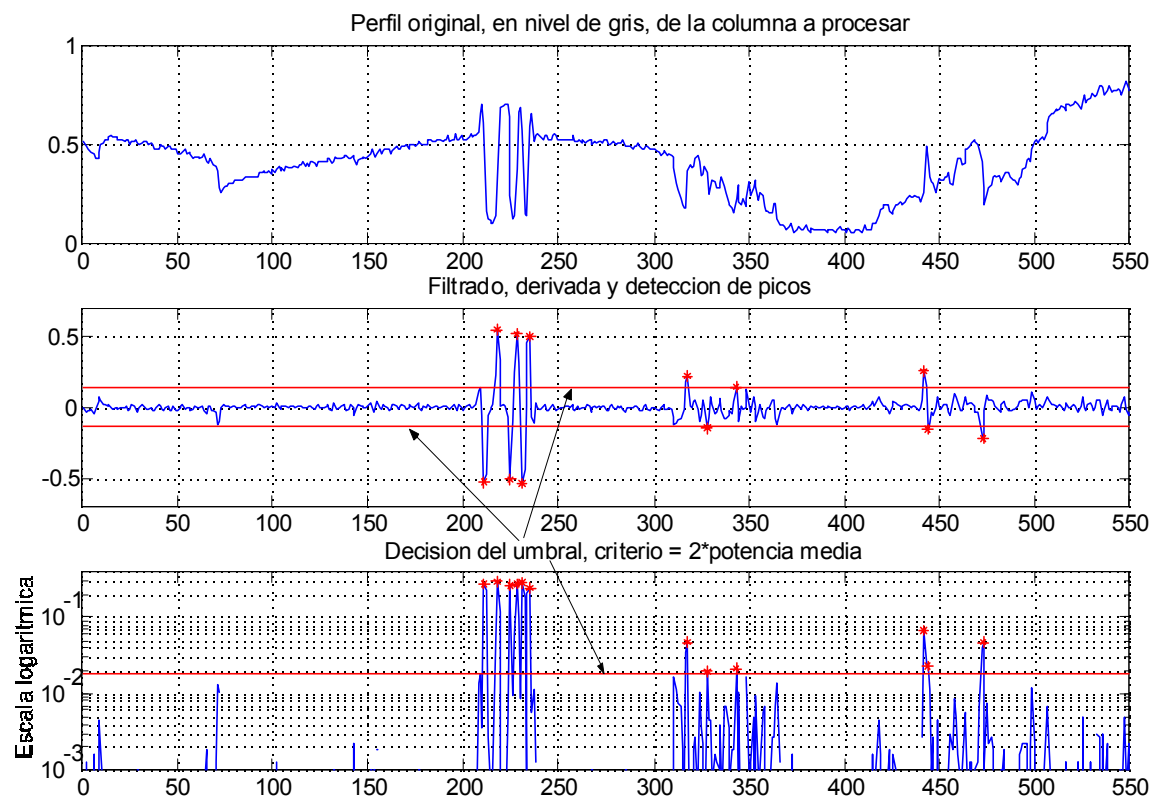


Figura 4-14: Procesado de una columna de imagen; de arriba a abajo: perfil original en nivel de gris; salida del filtro-derivada; determinación del umbral.

por +1 al de la transición contraria, la secuencia correcta debe ser: $S(i) = [-1, +1, -1, +1, -1, +1]$, representando $S(i)$ a cada posible grupo de seis flancos consecutivos presentes en $O(n)$. Este simple criterio ya elimina un número apreciable de puntos de la búsqueda.

El siguiente paso es determinar la secuencia temporal de $S(i)$; en primer lugar se determina el periodo básico de la secuencia, mediante la expresión $T_s(i) = \frac{1}{7} \{t[S(i+5)] - t[S(i)]\}$; se extraen después los periodos entre los flancos de $S(i)$ y se comparan éstos con la secuencia correcta de un código Barker, la cual sería $S_T = [2T_s, 2T_s, T_s, T_s, T_s]$, correspondiente a los siete bits en codificación directa. Si las diferencias entre los periodos internos de la secuencia $S(i)$ son inferiores al 5% del valor de T_s , el código Barker de ese punto se da como posible, en términos temporales.

Del paso anterior se sabe que los flancos detectados siguen la secuencia de un código Barker, pero queda por establecer si los niveles de gris entre los flancos se corresponden con las zonas blancas y negras buscadas.

En consecuencia, se realiza en este punto la correlación entre $O(b) = O(n)|_{n \in S(i)}$ y un código Barker sintetizado, $Bk(b)$, para medir lo mismo que $O(b)$. Dado que ambas secuencias son iguales,

la correlación se limita a ser la suma de la resultante del producto de ambos arrays de datos, esto es:

$$C = \sum_1^B \overline{O(b)} \cdot Bk(b), \quad (4.10)$$

en donde $\overline{O(b)}$ expresa la normalización de niveles de $O(b)$ en vistas a hacer corresponder su máximo con el valor $+1$ y su mínimo con -1 .

Gran parte de la eficiencia del algoritmo se fundamenta en no realizar la correlación como método de búsqueda del código Barker, sino como método de *confirmación* de la existencia del mismo; así, la expresión 4.10 sólo se calcula en aquellos puntos cuya secuencia temporal y de flancos ya presuponen la existencia fiable de un posible código. Además, tal expresión se aplica sobre la secuencia $O(b)$ sin umbralizar, esto es, en niveles de gris, para evitar ser confundidos por flancos extraídos de otro tipo de patrones similares pero espúreos.

La figura 4-15 muestra el efecto sobre una imagen real del algoritmo propuesto. La gráfica superior presenta el perfil completo de una columna dada: el código Barker está situado entre las filas 250 y 300 de la misma. La gráfica inferior muestra la secuencia normalizada $\overline{O(b)}$ y el código Barker sintético $Bk(b)$, representado en la mitad de su magnitud para ser visible más cómodamente. Tal y como se indica en la propia gráfica, el resultado de la correlación es de $C = 0.72$, corroborando la existencia del código citado, según los criterios expuestos en la sección 4.2.

Es interesante resaltar algunos de los otros datos expuestos en la misma gráfica. La distancia de 30 pixels se corresponde con el número de pixels existente entre el último y el primer flanco de la secuencia; de esa forma, el periodo $T_s(i) = 4.14$. En consecuencia, se sintetiza una secuencia Barker entera (sin interpolación en los flancos), basada en un redondeo de los periodos resultantes; así, tal secuencia temporal sería:

$$S_{Brk} = [1, 9, 18, 22, 26, 30],$$

tal y como se comprueba sobre la propia gráfica.

La interpolación del código Barker, $Bk(b)$, en las transiciones blanco-negro mejoraría, en principio, el valor de la correlación C , pero a costa de un mayor coste computacional. En lugar de ello, la ligera degradación en el valor teórico de C se ha compensado con una ligera bajada del umbral de validación de C . Según lo expuesto en la sección 4.2, este umbral es de 4.5; finalmente, se ha rebajado alrededor de un 10%, habiendo sido fijado en un valor de cuatro, tal y como se especifica en el listado de la figura 4-13. El punto de inicio de la secuencia Barker validada es marcado y constituye la salida de este algoritmo; tal marca es visible en la gráfica superior de la figura 4-15,

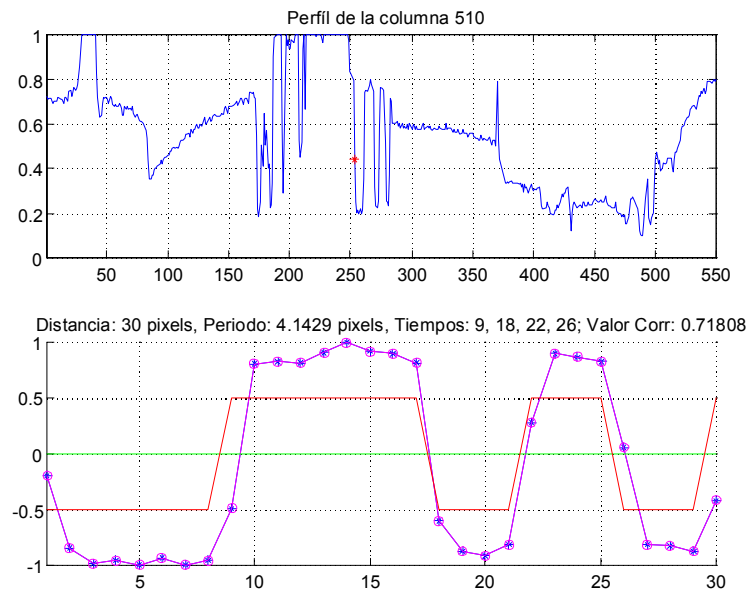


Figura 4-15: Correlación de la secuencia de la columna de imagen con el código Barker-7 sintético. Para facilitar su visualización, el código Barker se representa al 50% de su magnitud real.



Figura 4-16: Puntos de búsqueda de códigos Barker-7 en una imagen real.

Concepto	Num. de puntos	Porcentaje
Imagen original	442368	100%
Picos encima del umbral	11221	2.5%
Secuencias para comprobar	1716	0.39%
Códigos detectados	26	0.0059%

Tabla 4.1: Resumen de resultados de la detección de los códigos Barker.

sobre la fila 253.

La imagen de prueba que proporcionó la información representada en las figuras 4-14 y 4-15 se muestra a su vez en la figura 4-16. La imagen tiene una resolución de 768×576 pixels, lo que da un total de 442368 puntos de imagen, en 2D, de los cuales sólo se dieron como válidos 26, todos correctos.

La tabla 4.1 resume los resultados del análisis de la imagen de la figura 4-16. De los puntos totales de la imagen, sólo 11221 se identificaron como flancos de interés; de todos ellos, 1716 presentaban una secuencia de flancos compatible con un código Barker y que pasaron a ser analizados por sus secuencias temporales, lo cuál representa un máximo del 0.39% de los puntos totales de la imagen a comprobar mediante la correlación definida por la expresión 4.10; todos estos puntos están representados sobre la imagen original, en la misma figura 4-16. Finalmente, los 26 posibles candidatos presentes en la imagen fueron detectados, sin fallos ni pérdidas.

4.4.3 Segmentación de círculos y extracción de centroides

Tras la detección del conjunto de puntos correspondientes a un código Barker y su asignación final en grupos válidos, el siguiente paso del algoritmo base es segmentar la imagen para extraer los centroides de los círculos presentes en ella. En este aspecto resulta esencial obtener un modelo que permita obtener las centroides de los círculos con precisiones subpixélicas, de cara a obtener una precisión suficiente en la recuperación posterior de la posición relativa entre MPL y cámara [Lavest 99] [Lázaro 00].

La figura 4-17 ilustra esta fase del algoritmo mediante dos imágenes capturadas a la misma distancia, $R = 1$ m, pero con distinto ángulo de visión. Resulta interesante verificar el comportamiento del algoritmo de agrupación de códigos Barker; en las imágenes, todas las columnas que resultaron contener tal código han sido detectadas (trazo vertical continuo), incluyendo un cierto subgrupo del código de barras que responde a un patrón similar.

El ruido introducido por este subgrupo fué eliminado según los criterios definidos por el algoritmo de búsqueda de candidatos Barker. En el caso del subgrupo de la imagen derecha, no se cumple la relación de aspecto (ancho/alto) fijada. En el caso del subgrupo de la imagen izquierda, éste está

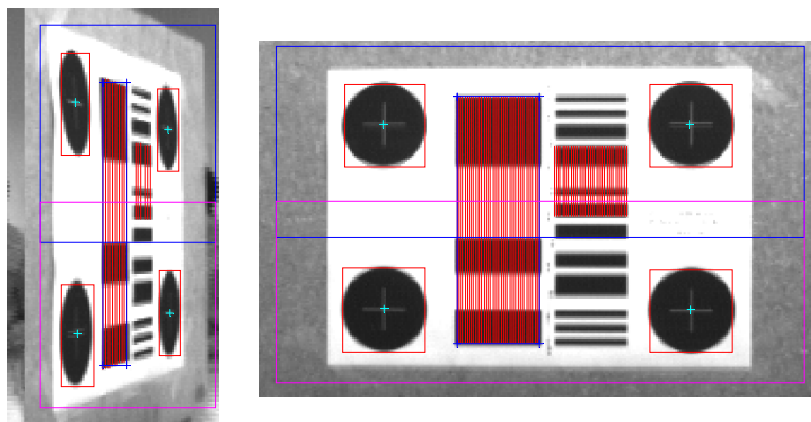


Figura 4-17: Segmentación de los círculos de las marcas. Condiciones de medida: distancia al centro, $R = 1$ m; ángulos de giro $\phi = 75^\circ$, en la imagen de la izquierda, y $\phi = 0^\circ$, en la de la derecha. Se aprecia además cómo se obvia la detección, como un Barker-7, de un subgrupo del código de barras.

inscrito dentro de la posición esperada para los círculos de la marca del grupo mayor (rectángulos exteriores).

El algoritmo de segmentación de círculos y determinación de centroides se muestra en la figura 4-18. Como parámetro de entrada necesita las coordenadas del grupo validado como código Barker; tales coordenadas pueden verse, gráficamente, como un rectángulo que rodea a los códigos Barker de las imágenes de la figura 4-17.

Según la relación de aspecto de tal rectángulo, puede estimarse si la marca está de frente (relación máxima) o de costado (valor más bajo) lo que influye en la definición horizontal de la zona de búsqueda de círculos. Se definen dos subventanas:

- La subventana superior, que abarca los dos círculos más altos.
- La subventana inferior, para los dos más bajos.

En ambos casos, la altura y posiciones vertical y horizontal de las subventanas se establece en base a la altura y posiciones vertical y horizontal del rectángulo del código Barker. La única dimensión variable es el ancho de ambas subventanas, la cual se determina en función de la relación de aspecto del código Barker: a mayor relación, mayor ancho de la subventana. En la figura 4-17 pueden comprobarse estos detalles, comparando ambas imágenes.

Cada subventana se trata por separado. Para cada una de ellas, el algoritmo de segmentación de círculos utiliza el método de proyección por columnas/filas para delimitar la zona en la que se encuentra cada uno de ellos, delimitando en consecuencia una serie de subventanas más pequeñas, o

```

*/Algoritmo: busqueda_de_circulos
*/Inicio
input candidato      */Lugar en >imagen: con Barker7 detectado
Swu = subventana_superior_candidato
Swd = subventana_inferior_candidato
for cada_subventana(Swi)
    SwB = binarizar_subimagen(Swi)
    Sumcols = proyeccion_por_columnas(SwB)
    for cada_lado_de_candidato
        if existe_pico_en_posicion_prevista
            buscar_limites_a_cada_lado_del_pico
            crecer_un_pixel_por_cada_lado
            SCw = segmentar_SwB_por_columnas          /*imagen binaria
            Sumfils = proyeccion_por_filas(SCw)
            if Num_picos_Sumfils == 1
                buscar_limites_a_cada_lado_del_pico
                SFw = segmentar_SwB_por_filas_cols      /*<- en gris
                Sumcols = proyeccion_por_columnas(SFw)
                Sumfils = proyeccion_por_filas(SFw)
                Centroides = ajuste_parabolico(Sumcols,Sumfils)
            else
                descartar_circulo
            endif
        else
            descartar_circulo
        endif
    endfor
endfor
salida_del_algoritmo ...
    (circulos_validos, sus_centroides)

```

Figura 4-18: Algoritmo de búsqueda de círculos y determinación de centroides.

miniventanas, también rectangulares y ajustadas al borde exterior del círculo. Estas miniventanas también son visibles en todos los círculos presentes en la figura 4-17.

Para buscar los círculos, esto es, las miniventanas adecuadas en cada subventana superior e inferior, se analizan en primer lugar las proyecciones por columnas. Sin embargo, estas proyecciones se realizan sobre una versión binarizada, con sólo dos niveles, de la imagen; esto es así para evitar la perniciosa influencia acumulativa de zonas uniformes de gris no pertenecientes a la marca pero sí visibles en la subventana correspondiente. No se realiza aumento del contraste original, pero sí se fija un umbral de binarización más cercano al negro que al blanco (75% de gris, hacia oscuro).

Las figuras 4-19 y 4-20 muestran el resultado de esta binarización. La marca mostrada es la central de la imagen de referencia de la figura 4-16, y se encuentra situada a unos 5 m de la cámara.

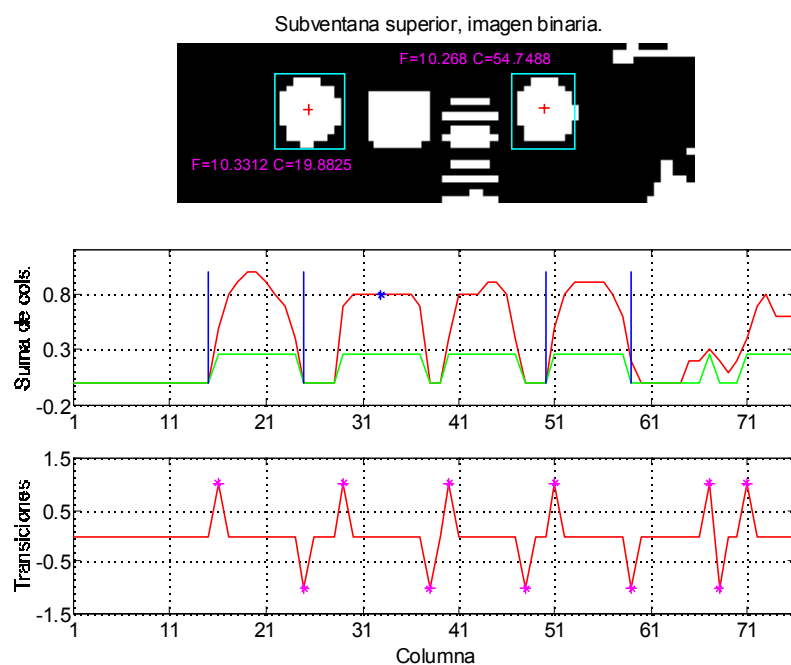


Figura 4-19: Segmentación de círculos en subventana superior.

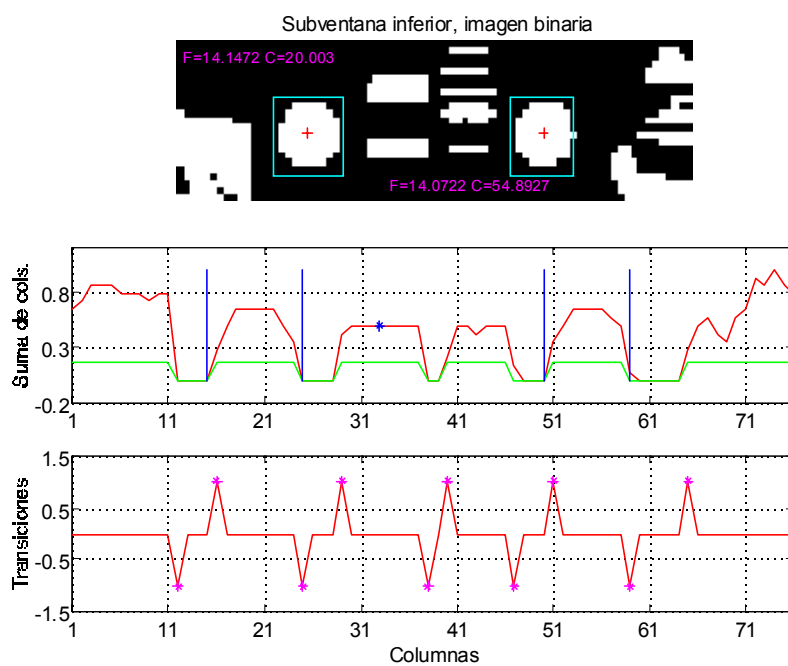


Figura 4-20: Segmentación de círculos en subventana inferior.

Dado que los patrones son negros sobre fondo blanco, la imagen se invierte al ser binarizada, de lo cual se comprueba la conveniencia de seguir la recomendación del autor de situar las marcas sobre fondo claro; cabe decir que ésto sería lo habitual en cualquier hogar u oficina, pues no suele ser agradable el disponer de paredes oscuras en estos lugares. No obstante, siempre es posible colocar la marca sobre otro formato en blanco (por ejemplo un DIN-A3 o una cartulina), si esto fuera estrictamente necesario.

En las figuras señaladas (4-19 y 4-20) se acompaña la imagen de cada subventana con las gráficas resultantes de su proyección por columnas y de otras marcas gráficas procedentes del proceso de segmentación. La forma que presenta la proyección por columnas de la imagen binarizada posee una estructura típica, fácil de interpretar:

- Las dos bandas centrales se corresponden con el código Barker, a la izquierda, y el de barras, a la derecha. Ambos poseen densidades de blanco similares, lo cual da proyecciones también similares. Esta característica de densidad se cumple de una forma bastante aproximada para cualquier código de barras (consultar *Apéndice C*).
- Las proyecciones de los círculos poseen una forma peculiar, casi una función cuadrática o parabólica⁸, con un máximo central y suaves caídas laterales.
- Fuera de la estructura definida por los patrones de la marca, pueden existir, y de hecho existen, zonas de ruido importantes.
- Tales estructuras son similares en ambas subventanas.

Dado que la definición de la geometría de la marca es conocida de antemano, la búsqueda de los círculos resulta relativamente sencilla. El punto de partida o de referencia es el centro del patrón de proyección correspondiente al código Barker, el cual se señala con un asterisco en la citada proyección, más o menos en la columna 33 de las representadas en ambas subventanas. Este valor será usado para binarizar la proyección con el propósito de detectar sólo los flancos más importantes; el valor actual de tal umbral se fija a un tercio del valor obtenido en el centro de la proyección del código Barker.

Una vez obtenidos estos flancos, se trata de localizar, a izquierda y derecha del código Barker, un máximo de la curva de proyección en intervalos dados por la posición de referencia y el ancho del propio código Barker y comprendidos entre dos flancos de sentidos adecuados, según lo esperado. Si esta estructura no es reconocida, se da por perdido el círculo en cuestión.

⁸De hecho es elipsoidal, pero irregular. No obstante lo interesante para el algoritmo es su semejanza local con una parábola y el hecho de ser una función par.

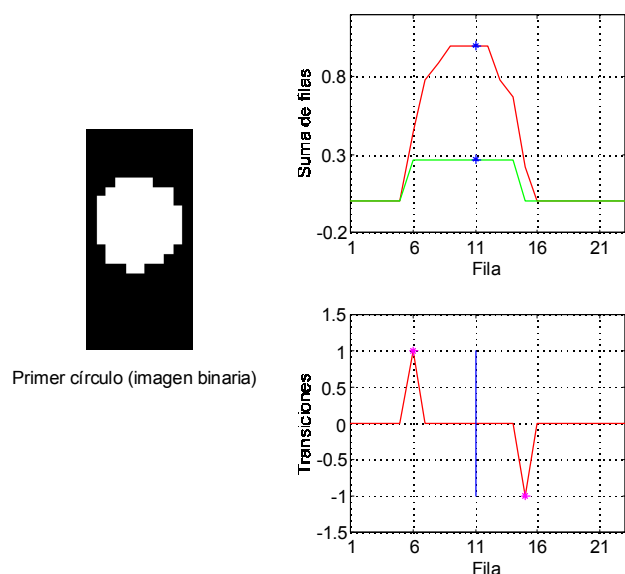


Figura 4-21: Segmentación final de uno de los círculos. Primera miniventana.

En las figuras 4-19 y 4-20 la estructura se reconoce sin problemas; los límites así obtenidos se recrecen hacia el exterior un pixel por cada lado, constituyendo los límites de las columnas de las miniventanas de círculos. Estos límites se representan en las figuras en cuestión mediante sendos segmentos verticales a ambos lados de los patrones de proyección cuasi-parabólicos.

Obtenidos los límites por columnas, los límites verticales, esto es por filas, se consiguen con un proceso similar; el correspondiente al círculo primero de la MPL (a la izquierda, arriba) se ilustra en la figura 4-21.

Partiendo de la porción de subventana encerrada entre las dos columnas designadas en la fase anterior del algoritmo, se realiza la proyección de la misma, esta vez por filas. Se busca el máximo y, a partir de él, los flancos a izquierda y derecha respecto a un umbral similar al de la fase anterior: establecido en un tercio del valor del máximo de la proyección.

El resultado global de ambas fases de algoritmo es la creación de tantas miniventanas como círculos se hayan detectado en las posiciones y con las condiciones correctas, basadas en razones de geometría local a partir del código Barker ya identificado. Es de mencionar que criterios útiles en otros casos, como podría ser la circularidad de la figura segmentada, no resulta ser idónea para la tarea de segmentar los círculos de la MPL, dado que los círculos, vistos desde gran distancia y con grandes desviaciones angulares, pueden llegar a verse como rectángulos más o menos deformados. En lugar de ello, resulta más eficiente considerar válidos los círculos en las condiciones señaladas, segmentar la imagen y, posteriormente, establecer si alguna de las miniventanas difiere excesivamente

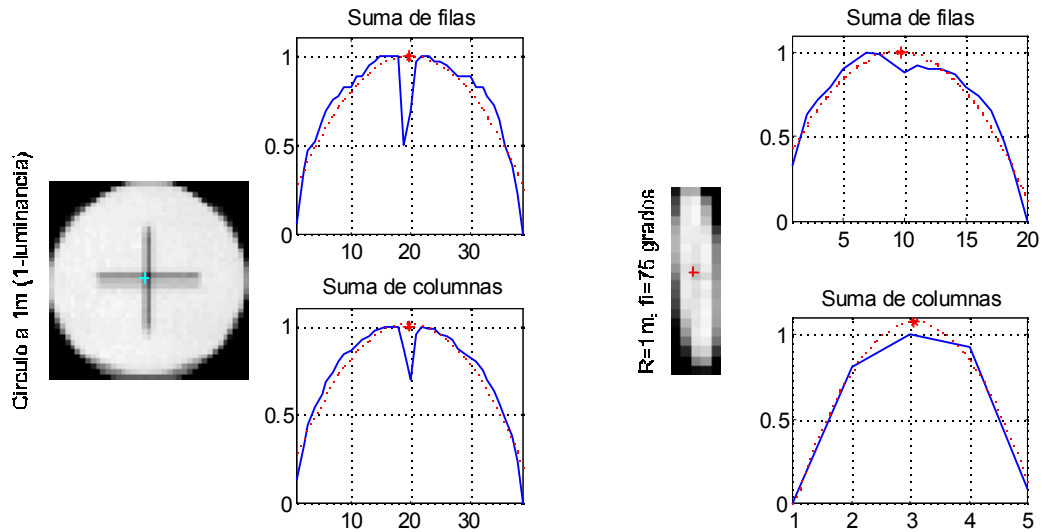


Figura 4-22: Obtención de los centroides de los círculos: aproximación parabólica a la curva de proyección.

de las otras tres en dimensiones, pues ésta sí es una muestra clara de fallo en la segmentación de tal miniventana.

Obtención de los centroides de los círculos

Tras hallar los límites de las miniventanas correspondientes a cada círculo, la obtención de los centroides vuelve a hacer uso de la subventana de imagen original, esto es, en niveles de gris. Se trata así de tener en cuenta la distinta luminancia de los pixels del círculo, especialmente en los puntos del borde. Trabajar en luminancias, en lugar de con imágenes binarias, aumenta la exactitud en la determinación del centroide, tal y como ha quedado contrastado en numerosos trabajos previos (por ejemplo, [Lavest 99], [Lázaro 00] y [Heikkilä 00]).

En el caso de la MPL, el método de segmentación rectangular propuesto por el autor de esta tesis, no es tan exacto como los propuestos por Janne Heikkilä en [Heikkilä 96] o por Jean-Marc Lavest en [Lavest 99]. Sin embargo el coste computacional del método aquí presentado sí es notablemente inferior⁹.

La figura 4-22 muestra el resultado de la aproximación parabólica sobre dos círculos en condiciones diferentes de visibilidad. El círculo de la izquierda está visto frontalmente desde una distancia de 1 m (esto es, con $\phi = 0^\circ$). La imagen en luminancias siempre es la invertida de la real, con

⁹ A este respecto, ni Lavest ni Heikkilä documentan los tiempos de cómputo, pues se trata de métodos de calibración de cámara *off-line*, estando ambos autores más interesados por la precisión que por el tiempo de proceso.

vistas a realzar precisamente la parte circular frente al fondo. En la figura citada se comprueba la existencia de una gran cruz central blanca (en negro en la imagen invertida) la cuál se introdujo sólo como realimentación visual para el control del experimento, no existiendo tal referencia en el diseño final de la MPL.

En las dos gráficas asociadas a la imagen del círculo en cuestión, se muestran las funciones de proyección por filas y columnas, normalizadas respecto a su máximo; superpuestas a ellas aparecen, en línea punteada, las aproximaciones parabólicas a la curva real. El centroide de cada sentido, fila o columna, se destaca con un asterisco en estas gráficas; su posición respecto a la imagen original se indica además con una pequeña cruz, aproximadamente en el centro de la cruz real. Para calcular el valor del centroide, tras la aproximación parabólica, basta con hallar el máximo de la parábola; supuesto que la aproximación polinómica sea, por ejemplo en el eje horizontal:

$$p(u) = a_2 u^2 + a_1 u + a_0,$$

el centroide horizontal sería:

$$u_0 = -\frac{a_1}{2a_2},$$

resultando una expresión idéntica para el centroide vertical.

En casi todas las figuras de marcas de la presente subsección, aparecen representadas con una pequeña cruz los centroides de los círculos visibles en ellas; en especial, en las figuras 4-19 y 4-20 se especifican las posiciones locales de los mismos, en formato fila-columna (F, C) y con resolución subpíxel. Las diferencias entre el centroide hallado y el real no son muy significativas a simple vista, principalmente cuando se observan las imágenes en escala de grises, aunque más adelante se indicará la varianza de medida esperada, obtenida de medidas experimentales.

Respecto al segundo círculo, éste se capturó desde una distancia de 2 m, con un ángulo de desviación $\phi = 75^\circ$. Es de notar la gran reducción que ha experimentado la dimensión horizontal, lo cual hace que el número de columnas de la miniventana del círculo sea sólo de 5 píxels de ancho. Puede comprobarse cómo el criterio de circularidad en este caso resultaría de difícil aplicación.

Sin embargo, el algoritmo propuesto por el autor, a pesar de su simplicidad conceptual, logra recuperar un centroide a simple vista muy próximo al real, aún a pesar de la elevada distorsión experimentada por el círculo en cuestión.

4.4.4 Lectura del código de barras

La última fase del algoritmo base es la recuperación del código de barras de la MPL, si es que ésta es posible por estar dentro de la distancia de cobertura. La estructura y forma de codificación del código de barras de la MPL ya fueron especificadas en el capítulo anterior, por lo que no se repetirá tal descripción aquí, centrándose esta sección, entonces, en el proceso de recuperación de tal información.

```
*/Algoritmo: leer_codigo_barras
*/Inicio
input candidato      */Lugar en >imagen< con Barker7 detectado
Wide = ancho_en_cols(candidato)
for numcols == Wide
    Linea = seccion_columna_imagen
    reconstruir_Linea
    Periodo = ponderar(4_primeros_flancos,5_ultimos_flancos)
    obtener_secuencia_codigo_barras
    decodificar_secuencia
    if checksum_correcto
        validar_codigo_candidato
    endif
endfor
comparar_todos_los_codigos_candidatos
if (num_codigos_candidatos_iguales > 75%(Wide))
    validar_codigo
endif
salida_del_algoritmo ...
    (valor_del_codigo_validado)
```

Figura 4-23: Algoritmo de recuperación de los códigos de barras.

En la figura 4-23 se muestra el algoritmo diseñado para esta tarea. La localización previa del código Barker permite una identificación muy rápida de la zona en la que se debe encontrar el código de barras, circunscribiéndose el análisis a una parte muy acotada de la imagen que se denominará *subventana de búsqueda*.

Como se comprueba en el algoritmo listado en la figura 4-23, se realiza una lectura de todas las columnas que se cree contienen el código de barras y se trata de recuperar el código de cada una de ellas. Sólo si el *checksum* coincide, tal código se valida. Para que el código de barras se dé como recuperado, deben validarse al menos un 75% de las columnas de la subventana de búsqueda, en caso contrario tal código se descarta.

La decodificación en sí de un código de barras no constituye una tarea novedosa, máxime cuando

se usa una codificación estándar como es la EAN-13 (ver *Anexo B*) con un alfabeto completamente definido y con utilidades *software* de uso público. Las aportaciones del autor en este aspecto se centran en el diseño en sí de la codificación de información sobre la MPL y en el método usado para su recuperación, mediante la exploración de líneas verticales. A este respecto, la fase del algoritmo de recuperación de códigos de barras más interesante es la de reconstrucción del código, antes de su decodificación.

En la figura 4-24 se detalla la ubicación de la subventana de búsqueda del código de barras, cuyas dimensiones y posición se determinan, como en el caso del resto de subventanas, a partir de la posición y relación de aspecto del código Barker de identificación de la MPL. La marca se capturó a una distancia $R = 1$ m, con una desviación angular $\phi = 0^\circ$. Sobre la propia figura se indica una de las líneas de exploración, la cual será utilizada como referencia para detallar la fase de reconstrucción del código, y que se denominará $I(n)$.

A su vez, la figura 4-25 ilustra el resultado de la reconstrucción de la línea de exploración definida en la figura 4-24. En la gráfica superior se muestran los datos originales de la columna imagen, se puede apreciar una cierta saturación a blancos (valor 1) del array de datos a procesar.

El paso principal de la reconstrucción es muy similar al ya descrito para el proceso de búsqueda e identificación del código Barker: la localización de los flancos del array de datos. Para ello se filtra y deriva la columna de imagen con las relaciones definidas por la ecuaciones 4.8 y 4.9, con la salvedad del umbral U_p , que en esta ocasión, dada la estructura más definida de los datos a procesar, es fijo y de valor $U_p = 0.1$, un 10% del valor máximo esperado. De este proceso se obtiene una señal filtrada, $O(n)$, de la que se conoce su secuencia de picos, $O(p)$.

La gráfica central de la figura 4-25 muestra el resultado, $O(n)$, del filtrado de $I(n)$, y el de la detección de picos, $O(p)$, los cuales se indican como asteriscos. También se muestran los umbrales de referencia, ± 0.1 .

Sólo es necesaria la información de distancia entre picos para la decodificación del código, pero con objeto de facilitar su visualización, se ha incluido en la gráfica inferior de la figura 4-25 tal reconstrucción, indicando con rombos la posición de los flancos recuperados. Son perfectamente visibles los trenes de sincronismo en el principio y fin del código de barras; en el caso de la cabecera se tienen tres bits, con la secuencia $[nbn]$, siendo $n \equiv \text{negro} = -1$ y $b \equiv \text{blanco} = 1$ en la gráfica reconstruida, y en el caso de la cola se tienen cuatro bits, con la secuencia $[bnbn]$. Los intervalos entre estos bits constituyen el reloj de recuperación del código de barras, o tiempo de bit, por lo que el algoritmo procede, en primer lugar, a la ponderación de estas secuencias para obtener el tiempo de bit más probable, eliminando aquellos datos que se aparten más del 33% de la media inicial¹⁰.

¹⁰Se corresponde con la eliminación de datos espúreos, o *outliers*.

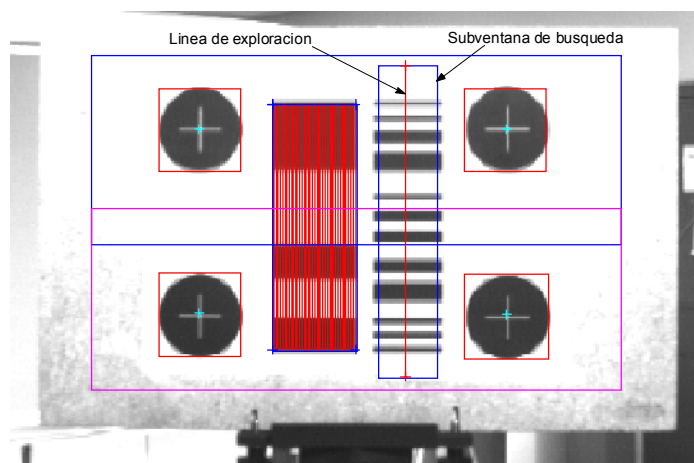


Figura 4-24: Recuperación del código de barras: subventana de búsqueda.

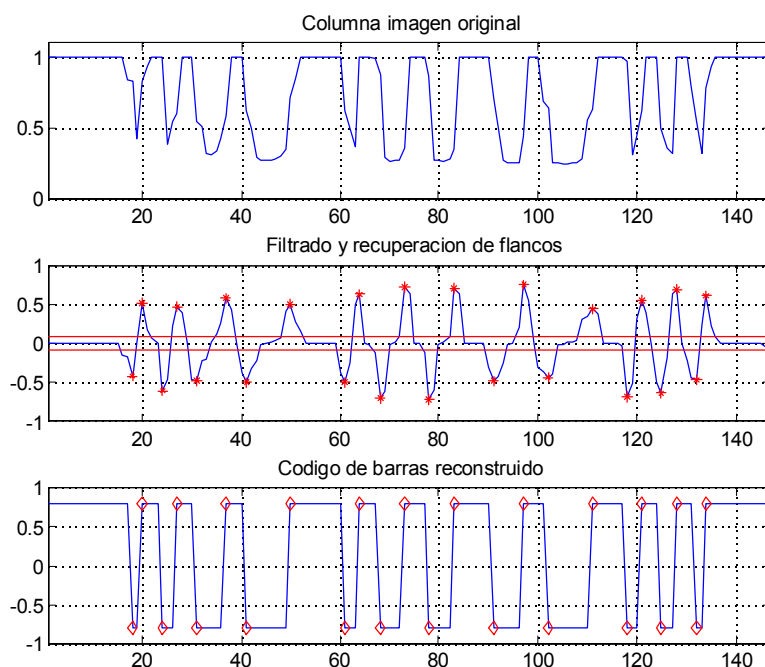


Figura 4-25: Reconstrucción del código de barras en una columna de datos de la imagen original.

En el caso representado en la figura 4-25, la secuencia inicial de intervalos temporales de sincronización, tomando cabecera más cola, es:

$$S_{clk}^{inicial} = [2, 4, 3, 4, 3, 4, 2],$$

cuya media es $\overline{T_{clk}^{inicial}} = 3.143$, que con el criterio establecido anteriormente eliminaría los datos extremos (los de valores iguales a 2). Así, la secuencia a valorar en la segunda pasada es:

$$S_{clk} = [4, 3, 4, 3, 4],$$

cuya media, $\overline{T_{clk}} = 3.6$, resulta ser un valor más adecuado como tiempo de bit. Con este valor, la decodificación del código de barras se realiza sin mayores dificultades, teniendo en cuenta las especificaciones del mismo (capítulo anterior) y las notas y referencias del *Anexo B*.

4.4.5 Comprobación experimental y discusión de los resultados

Para corroborar la bondad de los algoritmos citados, se ha realizado un experimento con una batería de 300 imágenes, adquiridas en 30 puntos distintos, con posiciones y orientaciones distintas y calibradas.

Dada la simetría radial del problema, se adoptó el sistema de coordenadas polares como referencia; en consecuencia, se fijaron distancias entre centro óptico y centro de MPL en el rango $R \in [1..5]$ metros, en intervalos de un metro. En cuanto a la orientación, se especificaron los ángulos $\alpha = \beta = 0$ y respecto al de giro se tomó ϕ , en lugar de γ , por ser más cómodo de interpretar; en este caso, los ángulos se fijaron en el rango $\phi \in [0..75]$ grados, tomados en intervalos de 15° .

En cada uno de los 30 puntos de referencia se han adquirido 10 imágenes, cada una de las cuales con diferentes condiciones de iluminación (alta, baja y media), incluso llegándose en algún caso a la saturación de blancos. Además el fondo no fué alterado, siendo el normal de un laboratorio de investigación. Con esto se pretende simular, en lo posible, las condiciones normales en lo que sería su campo de trabajo habitual.

Como ejemplo ilustrativo de la naturaleza global de este experimento, se incluye la figura 4-26, en donde se muestran las 10 imágenes correspondientes a un punto, cuya referencia será P_{5-45} , correspondiente a una distancia-orientación de $(R, \phi) = (5 \text{ m}, 45^\circ)$. Se aprecia a simple vista la variedad de condiciones de iluminación y la naturaleza del entorno de la MPL, nada favorable, en principio, por la cantidad de estructuras horizontales presentes en las distintas imágenes; obsérvese que el fondo efectivamente está lleno de posibles fuentes de ruido de imagen estructurado: ordenadores, sillas, mesas, etc.



Figura 4-26: Batería de 10 imágenes correspondientes al punto P_{5-45} : distancia 5 m, desviación angular $\phi = 45^\circ$. Se muestran aquí las diversas condiciones de luminosidad y las características del entorno de prueba, con las numerosas fuentes de ruido de imagen existentes.

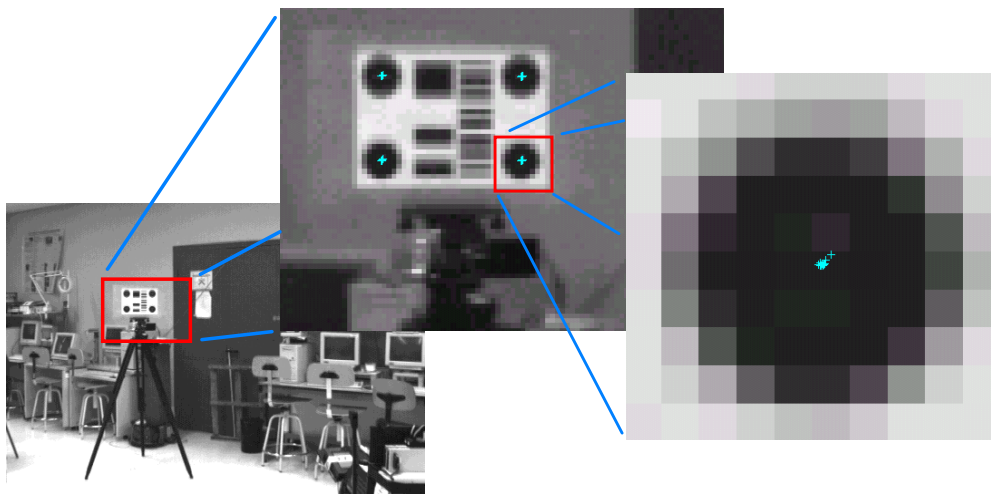


Figura 4-27: Evaluación de la varianza de medida de centroides; imagen de prueba a 5 m, y con $\phi = 0^\circ$. Detalle ampliado de uno de los círculos, para observar la proyección de las diez pruebas realizadas en este punto.

La figura 4-27 muestra diversos detalles de otra de las imágenes, tomada en el punto con referencia P_{5-0} . En el detalle más ampliado de la misma se observa uno de los círculos de la MPL, de apenas 8×8 pixels de tamaño. En su centro, se aprecian diversas pequeñas cruces, 10 en concreto, que se corresponden con los resultados de proyectar los centroides obtenidos para cada una de las 10 imágenes distintas capturadas en ese mismo punto, P_{5-0} . Sin necesidad de mayores datos, por el momento, puede observarse a simple vista la exactitud del método de extracción de centroides modelado por el autor de esta tesis, pues casi la totalidad de las cruces se concentran en las mismas coordenadas, por supuesto con resolución subpixel, y esto a pesar de la notable diferencia de luminosidad entre las 10 imágenes tomadas.

De los cuatro círculos de la MPL en el punto P_{5-0} , se ha ampliado precisamente aquél que presenta un dato de desviación mayor que los demás (pequeña cruz, ligeramente desviada hacia arriba y a la derecha), notándose además un cierto patrón, como la forma de una gota de agua, en la distribución de centroides recuperadas. Este efecto apareció en algunas imágenes más, sobre todo relacionado con aquéllas de brillo mayor, llegando a una desviación similar, del orden del tercio de pixel.

Esta desviación, relacionada con la luminosidad de la imagen, coincide con los datos presentados por Janne Heikkilä en [Heikkilä 00], en donde se modeló una desviación de ese orden de magnitud, unas décimas de pixel y dependientes de las coordenadas (u, v) del pixel en cuestión, por el simple hecho de cambiar de lámpara, entre halógena y fluorescente. En consecuencia, errores como el

descrito pueden tener su origen en el conjunto iluminación-cámara, en lugar de en el método de recuperación de centroides en sí, y deberán considerarse como errores sistemáticos del propio sistema de visión.

A partir de los datos de salida de las 300 imágenes de prueba, se ha construido la tabla 4.2. En ella, los resultados se agrupan en función del punto de prueba, $P_{R-\phi}$, comprobándose la degradación gradual de prestaciones respecto al aumento en distancia, R , y desviación angular, ϕ .

El primer dato a resaltar de la tabla es la alta eficiencia en la detección de marcas: el 99% de las presentes, o sea 297 marcas, se detectaron correctamente; por añadidura hubo un 0% de falsas detecciones, esto es, ningún elemento de las 300 imágenes, y que no fuera una MPL, fue identificado como tal.

Sin embargo este dato es aún más positivo si sólo se toman en consideración las MPL situadas dentro del área de cobertura teórica. En efecto, con la cámara de referencia, y según lo ya estimado en la sección 4.2.2, el alcance máximo en función del ancho vertical del código Barker es de 5.35 m; respecto a la dimensión horizontal, al ser ésta de 6 cm, el diámetro máximo de la zona de cobertura¹¹ resultaría ser $D_c = 12.78$ m. Rearreglando la ecuación 4.7 en función de la distancia actual, d_a , se obtendría la cota:

$$d_a \leq D_c \cos \phi_a \big|_{-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ},$$

de donde se puede extraer el valor del ángulo ϕ_a máximo, para una distancia d_a dada, como:

$$\phi_a \leq \arccos \frac{d_a}{D_c}.$$

En el caso particular de la antepenúltima fila de la tabla, para el punto P_{5-75} , se tiene que $\phi \leq 66.97^\circ$, lo cual permite asegurar que precisamente en estas condiciones *no está garantizada* la detección de la MPL, con lo que los tres fallos de localización producidos son, en realidad, no imputables al SPL. De esta forma puede admitirse que la tasa de aciertos del algoritmo diseñado por el autor es, en realidad, del 100% dentro del área de cobertura definido.

La quinta columna de la tabla refleja, indirectamente, el número de columnas con un código Barker de identificación de marca que no fueron detectadas como tales. La tasa de aciertos global en esta tarea es del 99.75%, estando provocadas la mayor parte de las faltas por las diferencias exageradas de iluminación, principalmente en las imágenes saturadas, que cambian el ancho efectivo de las bandas. Puede comprobarse cómo, incluso en puntos de posición-orientación muy forzada

¹¹Recuérdese que ambas distancias son máximas y deben cumplirse a la vez, por lo que siempre debe tomarse la menor de las dos.

R	ϕ	MPL Ciertas	MPL Falsas	Cols. Barker-7 detectadas	Círculos detectados	Varianzas fila: σ_u^2 col.: σ_v^2	
1	0	10	0	100%	40, (100%)	0.059	0.024
	15	10	0	100%	40	0.074	0.012
	30	10	0	100%	40	0.011	0.011
	45	10	0	100%	40	0.018	0.021
	60	10	0	100%	40	0.019	0.027
	75	10	0	100%	40	0.033	0.023
2	0	10	0	100%	40	0.014	0.009
	15	10	0	100%	40	0.006	0.005
	30	10	0	100%	40	0.017	0.017
	45	10	0	100%	40	0.021	0.018
	60	10	0	98.97%	40	0.017	0.013
	75	10	0	100%	36, (90%)	0.041	0.015
3	0	10	0	100%	40	0.002	0.006
	15	10	0	100%	36, (90%)	0.003	0.009
	30	10	0	99.05%	36, (90%)	0.011	0.004
	45	10	0	99.03%	40	0.010	0.002
	60	10	0	100%	36, (90%)	0.016	0.001
	75	10	0	100%	36, (90%)	0.045	0.004
4	0	10	0	99%	40	0.015	0.004
	15	10	0	100%	40	0.005	0.001
	30	10	0	100%	40	0.010	0.002
	45	10	0	100%	40	0.014	0.005
	60	10	0	97.91%	38, (95%)	0.020	0.003
	75	10	0	100%	36, (90%)	0.029	0.006
5	0	10	0	100%	40	0.023	0.008
	15	10	0	100%	40	0.022	0.013
	30	10	0	98.48%	40	0.022	0.013
	45	10	0	100%	40	0.015	0.018
	60	10	0	100%	40	0.012	0.010
	75	7	0	100%	28, (70%)	0.011	0.009
Media:		9.9	0	99.75%	38.7, (97%)	0.021	0.011
Std.:		0.5	0	0.55%	2.6, (6.4%)	0.016	0.007

Tabla 4.2: Resultados del algoritmo de detección de parámetros de las Marcas de Posicionamiento y Localización).

como el P_{5-75} , el código Barker se identificó sin fallo.

En la sexta columna se recogen el número de círculos identificados, al ser 10 imágenes por punto (fila de la tabla) éste número debiera ser de 40, si se detectan todos sin problemas. La tasa de acierto global es de un 97%, estando de nuevo asociados los errores a las imágenes con iluminación extrema, por muy clara o por muy oscura. Cabe resaltar en este punto, que la totalidad de las 10 imágenes de la figura 4-26 se procesaron sin problemas.

Las columnas finales, séptima y octava, reflejan la exactitud del método de recuperación de centroides diseñado por el autor, pues recogen las varianzas de medida en las dimensiones horizontal y vertical por cada punto de prueba; es necesario aclarar que en este cálculo no se tuvieron en cuenta, por razones obvias, los datos correspondientes a los círculos no detectados.

En promedio, la varianza en la recuperación de centroides en la dimensión horizontal es $\sigma_u^2 = 0.021 \text{ pixel}^2$, mientras que la de la dimensión vertical es $\sigma_v^2 = 0.011 \text{ pixel}^2$. Es lógica la mayor desviación de la dimensión horizontal frente a la vertical, debido a la compresión que experimentan los círculos en esta dirección al aumentar la desviación angular, ϕ , respecto a la normal a la MPL; así, cuanto menos datos (ancho en pixels) estén disponibles para el ajuste parabólico de la proyección por columnas, menos exacto será tal ajuste.

Aún así, puede asegurarse la resolución subpixel en la obtención de la centroide, con desviaciones típicas máximas que pueden resumirse en el dato promedio mayor:

$$\sigma_{centroide} < 0.15 \text{ pixel}$$

Las dos últimas filas ilustran las medias y desviaciones típicas (std) de las respectivas columnas.

Respecto a los tiempos de ejecución del algoritmo, los datos en poder del autor corresponden únicamente a la de los modelos programados en el entorno Matlab V5.3, para Windows95/98, quedando su migración para S.O. Linux y lenguaje C estándar para una fase posterior en las investigaciones del autor. El inconveniente del entorno Matlab, a efectos de establecer tiempos de proceso de datos, es su carácter de lenguaje interpretado y la forma en la que las llamadas a funciones *protegen* al programador (y también bloquean) de las tareas de especificar los tipos de datos y optimizar su proceso.

Las funciones más elementales se compilaron, generándose funciones *.dll supuestamente más eficientes; aún así, no se han podido obviar las llamadas a las librerías internas. Con todas estas salvedades, el proceso completo de una imagen VGA, de 640×480 pixels, en escala de grises, lleva alrededor de 0.5 s en un PC-PentiumII a 400MHz.

4.5 Recapitulación

En el presente capítulo se han presentado los resultados de los estudios del autor referentes al diseño de la Marca de Posicionamiento y Localización, MPL. El autor justifica la elección de las dimensiones, tipo de información encerrada y distribución de patrones sobre la MPL, en función de criterios que tratan de responder a las condicionantes marcadas por su potencial uso en sistemas autónomos de Asistencia a la Movilidad, principalmente con arquitecturas apropiadas para ello como la especificada para la Silla de Ruedas Autónoma SIAMO.

Los criterios adoptados son:

- Maximizar el área de cobertura de cada una de las MPL, con objeto de cubrir un entorno dado con el mínimo número de marcas posible. Tal criterio se cumple ubicando los parámetros más críticos de los patrones gráficos para su lectura en sentido vertical descendente.
- Minimizar el coste computacional de identificar la marca y segmentar sus características. La solución adoptada por el autor es la incorporación de un código único, basado en el Barker de 7 bits, que permite identificar, con una muy alta tasa de éxito, la presencia de una MPL, al igual que impide, también con muy alta tasa de éxito, la detección del resto de elementos existentes en el entorno como tales marcas.

Por su parte, la segmentación del resto de características de la MPL se facilita también a través de la eficiente localización del código Barker de identificación.

También se han diseñado unos algoritmos de proceso de imagen cuyos resultados, contrastados por la experimentación, demuestran una tasa de aciertos muy elevada en las tareas asignadas, pese a la sencillez computacional del modelo adoptado.

Más difícil es el contraste de estos resultados con los de otros investigadores pues, dentro de lo que es el conocimiento actual del autor, no existen muchos modelos comparables de forma homogénea con el aquí propuesto:

- Los modelos de obtención de centroides de Lavest y Heikkilä ([Lavest 99] y [Heikkilä 00]) tienen como objeto la calibración de un sistema de cámaras, son mucho más precisos que el modelo del SPL pero también son mucho más complejos y lentos.
- La detección de centroides de marcas para el posicionamiento de una SRA, es un método también usado por John-David Yoder [Yoder 96], sin embargo no se documentan los resultados de tal segmentación. Por lo demás, como puede verse en las figuras 4-7 y 4-8, el autor de esta tesis experimentó también con un modelo anular, al igual que Skaar, para los círculos, pero éste método sólo es eficiente en caso de que la marca sólo contuviera círculos, por lo que éstos

son necesarios para identificar la presencia de una marca; esta misión se cumple, con mayor rapidez y fiabilidad, mediante el código Barker-7 en el diseño aquí propuesto.

El método de anillos de Skaar, en opinión del autor de esta tesis, no es aplicable en el caso del SPL por las siguientes problemas:

- La detección es más compleja computacionalmente, al exigir una exploración en varias direcciones para determinar la existencia de tal círculo.
 - La determinación, con exactitud subpíxel, del centroide de la figura anular es más complicada de modelar y, en consecuencia, menos eficiente que la propuesta en esta tesis.
 - En orientaciones muy anguladas, el anillo tiende a colapsar haciendo imposible la detección de tales círculos, mientras que en igualdad de condiciones el diseño aquí expuesto sigue siendo aplicable, como puede comprobarse de los datos de la tabla 4.2.
- Otros trabajos que hacen uso de círculos como patrones de posicionamiento (como [Coelho 99] y [Martens 01]) no documentan completamente el modelo empleado para segmentar la imagen. Es más, en el caso concreto del dirigible de Coelho, los círculos eran prelocalizados *a mano*, mediante el click de un ratón por el controlador humano sobre un interfaz gráfico adecuado. Por contra, en el SPL propuesto en esta tesis la detección de la MPL se realiza automáticamente, mediante el patrón de identificación Barker.
 - En [Armingol 98] se emplean sendos círculos aislados como haces (*beacons*) de un sistema de triangulación. En este caso, la segmentación de los círculos aislados se realiza mediante la correlación normalizada de toda la imagen con un modelo circular, lo que provoca problemas de falsos blancos y restringiéndose además las posibles localizaciones para que las marcas sean detectadas. Se documenta el uso de 6 marcas para cubrir un recinto de 12×7 m, aunque el recorrido realmente cubierto por el experimento aparenta abarcar apenas la mitad de tal recinto.
 - En lo que respecta a marcas codificadas, Thomas Röfer en [Röfer 97], presenta una propuesta de marca artificial que sólo codifica una cifra, y cuya segmentación se realiza por un proceso de identificación por regiones, más costoso computacionalmente y con menos área de cobertura que el aquí descrito.
 - También Jörg usa códigos de barras [Jörg 99], pero su diseño, con lectura en horizontal, resulta tener menores posibilidades de cobertura que el propuesto en esta tesis.

El único modelo realmente similar al diseñado por el autor es el del Dr. Lázaro Galilea, quien

en [Lázaro 00] presenta los resultados de un sistema de posicionamiento por visión estereoscópica que usa marcas artificiales localizables por un patrón vertical y con cuatro círculos de referencia.

En lo que atañe al proceso de localización y segmentación de la marca, el diseño propuesto en esta Tesis mejora la propuesta citada en los siguientes aspectos:

- La MPL contiene mayor cantidad de información que la propuesta en [Lázaro 00].
- El modelo presentado en esta tesis no precisa determinar la circularidad en el PI de los, valga la redundancia, círculos de la marca, con lo que el área de cobertura de la MPL resulta ser potencialmente mayor¹².

El resto de parámetros documentados en [Lázaro 00] no son comparables a los presentados en este capítulo de la tesis, por referirse a procesos heterogéneos con los aquí descritos. No obstante, de lo expuesto en esta sección puede valorarse la aportación del autor a la navegación autónoma, mediante el diseño de una marca artificial y de los algoritmos necesarios para un eficiente uso en sistemas como las Sillas de Ruedas Autónomas.

¹² Este extremo no se documenta en el trabajo del Dr. Lázaro, por lo cual no pueden extraerse mayores conclusiones.

Capítulo 5

Posicionamiento basado en marcas artificiales

5.1 Introducción

El diseño y las características de la Marca Artificial finalmente adoptada tienen su base en la resolución del problema de la *orientación exterior* de una cámara, conocidas las características geométricas de un objeto patrón visualizado. Este problema es fácilmente resoluble, con precisiones notables, usando patrones de calibración con muchas características conocidas extraíbles, como es el caso de los métodos de calibración más conocidos [Bouguet 99]. En ellos se usan patrones de barras, cuadros, escaques o círculos, bien tridimensionales como en [Heikkilä 00] o bidimensionales como en [Zhang 98] y [Lavest 99].

Pero cuando se trata de un sistema de localización y posicionamiento, como el objeto de esta tesis, no es práctico usar patrones con muchas características pues necesariamente esto limitaría el rango de medida. Como ya se indicó, se tomó como premisa el diseñar una marca fácilmente imprimible en cualquier equipo informático, por lo que el tamaño de la marca se limitó a una hoja DIN-A4 estándar (21×29.7 cm).

Si se quiere que las características se vean desde lo más lejos posible, una primera aproximación sería el tomar las cuatro esquinas de la hoja como referencias geométricas. Sin embargo, como ya se justificó en el capítulo anterior, la detección de características se realiza con mayor fiabilidad, precisión y rapidez si se toman las centroides de figuras geométricas sencillas, como son los círculos escogidos como tales referencias en la Marca de Posicionamiento y Localización propuesta (MPL).

Conceptualmente la solución adoptada es similar a la de tomar las esquinas de la hoja, aunque

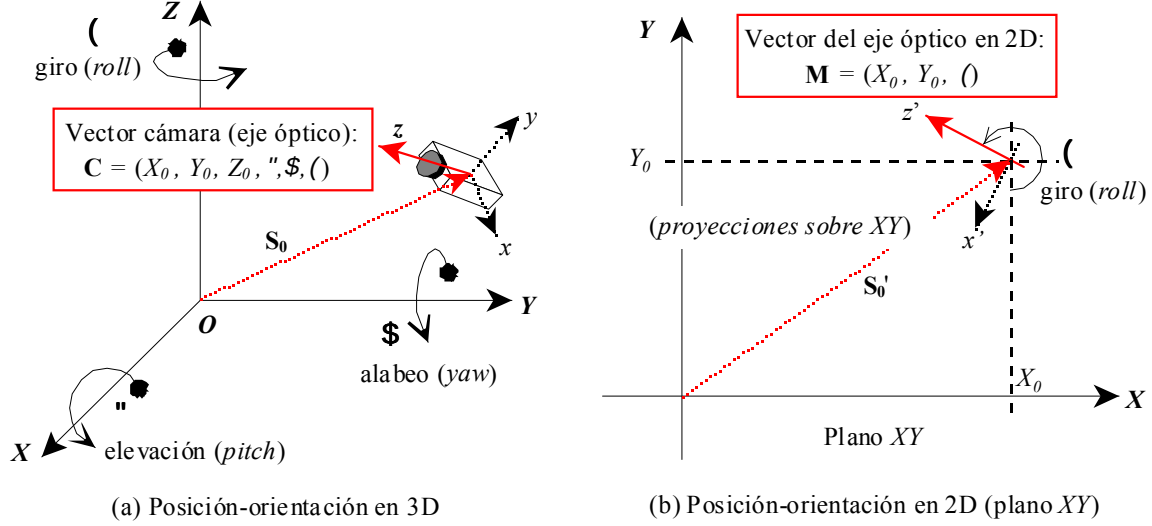


Figura 5-1: Objetivo de los algoritmos de posicionamiento: (a) Posición-Orientación en tres dimensiones. (b) Simplificación del problema, proyección sobre el plano de rodadura (XY).

las dimensiones finales resultan ser algo más reducidas que las propias del soporte de papel. Esto es inevitable, salvo que la pared o lugar de inserción de la marca se haga parte de la misma, lo cual no resulta ser práctico al imponer más restricciones de las necesarias a la hora de su instalación.

Así pues, se dispone de cuatro puntos, $\mathbf{i}_i$, (los centros de los círculos) para recuperar, a partir de sus coordenadas (u_i, v_i) en el Plano Imagen, la posición-orientación del móvil. De todas formas, el problema global, tal y como se documenta en el *Anexo C*, se reducirá al mismo problema de determinación de la *orientación exterior* de la cámara que en el caso de una calibración, salvo que se dispondrá solamente de los cuatro puntos $\mathbf{i}_i$ mencionados. Siguiendo la nomenclatura fijada en el anexo C, se quiere obtener el vector $\mathbf{C} = (\mathbf{S}_0, \Omega) = (X_0, Y_0, Z_0, \alpha, \beta, \gamma)$, de posición-orientación del centro óptico $\mathbf{C}$, lo que implica hallar los parámetros de traslación, $\mathbf{S}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$, y los ángulos de rotación $\Omega = (\alpha, \beta, \gamma)$ respecto al Sistema de Coordenadas Absoluta (SCA) (figura 5-1-a).

En las secciones siguientes se documentarán dos modelos para obtener la posición de la cámara en el SCA. El primero de ellos se basa en las propiedades de los puntos de fuga de dos grupos de rectas paralelas, distribuidos en direcciones perpendiculares sobre el mismo plano (en la MPL), así podrán obtenerse los seis parámetros buscados, $(\mathbf{S}_0 \text{ y } \Omega)$, lo que equivale a una determinación en **3D** de la posición-orientación de la cámara. Sin embargo, y coincidiendo con los resultados presentados por otros autores [Kumar 94], es necesaria una precisión muy elevada en la determinación de los puntos de fuga para obtener una precisión razonable en el posicionamiento, lo que fuerza a visualizar las marcas desde muy cerca (gran tamaño en el PI).

El segundo modelo se fundamenta en la realización de unas aproximaciones razonables sobre los sistemas de ecuaciones correspondientes a la descripción del primero, tras imponer ciertas restricciones de montaje (con sus tolerancias) al sistema cámara-móvil; de esta forma puede obtenerse la posición-orientación del móvil en $2\mathbf{D}$, o sea, en el plano XY de rodadura del robot móvil o Silla de Ruedas Autónoma (SRA), tal y como se ilustra en la figura 5-1-b. Esto permite mejorar el rango de uso del sistema propuesto en la determinación del vector $\mathbf{M} = (X_0, Y_0, \gamma)$ sobre el plano, suponiendo conocidas el resto de variables (Z_0, α, β) , y todo ello manteniendo una precisión razonable en términos relativos tanto en posición como en orientación.

5.2 Recuperación de posición y orientación mediante Puntos de Fuga

Las propiedades geométricas de los puntos de fuga en el PI de sendas rectas paralelas en el SCA (ver anexo C) permiten recuperar con cierta facilidad los ángulos de rotación, Ω . A partir de estos ángulos, la determinación de la posición puede realizarse también con cierta facilidad. Este mismo principio, aunque con notables diferencias respecto al algoritmo aquí propuesto, se encuentra en [Wand 91].

Se trata entonces de un método del tipo ' $\mathbf{R}$ y después $\mathbf{T}$ ' (que se abreviará como $[\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{T}]$), lo cual, tal y como avanza la intuición y el trabajo de Kumar confirma en [Kumar 94], presenta un problema de propagación acumulativa de los errores de medida entre los sucesivos pasos, con el peligro potencial de obtener una incertidumbre final en el posicionamiento no admisible para la aplicación dada.

La situación de partida del presente método se corresponde con la existencia de líneas horizontales y verticales en la marca artificial; aunque el número de líneas en cada dirección podría ser cualquiera, lo cual incidiría en una mejor precisión en la solución obtenida, se ha de restringir éste número a dos por las cuestiones justificadas en la sección anterior.

La figura 5-2 ilustra esta idea. La marca posee dos líneas verticales ($\mathbf{Lv}_1, \mathbf{Lv}_2$) y dos líneas horizontales ($\mathbf{Lh}_1, \mathbf{Lh}_2$). Las citadas rectas pueden describirse como:

$$\mathbf{Lv}_m = \mathbf{P}_m + k\mathbf{D}_v$$

$$\mathbf{Lh}_n = \mathbf{P}_n + k\mathbf{D}_h$$

siendo $\mathbf{D}_v$ y $\mathbf{D}_h$ los vectores directores de las líneas verticales y horizontales, respectivamente, y los $\mathbf{P}_j$ sendos puntos pertenecientes a la recta considerada. Como tales $\mathbf{P}_j$, y atendiendo a las

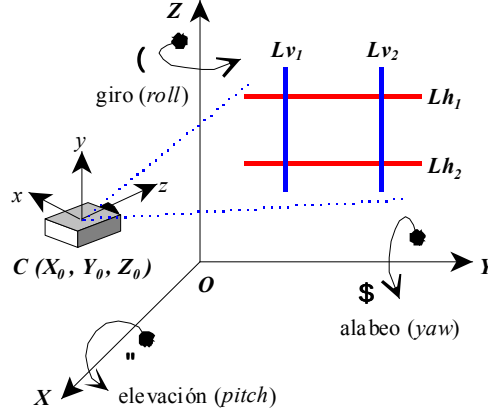


Figura 5-2: Detección de líneas horizontales y verticales en la marca artificial.

razones justificadas en el capítulo anterior, se tomarán los centroides de los círculos extremos de la MPL. Además, dado que puede tomarse como referencia del SCA cualquier punto fijo del entorno, puede establecerse que la marca se encuentre en el plano YZ del citado SCA (figura 5-2); como tal plano YZ puede elegirse cualquier pared del recinto. La restricción geométrica marcada se muestra especialmente útil si se centra el análisis en los vectores directores de $\mathbf{Lv}_i$ y $\mathbf{Lh}_j$, pues éstos cumplen que:

$$\mathbf{D}_v = (a_X, b_Y, c_Z) = (0, 0, c_Z) = (0, 0, 1) \quad (5.1)$$

$$\mathbf{D}_h = (a_X, b_Y, c_Z) = (0, b_Y, 0) = (0, 1, 0)$$

en donde evidentemente $b_Y|_v = c_Z|_h = 1$ pues ambos vectores directores han de ser unitarios. Es de destacar que, al tomar como base del análisis los vectores directores, es indiferente que se trate del plano YZ como tal o de cualquier otro plano paralelo a él. Por otro lado, las conclusiones aplicadas a este caso particular son fácilmente extrapolables a otras situaciones similares geométricamente.

Aunque teóricamente puede recuperarse una información de orientación a partir de cualquier grupo de puntos (marcas) de coordenadas conocidas, aplicar unas restricciones posicionales a dichas marcas simplifica notablemente el planteamiento y la resolución de las ecuaciones que rigen el problema. Así, al definirse una posición de privilegio en la marca artificial (como la planteada en la figura 5-2), y sabiendo la posición-orientación de la cámara respecto de la marca, y de ésta respecto del origen O del SCA, se obtendrá la posición-orientación absoluta de la cámara aplicando una transformación $\{\text{cámara} \rightarrow \text{marca} \rightarrow O\}$. Un planteamiento similar se adopta igualmente para independizar el robot de la cámara: una vez recuperada la posición y orientación de la cámara

respecto del sistema de coordenadas absoluto, obtener la misma información respecto al robot puede hacerse sabiendo la transformación $\{cámara \mapsto robot\}$.

5.2.1 Obtención de la orientación de la cámara

El primer objetivo será el de obtener la orientación de la cámara, esto es el vector de ángulos $\Omega = (\alpha, \beta, \gamma)$ respecto de la marca artificial. A partir de esta información será posible recuperar la posición de la cámara, esto es, el vector $\mathbf{S}_0$. Los tres ángulos buscados pueden obtenerse de la imagen de la marca en el PI, haciendo uso de las restricciones indicadas en (5.1).

Supongamos inicialmente una marca artificial compuesta por un rectángulo con sus lados mayor y menor orientados en relación al SCA en direcciones horizontal y vertical, respectivamente. Sus vectores directores cumplirían entonces las restricciones de la ecuación 5.1. Las proyecciones de los lados del rectángulo en el PI serían cuatro rectas definidas como:

$$\mathbf{i}_n = \begin{cases} \mathbf{u}_n = \lambda \frac{x_n + ka_n}{z_n + kc_n} \\ \mathbf{v}_n = \lambda \frac{y_n + kb_n}{z_n + kc_n} \end{cases}$$

siendo $1 \leq n \leq 4$ y los cosenos directores (a_n, b_n, c_n) iguales dos a dos, en correspondencia con las rectas paralelas de los lados mayor y menor (esto es, horizontales y verticales en el SCA). Cada par de rectas paralelas tendría un punto de fuga definido por las relaciones justificadas dentro del anexo C; si a estas relaciones se le añade la correspondiente a las componentes del vector director unitario, se tiene:

$$\begin{bmatrix} u_{\infty i} \\ v_{\infty i} \\ a_i^2 + b_i^2 + c_i^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda \frac{a_i}{c_i} \\ \lambda \frac{b_i}{c_i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

en donde $i \in [1, 2]$, según sea el punto de fuga de las rectas verticales u horizontales respectivamente. El método de obtención de las coordenadas de cada punto de fuga a través de las rectas recuperadas en el PI es indiferente a efectos de la definición del presente algoritmo y, en consecuencia, se supondrá ya resuelto. Despejando en 5.2 a_i y b_i , de las dos primeras ecuaciones, sustituyendo en la tercera y

rearrreglando el resultado en forma matricial puede escribirse para cada punto de fuga:

$$\begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{u_{\infty i}^2 + v_{\infty i}^2 + \lambda^2}} \begin{bmatrix} u_{\infty i} \\ v_{\infty i} \\ \lambda \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} u_{\infty i} \\ v_{\infty i} \\ \lambda \end{bmatrix}}{\left\| \begin{bmatrix} u_{\infty i} \\ v_{\infty i} \\ \lambda \end{bmatrix} \right\|} = \frac{\mathbf{U}_i}{\|\mathbf{U}_i\|}$$

Agrupando de forma explícita las dos ecuaciones obtenidas para cada punto de fuga se pueden resumir las relaciones halladas como:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \\ c_1 & c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{U}_1}{\|\mathbf{U}_1\|} & \frac{\mathbf{U}_2}{\|\mathbf{U}_2\|} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Por otro lado, los vectores directores $\mathbf{d}$ recuperados en el SCC respecto de los originales $\mathbf{D}$ en el SCA deben cumplir que:

$$\mathbf{d}_i = \mathbf{D}_i \mathbf{R}$$

Sean $\mathbf{D}_i = (A_i, B_i, C_i)$ los cosenos directores en el SCA para los dos conjuntos de rectas definidos, verticales y horizontales. Como además estas rectas están sobre el plano YZ , entonces $A_i = 0$ en ambas. Aplicando además las restricciones de rectas verticales (para $i = 1$) y horizontales (para $i = 2$), se tiene:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \end{bmatrix} \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{R} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Igualando las relaciones 5.3 y 5.4 se obtiene finalmente:

$$\begin{bmatrix} r_{31} & r_{21} \\ r_{32} & r_{22} \\ r_{33} & r_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{U}_1}{\|\mathbf{U}_1\|} & \frac{\mathbf{U}_2}{\|\mathbf{U}_2\|} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

en donde:

$$\begin{pmatrix} r_{31} = -\sin \beta \\ r_{32} = \sin \alpha \cos \beta \\ r_{33} = \cos \alpha \cos \beta \\ r_{21} = \cos \beta \sin \gamma \\ r_{22} = \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \\ r_{23} = \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} u_{\infty v} \\ v_{\infty v} \\ \lambda \end{bmatrix} \\ \mathbf{U}_2 = \begin{bmatrix} u_{\infty h} \\ v_{\infty h} \\ \lambda \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5.6)$$

Por lo tanto, 5.5 representa un sistema sobredimensionado no lineal de seis ecuaciones con tres incógnitas, que se corresponden con los tres ángulos del vector de orientación $\Omega = (\alpha, \beta, \gamma)$. La resolución estándar a este problema es la de encontrar una solución aproximada inicial para Ω y elaborar un resultado exacto posteriormente usando un método de mínimos cuadrados recursivos [Haralick 93].

5.2.2 Solución inicial del vector orientación, Ω

A partir del sistema 5.6, y sustituyendo los valores de los respectivos r_{ij} dados por las relaciones 5.5, se puede identificar una solución inicial para los ángulos buscados mediante las ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} \overline{u_v} = -\sin \beta \\ \overline{v_v} = \sin \alpha \cos \beta \\ \overline{\lambda_v} = \cos \alpha \cos \beta \\ \overline{u_h} = \cos \beta \sin \gamma \end{pmatrix}.$$

en donde (u_v, v_v) son las coordenadas del punto de fuga de las rectas verticales, P_{Fv} ; (u_h, v_h) son las coordenadas del punto de fuga de las rectas horizontales, P_{Fh} ; y las notaciones $\overline{u_k}$ y $\overline{\lambda_k}$ expresan valores normalizados respecto al módulo del vector $\mathbf{U}_k$. Despejando β de la primera ecuación, dividiendo entre sí las dos segundas, y utilizando el valor hallado de β para la última, se obtienen los valores de orientación buscados y que se resumen en las ecuaciones 5.7, las cuales incluyen los márgenes de variación de las variables de Ω que son posibles en esta aplicación:

$$\begin{aligned} \alpha &= \arctan\left(\frac{v_v}{\lambda}\right) & \rightarrow & 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \\ \beta &= -\arcsin \overline{u_v} & \rightarrow & -\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} \\ \gamma &= \arcsin\left(\frac{\overline{u_h}}{\cos \beta}\right) & \rightarrow & \pi < \gamma < 2\pi \end{aligned} \quad (5.7)$$

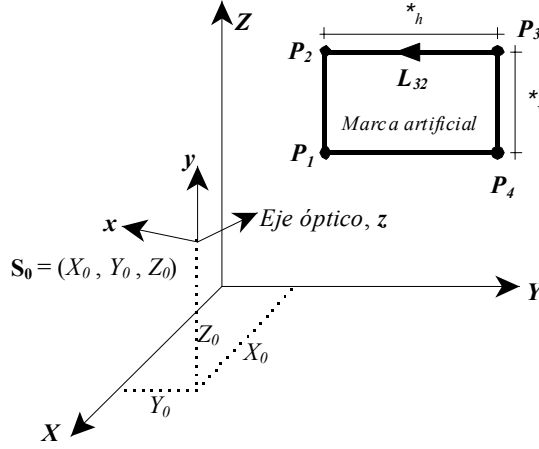


Figura 5-3: Posición relativa de la cámara respecto de la marca artificial: planteamiento inicial.

5.2.3 Recuperación de la posición de la cámara

Una vez determinada la orientación $\Omega = (\alpha, \beta, \gamma)$ de la cámara (esto es, del SCC) respecto de la marca (o sea, del SCA), se conocen ya todas las componentes de la matriz $\mathbf{R}$ de rotación, según los criterios adoptados en esta tesis. El siguiente paso del algoritmo es la determinación de la posición de la cámara respecto al SCA mediante la obtención de la matriz $\mathbf{T}$ de traslación pues ésta contiene la información del centro óptico C situado en el punto (X_0, Y_0, Z_0) del SCA.

La figura 5-3 muestra la situación de partida de este desarrollo. La marca artificial está formada por un rectángulo delimitado por las rectas que unen los puntos $\mathbf{P}_1$, $\mathbf{P}_2$, $\mathbf{P}_3$ y $\mathbf{P}_4$, todos ellos de coordenadas conocidas. También se suponen conocidas las distancias δ_v y δ_h , correspondientes con la altura y anchura, respectivamente, del rectángulo formado por los puntos anteriores. Así, las ecuaciones de cada una de las rectas del rectángulo podrán caracterizarse en función de las coordenadas de un origen arbitrario, en alguno de los $\mathbf{P}_i$, del vector director apropiado y de la longitud δ_k correspondiente a la existente entre el punto origen y el destino, $\mathbf{P}_j$.

Por ejemplo, el borde superior de la marca representada en la figura 5-3 tendrá la siguiente expresión:

$$\mathbf{L}_{32} = \mathbf{P}_3 + k_{32}\mathbf{M}_{32} \big|_{0 \leq k_{32} \leq \delta_h}$$

siendo $\mathbf{M}_{32}$ el vector director del citado segmento, que en este caso particular sería $\mathbf{M}_{32} = (a_X, b_Y, c_Z) = (0, -1, 0)$.

En el caso general (ver figura 5-3) la cámara, y en consecuencia el PI, estarán trasladadas a

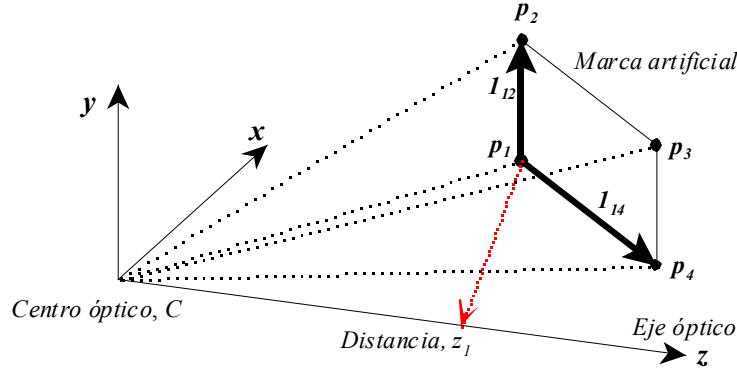


Figura 5-4: Marca artificial vista desde el SCC: recuperación de la posición relativa.

un punto desconocido, indicado por el vector $\mathbf{S}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$, y observando la marca tras unas rotaciones $\mathbf{R}$, ya conocidas gracias a la fase anterior del algoritmo.

La figura 5-4 muestra la situación de los puntos $\mathbf{P}_i$ de la marca ya transformados al SCC, esto es, se observan unos puntos $\mathbf{p}_i \leftarrow \mathbf{P}_i$ obtenidos tras las correspondientes rotaciones-traslaciones descritas en el anexo C. Estos puntos se encuentran unidos entre ellos por unas líneas de longitud δ_{ij} conocida y cuyas ecuaciones genéricas serían:

$$\mathbf{l}_{ij} = \mathbf{p}_i + k_{ij}\mathbf{m}_{ij} = (x_i, y_i, z_i) + k_{ij}(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$$

siendo $0 \leq k_{ij} \leq \delta_{ij}$. Es suficiente recuperar la posición de tres puntos para recuperar la posición relativa del SCC respecto del SCA, aunque el método es fácilmente generalizable al caso de recuperar $n + 2|_{n \geq 1}$ puntos.

En el desarrollo siguiente se tomará el punto $\mathbf{p}_1$ como origen de los segmentos orientados $\mathbf{l}_{12}$ y $\mathbf{l}_{14}$, cuyas ecuaciones, en el SCC, serían:

$$\begin{aligned} \mathbf{l}_{12} &= \mathbf{p}_1 + k_{12}\mathbf{m}_{12} |_{0 \leq k_{12} \leq \delta_v} \\ \mathbf{l}_{14} &= \mathbf{p}_1 + k_{14}\mathbf{m}_{14} |_{0 \leq k_{14} \leq \delta_h} \end{aligned} \quad (5.8)$$

de cosenos directores conocidos y relacionados con los de los segmentos originales mediante la transformación:

$$\mathbf{m}_{ij} = \mathbf{M}_{ij}\mathbf{R}$$

siendo en este caso concreto $\mathbf{M}_{12} = (0, 0, 1)$, por tratarse de un segmento vertical, y $\mathbf{M}_{14} = (0, 1, 0)$,

por tratarse de un segmento horizontal.

En el plano imagen, tenemos las transformaciones de perspectiva $\pi_i \leftarrow \mathbf{p}_i$ de tal forma que se obtendría, para cada π_i y respecto del punto de referencia $\mathbf{p}_1 = (x_1, y_1, z_1)$ las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}\pi_1 &\longrightarrow \begin{cases} u_1 = \lambda \frac{x_1}{z_1} \\ v_1 = \lambda \frac{y_1}{z_1} \end{cases} \\ \pi_2 &\longrightarrow \begin{cases} u_2 = \lambda \frac{x_1 + \delta_v a_{12}}{z_1 + \delta_v c_{12}} \\ v_2 = \lambda \frac{y_1 + \delta_v b_{12}}{z_1 + \delta_v c_{12}} \end{cases} \\ \pi_4 &\longrightarrow \begin{cases} u_4 = \lambda \frac{x_1 + \delta_h a_{14}}{z_1 + \delta_h c_{14}} \\ v_4 = \lambda \frac{y_1 + \delta_h b_{14}}{z_1 + \delta_h c_{14}} \end{cases} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Resolviendo para x_1 e y_1 en las ecuaciones de π_1 y sustituyendo en las de π_2 y π_4 , se obtiene:

$$\mathbf{p}_1 \longrightarrow \begin{cases} x_1 = \frac{z_1}{\lambda} u_1 \\ y_1 = \frac{z_1}{\lambda} v_1 \end{cases} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned}\pi_2 &\longrightarrow \begin{cases} (u_2 - u_1) z_1 = \delta_v (\lambda a_{12} - u_2 c_{12}) \\ (v_2 - v_1) z_1 = \delta_v (\lambda b_{12} - v_2 c_{12}) \end{cases} \\ \pi_4 &\longrightarrow \begin{cases} (u_4 - u_1) z_1 = \delta_h (\lambda a_{14} - u_4 c_{14}) \\ (v_4 - v_1) z_1 = \delta_h (\lambda b_{14} - v_4 c_{14}) \end{cases} \end{aligned} \quad (5.11)$$

En las ecuaciones 5.10 basta con encontrar el valor de la distancia al punto, siguiendo el eje óptico z_1 , para poder determinar las otras dos coordenadas. Esta distancia, se recupera a partir del sistema 5.11, de cuatro ecuaciones y una sólo incógnita. Colocando aquellas en forma matricial se

obtiene:

$$\begin{bmatrix} u_2 - u_1 \\ v_2 - v_1 \\ u_4 - u_1 \\ v_4 - v_1 \end{bmatrix} z_1 = \begin{bmatrix} \delta_v(\lambda a_{12} - u_2 c_{12}) \\ \delta_v(\lambda b_{12} - v_2 c_{12}) \\ \delta_h(\lambda a_{14} - u_4 c_{14}) \\ \delta_h(\lambda b_{14} - v_4 c_{14}) \end{bmatrix} \implies \mathbf{A} z_1 = \mathbf{B} \quad (5.12)$$

que puede resolverse de forma sencilla, por mínimos cuadrados, en la siguiente forma:

$$z_1 = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (5.13)$$

llevando éste valor a las ecuaciones 5.10 se obtendrá, entonces, el vector de posición $\mathbf{p}_1 = (x_1, y_1, z_1)$, respecto del SCC. Este vector se relaciona con el SCA mediante la transformación $\mathbf{p}_1 = \mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{R}$ en donde $\mathbf{R}$ es conocida; cambiando la referencia hacia el SCA y en coordenadas homogéneas se tiene:

$$\mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{R} \mathbf{R}^{-1} = \mathbf{P}_1 \mathbf{T} = \mathbf{p}_1 \mathbf{R}^{-1} \quad (5.14)$$

Es de notar que precisamente la matriz $\mathbf{T}$ es donde se encuentra la información buscada, esto es, el vector de posición $\mathbf{S}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ del centro óptico de la cámara respecto del SCA. Reescribiendo 5.14 respecto de la matriz de rotación en coordenadas no homogéneas se tiene:

$$(X_1 - X_0, Y_1 - Y_0, Z_1 - Z_0) = \mathbf{P}_1 - \mathbf{S}_0 = \mathbf{p}_1 \mathbf{R}^{-1}$$

por tanto, recuperar el vector $\mathbf{S}_0$ sólo necesita de una simple resta:

$$\mathbf{S}_0 = \mathbf{P}_i - \mathbf{p}_i \mathbf{R}^{-1} \quad (5.15)$$

en coordenadas no homogéneas, en donde $\mathbf{R}^{-1}$ es la matriz inversa de rotación, e i especifica cualquiera de los puntos de la marca artificial, de coordenadas conocidas respecto al SCA, y que se hubiera tomado como referencia para el algoritmo aquí detallado; en este ejemplo $i = 1$.

Dos estructuras, dos resultados

Para la recuperación de la posición basta con conocer tres de los cuatro puntos que constituyen las cuatro esquinas de la marca artificial. Sin embargo, para poder obtener los dos puntos de fuga (de las rectas horizontales y verticales), base de la fase de recuperación del vector Ω (relacionado con la matriz de rotación $\mathbf{R}$), es necesario haber determinado los cuatro puntos; de esta forma, la situación descrita en la figura 5-4 aparece dos veces, una para cada tripleta de puntos esquina. Esta

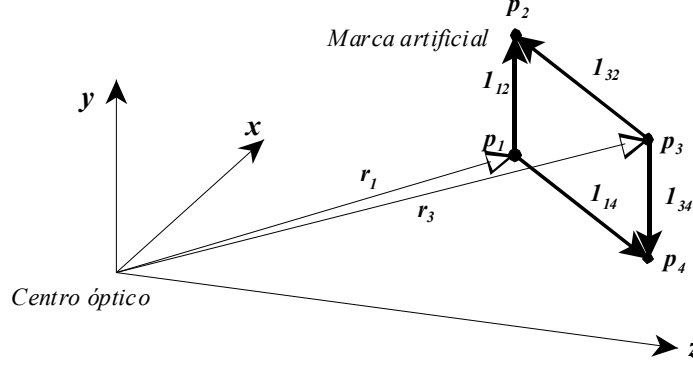


Figura 5-5: Recuperación de la posición: doble estructura triangular en la Marca Artificial..

circunstancia se remarca en la figura 5-5.

La posición del centro óptico C se determina, según lo mostrado en la ecuación 5.15, tomando como base el punto de intersección de las rectas horizontal y vertical, y según lo mostrado en la figura 5-5, se encuentran dos posibles estructuras¹ asociadas a los puntos $\mathbf{p}_1$ y $\mathbf{p}_3$. Dichas estructuras, asociadas a los vectores $\mathbf{r}_1$ y $\mathbf{r}_3$, incluyen en cada caso los elementos:

$$\mathbf{r}_1 \rightarrow [\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_4, l_{12}, l_{14}]$$

$$\mathbf{r}_3 \rightarrow [\mathbf{p}_3, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_4, l_{32}, l_{34}]$$

En cada uno de los casos anteriores se recuperan sendas estimaciones $\mathbf{S}_{0i}$, en correspondencia con los puntos base, $\mathbf{p}_i$, usados; dado que ambas están sujetas a incertidumbres de medida similares, por la propia simetría y dimensiones del problema, se obtendría una mejor estimación de $\mathbf{S}_0$ como:

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{S}_{01} = \mathbf{P}_1 - \mathbf{p}_1 \mathbf{R}^{-1} \\ \mathbf{S}_{03} = \mathbf{P}_3 - \mathbf{p}_3 \mathbf{R}^{-1} \end{array} \right\} \Rightarrow \mathbf{S}_0 = \frac{\mathbf{S}_{01} + \mathbf{S}_{03}}{2} = \frac{\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_3}{2} - \frac{\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_3}{2} \mathbf{R}^{-1}$$

expresión que se simplifica notablemente si el origen, punto $(0, 0, 0)$, de la marca se hace coincidir con el centro del rectángulo definido por $\mathbf{p}_{1...4}$, con lo que $\frac{1}{2}(\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_3) = 0$ y la expresión final de $\mathbf{S}_0$ resulta ser:

$$\mathbf{S}_0 = -\frac{\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_3}{2} \mathbf{R}^{-1} \quad (5.16)$$

Finalmente, juntando este resultado con los ángulos de rotación ya recuperados, el vector de

¹No existen más; si se tomasen los otros puntos esquina se obtendrían meras combinaciones lineales de las otras soluciones.

posición-orientación del eje óptico del SCC respecto del SCA queda determinado como:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{S}_0, \Omega) = (X_0, Y_0, Z_0, \alpha, \beta, \gamma)$$

5.3 Prestaciones del algoritmo de posicionamiento mediante Puntos de Fuga

El algoritmo en dos fases descrito en la sección anterior tiene la ventaja relativa de no hacer uso más que de la propia imagen de la marca artificial para determinar el vector $\mathbf{C}$, en 3D. Sin embargo, como ya se ha advertido, tiene el inconveniente de acumular los errores cometidos en la determinación de Ω a la determinación de la traslación $\mathbf{T}$. Además se tiene el inconveniente añadido de la escasa información proporcionada por la marca, sobre todo a gran distancia: cuatro únicos centroides en (u, v) , de reducidas dimensiones relativas, de los que se extraerán las rectas definidas por ellos y sus consiguientes puntos de fuga.

Otros métodos de tipo $[\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{T}]$, necesitan o bien de tramos rectos alejados entre sí en el SCA, para poder dar múltiples puntos de vista diferentes [Kumar 94], o bien de segmentos notablemente grandes de longitudes de alrededor de un tercio del número de pixels del sensor [Wang 91] [Amat 99].

Para tener una idea clara de las prestaciones reales del algoritmo de posicionamiento mediante Puntos de Fuga, se han realizado un conjunto de simulaciones sobre trazas sintéticas de puntos en una rejilla espacial dada y usando una óptica y sensor del entorno del video multimedia.

5.3.1 Óptica y sensor de referencia

Para las simulaciones, y con vistas a una evaluación de sus posibilidades de implantación práctica, se ha optado por una combinación de óptica y sensor miniatura, de menores dimensiones, peso y precio que el sistema de visión empleado en el capítulo anterior. Se pretende obtener así unas conclusiones correspondientes a lo que sería un dispositivo más apropiado a la aplicación buscada, en lugar de usar ópticas profesionales de las presentes en los laboratorios de investigación o en máquinas industriales de gama alta.

El sensor de referencia es un módulo digital miniatura, en tecnología CMOS, de la firma OmniVision, del tipo 1/3", de formato VGA (640×480 pixels), equipado con una óptica integrada de 6.5 mm. Con estos datos, el sensor posee unos campos de visión (*FOV*, o *Field Of View*) de alrededor de 35 grados en el eje vertical y unos 45 grados en el eje horizontal.

Se ha elegido también, como en el caso de la cámara del capítulo anterior, un sensor monocromo, en este caso el OV7610, para evitar que el mosaico de puntos detectores de diferentes longitudes de

onda correspondiente a los sensores en color añade más ruido a la detección de centroides.

5.3.2 Resultados de las simulaciones

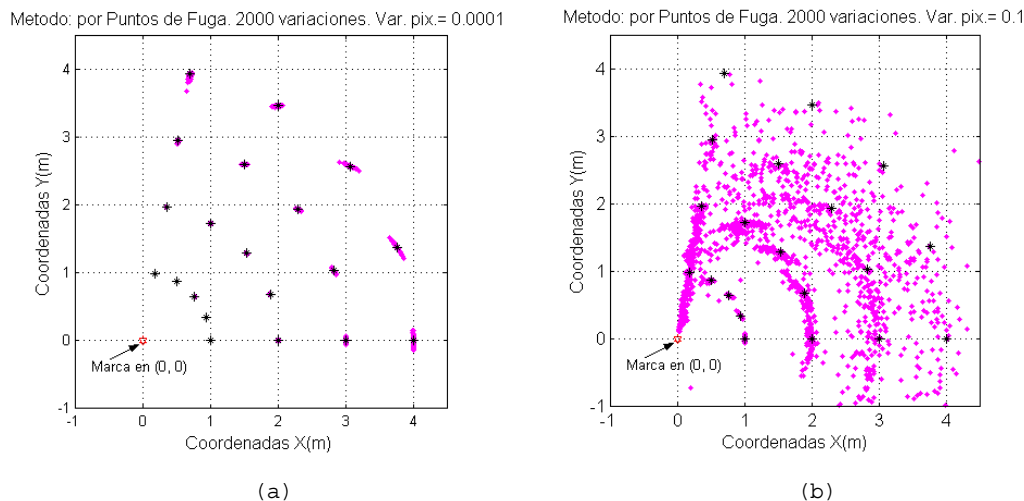


Figura 5-6: Posiciones recuperadas en el plano XY , para distintas varianzas de medida de centroides. (a)-Varianza de medida de 0.0001 pixel^2 ; (b)-Varianza de medida de 0.1 pixel^2 .

Se han realizado distintas simulaciones correspondientes a diversas desviaciones típicas en el proceso de detección de centroides de los cuatro puntos de referencia de la marca. En todo caso, se ha supuesto la cámara paralela al plano horizontal, lo que resulta en sendos ángulos de elevación y alabeo de $\alpha = \beta = 0^\circ$. La figura 5-6, muestra dos gráficas con los resultados obtenidos para sendas varianzas de medida de centroides de 0.0001 y 0.1 pixel^2 , lo que se corresponde con desviaciones típicas de 0.01 y 0.3 pixel , respectivamente.

En ambos casos se trata de resoluciones efectivas subpíxelicas, pero mientras una resolución de 0.3 pixel es relativamente fácil de obtener, la resolución de 0.01 pixel exigiría un algoritmo de recuperación de centroides notablemente más preciso y complejo que el expuesto en el capítulo anterior [Heikkilä 96] [Lavest 99] [Lázaro 00]. Pero además, a la vista de los resultados expuestos en la figura 5-6, puede concluirse que el sistema sólo presentará resultados aplicables si se tiende a la *centésima de pixel* en la desviación típica de la detección de centroides, con la gran dificultad que esto conlleva.

Dado que en la figura 5-6 parece observarse una estructura radial en la dispersión de los datos de posición (X, Y) recuperados, en el resto de pruebas éstas se describen en un espacio polar (R, ϕ) , en donde R es la distancia radial entre el centro de la marca (punto de referencia, $R = 0$) y el

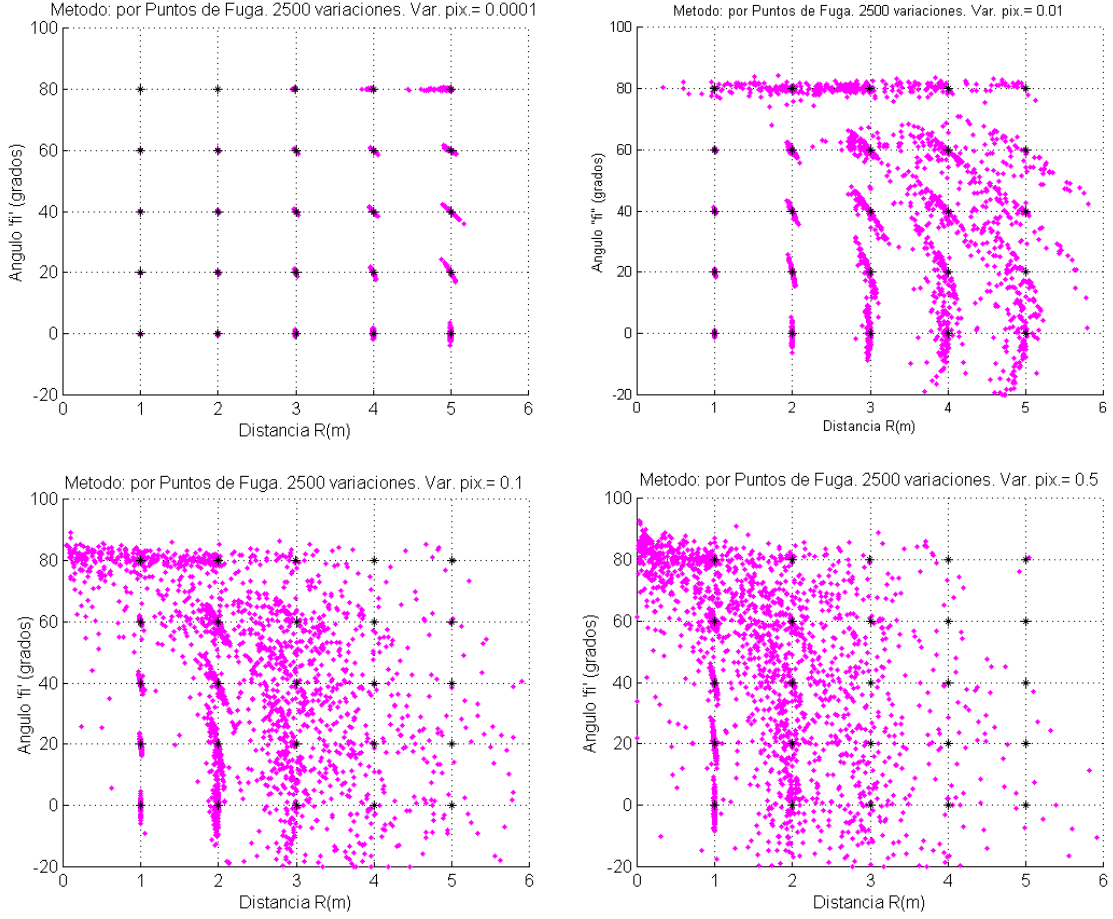


Figura 5-7: Representación en coordenadas polares del plano XY . Posiciones recuperadas por el algoritmo bajo estudio, en un espacio polar (R, ϕ) . Condiciones de medida de centroides, de izquierda a derecha y de arriba a abajo, varianzas de: 0.0001, 0.01, 0.1 y 0.5 pixel².

centro óptico C , y el ángulo ϕ es la desviación referente a la posición frontal de la marca. Esto se corresponde a la situación descrita para la marca en el plano YZ del SCA, siendo entonces $\phi = 0$ el propio eje X . La relación entre el ángulo de fase ϕ , referido al eje X del plano de rodadura, y el ángulo de giro γ de la cámara es:

$$\phi = \gamma - \frac{3\pi}{2},$$

dato a tener en cuenta pues, según el caso, en el resto de este documento se hará mención indistinta al ángulo de giro como ϕ o como γ , difiriendo ambos en la cantidad mencionada.

La figura 5-7 se ha realizado en el espacio polar (R, ϕ) , tomando distancias R enteras, entre 1 y 5 metros, y ángulos ϕ entre 0 y 80 grados, con incrementos de 20°. Se comprueba fácilmente la

importante degradación que se produce en las posiciones recuperadas según aumenta la varianza de medida de centroides, σ^2 . Ya incluso con $\sigma^2 = 10^{-4}$, se aprecia una cierta degradación en ángulos ϕ grandes, aparte de una lógico empeoramiento en la recuperación de R con la distancia.

La situación empeora rápidamente al crecer σ^2 . Para $\sigma^2 = 10^{-2}$, lo que corresponde a una desviación típica de sólo 0.1 pixel, la distribución de puntos resulta cuasi caótica para distancias a partir de unos 3 metros, mientras que simultáneamente la detección para $\phi = 80^\circ$ resulta prácticamente imposible. Con σ^2 de 0.1 y 0.5 pixel² el sistema puede considerarse, sin exageración, como inservible. ¿Qué provoca tamaña dispersión?

Recuérdese que se trata de un algoritmo $[\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{T}]$, esto permite aventurar que el origen del problema puede estar en la recuperación de $\mathbf{R}$, esto es, de los ángulos de orientación $\Omega = (\alpha, \beta, \gamma)$: si esta recuperación es deficiente, el error puede ser notablemente mayor en $\mathbf{T}$.

Aprovechando las herramientas de simulación pueden extraerse conclusiones más rápidamente que mediante una analítica del algoritmo en sí, por lo que éste será el camino a seguir para buscar una solución que permita utilizar el sistema de posicionamiento con menores restricciones en su precisión, siempre difíciles de lograr, y obtener a cambio mejores prestaciones en lo que es el objetivo final propuesto: un sistema de posicionamiento preciso y de bajo coste, para vehículos autónomos con relaciones prestaciones/precio muy ajustadas.

La figura 5-8 muestra gráficamente los errores cometidos en la recuperación de los ángulos de elevación y alabeo, (α, β) . El espacio de prueba es de cuatro distancias, R de 1 a 4 metros, con posiciones angulares ϕ de 15, 45 y 75 grados; en cada punto se han realizado 100 simulaciones con un resultado total de 1200 muestras; la varianza σ^2 es de 0.1 pixel².

Puede comprobarse que los errores cometidos en la recuperación del ángulo β resultan ser despreciables al quedarse acotados entre los $\pm 2^\circ$. Sin embargo, el error cometido en la detección del ángulo de elevación α resulta ser muy importante, creciendo proporcionalmente a la distancia R y al ángulo ϕ ; los picos de error llegan, en algún caso, a superar los 70° , lo cual es sencillamente inaceptable.

La recuperación de γ presenta unos errores aún mayores. La figura 5-9 muestra los valores recuperados del ángulo de giro, γ , en el mismo experimento. Se observa un error creciente con la distancia y que llega a presentar picos mayores de 30° , sin embargo, el comportamiento frente a ϕ crecientes es inverso al experimentado por α , pues se aprecia un decrecimiento con ϕ . Por otro lado se comprueba que la distribución de error no es gaussiana en γ , pues experimenta mayores decrecimientos que crecimientos en su valor; la razón está en la no linealidad inherente al algoritmo de recuperación de la orientación Ω , aunque se manifiesta más claramente en γ que en el resto de ángulos.

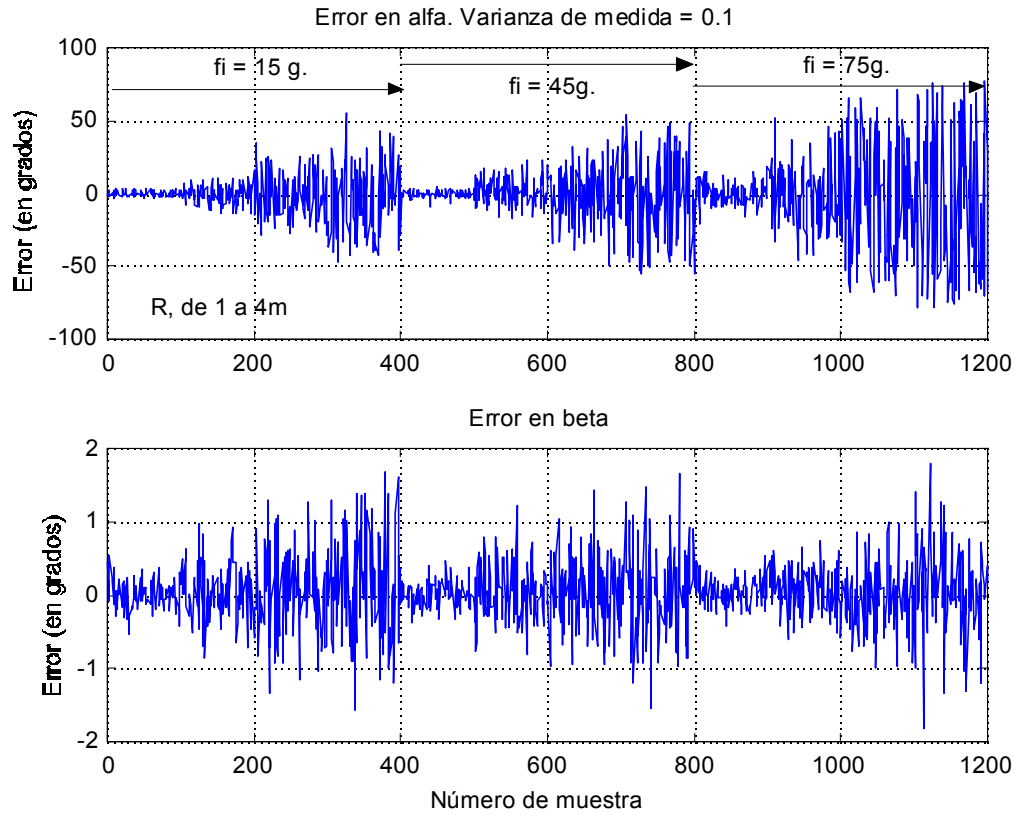


Figura 5-8: Errores en la recuperación de los ángulos de elevación y alabeo, (α, β) . Datos de 1200 muestras, con $R \in [1..4]$ metros, y $\phi \in [15, 45, 75]$ grados. Varianza de medida de centroides $\sigma^2 = 0.1$ pixel².

Finalmente, se pueden observar algunos puntos exageradamente desviados aunque en algún caso parecen corresponder a cambios de signo en ϕ , pues ocupan posiciones próximas al valor $-\phi$ correspondiente.

La tabla 5.1 presenta, numéricamente y supuesta una aproximación gaussiana², las desviaciones típicas obtenidas en la recuperación de los ángulos de orientación Ω , mediante el presente algoritmo. Se comprueban las tendencias enunciadas a la vista de las gráficas de las figuras 5-8 y 5-9, así como los valores numéricos correspondientes.

En conclusión, puede afirmarse que el ángulo de alabeo β no es especialmente sensible a los errores en la detección de centroides y se recupera con más que suficiente precisión. Sin embargo, la recuperación de los ángulos α y γ resulta ser mucho más problemática, especialmente en lo que atañe

²A pesar de no ser ésta la distribución estadística que más se ajusta a los datos obtenidos, su interpretación se hace así más intuitiva.

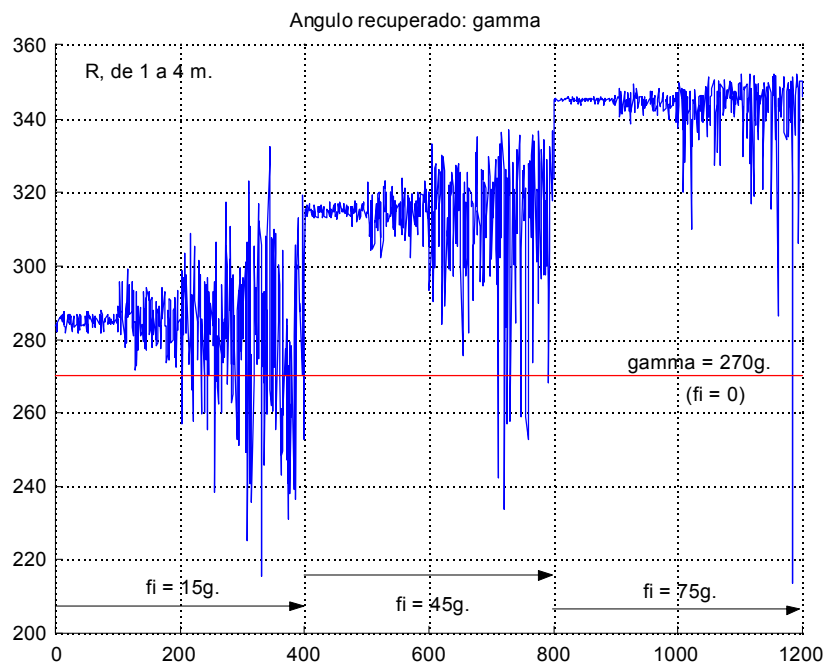


Figura 5-9: Recuperación del ángulo de giro, γ . Datos de 1200 muestras, con $R \in [1..4]$ metros, y $\phi \in [15, 45, 75]$ grados. Varianza de medida de centroides $\sigma^2 = 0.1 \text{ pixel}^2$.

al ángulo de elevación, cuyo error es mayor en módulo. No obstante, el error en γ es especialmente preocupante por implicar posteriores errores en el plano XY de varios metros a sólo 3 o 4 metros de la marca.

Antes de abordar la mejora del sistema propuesto, de cara a obtener una precisión suficiente para cumplir el objetivo marcado, cabe caracterizar las razones que llevan a este crecimiento tan rápido en los errores cometidos en la estimación de Ω . En las siguientes secciones se abordará esta cuestión bajo el punto de vista de la sensibilidad de la detección de Ω a los parámetros implicados en la obtención del punto de fuga.

5.3.3 Caracterización de los puntos de fuga

La forma en la cual se obtienen los puntos de fuga afecta a la precisión y a la sensibilidad del método a los errores de medida cometidos en la recuperación de las líneas definidas por la marca artificial. Se han de seguir dos fases de forma secuencial:

- Obtención de las rectas en el plano imagen y cálculo de su punto de fuga.
- Obtención de la posición y orientación de la cámara, a partir de los datos de los punto de fuga

R	ϕ	Desv. típicas		
		σ_α	σ_β	σ_γ
1	15	1.83	0.18	1.69
1	45	2.38	0.18	1.22
1	75	6.72	0.18	0.46
2	15	7.01	0.36	6.49
2	45	9.07	0.35	4.93
2	75	22.2	0.34	1.93
3	15	14.9	0.52	13.9
3	45	20.0	0.52	11.8
3	75	38.9	0.45	5.29
4	15	24.1	0.69	24.0
4	45	29.2	0.65	21.8
4	75	51.7	0.48	18.8
5	15	32.8	0.81	32.5
5	45	39.1	0.72	33.3
5	75	59.3	0.52	36.4

Tabla 5.1: Desviaciones típicas, en grados, para los ángulos de elevación, alabeo y giro recuperados por el algoritmo de posicionamiento basado en puntos de fuga (aproximación gaussiana).

ya obtenidos.

Se trata de encontrar en el plano imagen (u, v) el punto de intersección de dos rectas conocidas, las cuales se definen a partir de sendos segmentos cuyos extremos son de coordenadas conocidas. Sean éstas dos rectas paralelas en el espacio (SCC) y que vengan determinadas en el PI por su pendiente³ m y su ordenada inicial B :

$$\begin{aligned} r_1 &\longrightarrow v = m_1 u + B_1 \\ r_2 &\longrightarrow v = m_2 u + B_2 \end{aligned}$$

estas rectas se cortan (punto de fuga) en las coordenadas (u_F, v_F) dadas por:

$$u_F = \frac{B_2 - B_1}{m_1 - m_2} \quad v_F = \frac{m_1 B_2 - B_1 m_2}{m_1 - m_2} \quad (5.17)$$

Las ecuaciones 5.17 admiten una interesante transformación si se normaliza el valor de las coordenadas B_i respecto de la distancia focal λ . Así, puede escribirse:

$$\hat{u}_F = \frac{b_2 - b_1}{m_1 - m_2} \quad \hat{v}_F = \frac{m_1 b_2 - b_1 m_2}{m_1 - m_2} = \frac{m_1 m_2}{m_1 - m_2} (a_1 - a_2) \quad (5.18)$$

³De entre las formas de definir la recta, ésta es la que permitirá una interpretación más inmediata e intuitiva de las sensibilidades halladas.

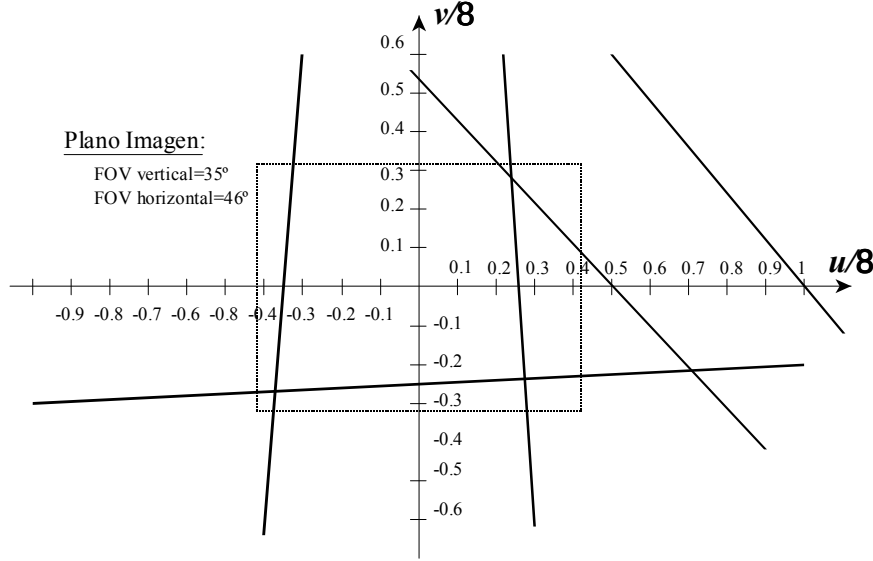


Figura 5-10: Plano imagen normalizado: puntos de corte de las rectas visibles en el PI respecto a los ejes (u/λ) y (v/λ)

siendo los a_i los puntos de cruce con el eje de abscisas $\hat{u}$, pues se cumple que:

$$m_i = \frac{\Delta v}{\Delta u} = -\frac{b_i}{a_i} \Rightarrow a_i = -\frac{b_i}{m_i}$$

La utilidad más interesante de las expresiones alternativas 5.18 es la de poder establecer, de forma aproximada y rápida, un límite para los valores de a_i y b_i en función de su visibilidad en el plano imagen. En efecto, para poder ver las rectas r_i alguno de los citados puntos de corte con los ejes (a_i, b_i) ha de ser visible dentro del PI, o al menos caer en sus proximidades (caso de las rectas oblicuas en las esquinas de la imagen).

La figura 5-10 muestra la situación en el caso del sistema óptico de referencia: un sensor de $1/3''$ con una óptica de 6.5mm. En este caso, los límites normalizados $(\hat{u}, \hat{v})$ del plano imagen son $(0.42, 0.31)$, con lo que rectas cuyos puntos de corte con los ejes estén por encima de la unidad es seguro que no son visibles, tal y como se muestra en la citada figura. Para otras ópticas y sensores los límites serán distintos, pero los conceptos y conclusiones que se extraigan en esta sección serán fácilmente extrapolables a cualquier otro caso.

En el estudio que sigue se tomará la solución inicial del vector orientación $\Omega = (\alpha, \beta, \gamma)$, desarrollado en la sección 5.2.2, y supuesta la situación definida en la sección 5.2.3, en la que la marca ocupa el plano YZ .

5.3.4 Sensibilidad en la elevación, ángulo α

De las ecuaciones 5.7, y empleando las notaciones ya normalizadas respecto a λ correspondientes a las ecuaciones 5.18, puede escribirse:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{v_v}{\lambda}\right) = \arctan\frac{m_1b_2 - b_1m_2}{(m_1 - m_2)}$$

siendo m_i y b_i los parámetros de las dos rectas verticales de la marca artificial proyectadas sobre el PI. El ángulo α es función de cuatro parámetros: $\alpha = f(m_1, m_2, b_1, b_2)$. No obstante, simplifica el análisis considerar a α como una función de función, separando la parte trigonométrica de los parámetros de las rectas en la forma:

$$\alpha = \arctan F \quad \Leftrightarrow \quad F = \frac{m_1b_2 - b_1m_2}{(m_1 - m_2)} \quad (5.19)$$

En consecuencia, el error relativo de α en función de los errores relativos de cada uno de los parámetros de las rectas implicadas vendrá dado por:

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{m_1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dm_1} \frac{dm_1}{m_1} + \frac{m_2}{\alpha} \frac{d\alpha}{dm_2} \frac{dm_2}{m_2} + \frac{b_1}{\alpha} \frac{d\alpha}{db_1} \frac{db_1}{b_1} + \frac{b_2}{\alpha} \frac{d\alpha}{db_2} \frac{db_2}{b_2}$$

expresión que puede simplificarse como:

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = S_{m_1}^\alpha \frac{dm_1}{m_1} + S_{m_2}^\alpha \frac{dm_2}{m_2} + S_{b_1}^\alpha \frac{db_1}{b_1} + S_{b_2}^\alpha \frac{db_2}{b_2} \quad (5.20)$$

siendo las expresiones S_P^Q correspondientes a la sensibilidad de la función Q respecto del parámetro P definida como:

$$S_P^Q = \frac{P}{Q} \frac{dQ}{dP} = \frac{P}{Q} \frac{dQ}{dF} \frac{dF}{dP}$$

una vez tenida en cuenta la función intermedia F , tal como se definió en 5.19. A continuación se obtendrán cada uno de los cuatro factores de sensibilidad definidos en 5.20 y posteriormente se discutirán los resultados obtenidos.

Sensibilidades de α respecto a las pendientes m_i .

Tomando la pendiente m_1 su sensibilidad $S_{m_1}^\alpha$ resulta ser:

$$S_{m_1}^\alpha = \frac{m_1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dF} \frac{dF}{dm_1} = \frac{m_1}{\alpha} \frac{1}{1 + F^2} \frac{m_2(b_1 - b_2)}{(m_1 - m_2)^2} \quad (5.21)$$

expresión útil para computar el valor de la sensibilidad pero no para obtener conclusiones útiles. Sin embargo, a partir de las ecuaciones 5.18 y 5.7 podemos establecer una relación interesante entre los ángulos α y β :

$$\begin{aligned} \frac{\hat{u}}{\hat{v}} &= \left(\frac{b_2 - b_1}{m_1 - m_2} \right) \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 b_2 - b_1 m_2} \right) = \frac{b_2 - b_1}{m_1 - m_2} \frac{1}{F} = -\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{b_1 - b_2}{m_1 - m_2} = F \frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \end{aligned}$$

expresión que sustituida en 5.21 queda como:

$$S_{m_1}^\alpha = \frac{m_1}{\alpha} \frac{F}{1 + F^2} \frac{m_2}{(m_1 - m_2)} \frac{\tan \beta}{\sin \alpha} = \frac{F}{1 + F^2} \frac{1}{\alpha \sin \alpha} \frac{m_1 m_2}{(m_1 - m_2)} \tan \beta$$

en donde usando la relación de pendientes encontrada en 5.18, se obtiene:

$$S_{m_1}^\alpha = \frac{F}{1 + F^2} \frac{1}{\alpha \sin \alpha} \frac{F}{a_1 - a_2} \tan \beta = \frac{F^2}{1 + F^2} \frac{1}{\alpha \sin \alpha} \frac{\tan \beta}{\Delta a} \quad (5.22)$$

expresión que sólo depende de tres parámetros: el ángulo de elevación α (recuérdese que $F = \tan \alpha$); el ángulo de alabeo β ; y la separación entre los cortes de las rectas verticales sobre el eje de abscisas: $\Delta a = a_1 - a_2$.

Realizando operaciones similares para obtener $S_{m_2}^\alpha$, la expresión resultante guarda una interesante simetría con la obtenida para $S_{m_1}^\alpha$. En efecto, se cumple que:

$$S_{m_2}^\alpha = -\frac{F^2}{1 + F^2} \frac{1}{\alpha \sin \alpha} \frac{\tan \beta}{\Delta a} = -S_{m_1}^\alpha \quad (5.23)$$

diferenciándose sólo en el signo y siendo ambas expresiones independientes de los valores absolutos de las pendientes (ni m_1 ni m_2 aparecen en ellas).

Para poder extraer conclusiones prácticas de 5.22 y 5.23 es necesario establecer ciertas condiciones habituales de trabajo. En condiciones normales, los ángulos de elevación y alabeo han de ser $\alpha = \pi/2$ y $\beta = 0$; en esas condiciones ambas sensibilidades son nulas, lo cual es coherente con la observación de que el ángulo α depende de la ordenada del punto de fuga y si $\beta = 0$ el punto de fuga y el de cruce de las rectas con el eje de ordenadas (parámetro b) coinciden, siendo independientes entonces de las pendientes m . Por ello, las sensibilidades sólo tienen valores no nulos para $\beta \neq 0$, dependiendo además del propio valor de α y de la separación entre las rectas Δa : cuanto mayor sea esta separación, mejor precisión *ergo* menor sensibilidad.

En la figura 5-11 se representan las variaciones de la sensibilidad S_m^α respecto a la separación Δa , con el alabeo β como parámetro; recuérdese que en principio el valor de β debiera estar próximo a cero, con lo que las gráficas para $\beta = 5^\circ$ y 10° resultan ser las más significativas. Cada una de las gráficas citadas contienen tres curvas correspondientes a los valores de elevación comprendidos entre $\alpha = 0$ (curva más exterior) y $\pi/2$ (curva interior), con una curva intermedia para $\alpha = \pi/4$.

La figura 5-12 presenta de forma continua las variaciones de S_m^α respecto al alabeo β para un ángulo $\alpha = \pi/4$. Puede comprobarse cómo la sensibilidad tiende a cero con el valor de $\tan \beta$. Es visible también la discontinuidad en el valor de S_m^α para $\Delta a = 0$, cosa lógica pues representa el caso de rectas coincidentes, caso en el que no existe punto de fuga al no haber un cruce discernible.

Sensibilidades de α respecto a las ordenadas en el origen, b_i .

Tomando la ordenada b_1 de la primera recta, la sensibilidad $S_{b_1}^\alpha$ es igual a:

$$S_{b_1}^\alpha = \frac{b_1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dF} \frac{dF}{db_1} = \frac{b_1}{\alpha} \frac{1}{1+F^2} \frac{-m_2}{m_1-m_2} \quad (5.24)$$

Reordenando la expresión 5.24, y teniendo en cuenta las equivalencias de la función F (ecuaciones 5.18 y 5.19), puede escribirse:

$$\frac{-m_2 b_1}{m_1 - m_2} = \frac{-m_1 m_2}{m_1 - m_2} \frac{b_1}{m_1} = \frac{m_1 m_2}{m_1 - m_2} a_1 = \frac{F}{\Delta a} a_1$$

con lo que 5.24 queda definitivamente como:

$$S_{b_1}^\alpha = \frac{F}{1+F^2} \frac{1}{\alpha} \left(\frac{a_1}{\Delta a} \right) \quad (5.25)$$

Realizando un desarrollo similar para la otra recta, el valor de $S_{b_2}^\alpha$ resulta ser:

$$S_{b_2}^\alpha = \frac{F}{1+F^2} \frac{1}{\alpha} \left(\frac{-a_2}{\Delta a} \right) \quad (5.26)$$

Al igual que en el caso de las pendientes m , las expresiones 5.25 y 5.26 dependen únicamente de tres parámetros que, en este caso, son la elevación α y dos parámetros geométricos respecto al eje de abscisas de las rectas implicadas: el corte de la recta respecto a la cual se estima la sensibilidad ($a_{1,2} \longleftrightarrow b_{1,2}$, salvo el signo) y la diferencia entre los cortes de las dos rectas tratadas, Δa . Igual que en el caso de las pendientes m , resulta claro que a mayor separación menor sensibilidad en la recuperación de α .

La figura 5-13 muestra distintos valores de la sensibilidad $S_{b_1}^\alpha$, y por extensión de $-S_{b_2}^\alpha$, en

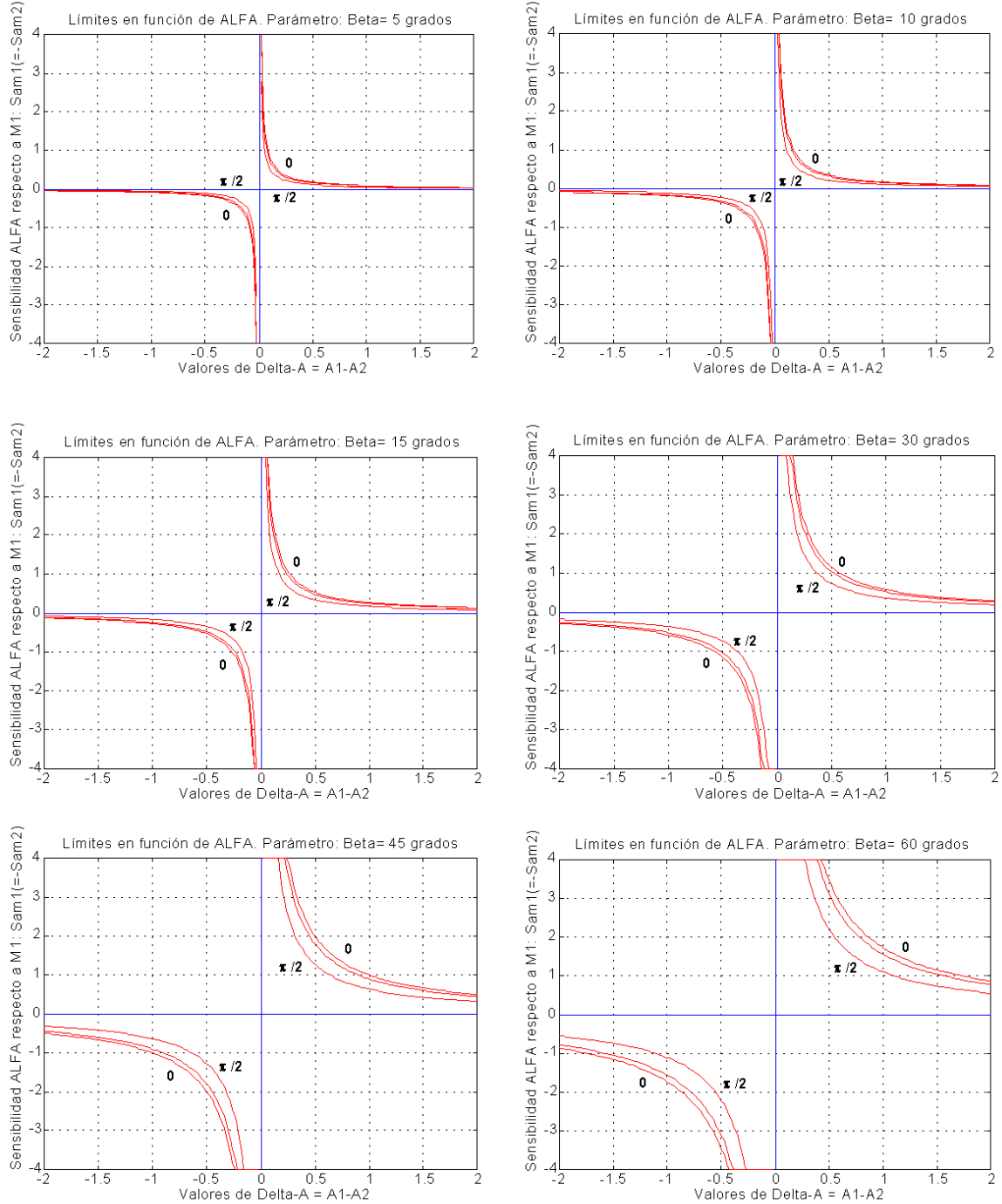


Figura 5-11: Sensibilidades $S_{m_1}^\alpha$ y $-S_{m_2}^\alpha$ respecto a la diferencia Δa , para valores de α iguales a 0, $\pi/4$ (curva interior) y $\pi/2$. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: curvas para valores de β iguales a 5, 10, 15, 30, 45 y 60 grados.

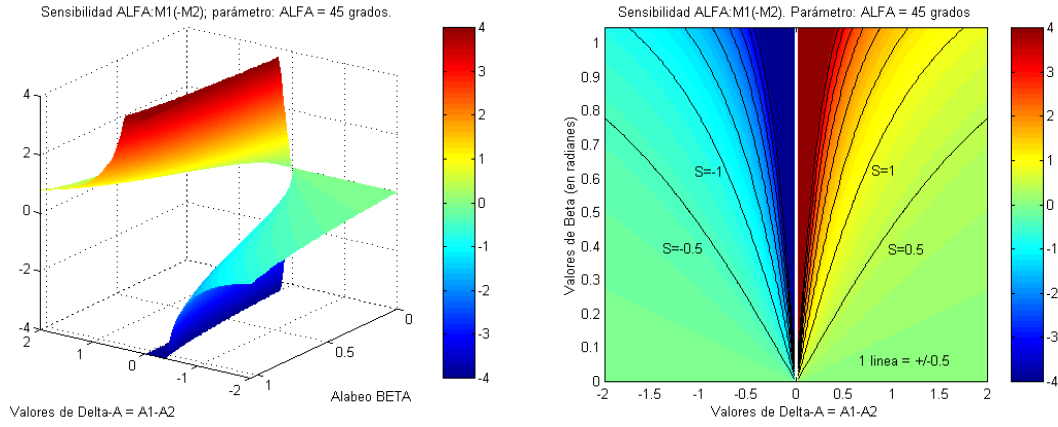


Figura 5-12: Sensibilidades $S_{m_1}^\alpha$ y $-S_{m_2}^\alpha$: gráficas respecto al alabeo β y a la diferencia Δa , para un valor de $\alpha = 45^\circ$. A la izquierda representación 3D; a la derecha proyección sobre el plano y curvas de nivel.

función del valor de la separación de abscisas, Δa , y usando como parámetro la abscisa a_i . Sólo se muestran valores positivos de esta última, pudiéndose extender las conclusiones que se extraigan invirtiendo el signo en su caso. Los valores de Δa se restringen a los posibles al tomar la limitación práctica de los valores de a_i a ± 1 .

Como puede verse, y a la luz de la expresión 5.25, la sensibilidad considerada se anula si la recta implicada pasa por el origen; a partir de ahí, interesa que la separación entre las dos rectas verticales sea lo mayor posible. Teniendo en cuenta el valor actual del ángulo de elevación α , éste interesa que sea lo más próximo posible a $\pi/2$, valor para el cual la sensibilidad también se anula al resultar que $(F = \tan \alpha) \rightarrow \infty$. Esta situación es la correspondiente a la cámara en posición horizontal. Por último, el ángulo de alabeo β no influye en los resultados obtenidos.

Por otro lado, la figura 5-14 muestra una vista en 3D, así como su proyección sobre el plano, de la sensibilidad $S_{b_1}^\alpha$ en función de los valores de a_1 y Δa , particularizados para el caso de $\alpha = \pi/4$. De nuevo se puede observar la discontinuidad debida al caso de rectas coincidentes $\Delta a = 0$. Como conclusión práctica puede extraerse que, por separado, cada recta pase por el origen ($a_i = 0$) y que la otra esté lo más lejos posible de la anterior. No obstante esta condición no es posible cumplirla simultáneamente para ambas rectas, por lo que una buena solución de compromiso es tener las rectas en posiciones simétricas respecto al origen, con lo que, por ejemplo, se tendría que $\Delta a = a_1 - (-a_2) \simeq 2a_i$. La sensibilidad en este caso se reduciría a:

$$S_{b_1}^\alpha = S_{b_2}^\alpha = \frac{F}{1 + F^2} \frac{1}{2\alpha}$$

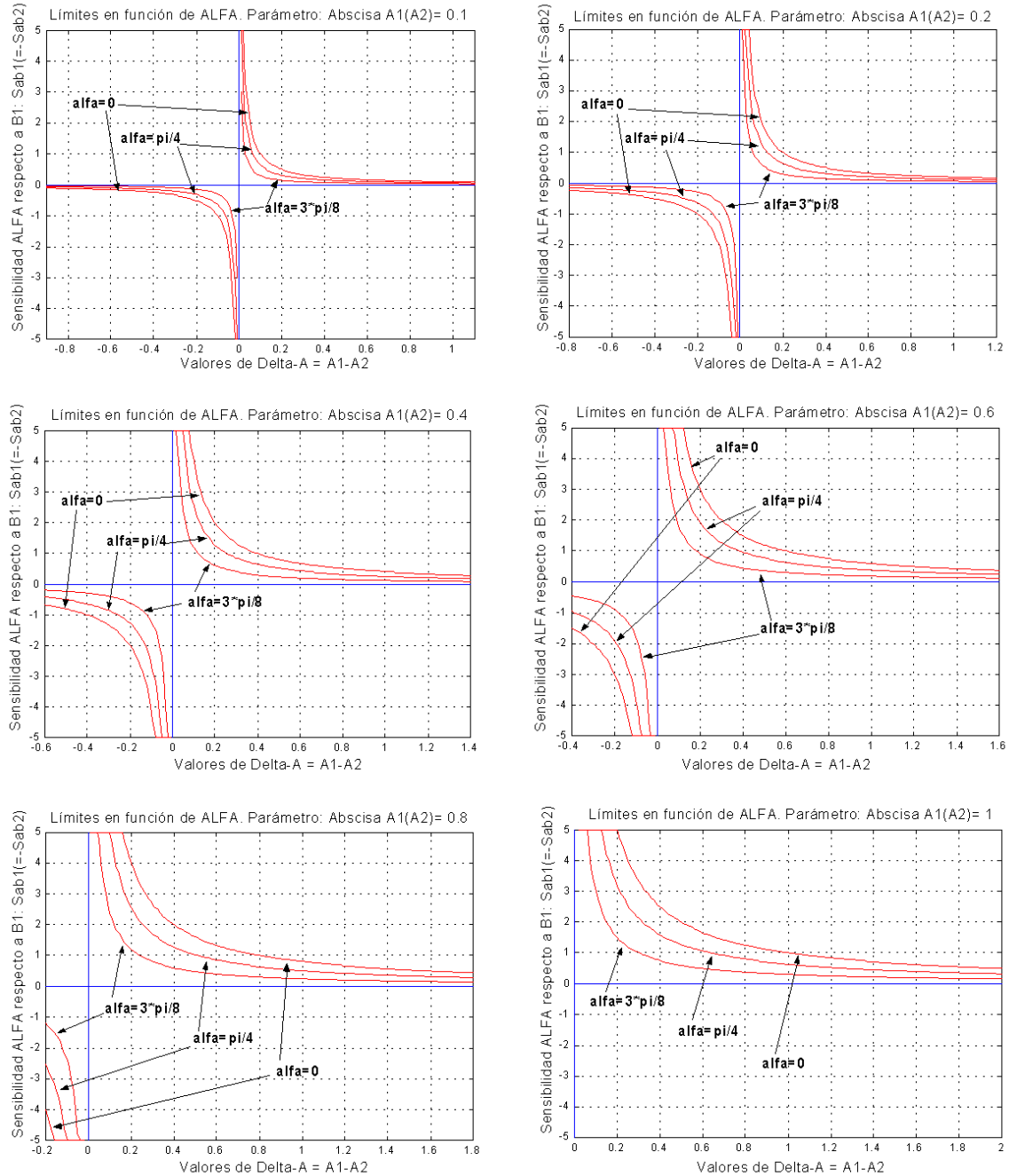


Figura 5-13: Sensibilidades $S_{b_1}^\alpha$ y $-S_{b_2}^\alpha$ respecto a la diferencia Δa , para valores de α iguales a 0, $\pi/4$ (curva interior) y $3\pi/8$. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: curvas para valores normalizados de la abscisa $a_{1(2)}$ iguales a 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.

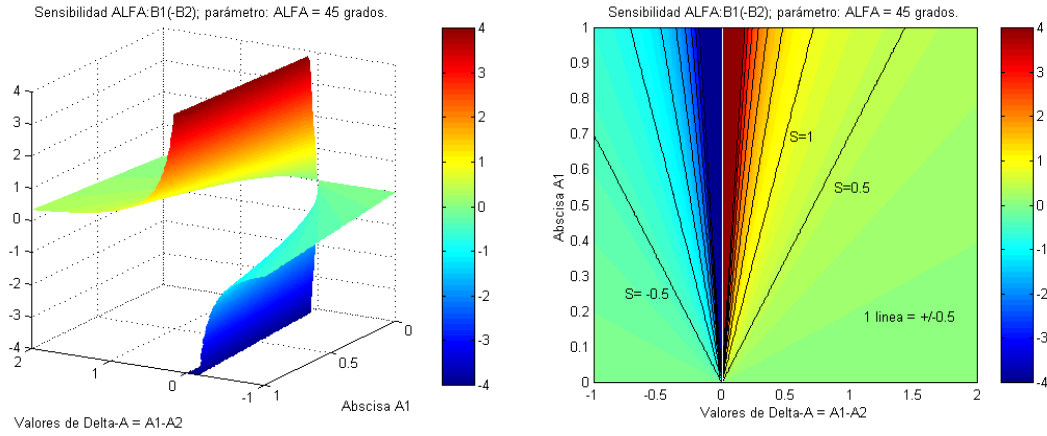


Figura 5-14: Sensibilidades $S_{b_1}^\alpha$ y $-S_{b_2}^\alpha$: gráficas respecto a cada abscisa (a_1 o $-a_2$, según el caso) y a la diferencia Δa , para un valor de $\alpha = 45^\circ$. A la izquierda representación 3D; a la derecha proyección sobre el plano y curvas de nivel.

que, en el caso particular correspondiente a la situación de la figura 5-14, con $\alpha = 45^\circ$ resulta ser $S_{b_1}^\alpha = 1/\pi \simeq 0.32$, y esto independientemente del valor de la abscisa pues sólo importa la relación $a_i/\Delta a$.

5.3.5 Sensibilidad en el alabeo, ángulo β

El valor recuperado del ángulo de alabeo β viene dado, según 5.7, por la expresión:

$$\beta = -\arcsin \overline{u_v} \rightarrow -\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}$$

si bien en condiciones normales β es, o debe ser, un ángulo muy próximo a cero. A efectos de estimar la sensibilidad de β a los (m_i, b_i) de las rectas verticales de las que depende, resulta más claro acudir directamente a las expresiones 5.6, de donde se deduce que:

$$\left. \begin{aligned} r_{31} &= -\sin \beta = \overline{u_v} \\ r_{32} &= \sin \alpha \cos \beta = \overline{v_v} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{u_v}{v_v} = -\frac{\tan \beta}{\sin \alpha} \text{ y además } \frac{u_v}{v_v} = -\frac{b_2 - b_1}{m_1 b_2 - m_2 b_1}$$

por lo que el ángulo β puede obtenerse, en función de (m_i, b_i) como:

$$\beta = \arctan \left(\frac{b_2 - b_1}{m_1 b_2 - m_2 b_1} \sin \alpha \right)$$

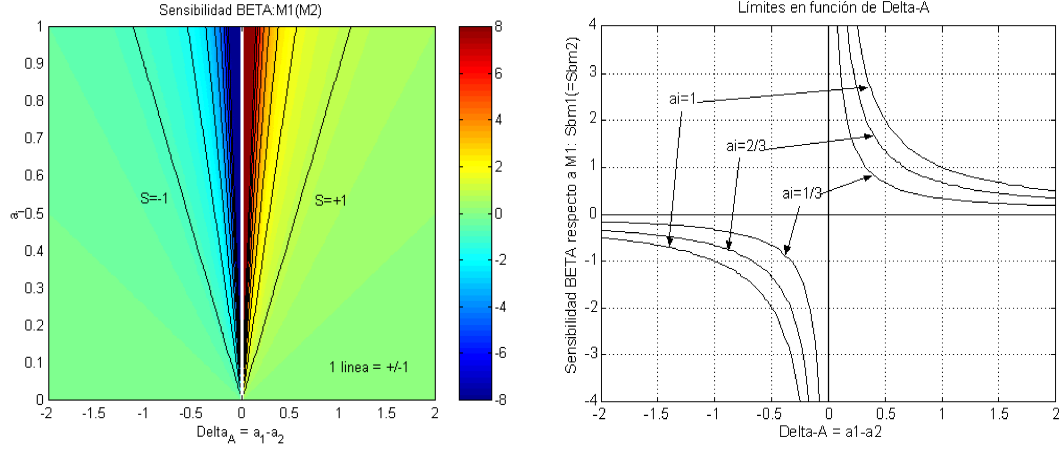


Figura 5-15: Sensibilidades $S_{m_1}^\beta$ y $-S_{m_2}^\beta$: gráficas tomadas respecto a la abscisa a_i y a la diferencia $\Delta a = a_1 - a_2$. A la izquierda representación en curvas de nivel; a la derecha secciones para distintos valores de a_i .

y si, por último, se restringe el estudio a ángulos $\beta \simeq 0$, y para elevaciones α próximas $\pi/2$ (eje óptico horizontal) la expresión final práctica del valor de β resulta ser:

$$\beta \simeq \frac{b_2 - b_1}{m_1 b_2 - m_2 b_1} \quad (5.27)$$

Hallar los valores de $S_{m_i}^\beta$ y $S_{b_i}^\beta$, es una tarea sencilla. Comenzando por las sensibilidades respecto a m_i se obtiene:

$$S_{m_1}^\beta = \frac{m_1}{\beta} \frac{d\beta}{dm_1} = \frac{-m_1 b_2}{m_1 b_2 - m_2 b_1} = \frac{a_2}{a_1 - a_2} \quad (5.28)$$

Por otro lado, la sensibilidad $S_{m_2}^\beta$ queda:

$$S_{m_2}^\beta = \frac{m_2}{\beta} \frac{d\beta}{dm_2} = \frac{-m_2 b_1}{m_1 b_2 - m_2 b_1} = \frac{-a_1}{a_1 - a_2} \quad (5.29)$$

La figura 5-15 muestra este valor de la sensibilidad $S_{m_i}^\beta$. A la izquierda se representa la superficie obtenida, vista desde arriba y con niveles mostrados en la escala adjunta a la figura; cada línea de nivel representa un incremento unitario en la sensibilidad, siendo el eje de abscisas el denominador $\Delta a = (a_1 - a_2)$, y el de ordenadas el parámetro a_i de la recta considerada. A la derecha se muestran varias secciones de la superficie $S_{m_i}^\beta$, a los valores de $a_i = [1, \frac{2}{3}, \frac{1}{3}]$.

La conclusión que se extrae tanto de la expresión 5.29 como de la figura 5-15 es la conveniencia de tener separaciones Δa lo mayores posible, manteniendo al mismo tiempo un valor bajo de a_i ;

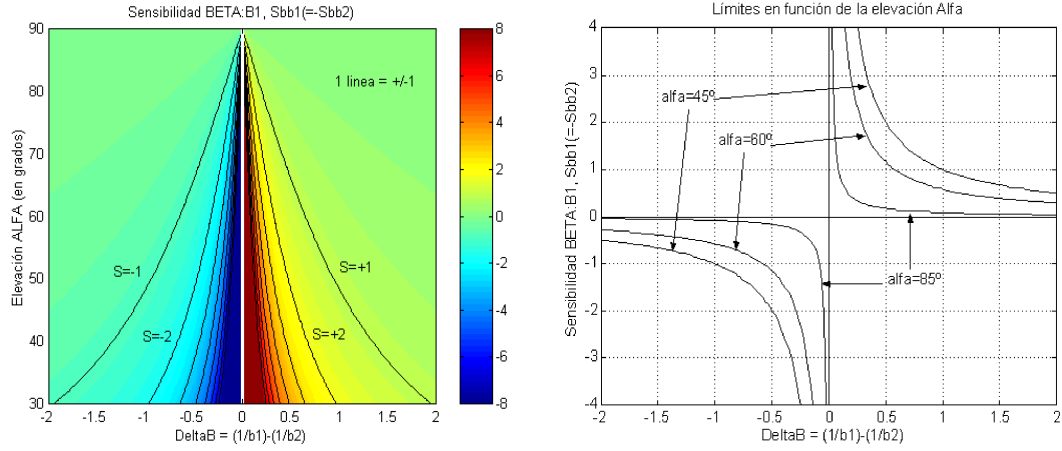


Figura 5-16: Sensibilidades $S_{b_1}^\beta$ y $-S_{b_2}^\beta$: gráficas tomadas respecto a la elevación α y a la diferencia entre las inversas de b_i , $\Delta B = (\frac{1}{b_1}) - (\frac{1}{b_2})$. A la izquierda representación en curvas de nivel; a la derecha secciones para valores $\alpha = [45^\circ, 60^\circ, 85^\circ]$.

esta situación se parece mucho a la ya descrita para $S_{b_i}^\alpha$ y al igual que entonces una solución de compromiso sería la de tener ambas rectas en posiciones simétricas respecto del origen, con lo que 5.29 se reduciría a:

$$S_{m_1}^\beta = S_{m_2}^\beta = \frac{a_i}{2a_i} \Big|_{a_i \neq 0} = \frac{1}{2}$$

y en todo caso interesarían valores de Δa lo más grandes posible.

En lo que respecta a $S_{b_1}^\beta$, su valor resulta ser:

$$S_{b_1}^\beta = \frac{b_1}{\beta} \frac{d\beta}{db_1} = \frac{b_1 b_2 (m_1 - m_2)}{(b_1 - b_2)(m_1 b_2 - m_2 b_1)}$$

en donde observando con atención se descubre una dependencia con el ángulo α de elevación, si se hace uso de la relación hallada en 5.19. Así, realizando dicha sustitución y comparando además este resultado con el correspondiente al desarrollo de $S_{b_2}^\beta$, se obtiene finalmente:

$$S_{b_1}^\beta = -S_{b_2}^\beta = \frac{b_1 b_2}{b_1 - b_2} \frac{1}{\tan \alpha} = \frac{-1}{\left(\frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_2}\right) \tan \alpha} = \frac{-1}{\Delta B \tan \alpha} \quad (5.30)$$

La figura 5-16 ilustra el resultado de la ecuación 5.30. Se observa que si $\alpha \rightarrow \frac{\pi}{2}$ la sensibilidad tiende a cero. Es de destacar que, de todas formas, al estarse refiriendo el cálculo de β a la ordenada en el origen de las rectas verticales los valores de $1/b_i$ son siempre valores pequeños, con lo que su

diferencia ΔB puede resultar ser también un valor pequeño; el peor caso posible sería con $\Delta B = 0$, en donde la sensibilidad sería máxima. No obstante, esta situación no es ilustrativa, pues se trataría del caso particular de rectas verticales paralelas, en donde $\beta = 0$, por lo que tal variación relativa está justificada.

La conclusión final del estudio de la variabilidad de β respecto a los parámetros (m_i, b_i) de las rectas verticales confirma ciertas propiedades que caracterizan este problema. Así, los errores de recuperación del ángulo de alabeo β se minimizan si se cumple que las rectas verticales:

- se encuentran lo más separadas posible en el PI, ocupando lados opuestos de la imagen;
- alguna de ellas corta al eje de ordenadas en un punto más o menos lejano ($b \neq 0$);
- si se observa la marca artificial con el eje óptico de la cámara en posición horizontal ($\alpha = \frac{\pi}{2}$).

5.3.6 Sensibilidad en el giro, ángulo γ

Según la solución inicial 5.7, el valor de γ se obtiene a partir de la coordenada u del punto de fuga de las rectas horizontales, mediante la expresión:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{\overline{u_h}}{\cos \beta}\right) \rightarrow \pi < \gamma < 2\pi$$

en donde se comprueba la existencia de una cierta dependencia con el ángulo β de alabeo. Tomando la situación normal, en la que $\beta = 0$, el valor de γ se reduce a:

$$\gamma = \arcsin \overline{u_h}$$

en donde $\overline{u_h} = \frac{u_h}{\sqrt{u_h^2 + v_h^2 + \lambda^2}}$, por lo que no resulta fácil extraer los correspondientes parámetros de sensibilidad.

No obstante, a partir del sistema de ecuaciones 5.6 puede simplificarse el problema anterior. Haciendo $\beta = 0$ en las componentes $\overline{u_h}$ y $\overline{v_h}$, se tiene:

$$\left. \begin{array}{l} \overline{u_h} = \cos \beta \sin \gamma \\ \overline{v_h} = \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \end{array} \right|_{\beta \rightarrow 0} \Rightarrow \begin{cases} \overline{u_h} = \sin \gamma \\ \overline{v_h} = \cos \alpha \cos \gamma \end{cases}$$

si además el ángulo α de elevación se hace igual a $\pi/2$, situación correspondiente a la de tener el eje óptico de la cámara en horizontal, el término $\overline{v_h}$ se anula. Por tanto, $\overline{u_h}$ queda reducido a:

$$\overline{u_h} = \frac{u_h}{\sqrt{u_h^2 + \lambda^2}} = \frac{\hat{u}_h}{\sqrt{\hat{u}_h^2 + 1}}$$

con lo que finalmente el ángulo γ se corresponde con:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{\hat{u}_h}{\sqrt{\hat{u}_h^2 + 1}}\right) \quad (5.31)$$

De forma similar a lo planteado con los ángulos α y β , bastaría con conocer las dependencias de γ a los parámetros m_i y b_i de las rectas para poder predecir el error obtenido en la medida del giro γ . Ahora bien, en lugar de tomar variaciones relativas para γ se hará el estudio de las variaciones elementales $d\gamma$, esto es según la relación:

$$d\gamma = \frac{d\gamma}{dm_1}dm_1 + \frac{d\gamma}{dm_2}dm_2 + \frac{d\gamma}{db_1}db_1 + \frac{d\gamma}{db_2}db_2$$

expresión que puede simplificarse como:

$$d\gamma = E_{m_1}^\gamma dm_1 + E_{m_2}^\gamma dm_2 + E_{b_1}^\gamma db_1 + E_{b_2}^\gamma db_2$$

siendo los términos E_p^γ los elementos de sensibilidad de γ respecto del parámetro p .

Elementos de sensibilidad de γ respecto a las pendientes m_i

Una vez determinada, con 5.31, una relación útil entre γ y $\hat{u}_h$, es posible encontrar los parámetros correspondientes de sensibilidad. Empezando con las pendientes m_i , los elementos de sensibilidad buscados son de la forma:

$$E_{m_i}^\gamma = \frac{d\gamma}{d\hat{u}_h} \frac{d\hat{u}_h}{dm_i}$$

en donde $\frac{d\gamma}{d\hat{u}_h} = \frac{d}{d\hat{u}_h} \left[\arcsin\left(\frac{\hat{u}_h}{\sqrt{\hat{u}_h^2 + 1}}\right) \right] = \frac{1}{\hat{u}_h^2 + 1}$, y $\frac{d\hat{u}_h}{dm_i} = \frac{d}{dm_i} \left(\frac{b_2 - b_1}{m_1 - m_2} \right)$. Realizando las sustituciones oportunas, y teniendo en cuenta el resultado del desarrollo de $E_{m_2}^\gamma$ se obtiene:

$$E_{m_1}^\gamma = -E_{m_2}^\gamma = \frac{b_2 - b_1}{(m_1 - m_2)^2} \left(\frac{1}{\hat{u}_h^2 + 1} \right) = \frac{1}{b_2 - b_1} \left(\frac{\hat{u}_h^2}{\hat{u}_h^2 + 1} \right) = \frac{\sin^2 \gamma}{\Delta b}$$

funciones sólo dependientes de γ y, de nuevo, de un parámetro de diferencia en este caso entre las ordenadas en el origen de ambas rectas horizontales: $\Delta b = b_2 - b_1$.

En la figura 5-17 se ilustra la variación de $E_{m_i}^\gamma$: se muestra una visión general de su evolución, mediante curvas de nivel y además se detallan secciones particulares a ciertos valores de Δb . Es de destacar que, por contra de lo que la intuición parece señalar, el peor caso es el correspondiente a ver *frontalmente* la marca artificial; en efecto: los valores más altos se dan para $\gamma = 3\frac{\pi}{2}$. La razón

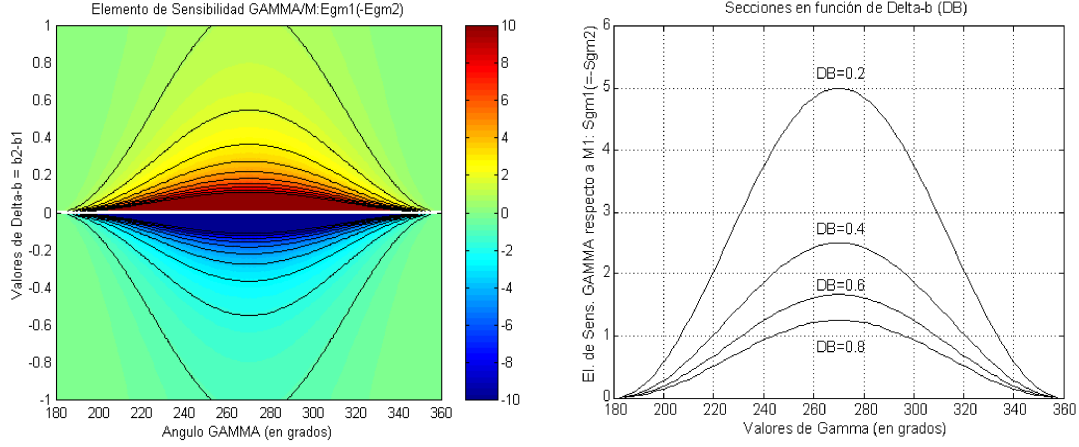


Figura 5-17: Elemento de sensibilidad $E_{m_i}^\gamma$ en función del ángulo de giro γ y de la diferencia $\Delta b = (b_2 - b_1)$. A la izquierda: falso color y curvas de nivel en incrementos unitarios. A la derecha: secciones en $\Delta b = [0.2, 0.4, 0.6, 0.8]$.

está en que en esa zona la función sin γ evoluciona más lentamente (menor pendiente), con lo que pequeñas variaciones en la medida del *seno* acarrearán mayores variaciones en el ángulo recuperado.

La otra conclusión a extraer sí se corresponde más con la intuición: interesan separaciones grandes entre las líneas, esto es valores de Δb grandes, para minimizar la dependencia con los errores de estimación en m_i .

Elementos de sensibilidad de γ respecto a las ordenadas b_i

Los elementos de sensibilidad de γ respecto de las ordenadas b_i son de la forma:

$$E_{b_i}^\gamma = \frac{d\gamma}{db_i} = \frac{d\gamma}{d\hat{u}_h} \frac{d\hat{u}_h}{db_i}$$

en donde, como se demostró en la subsección anterior, $\frac{d\gamma}{d\hat{u}_h} = \frac{1}{\hat{u}_h^2 + 1}$, y por su parte $\frac{d\hat{u}_h}{db_i} = \frac{d}{db_i} \left(\frac{b_2 - b_1}{m_1 - m_2} \right)$. Por ello, el valor buscado es:

$$E_{b_1}^\gamma = \frac{-1}{m_1 - m_2} \left(\frac{1}{\hat{u}_h^2 + 1} \right) = \frac{-1}{b_2 - b_1} \left(\frac{\hat{u}_h}{\hat{u}_h^2 + 1} \right)$$

Por otro lado, si de nuevo se hace uso de las ecuaciones 5.6, se puede encontrar una relación

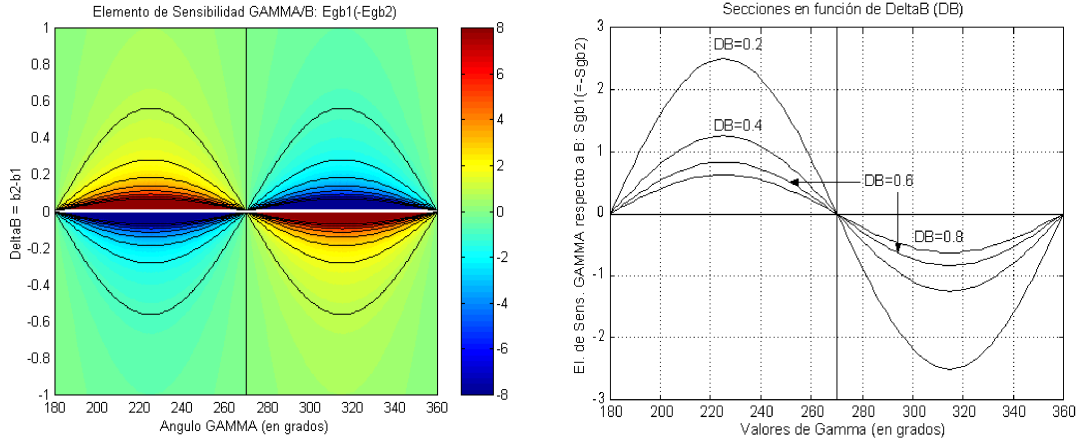


Figura 5-18: Elemento de sensibilidad $E_{b_i}^\gamma$ en función del ángulo de giro γ y de la diferencia $\Delta b = (b_2 - b_1)$. A la izquierda: falso color y curvas de nivel en incrementos unitarios. A la derecha: secciones en $\Delta b = [0.2, 0.4, 0.6, 0.8]$.

interesante respecto al valor de $\hat{u}_h$. En efecto, según 5.6 se tiene que:

$$\hat{u}_h = \frac{u_h}{\lambda} = \frac{\cos \beta \sin \gamma}{\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma} \Big|_{\beta \rightarrow 0} = \frac{-\tan \gamma}{\sin \alpha}$$

lo que permite hallar la siguiente expresión para $E_{b_1}^\gamma$:

$$E_{b_1}^\gamma = \frac{1}{b_2 - b_1} \left(\frac{\hat{u}_h^2}{\hat{u}_h^2 + 1} \right) \frac{\sin \alpha}{\tan \gamma} = \frac{1}{\Delta b} \sin \alpha \sin \gamma \cos \gamma$$

La dependencia con α puede obviarse si se toma el caso peor, el cual corresponde a $\alpha = \pi/2$. Con ello, una expresión útil para $E_{b_1}^\gamma$, y que permite sacar bastantes conclusiones prácticas, es:

$$E_{b_1}^\gamma = \frac{\sin \gamma \cos \gamma}{\Delta b} = -E_{b_2}^\gamma \quad (5.32)$$

La figura 5-18 ilustra la dependencia de $E_{b_i}^\gamma$ con respecto a γ y Δb encontrada. Comparándola con los resultados obtenidos para $E_{m_i}^\gamma$ se observa, en general, una dependencia en conjunto de menor módulo y localizada además en ángulos de orientación desplazados 45° respecto a la visión frontal de la marca artificial, en 270° . Al igual que en todos los casos anteriores, una mayor separación entre las rectas visibles (Δb mayores) garantiza una menor variación en las medidas de los ángulos de orientación, recuperados a partir de las rectas de la marca artificial.

En conjunto, la conclusión extraída para la recuperación fiable del ángulo γ de orientación parece

contradecir a la intuición:

- es más fiable la medida de γ cuanto más extrema sea ésta, o sea para orientaciones próximas a π o 2π , siendo el *peor caso* el de *ver la marca de frente*.

Aún siendo aparentemente paradójica cabe realizar el siguiente experimento: obsérvese una hoja de papel en blanco y mírese ésta de frente a unos 2 metros de distancia pero con un cierto giro bien a izquierdas o a derechas del observador. Si realizamos la observación con un sólo ojo (recordemos que se trata de *una sola vista* de la marca) no resultará fácil, usando la vista y sólo ella, determinar si estamos un poco a la izquierda o un poco a la derecha de la marca; inevitablemente se tratará de buscar un *punto de apoyo* usando algún otro dato complementario como:

- otra vista, moviéndose a izquierda o derecha de la posición anterior.
- otra referencia, acudiendo a alguna característica del entorno, como puede ser la orientación de las líneas de borde de suelo y techo, en definitiva mayor separación de las líneas.
- vision estéreo: usando el otro ojo.

5.3.7 Discusión

Los análisis de sensibilidad realizados confirman los resultados de las simulaciones anteriores: es necesaria una muy alta precisión en la recuperación de las características de las rectas buscadas en el plano imagen (centroides $\mathbf{P}_j$) para poder obtener una precisión relativa razonable en la determinación de la posición-orientación en 3D. Así, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- En principio, el modelo descrito presenta la ventaja de usar, exclusivamente, la información procedente de la imagen de la MPL y de dar, como salida, el vector $\mathbf{C}$, de posición-orientación en 3D.
- Al tratarse de un algoritmo $[\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{T}]$, los errores en la recuperación de $\mathbf{R}$ se propagan a $\mathbf{T}$, por lo que es fundamental minimizar los errores asociados a la obtención del vector de orientación, Ω .
- En la mayor parte de los casos, con ópticas y sensores similares al descrito y al observar la MPL desde distancias superiores a 1m, las diferencias entre los puntos de corte de las rectas visibles en el PI (figura 5-10), Δa y Δb , corresponderán con valores muy pequeños, del orden de la décima e inferiores.

- La sensibilidad de los ángulos α y β respecto a los parámetros de las rectas recuperadas (pendiente, m , y ordenada en el origen, b) no está acotada para aquellos casos en los que las rectas se encuentran muy próximas en el plano imagen (Δa pequeñas, en figuras 5-11, 5-13, 5-15 y 5-16), lo que se corresponde, en situaciones normales, a rectas vistas desde gran distancia o con ángulos de visión lateral de la MPL que ejerzan efectos similares.
- La sensibilidad del ángulo de giro, γ , combinando los efectos respecto a m y b , aún estando acotada, crece rápidamente según disminuye la diferencia Δb . Esta condición se da, por ejemplo, cuando la marca se ve con la cámara en horizontal, en orientaciones próximas al vector normal a la MPL, esto es, directamente frente a ella.
- Para minimizar los errores de este modelo es necesario realizar una detección de parámetros de las rectas de la MPL muy precisa, en consecuencia con las elevadas sensibilidades predichas. Esta situación se aprecia principalmente en los resultados de las simulaciones del modelo, documentados en la sección 5.3.2.

Tanto los errores obtenidos como la muy alta precisión necesaria en la detección de los centroides $\mathbf{P}_j$, complican en exceso su aplicación práctica a una plataforma con las características marcadas para una SRA. Por tanto, a pesar de sus potenciales virtudes se hace necesario reducir los errores sistemáticos del SPL incluyendo, si ésto es posible, alguna información adicional que restrinja el efecto de los errores de detección de las características de la imagen en la obtención de la posición-orientación del móvil.

Para ello puede hacerse uso de cierta información *a priori* sobre el sistema que incorporará el SPL diseñado. El principal de todos los razonamientos que pueden hacerse se resume en: *al tratarse de un vehículo con ruedas, éste se desplazará preferentemente por un único plano, al que se denominará de rodadura y que se hará coincidir con el plano XY*.

Con esta sola restricción, y añadiendo alguna otra correspondiente al procedimiento de montaje del sistema de cámara a bordo del móvil, es posible reducir la complejidad del modelo y disminuir, drásticamente, los errores del SPL lo cual aumenta sus posibilidades de incorporación a bordo de una SRA, lo cual es uno de los objetivos fundamentales de esta tesis.

En las siguientes secciones se estudian y justifican tales simplificaciones del modelo inicial, así mismo se indican las condiciones y márgenes de utilización del SPL y se completa el modelo con una predicción del error de medida cometido, indispensable para la incorporación posterior del SPL en un sistema de navegación autónoma, en especial aquél concebido por el autor para su aplicación en las AT, tal y como se documentó en el capítulo 3.

5.4 Mejoras al sistema de posicionamiento: restricciones geométricas

El modelo de posicionamiento usando sólo la información visual procedente de la imagen recuperada de la marca artificial se ha demostrado insuficiente, en la práctica, para distancias superiores a un par de metros de la misma. Aumentar el rango de uso equivale a necesitar de:

- una calibración muy precisa de los parámetros de la cámara;
- resoluciones del orden de la centésima de pixel en la detección de centroides;
- el uso de un zoom (calibrado) o, más razonable en cuanto a coste, de múltiples ópticas con distancias focales más largas.

Además, para poder visualizar la marca en posiciones y orientaciones distintas de la meramente enfrentada a la misma, se hace necesario el uso de una unidad de *pan-tilt* con el objeto de realizar un *tracking* de la marca artificial durante el desplazamiento del móvil.

Es precisamente esta unidad de *pan-tilt* la clave de una reforma al algoritmo original que aumenta drásticamente su aplicabilidad. Se parte de que la citada unidad está montada con una precisión aceptable sobre el vehículo, con lo que puede garantizarse que se tiene un ángulo de alabeo $\beta \simeq 0$, y que además posee un controlador capaz de *realimentar* hacia el sistema de posicionamiento el ángulo α de **elevación** (*tilt*) en el que se encuentra la cámara en ese momento. Esto último es evidente, ya que se parte de que la posición -orientación relativa *cámara* $\leftrightarrow$ *móvil* es conocida en todo momento.

Por tanto los ángulos α y β se supondrán conocidos en todo momento, admitiendo como errores de medida las diferencias que pudieran existir entre los valores nominales y los realmente existentes, tanto por los inevitables errores de lectura de α como por los de montaje de β .

En el planteamiento que sigue se partirá, con ciertas variantes, de la situación descrita en la sección 5.2.3 y del desarrollo matemático planteado en ella; por claridad, parte de ese desarrollo se reproducirá resumido a continuación. Comencemos por una configuración geométrica de la marca como la mostrada en la figura 5-19, versión modificada de la figura 5-4.

Dado que la marca posee cuatro puntos reconocibles ($\mathbf{p}_1 \rightarrow \mathbf{p}_4$), en esta ocasión se usarán los cuatro puntos para aumentar la fiabilidad del resultado final. No obstante, la geometría básica del problema puede descomponerse en dos estructuras triangulares basadas en los vectores $\mathbf{r}_1$ y $\mathbf{r}_3$, que se obtendrán a partir de la estructura definida por los subconjuntos de puntos y segmentos

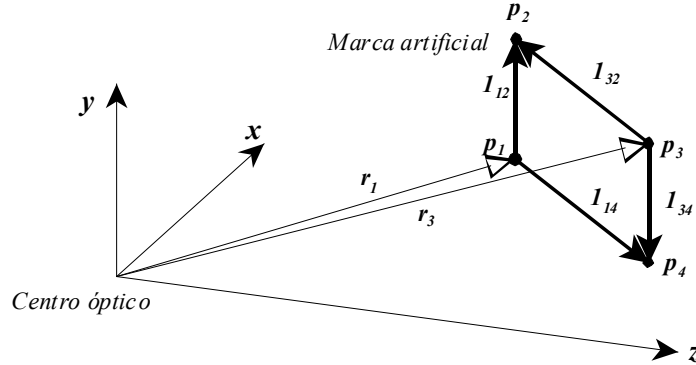


Figura 5-19: Método simplificado de posicionamiento: referencias geométricas.

orientados siguientes:

$$\mathbf{r}_1 \rightarrow [\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_4, \mathbf{l}_{12}, \mathbf{l}_{14}]$$

$$\mathbf{r}_3 \rightarrow [\mathbf{p}_3, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_4, \mathbf{l}_{32}, \mathbf{l}_{34}]$$

los cuales se detallan en la figura 5-19.

Las posiciones de $\mathbf{p}_1$ y $\mathbf{p}_3$, esto es, los vectores $\mathbf{r}_1 = (x_1, y_1, z_1)$ y $\mathbf{r}_3 = (x_3, y_3, z_3)$, podrán recuperarse de sus proyecciones en PI, (u_i, v_i) mediante el algoritmo descrito en la sección 5.2.3: primero recuperando las coordenadas z_i de las siguientes relaciones⁴:

$$\begin{aligned} \pi_2 \left\{ \begin{array}{l} (u_2 - u_1)z_1 = \delta_v(\lambda a_{12} - u_2 c_{12}) \\ (v_2 - v_1)z_1 = \delta_v(\lambda b_{12} - v_2 c_{12}) \end{array} \right. & \quad \pi_2 \left\{ \begin{array}{l} (u_2 - u_3)z_3 = -\delta_h(\lambda a_{32} - u_2 c_{32}) \\ (v_2 - v_3)z_3 = -\delta_h(\lambda b_{32} - v_2 c_{32}) \end{array} \right. \\ \pi_4 \left\{ \begin{array}{l} (u_4 - u_1)z_1 = \delta_h(\lambda a_{14} - u_4 c_{14}) \\ (v_4 - v_1)z_1 = \delta_h(\lambda b_{14} - v_4 c_{14}) \end{array} \right. & \quad \pi_4 \left\{ \begin{array}{l} (u_4 - u_3)z_3 = -\delta_v(\lambda a_{34} - u_4 c_{34}) \\ (v_4 - v_3)z_3 = -\delta_v(\lambda b_{34} - v_4 c_{34}) \end{array} \right. \end{aligned} \quad (5.33)$$

en donde los cosenos directores (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}) según las relaciones 5.4, son:

$$\begin{aligned} a_{12} &= a_{34} = r_{31} = -\sin \beta \\ b_{12} &= b_{34} = r_{32} = \sin \alpha \cos \beta \\ c_{12} &= c_{34} = r_{33} = \cos \alpha \cos \beta \\ a_{14} &= a_{32} = r_{21} = \cos \beta \sin \gamma \\ b_{14} &= b_{32} = r_{22} = \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \\ c_{14} &= c_{32} = r_{23} = \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \end{aligned}$$

⁴ Los cambios de signo en las orientaciones de los segmentos $\mathbf{l}_{3j}$ se han asignado a las longitudes que pasan a ser: $-\delta_h$ y $-\delta_v$.

y posteriormente sustituir los z_i hallados para resolver los pares (x_i, y_i) mediante:

$$\mathbf{P}_1 \rightarrow \begin{cases} x_1 = \frac{z_1}{\lambda} u_1 \\ y_1 = \frac{z_1}{\lambda} v_1 \\ z_1 \end{cases} \quad \mathbf{P}_3 \rightarrow \begin{cases} x_3 = \frac{z_3}{\lambda} u_3 \\ y_3 = \frac{z_3}{\lambda} v_3 \\ z_3 \end{cases} \quad (5.34)$$

Los ángulos α y β se recuperan a partir de los nominales correspondientes a la colocación de la cámara. Mientras α podrá variar entre 0 y 90 grados (normalmente cerca de 90°), β puede considerarse igual a cero. Con todo ello, las expresiones prácticas de los cosenos directores se convierten en:

$$\begin{aligned} a_{12} &= a_{34} = r_{31} = 0 \\ b_{12} &= b_{34} = r_{32} = \sin \alpha \\ c_{12} &= c_{34} = r_{33} = \cos \alpha \\ a_{14} &= a_{32} = r_{21} = \sin \gamma \\ b_{14} &= b_{32} = r_{22} = \cos \alpha \cos \gamma \\ c_{14} &= c_{32} = r_{23} = -\sin \alpha \cos \gamma \end{aligned} \quad (5.35)$$

A partir de las relaciones 5.33, y teniendo en cuenta el valor aproximado de los cosenos directores dado en 5.35, pueden establecerse dos grupos de ecuaciones en el sistema 5.33:

- Las relaciones que afectan a las rectas verticales (δ_v), y que incluyen los cosenos directores (a_{12}, b_{12}, c_{12}) , no dependen del ángulo de giro, γ .
- Las rectas horizontales (δ_h) sí se ven afectadas por γ , a través de los cosenos directores (a_{14}, b_{14}, c_{14}) .

Del primer grupo puede extraerse, sin ambigüedades, los valores de las distancias z_i ; mientras que del segundo grupo podría obtenerse el valor del ángulo de giro γ , supuestas ya conocidas las citadas distancias.

En efecto, tomando el subconjunto adecuado de las ecuaciones 5.33, y sustituyendo en ellas las relaciones 5.35 se obtienen los sistemas siguientes:

$$\begin{bmatrix} u_2 - u_1 \\ v_2 - v_1 \end{bmatrix} z_1 = \begin{bmatrix} -\delta_v u_2 \cos \alpha \\ \delta_v (\lambda \sin \alpha - v_2 \cos \alpha) \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{A}_1 z_1 = \mathbf{B}_1$$

$$\begin{bmatrix} u_4 - u_3 \\ v_4 - v_3 \end{bmatrix} z_3 = \begin{bmatrix} \delta_v u_4 \cos \alpha \\ -\delta_v (\lambda \sin \alpha - v_4 \cos \alpha) \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{A}_3 z_3 = \mathbf{B}_3$$

cuya solución es:

$$\begin{aligned} z_1 &= (\mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1)^{-1} \mathbf{A}_1^T \mathbf{B}_1 \\ z_3 &= (\mathbf{A}_3^T \mathbf{A}_3)^{-1} \mathbf{A}_3^T \mathbf{B}_3 \end{aligned} \quad (5.36)$$

Del resto de ecuaciones del sistema 5.33 puede escribirse:

$$\begin{bmatrix} (u_4 - u_1) z_1 \\ (v_4 - v_1) z_1 \\ (u_2 - u_3) z_3 \\ (v_2 - v_3) z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_h (\lambda \sin \gamma + u_4 \sin \alpha \cos \gamma) \\ \delta_h (\lambda \cos \alpha + v_4 \sin \alpha) \cos \gamma \\ -\delta_h (\lambda \sin \gamma + u_2 \sin \alpha \cos \gamma) \\ -\delta_h (\lambda \cos \alpha + v_2 \sin \alpha) \cos \gamma \end{bmatrix}$$

sistema que puede reescribirse en forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} (u_4 - u_1) z_1 \\ (v_4 - v_1) z_1 \\ (u_2 - u_3) z_3 \\ (v_2 - v_3) z_3 \end{bmatrix} \frac{1}{\delta_h} = \begin{bmatrix} \lambda & u_4 \sin \alpha \\ 0 & (\lambda \cos \alpha + v_4 \sin \alpha) \\ -\lambda & -u_2 \sin \alpha \\ 0 & -(\lambda \cos \alpha + v_2 \sin \alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \gamma \\ \cos \gamma \end{bmatrix} \longrightarrow k\mathbf{D} = \mathbf{E}\Gamma, \quad (5.37)$$

llamando Γ a la matriz formada por los valores $\begin{bmatrix} \sin \gamma \\ \cos \gamma \end{bmatrix}$.

El sistema 5.37 puede considerarse lineal si se soluciona respecto a $(\sin \gamma)$ y a $(\cos \gamma)$ como dos variables separadas; con todo ello, y de nuevo por mínimos cuadrados, se obtiene una solución inicial de γ a través de:

$$\Gamma = k(\mathbf{E}^T \mathbf{E})^{-1} \mathbf{E}^T \mathbf{D},$$

solución lo suficientemente aproximada como para poder resolver el sistema 5.37 de nuevo, pero esta vez como un sistema no lineal en γ mediante mínimos cuadrados recursivos.

De esta forma se completa la determinación de la orientación $\Omega = (\alpha, \beta, \gamma)$ del SCC y, en consecuencia, del móvil. El conocimiento de Ω determina a su vez la matriz de rotación $\mathbf{R}$, con lo cual la recuperación de la posición es prácticamente inmediata.

Una vez conocidas las coordenadas z_i y mediante las ecuaciones 5.34, se obtendrán los vectores de posición $\mathbf{p}_1 = (x_1, y_1, z_1)$ y $\mathbf{p}_3 = (x_3, y_3, z_3)$, respecto del SCC. Estos vectores se relacionan con el SCA mediante la transformación $\mathbf{p}_i = \mathbf{P}_i \mathbf{T} \mathbf{R}$ en donde $\mathbf{T}$ encierra el desplazamiento $\mathbf{C}_0$ buscado. Basándose en el mismo desarrollo justificado en la sección 5.2.3, y dado que se recuperan dos medidas de $\mathbf{C}_0$ con igual incertidumbre en las mismas, se puede obtener una estimación de $\mathbf{C}_0$

como:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{C}_{01} &= \mathbf{P}_1 - \mathbf{p}_1 \mathbf{R}^{-1} \\ \mathbf{C}_{03} &= \mathbf{P}_3 - \mathbf{p}_3 \mathbf{R}^{-1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \mathbf{C}_0 = \frac{\mathbf{C}_{01} + \mathbf{C}_{03}}{2} = \frac{\mathbf{P}_1 - \mathbf{p}_1 \mathbf{R}^{-1} + \mathbf{P}_3 - \mathbf{p}_3 \mathbf{R}^{-1}}{2} =$$

$$= \frac{\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_3}{2} - \frac{\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_3}{2} \mathbf{R}^{-1}.$$

Dada la simetría de los puntos $\mathbf{P}_1$ y $\mathbf{P}_3$ respecto al origen de la marca, su suma se cancela quedando entonces la expresión buscada como:

$$\mathbf{C}_0 = -\frac{\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_3}{2} \mathbf{R}^{-1}. \quad (5.38)$$

Juntando este resultado con los ángulos de rotación ya recuperados, el vector de posición-orientación del SCC respecto del SCA queda definitivamente determinado:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{C}_0, \Omega) = (X_0, Y_0, Z_0, \alpha, \beta, \gamma).$$

5.4.1 Estimación de los errores de medida

El modelado de este algoritmo finaliza con un adecuado estudio de los errores cometidos en la estimación del vector $\mathbf{C}$. En este punto, las herramientas de simulación se muestran particularmente eficaces a la hora de extraer, *a priori*, ciertas consecuencias sobre la naturaleza e influencias de los errores de medida.

En el presente algoritmo, se obtiene $\mathbf{C}$ a partir de las medidas de los centroides $(u_i, v_i)|_{i=1\dots 4}$, de los cuatro puntos extremos de la marca artificial; en consonancia con los métodos descritos en el capítulo anterior, cada uno de los (u_i, v_i) puede considerarse afectado de un ruido de medida gaussiano, incorrelado para cada punto y coordenada, de media nula (no sesgado) y con una varianza σ^2 conocida. Así, en el presente análisis se parte en realidad de un vector de medidas:

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_2 & v_2 & u_3 & v_3 & u_4 & v_4 \end{bmatrix}^T$$

con una matriz de covarianza:

$$\mathbf{S} = \sigma^2 \mathbf{I}_{8 \times 8} \quad (5.39)$$

en donde $\mathbf{I}_{8 \times 8}$ representa la matriz identidad de dimensiones 8×8 , pues se estima, razonablemente, que los procesos de medida de cada una de las coordenadas, u y v , presentes en el vector $\mathbf{w}$ son independientes entre sí (tal y como queda de manifiesto en el capítulo 4). La constante σ^2 , debido a

la resolución subpixel obtenida, es inferior a la unidad y su valor real dependerá de las calidades de ópticas y sensores de imagen, así como de otros detalles del entorno como gradientes de iluminación o ruidos varios presentes cerca de los puntos de la marca (fallos de impresión, otros objetos, etc.); este valor se obtendrá por estimación directa de los datos de medidas reales a través de un protocolo adecuado.

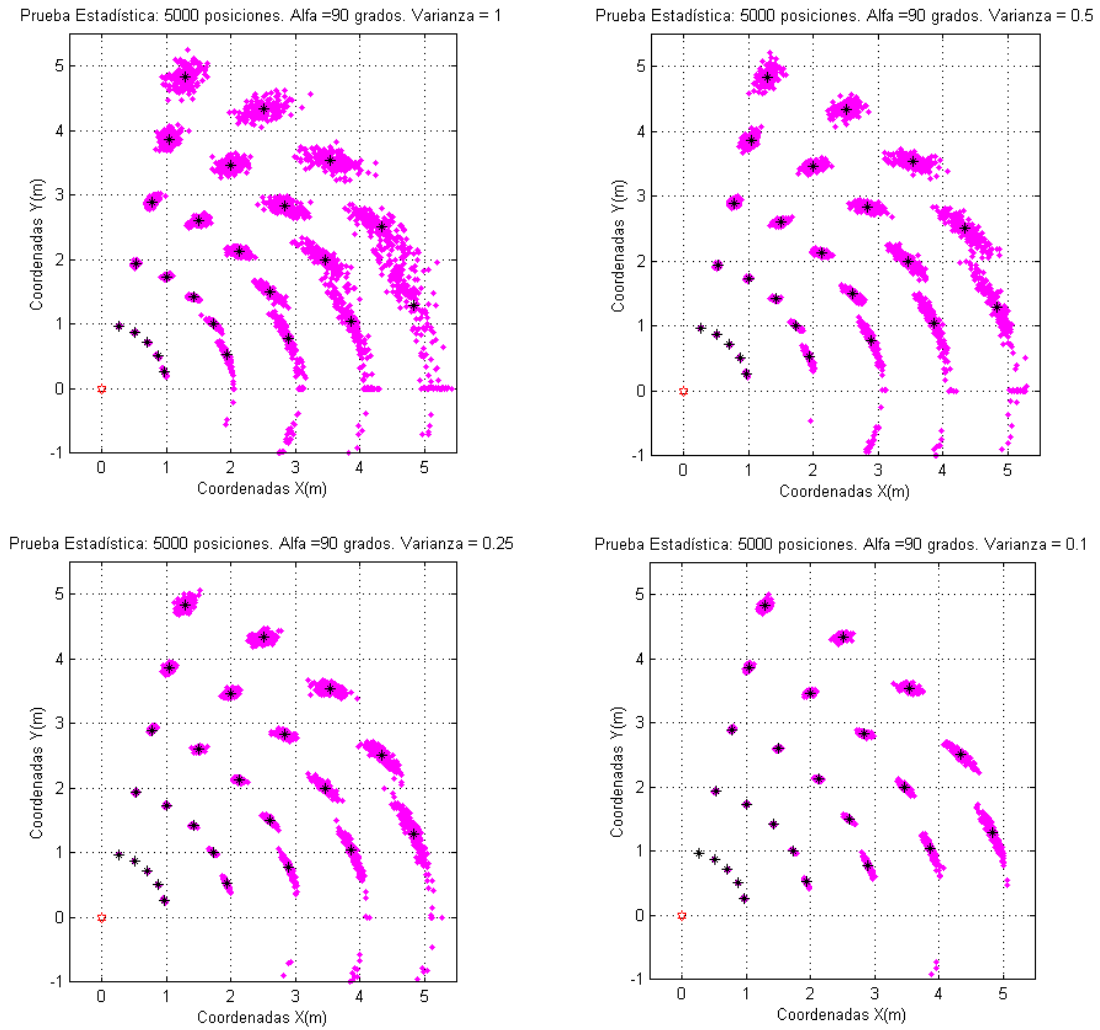


Figura 5-20: Errores de posicionamiento en el plano XY , en coordenadas cartesianas y en función de la varianza de la medida de centroides. Condiciones: $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 0$. Varianzas: $\sigma^2 = 1, 0.5, 0.25$ y 0.1 .

Una vez programados los algoritmos descritos, se genera un vector de medidas exactas $\mathbf{w}_i$ en M puntos distribuidos de forma conveniente alrededor de una marca artificial simulada. En consonancia con lo descrito en las secciones anteriores, la marca se sitúa con su centro en el origen de coordenadas

y coplanaria con el plano YZ . Para cada punto $i = 1, \dots, M$ se obtienen N variaciones tales que se generan $M \cdot N = P$ medidas sintéticas $\mathbf{w}_j = \mathbf{w}_i + \Delta\mathbf{w}_j$, $j = 1, \dots, P$, con $\Delta\mathbf{w}$ gaussianas de media cero y matriz de covarianza $\mathbf{S}$; para caracterizar a esta última basta con una única varianza σ^2 , correspondiente a la medidad de una cualquiera de las 8 coordenadas de $\mathbf{w}$. Los $\mathbf{w}_j$ así obtenidos se pasan por el algoritmo de posicionamiento y se representa sobre el plano XY el resultado efectivo de la misma.

La figura 5-20 muestra los resultados obtenidos en las condiciones siguientes: ángulo de elevación $\alpha = 90^\circ$ (cámara horizontal), ángulo de alabeo $\beta = 0$. Cada una de las cuatro gráficas se corresponde con distintas varianzas de medida σ^2 , escalados desde 1 a 0.1 pixel, y correspondientes a desviaciones típicas en las centroides de 1, 0.7, 0.5 y 0.3 pixeles. El número de posiciones de referencia es $M = 25$, con $N = 200$ variaciones en cada punto, representándose en cada gráfica un total de $P = 5000$ puntos distintos.

Obviando, por el momento, la lógica reducción en los errores al reducirse la varianza de las medidas, cabe resaltar la estructura radial de las distribuciones de puntos alrededor de cada uno de los M puntos de referencia. Esto resulta más evidente en los puntos próximos al eje X , en donde la forma de la distribución de puntos no es similar a las elipsoides esperadas, caso de poseer una distribución gaussiana, sino que las supuestas elipses parecen *ajustarse* respecto a una circunferencia imaginaria centrada en la marca. Revisando el algoritmo, la justificación está en que, en realidad, las relaciones definidas se refieren a la distancia, z_i , y la orientación, γ , respecto a la marca. Así, la representación de los errores dada en la figura 5-20 se caracterizarían mejor en coordenadas polares, $(X, Y) \rightarrow (R, \phi)$, en donde R es la distancia (o radio) hasta la marca y ϕ es el ángulo de desviación respecto al eje X ; éste último ángulo se relaciona con el ángulo γ de giro como $\phi = \gamma - \frac{3\pi}{2}$.

Lo primero que se resalta de las cuatro gráficas de la figura 5-21 es la forma elipsoidal de cada una de las M zonas de medida. Pero igualmente llama la atención la aparición de '*puntos espejo*', situados a la distancia correcta pero en fases ϕ con signo contrario. La causa directa estriba en que el vector de salida del algoritmo es, en realidad:

$$\mu = \begin{bmatrix} z_1 & z_3 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}^T$$

en donde $z_{1,3}$ son las distancias a cada uno de los puntos de referencia de las dos estructuras triangulares, y γ se extrae a partir de sus seno y coseno.

La distancia R , en el caso representado que corresponde a $\alpha = 90^\circ$ (cámara horizontal, apuntando directamente a la marca), es $R = z = \frac{1}{2}(z_1 + z_3)$. Pero, para la determinación de ϕ se parte del seno/coseno de γ . De la figura 5-21 se observa cómo el error '*en espejo*' se produce a distancias grandes y aparece antes en las proximidades de $\phi = 0$, esto es para $\gamma = \frac{3\pi}{2}$, lo cual se corresponde

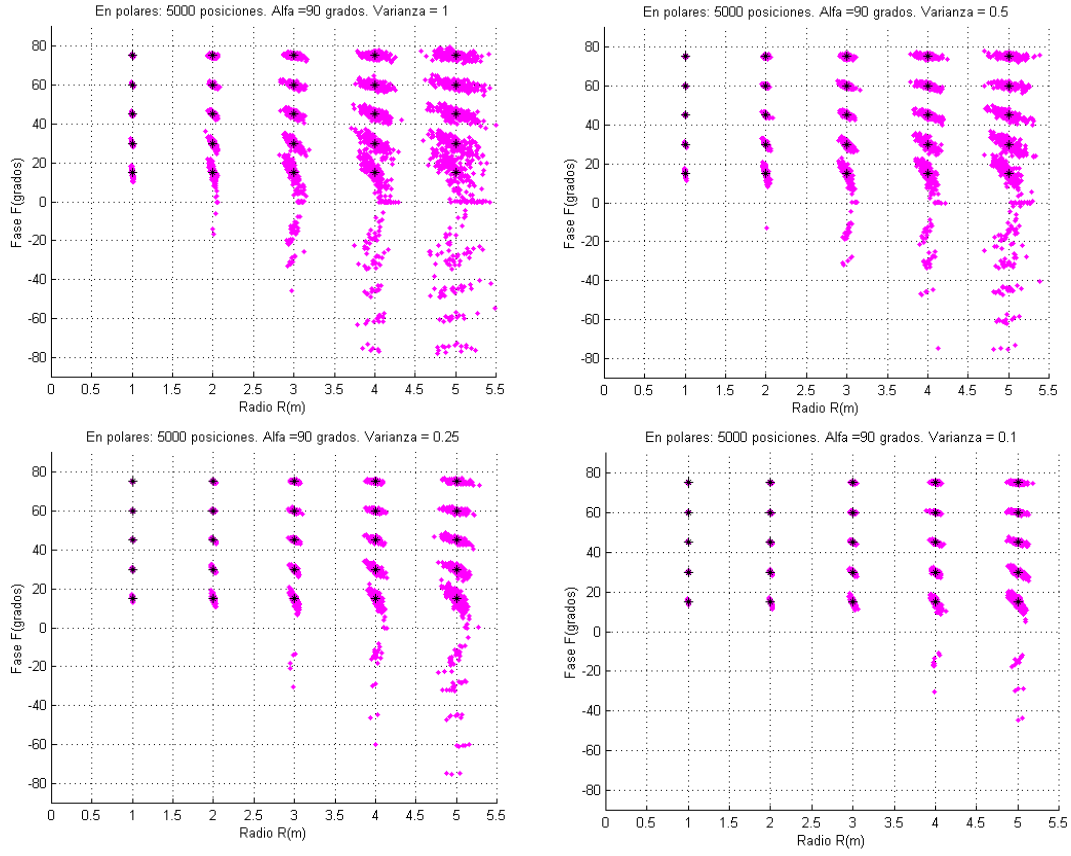


Figura 5-21: Errores de posicionamiento en coordenadas polares, $f(R, \phi)$, y en función de la varianza de la medida de centroides. Condiciones: $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 0$. Varianzas: $\sigma^2 = 1, 0.5, 0.25$ y 0.1 .

con el eje X en el plano XY justo enfrente, en suma, de la posición de referencia de la MPL sobre el plano YZ .

Ya se justificó que la información de orientación (ángulos γ o ϕ) sólo se podía obtener de los segmentos horizontales de la marca. Volviendo al sistema de ecuaciones 5.37, y considerando $\alpha = \frac{\pi}{2}$, el sistema se simplifica notablemente:

$$\begin{bmatrix} (u_4 - u_1) z_1 \\ (v_4 - v_1) z_1 \\ (u_2 - u_3) z_3 \\ (v_2 - v_3) z_3 \end{bmatrix} \frac{1}{\delta_h} = \begin{bmatrix} \lambda & u_4 \\ 0 & v_4 \\ -\lambda & -u_2 \\ 0 & -v_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \gamma \\ \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (5.40)$$

Tomando sólo las dos primeras ecuaciones y desarrollando las expresiones consiguientes se ob-

tiene:

$$\begin{bmatrix} (u_4 - u_1) z_1 \\ (v_4 - v_1) z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_h (\lambda \sin \gamma + u_4 \cos \gamma) \\ \delta_h v_4 \cos \gamma \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} \sin \gamma = \frac{(u_4 - u_1) z_1}{\delta_h \lambda} - \frac{u_4 \cos \gamma}{\lambda} \\ \cos \gamma = \frac{(v_4 - v_1) z_1}{\delta_h v_4} \end{cases} \quad (5.41)$$

Dado que la marca se encuentra en el plano YZ , y que ésta se coloca sobre una pared del recinto, las posiciones posibles se circunscriben a los cuadrantes primero y cuarto, o sea $X > 0$; esto se corresponde con ángulos ϕ entre $-\frac{\pi}{2}$ y $\frac{\pi}{2}$ y con ángulos γ entre π y 2π . Sólo el valor de $\sin \gamma$ no permite distinguir entre posiciones en el primer cuadrante y en el cuarto: se necesita $\cos \gamma$ para deshacer la indeterminación de signo. Pero la expresión de $\cos \gamma$ detallada en 5.41 muestra que este valor es función de la sutil diferencia entre las coordenadas verticales (v_4 y v_1) de los extremos de un segmento rectilíneo mirado de frente y a una distancia considerable.

Un razonamiento similar cabe hacer en el caso de las ecuaciones tercera y cuarta del sistema 5.40, referidas al segundo grupo triangular respecto a z_3 , en donde la diferencia $(v_2 - v_3)$ también está sujeta a fuertes errores potenciales.

En secciones posteriores se demostrará que la varianza del $\cos \gamma$ es varias veces superior a la del $\sin \gamma$, por lo que los resultados de γ (y en consecuencia de ϕ) mostrados en las figuras 5-20 y 5-21 hacen uso del valor de $\sin \gamma$ para determinar el módulo del ángulo ϕ , usándose $\cos \gamma$ sólo para determinar el signo. En las citadas figuras se comprueba, además, que los errores de módulo son inferiores a los de signo, pues las elipses se mantienen en un entorno cercano a los puntos de prueba mientras que aparecen puntos 'en espejo' incluso en fases tan elevadas como $\phi = 80^\circ$.

Solución a la indeterminación de signo

Este problema surge cuando el ruido de medida de los centroides (u_i, v_i) es comparable a la diferencia de coordenadas verticales usadas en la determinación del valor de $\cos \gamma$. Dado que este ruido tiene un valor medio nulo, cualquier solución de integración o acumulación de medidas contribuiría a eliminarlo.

Sin embargo, el propósito final de este sistema es el de incorporarlo a bordo de un robot móvil, con lo que una evolución temporal, implícita a cualquier método de integración de sucesivas medidas, ha de tener en cuenta la *dinámica* del vehículo. Por otro lado, ya desde su concepción inicial el presente sistema se concibió como un *complemento* a los sistemas odométricos convencionales, para añadir prestaciones de *posicionamiento absoluto* al puramente *relativo* obtenido con la odometría. En consecuencia, una *integración*, a nivel de sistema, entre ambos procedimientos resultaría la opción más válida.

En esta línea, la solución planteada por Bonnifait y Garcia en [Bonnifait 98], resulta ser la más

conveniente. Se hace uso de un *filtro de Kalman extendido* (EKF), debido a las no linealidades del sistema y la diferente periodicidad en las medidas procedentes de ambos sistemas:

- Frecuencia rápida, en el caso de la odometría.
- Frecuencia más lenta, en el caso del sensor absoluto, sea éste de visión, laser o similar.

Un sistema dinámico, como el de una SRA, equipado con *encoders*, puede caracterizarse mediante las siguientes ecuaciones de estado:

$$\begin{aligned}\mathbf{X}_{i+1} &= F(\mathbf{X}_i, \Delta q_i) + \alpha_i \\ \Delta q_i &= (\Delta q_i)_{\text{real}} + \beta_i\end{aligned}$$

en donde $\mathbf{X}_i$ representa el vector de estado, definido generalmente como posición-orientación en el plano y sus respectivas derivadas; Δq_i son las lecturas del sistema odométrico en el periodo considerado; y (α_i, β_i) son los respectivos errores de medida, de covarianzas (Q_α, Q_β) . El sistema anterior se completa con el vector de medidas:

$$\mu_j = f(\mathbf{X}_j) + \delta_j \quad (5.42)$$

correspondientes al posicionador absoluto, asociadas a un ruido de medida δ_j , de covarianza Q_δ . Los distintos subíndices, i y j , representan la asincronía temporal entre ambos procesos.

En principio, se parte de un periodo de medida $T_i < T_j$, situación habitual en estos sistemas. Mientras no existan medidas μ_j disponibles, la actualización de $\mathbf{X}_i$ se realiza por odometría convencional. Cuando existe μ_j , la actualización se realiza tomando en cuenta este nuevo conocimiento en la forma:

$$\hat{\mathbf{X}}_{j+1|j+1} = \hat{\mathbf{X}}_{j+1|j} + K_j(\mu_j - f(\hat{\mathbf{X}}_{j+1|j}))$$

en donde $\hat{\mathbf{X}}_{j+1|j+1}$ representa el estado validado para el instante $(j+1)$; $\hat{\mathbf{X}}_{j+1|j}$ es la predicción del estado en $(j+1)$ realizada con los datos del instante anterior, incluyendo la odometría; y K_j es la llamada *ganancia de Kalman*, o factor de ponderación de la medida μ_j , elaborada a partir de las matrices de covarianza del sistema completo, esto es Q_α , Q_β y Q_δ .

Las técnicas basadas en EKF han demostrado ser efectivas y fiables en la fusión de datos procedentes de la odometría y otros sensores absolutos a la determinación de la posición-orientación de un móvil, existiendo numerosas referencias al respecto (por ejemplo [Yoder 96] y [Hu 98]). Se trata, en suma, de una interesante línea a seguir en un futuro inmediato, aunque en el contexto

de esta tesis se ha considerado más importante concluir con la plena caracterización del sistema de posicionamiento absoluto, lo cual pasa por modelar adecuadamente la matriz Q_δ asociada a la función de medida 5.42.

5.4.2 Propagación del error de medida

En resumen, el algoritmo de posicionamiento propuesto puede considerarse como el resultado de resolver un sistema de ecuaciones de forma implícita. Una forma eficiente de estudiar la propagación del error en este tipo de sistemas se encuentra en [Haralick 93], de donde se ha tomado el desarrollo básico y la notación consiguiente.

Se parte de K vectores $\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_k$ de tamaño $N \times 1$, que representan los valores reales de ciertas cantidades, que están afectadas por ruidos de medida $\Delta\mathbf{w}_1, \dots, \Delta\mathbf{w}_k$, gaussianos y de características (medias y covarianzas) conocidas. Sea μ el vector de tamaño $L \times 1$ que representa las incógnitas del sistema. En consecuencia, el modelo sin ruido del sistema de ecuaciones será:

$$f(\mathbf{w}_k, \mu) = 0, \quad k = 1, \dots, K,$$

por lo que las medidas afectadas de un ruido $\Delta\mathbf{w}$ afectarán al vector de salida en una cantidad $\Delta\mu$, modelable a partir del sistema anterior como:

$$f(\mathbf{w}_k + \Delta\mathbf{w}_k, \mu + \Delta\mu) = 0, \quad k = 1, \dots, K \quad (5.43)$$

sistema que puede ser resuelto según el criterio de mínimos cuadrados en $\mu + \Delta\mu$. Para la determinación del valor esperado y de la matriz de covarianza de $\mu + \Delta\mu$, puede partirse de la linealización de la ecuación 5.43, a partir del término de primer orden de su desarrollo en serie:

$$f(\mathbf{w}_k + \Delta\mathbf{w}_k, \mu + \Delta\mu) \simeq f(\mathbf{w}_k, \mu) + \left[\frac{\partial f(\mathbf{w}_k, \mu)}{\partial \mathbf{w}} \right]^T \Delta\mathbf{w}_k + \left[\frac{\partial f(\mathbf{w}_k, \mu)}{\partial \mu} \right]^T \Delta\mu, \quad (5.44)$$

en donde los coeficientes de $\Delta\mathbf{w}_k$ y $\Delta\mu$ están particularizados a los valores $(\mathbf{w}_k, \mu)$ iniciales.

Sean, entonces, los vectores $\mathbf{g}_k$ y $\mathbf{h}_k$, de tamaños $N \times 1$ y $L \times 1$ respectivamente, definidos como:

$$\mathbf{g}_k = \frac{\partial f(\mathbf{w}_k, \mu)}{\partial \mathbf{w}_k}, \quad \mathbf{h}_k = \frac{\partial f(\mathbf{w}_k, \mu)}{\partial \mu}.$$

A partir de los K vectores $\mathbf{h}_k$, se define la matriz $\mathbf{H}$, de dimensiones $K \times L$, como sigue:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{h}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{h}_K^T \end{pmatrix}.$$

Dado que $f(\mathbf{w}_k + \Delta\mathbf{w}_k, \mu + \Delta\mu) = f(\mathbf{w}_k, \mu) = 0$, y a partir de las definiciones anteriores, el sistema de ecuaciones 5.44 puede reescribirse como:

$$\begin{pmatrix} -\mathbf{g}_1^T \Delta\mathbf{w}_1 \\ \vdots \\ -\mathbf{g}_K^T \Delta\mathbf{w}_K \end{pmatrix} = \mathbf{H} \Delta\mu,$$

sistema que puede resolverse por mínimos cuadrados como:

$$\Delta\mu = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \begin{pmatrix} -\mathbf{g}_1^T \Delta\mathbf{w}_1 \\ \vdots \\ -\mathbf{g}_K^T \Delta\mathbf{w}_K \end{pmatrix},$$

debiendo ser los valores esperados de $\Delta\mathbf{w}_k$ y de $\Delta\mu$ iguales a cero, para todo $k = 1, \dots, K$. Para determinar la matriz de covarianzas de $\mu + \Delta\mu$ buscada, se parte de las relaciones siguientes:

$$\Delta\mu \Delta\mu^T = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \begin{pmatrix} -\mathbf{g}_1^T \Delta\mathbf{w}_1 \\ \vdots \\ -\mathbf{g}_K^T \Delta\mathbf{w}_K \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\Delta\mathbf{w}_1^T \mathbf{g}_1 & \cdots & -\Delta\mathbf{w}_K^T \mathbf{g}_K \end{pmatrix} [(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}]^T \mathbf{H}.$$

Supuesta conocida la matriz de covarianza de las medidas $\mathbf{S}_w = E[\Delta\mathbf{w}_k \Delta\mathbf{w}_k^T]$, y dado que $E[\Delta\mathbf{w}_i \Delta\mathbf{w}_k^T] = 0$, para todo $i \neq k$, la matriz de covarianzas $\mathbf{Q}$ de las incógnitas μ resulta ser:

$$\mathbf{Q}_{\mu+\Delta\mu} = \mathbf{Q}_{\Delta\mu} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \begin{pmatrix} \mathbf{g}_1^T \mathbf{S}_w \mathbf{g}_1 & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \mathbf{g}_K^T \mathbf{S}_w \mathbf{g}_K \end{pmatrix} [(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}]^T \mathbf{H}. \quad (5.45)$$

Sistema de ecuaciones de partida

El algoritmo parte de dos estructuras triangulares con referencia central en los puntos p_1 y p_3 , respectivamente. Cada una de estas estructuras viene descrita por un repertorio de ecuaciones idéntico en forma pero diferenciándose en la tripleta de puntos base utilizados; así, la primera

estructura se corresponde con los puntos (p_1, p_2, p_4) y la segunda tiene como entradas los puntos (p_3, p_2, p_4) . Ambas tripletas comparten los puntos extremos (p_2, p_4) mientras que los puntos (p_1, p_3) , orígenes respectivos de cada estructura, son promediados según lo establecido en la relación 5.38, resultando un vector distancia o radio $\mathbf{R} = \frac{1}{2}(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_3)$.

Con vistas a simplificar razonablemente las expresiones que siguen, se realizará la siguiente aproximación:

- El vector $\mathbf{R}$ se considera de módulo igual al escalar $R \simeq \frac{1}{2}(z_1 + z_3)$, dado que la cámara normalmente apunta hacia la marca según su eje z , siendo despreciables los efectos de las otras dos coordenadas x e y .
- La aproximación anterior simplifica la estimación de las matrices de covarianza, pues R resulta ser una combinación lineal de z_1 y z_3 .

El presente estudio de propagación del error se generalizará, por tanto, a las variables del vector de salida definido en la sección anterior, esto es:

$$\mu_s = \begin{bmatrix} z_1 & z_3 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}^T,$$

reduciendo posteriormente la matriz $\mathbf{Q}_\mu$ mediante la combinación de las componentes correspondientes a las distancias parciales z_1 y z_3 .

Tómese, entonces, la medida formada por los puntos (p_1, p_2, p_3, p_4) y llévense estos datos al sistema de ecuaciones 5.33, rearmado con los valores de los cosenos directores dados por las relaciones 5.35. Expresando el sistema resultante en forma implícita, se obtiene:

$$f(\mathbf{w}_k, \mu_s) = \begin{bmatrix} (u_2 - u_1)z_1 + \delta_v u_2 \cos \alpha \\ (v_2 - v_1)z_1 - \delta_v (\lambda \sin \alpha - v_2 \cos \alpha) \\ (u_4 - u_3)z_3 - \delta_v u_4 \cos \alpha \\ (v_4 - v_3)z_3 + \delta_v (\lambda \sin \alpha - v_4 \cos \alpha) \\ (u_4 - u_1)z_1 - \delta_h (\lambda \sin \gamma + u_4 \sin \alpha \cos \gamma) \\ (v_4 - v_1)z_1 - \delta_h (\lambda \cos \alpha + v_4 \sin \alpha) \cos \gamma \\ (u_2 - u_3)z_3 + \delta_h (\lambda \sin \gamma + u_2 \sin \alpha \cos \gamma) \\ (v_2 - v_3)z_3 + \delta_h (\lambda \cos \alpha + v_2 \sin \alpha) \cos \gamma \end{bmatrix} = 0, \quad (5.46)$$

en donde el vector de medidas es:

$$\mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_2 & v_2 & u_3 & v_3 & u_4 & v_4 \end{bmatrix}^T, \quad (5.47)$$

y el de parámetros a ajustar son las salidas del algoritmo, μ_s .

Sobre los parámetros definidos por el vector de salida, las razones $\sin \gamma$ y $\cos \gamma$ serán consideradas variables separadas, con vistas a reconocer la distinta sensibilidad a los errores de medida en $\mathbf{w}_k$ de ambas razones trigonométricas; por tanto, y con vistas a simplificar el tratamiento del sistema de ecuaciones 5.46, se abreviarán como S_γ y C_γ , respectivamente. Con todo ello, el vector de salida se representará como:

$$\mu_s = \begin{bmatrix} z_1 & z_3 & S_\gamma & C_\gamma \end{bmatrix}^T. \quad (5.48)$$

A partir de las definiciones dadas, los vectores $\mathbf{g}_k$ resultan ser:

$$\mathbf{g}_k \rightarrow \begin{cases} \mathbf{g}_1^T = \begin{bmatrix} -z_1 & 0 & z_1 + \delta_v \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{g}_2^T = \begin{bmatrix} 0 & -z_1 & 0 & z_1 + \delta_v \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{g}_3^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -z_3 & 0 & z_3 - \delta_v \cos \alpha & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{g}_4^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -z_3 & 0 & z_3 - \delta_v \cos \alpha \end{bmatrix} \\ \mathbf{g}_5^T = \begin{bmatrix} -z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & z_1 - \delta_h C_\gamma \sin \alpha & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{g}_6^T = \begin{bmatrix} 0 & -z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & z_1 - \delta_h C_\gamma \sin \alpha \end{bmatrix} \\ \mathbf{g}_7^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & z_3 + \delta_h C_\gamma \sin \alpha & 0 & -z_3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{g}_8^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & z_3 + \delta_h C_\gamma \sin \alpha & 0 & -z_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases},$$

los cuales, al realizar los productos correspondientes a las covarianzas de las medidas de $\mathbf{w}_k$ (matriz diagonal en la expresión 5.45), y teniendo en cuenta la matriz de covarianza de medida definida en 5.39, se reducen a los escalares siguientes:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_1^T \mathbf{S}_w \mathbf{g}_1 &= \sigma^2 (z_1^2 + (z_1 + \delta_v \cos \alpha)^2) = M \\ \mathbf{g}_2^T \mathbf{S}_w \mathbf{g}_2 &= \sigma^2 (z_1^2 + (z_1 + \delta_v \cos \alpha)^2) = M \\ \mathbf{g}_3^T \mathbf{S}_w \mathbf{g}_3 &= \sigma^2 (z_3^2 + (z_3 - \delta_v \cos \alpha)^2) = N \\ \mathbf{g}_4^T \mathbf{S}_w \mathbf{g}_4 &= \sigma^2 (z_3^2 + (z_3 - \delta_v \cos \alpha)^2) = N \\ \mathbf{g}_5^T \mathbf{S}_w \mathbf{g}_5 &= \sigma^2 (z_1^2 + (z_1 - \delta_h C_\gamma \sin \alpha)^2) = O \\ \mathbf{g}_6^T \mathbf{S}_w \mathbf{g}_6 &= \sigma^2 (z_1^2 + (z_1 - \delta_h C_\gamma \sin \alpha)^2) = O \\ \mathbf{g}_7^T \mathbf{S}_w \mathbf{g}_7 &= \sigma^2 (z_3^2 + (z_3 + \delta_h C_\gamma \sin \alpha)^2) = P \\ \mathbf{g}_8^T \mathbf{S}_w \mathbf{g}_8 &= \sigma^2 (z_3^2 + (z_3 + \delta_h C_\gamma \sin \alpha)^2) = P. \end{aligned}$$

Por otro lado, la matriz $\mathbf{H}$ se obtiene como:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1^T \\ \mathbf{h}_2^T \\ \mathbf{h}_3^T \\ \mathbf{h}_4^T \\ \mathbf{h}_5^T \\ \mathbf{h}_6^T \\ \mathbf{h}_7^T \\ \mathbf{h}_8^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u_2 - u_1) & 0 & 0 & 0 \\ (v_2 - v_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (u_4 - u_3) & 0 & 0 \\ 0 & (v_4 - v_3) & 0 & 0 \\ (u_4 - u_1) & 0 & -\delta_h \lambda & -\delta_h u_4 \sin \alpha \\ (v_4 - v_1) & 0 & 0 & -\delta_h (\lambda \cos \alpha + v_4 \sin \alpha) \\ 0 & (u_2 - u_3) & \delta_h \lambda & \delta_h u_2 \sin \alpha \\ 0 & (v_2 - v_3) & 0 & \delta_h (\lambda \cos \alpha + v_2 \sin \alpha) \end{bmatrix}.$$

A partir de $\mathbf{H}$ se puede definir la matriz $\mathbf{G}$ como $\mathbf{G} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T$. De esta forma, la matriz de covarianza inicial es:

$$\mathbf{Q}_{\mu s} = \mathbf{G} \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & O & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & O & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P \end{bmatrix} \mathbf{G}^T = \begin{bmatrix} \sigma_{z_1 z_1}^2 & \sigma_{z_1 z_3}^2 & \sigma_{z_1 S \gamma}^2 & \sigma_{z_1 C \gamma}^2 \\ \sigma_{z_1 z_3}^2 & \sigma_{z_3 z_3}^2 & \sigma_{z_3 S \gamma}^2 & \sigma_{z_3 C \gamma}^2 \\ \sigma_{z_1 S \gamma}^2 & \sigma_{z_3 S \gamma}^2 & \sigma_{S \gamma S \gamma}^2 & \sigma_{S \gamma C \gamma}^2 \\ \sigma_{z_1 C \gamma}^2 & \sigma_{z_3 C \gamma}^2 & \sigma_{S \gamma C \gamma}^2 & \sigma_{C \gamma C \gamma}^2 \end{bmatrix}. \quad (5.49)$$

Pero dado que z_1 y z_3 no son las salidas del algoritmo, la matriz $\mathbf{Q}_{\mu s}$ obtenida ha de reajustarse al vector de salida real

$$\mu = \begin{bmatrix} R & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}^T,$$

para lo cual se tiene en cuenta la aproximación lineal $R \simeq \frac{1}{2}(z_1 + z_3)$, con lo que la matriz de covarianza buscada será igual a:

$$\mathbf{Q}_{\mu} = \begin{bmatrix} \sigma_{RR}^2 & \sigma_{RS \gamma}^2 & \sigma_{RC \gamma}^2 \\ \sigma_{RS \gamma}^2 & \sigma_{S \gamma S \gamma}^2 & \sigma_{S \gamma C \gamma}^2 \\ \sigma_{RC \gamma}^2 & \sigma_{S \gamma C \gamma}^2 & \sigma_{C \gamma C \gamma}^2 \end{bmatrix}, \quad (5.50)$$

p	Grados de libertad, ν					
	1	2	3	4	5	6
68.3%	1.00	2.30	3.53	4.72	5.89	7.04
90%	2.71	4.61	6.25	7.78	9.24	10.6
95.4%	4.00	6.17	8.02	9.70	11.3	12.8
99%	6.63	9.21	11.3	13.3	15.1	16.8
99.73%	9.00	11.8	14.2	16.3	18.2	20.1
99.99%	15.1	18.4	21.1	23.5	25.7	27.8

Tabla 5.2: Constante de la elipsoide de error, en función del nivel de confianza y los grados de libertad.

en donde:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{RR}^2 &= \frac{1}{4}(\sigma_{z_1 z_1}^2 + \sigma_{z_3 z_3}^2 + 2\sigma_{z_1 z_3}^2) \\
 \sigma_{RS\gamma}^2 &= \frac{1}{4}(\sigma_{z_1 S\gamma}^2 + \sigma_{z_3 S\gamma}^2) \\
 \sigma_{RC\gamma}^2 &= \frac{1}{4}(\sigma_{z_1 C\gamma}^2 + \sigma_{z_3 C\gamma}^2)
 \end{aligned} \tag{5.51}$$

expresiones basadas en la correlación parcial existente entre las z_i , y la independencia entre las correlaciones entre z_i y $S\gamma$, $C\gamma$ (ver *Anexo D*).

5.4.3 Elipsoides de error

Conocidos el vector de salida final, μ , y su matriz de covarianza, $\mathbf{Q}_\mu$, el algoritmo se encuentra perfectamente caracterizado como para su incorporación dentro de cualquier otro sistema de posicionamiento relativo, por ejemplo mediante un EKF como los referidos anteriormente ([Yoder 96], [Bonnifait 98], etc.).

Ahora bien, al haber considerado una relación lineal entre el vector de medidas $\mathbf{w}_k$ y el de salida μ , la distribución gaussiana de los errores en $\mathbf{w}_k$ se propaga igualmente gaussiana hacia μ , con lo que la distribución de los errores en μ se encuentran encerrados en elipsoides cuyos parámetros (dirección de ejes y dimensiones de los mismos) dependen de los autovalores y autovectores de la matriz de covarianza $\mathbf{Q}_\mu$ y de una constante de escala, función esta última del nivel de confianza del recinto encerrado por la elipsoide.

Sea μ_0 el vector de salida conocido sobre el que se quiere trazar la elipsoide de error; la ecuación de la elipsoide será [Giai-Checa 93]:

$$(\mu - \mu_0)^T \mathbf{Q}_\mu^{-1} (\mu - \mu_0) = k^2.$$

Los valores de k^2 , en función del nivel de confianza deseado y de los grados de libertad de la elipsoide se muestran en la tabla 5.2 [Press 93]. Aunque el vector μ original es tridimensional,

R	ϕ	Componentes de $\mathbf{Q}$, para $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 0$ y $\sigma_w^2 = 0.5$					
		σ_{RR}^2	$\sigma_{S_\gamma S_\gamma}^2$	$\sigma_{C_\gamma C_\gamma}^2$	$\sigma_{RS_\gamma}^2$	$\sigma_{RC_\gamma}^2$	$\sigma_{S_\gamma C_\gamma}^2$
1	15	$4.94 \cdot 10^{-5}$	$6.51 \cdot 10^{-5}$	$2.63 \cdot 10^{-3}$	$-2.39 \cdot 10^{-5}$	$9.05 \cdot 10^{-6}$	$-6.05 \cdot 10^{-6}$
2	15	$7.91 \cdot 10^{-4}$	$2.60 \cdot 10^{-4}$	$4.20 \cdot 10^{-2}$	$-1.91 \cdot 10^{-4}$	$7.24 \cdot 10^{-5}$	$-2.42 \cdot 10^{-5}$
3	15	$4.00 \cdot 10^{-3}$	$5.85 \cdot 10^{-4}$	$2.12 \cdot 10^{-1}$	$-6.44 \cdot 10^{-4}$	$2.44 \cdot 10^{-4}$	$-5.44 \cdot 10^{-5}$
4	15	$1.26 \cdot 10^{-2}$	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$6.71 \cdot 10^{-1}$	$-1.53 \cdot 10^{-3}$	$5.79 \cdot 10^{-4}$	$-9.66 \cdot 10^{-5}$
5	15	$3.09 \cdot 10^{-2}$	$1.63 \cdot 10^{-3}$	1.64	$-2.98 \cdot 10^{-3}$	$1.13 \cdot 10^{-3}$	$-1.51 \cdot 10^{-4}$
1	45	$4.96 \cdot 10^{-5}$	$4.42 \cdot 10^{-5}$	$2.88 \cdot 10^{-3}$	$-1.75 \cdot 10^{-5}$	$2.39 \cdot 10^{-5}$	$-4.47 \cdot 10^{-6}$
2	45	$7.91 \cdot 10^{-4}$	$1.75 \cdot 10^{-4}$	$4.59 \cdot 10^{-2}$	$-1.40 \cdot 10^{-4}$	$1.90 \cdot 10^{-4}$	$-1.70 \cdot 10^{-5}$
3	45	$4.00 \cdot 10^{-3}$	$3.93 \cdot 10^{-4}$	$2.32 \cdot 10^{-1}$	$-4.72 \cdot 10^{-4}$	$6.42 \cdot 10^{-4}$	$-3.78 \cdot 10^{-5}$
4	45	$1.27 \cdot 10^{-2}$	$6.99 \cdot 10^{-4}$	$7.33 \cdot 10^{-1}$	$-1.12 \cdot 10^{-3}$	$1.52 \cdot 10^{-3}$	$-6.70 \cdot 10^{-5}$
5	45	$3.09 \cdot 10^{-2}$	$1.09 \cdot 10^{-3}$	1.79	$-2.18 \cdot 10^{-3}$	$2.98 \cdot 10^{-3}$	$-1.05 \cdot 10^{-4}$
1	75	$4.99 \cdot 10^{-5}$	$2.29 \cdot 10^{-5}$	$3.82 \cdot 10^{-3}$	$-6.54 \cdot 10^{-6}$	$2.75 \cdot 10^{-5}$	$1.39 \cdot 10^{-5}$
2	75	$7.92 \cdot 10^{-4}$	$8.96 \cdot 10^{-5}$	$6.21 \cdot 10^{-2}$	$-5.14 \cdot 10^{-5}$	$2.17 \cdot 10^{-4}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$
3	75	$4.01 \cdot 10^{-3}$	$2.01 \cdot 10^{-4}$	$3.15 \cdot 10^{-1}$	$-1.73 \cdot 10^{-4}$	$7.30 \cdot 10^{-4}$	$1.35 \cdot 10^{-4}$
4	75	$1.27 \cdot 10^{-2}$	$3.57 \cdot 10^{-4}$	$9.97 \cdot 10^{-1}$	$-4.10 \cdot 10^{-4}$	$1.73 \cdot 10^{-3}$	$2.40 \cdot 10^{-4}$
5	75	$3.09 \cdot 10^{-2}$	$5.58 \cdot 10^{-4}$	2.44	$-8.00 \cdot 10^{-4}$	$3.37 \cdot 10^{-3}$	$3.76 \cdot 10^{-4}$

Tabla 5.3: Valores de las componentes de la matriz de covarianzas de salida, para las condiciones indicadas.

una representación en el plano (R, ϕ) , como la mostrada en la figura 5-21, resulta notablemente conveniente. La compresión en dimensiones se realiza mediante el ángulo ϕ , obtenido a partir de $S_\gamma = \sin \gamma$, y de $C_\gamma = \cos \gamma$; de ambos valores, S_γ resulta ser notablemente más fiable que C_γ .

Mediante simulaciones en un espacio bidimensional (R, ϕ) dado, y utilizando las expresiones de $\mathbf{Q}_\mu$ derivadas de las ecuaciones 5.49, 5.50 y 5.51, se han obtenido los datos representados en la tabla 5.3.

La simulación abarca distancias R entre 1 y 5 metros con ángulos ϕ de 15, 45 y 75 grados; la varianza de medida de los centroides de los puntos se ha situado en $\sigma^2 = 0.5$, equivalente a una desviación típica de 0.7 píxeles. En lo que respecta a la cámara, su distancia focal es $\lambda = 6.5$ mm, formato VGA (640×480) de $1/3''$, con píxeles cuadrados de $8.4 \mu\text{m}$; su campo de visión (FOV) es de 35 grados en vertical y 46 grados en horizontal.

De los datos de la citada tabla puede observarse cómo la varianza de $\cos \gamma$ es siempre entre dos y tres órdenes de magnitud mayor que la correspondiente a $\sin \gamma$, creciendo ambos notablemente con la distancia R . Ésto justifica el uso de $\sin \gamma$ como única fuente de información para la obtención del módulo del ángulo ϕ y la del $\cos \gamma$ para resolver la indeterminación de signo, siendo posible a partir de su valor, el de su varianza y de la fiabilidad deseada, determinar cuándo esta medida estará sujeta a errores 'en espejo'.

Respecto a la medida de la distancia R , puede comprobarse cómo el valor de σ_{RR}^2 permanece casi constante en función sólo de R , circunstancia que aparece clara en la tercera columna de la tabla 5.3; en lo que respecta a su correlación respecto a la medida del ángulo de visión ϕ (componentes

$\sigma_{RS\gamma}^2$ y $\sigma_{RC\gamma}^2$) ambas influyen de forma similar sobre R , tanto en módulo como en sentido⁵, siendo mayores al aumentar tanto la distancia como el valor de ϕ .

Fijando la atención ahora en la recuperación del ángulo ϕ (esto es, atendiendo a la varianza $\sigma_{S\gamma S\gamma}^2$, que incide sobre el cálculo de $\sin \gamma$), ésta es más fiable a medida que se acerca ϕ a 90° , llegando la mejora a un orden de magnitud en la varianza. Por su lado la recuperación del $\cos \gamma$, relacionada con la varianza $\sigma_{C\gamma C\gamma}^2$, sigue una evolución inversa, aunque con diferencias mucho más pequeñas; cabe destacar, no obstante, que su crecimiento es mayor que el correspondiente al $\sin \gamma$, pues abarca tres órdenes de magnitud mientras que el incremento de $\sigma_{S\gamma S\gamma}^2$ es inferior a dos órdenes.

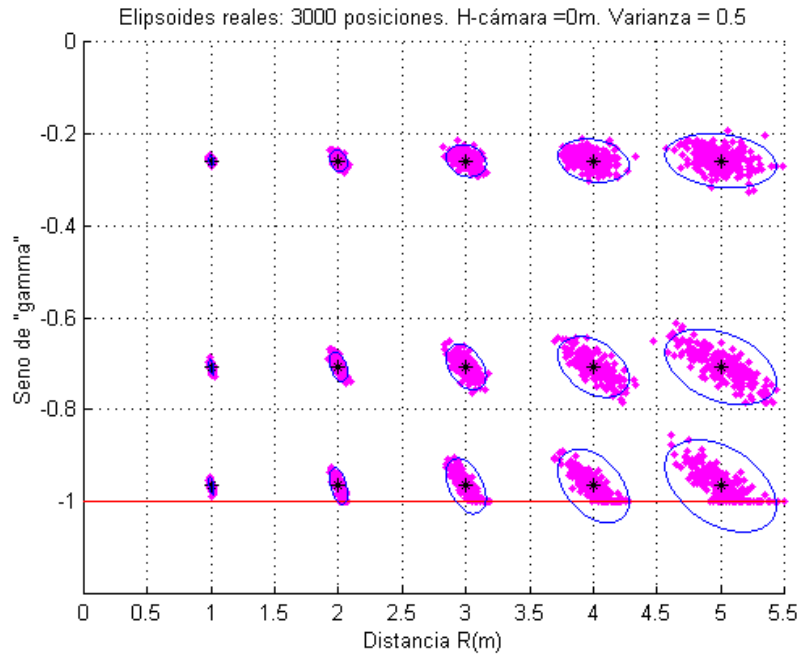


Figura 5-22: Elipsoides de error, referidas a las variables $(R, S\gamma)$ con un 95.4% de fiabilidad, con errores en el PI de $\sigma^2 = 0.5 \text{ pixel}^2$. Distancias de medida de 1 a 5 metros; $S\gamma$ correspondiente a fases ϕ de 15, 45 y 75 grados (de arriba a abajo).

La figura 5-22 visualiza las medidas y elipsoides de error correspondientes a los datos de covarianza de la tabla 5.3, con un valor de confianza del 95.4% ($k^2 = 6.17$). Se comprueba en la figura la adecuada correspondencia entre los valores obtenidos por la simulación (nebulosa de puntos) y la dirección y dimensiones de los ejes de la elipse predicha, lo que atestigua la validez del modelo elegido para caracterizar los errores de medida y su matriz de covarianza $\mathbf{Q}_\mu$. Es de destacar, no obstante, la deformación experimentada por los puntos recuperados en la frontera con el valor $\sin \gamma = -1$,

⁵Es de notar que las variaciones relativas de seno y coseno presentan signos contrarios en el cuadrante considerado.

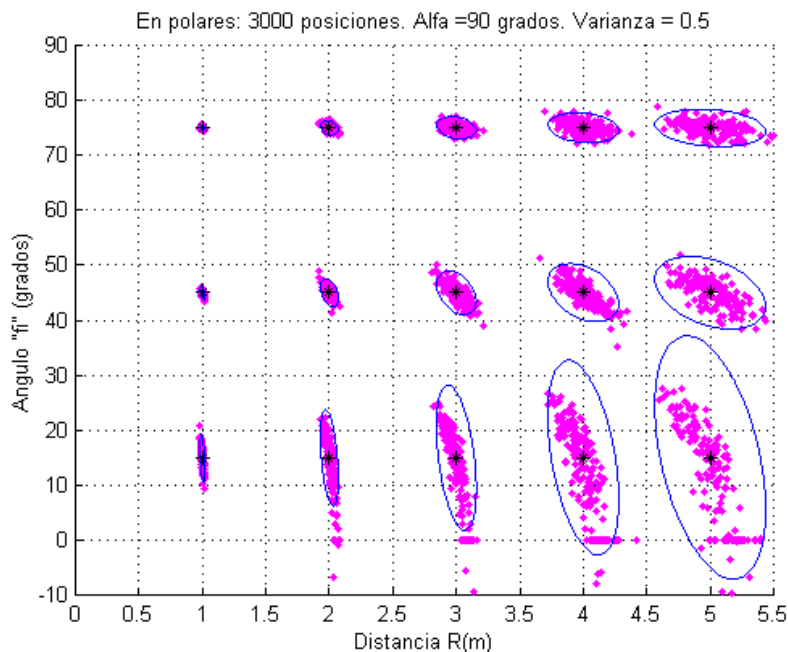


Figura 5-23: Proyección de las elipsoides de error sobre una representación en coordenadas polares (R, ϕ) .

correspondiente a $\phi = 0^\circ$: dado que el valor mínimo admisible es -1 , pero la salida del algoritmo se considera un escalar $S\gamma$, se recorta $S\gamma$ a este valor caso de tender a ser mayor a causa de los errores de medida.

Del estudio de la figura 5-22 se comprueba también cómo, a medida que crece R , aumenta notablemente la superficie encerrada por la elipse de error. Tomando proyecciones sobre los ejes R y $S\gamma$, puede observarse que las medidas de la distancia R se ven afectadas sólo ligeramente por la fase ϕ , mientras que la situación es notablemente peor para la medida de $S\gamma$, pues la incertidumbre crece muy notablemente al aproximarse a -1 , o sea a $\phi = 0^\circ$.

La representación de la figura 5-22, aún siendo la más correcta para representar la salida del algoritmo, no resulta fácil de interpretar por la inherente alinealidad de la función seno. Para ayudar en la interpretación de los resultados obtenidos se incluye en la figura 5-23 una proyección de los datos anteriores sobre una representación polar, (R, ϕ) , del mismo cuadrante. Para el trazado de dicha figura se ha aproximado $\gamma = \arcsin(S\gamma)$ con el primer término de su desarrollo en serie alrededor del punto considerado; dicha aproximación es válida para valores pequeños de γ (cuando $\phi \rightarrow 90^\circ$) pero se desvía apreciablemente para valores grandes de γ (con $\phi \rightarrow 0^\circ$).

Así mismo, se incluye en la figura 5-24 una representación en coordenadas cartesianas de los mismos datos; aunque en éste último caso no es inmediata la proyección de las elipses de error por

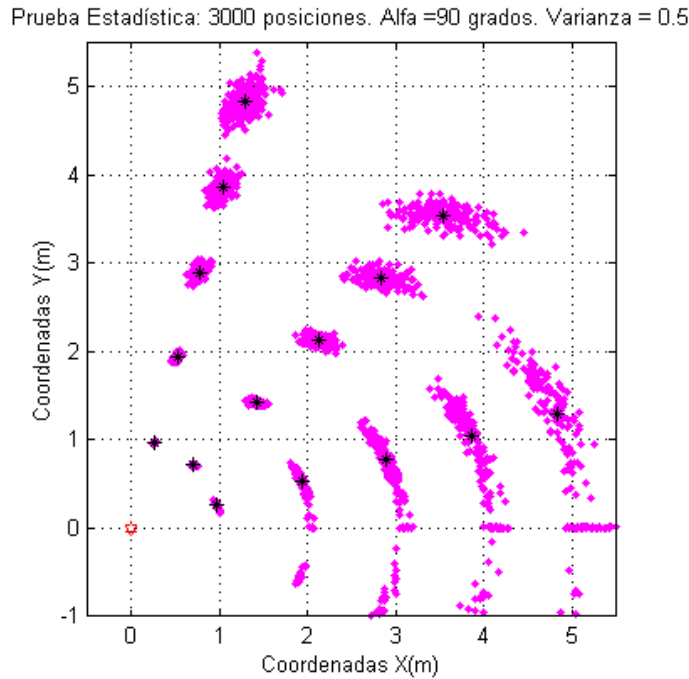


Figura 5-24: Representación de los puntos de prueba recuperados en coordenadas cartesianas.

su fuerte distorsión radial, la representación permite visualizar los errores posicionales en centímetros alrededor de los puntos de referencia.

5.4.4 Influencia de otros parámetros sobre los errores de posicionamiento

De las numerosas variables y procesos implicados en el algoritmo de posicionamiento, sólo se han tenido en cuenta en el estudio anterior los más importantes, considerando ideales (por ejemplo, ángulos α y β exactos) el resto de parámetros. En la presente sección se justificará que tales efectos no son notables frente a los ya contemplados, que resultan ser dominantes y de los cuales se han obtenido las componentes principales de $\mathbf{Q}_\mu$

Optimización por mínimos cuadrados recursivos

En teoría, las componentes S_γ y C_γ del vector de salida μ son sólo los valores iniciales necesarios para la posterior optimización y obtención del ángulo γ por medio de un algoritmo no lineal, como los mínimos cuadrados recursivos. Sin embargo, a la hora de modelar el error cometido en la estimación de (R, γ) la recursividad y no linealidad de estos procesos hacen muy problemático el estudio de la propagación del error de medida.

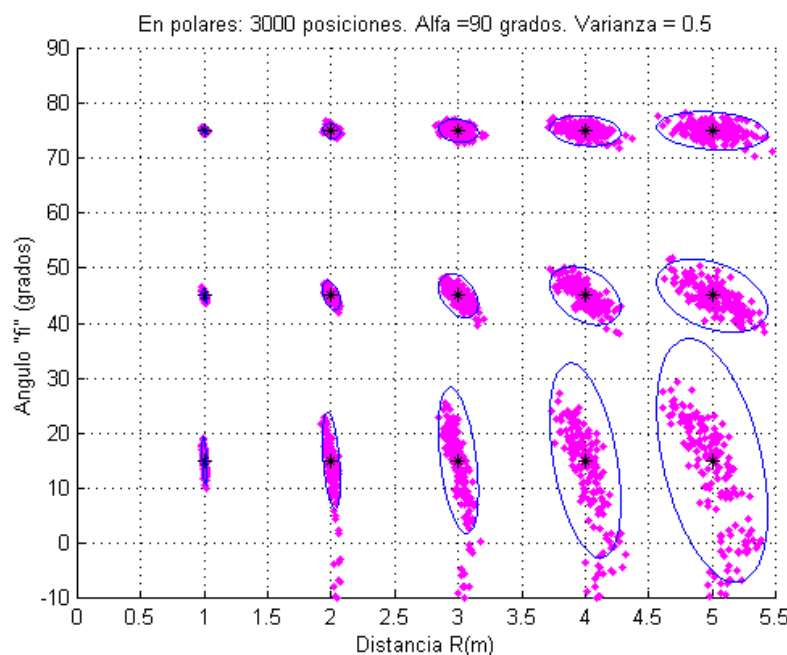


Figura 5-25: Comparación, en coordenadas polares, de las elipses de error con las salidas (R, ϕ) optimizadas por mínimos cuadrados recursivos.

Aprovechando la posibilidad de hacer simulaciones masivas, puede comprobarse empíricamente que la mejora obtenida en la precisión de la salida no es lo suficientemente importante como para justificar un análisis de error más ajustado a los algoritmos de optimización citados.

La figura 5-25 representa los mismos datos⁶ presentados anteriormente en la figura 5-22 pero tras pasar por una optimización por mínimos cuadrados recursivos. Comparando ambas figuras se detecta una muy leve mejora, aunque en líneas generales ésta es casi inapreciable a grandes rasgos; sólo resulta notable la eliminación de prácticamente todos los valores que antes se fijaron como $S\gamma = -1$, o sea, para $\gamma = -90^\circ \Rightarrow \phi = 0^\circ$. Pero precisamente gracias a este reajuste algunos puntos que anteriormente quedaron fuera de la elipse de error ahora se encuentran en su interior, lo cual viene a reforzar en realidad la validez del modelo.

No obstante, siguen existiendo puntos alejados de la elipse destacando, por su importancia, los inevitables puntos '*en espejo*' y algunos otros, más esporádicos, que no se pueden encuadrar en este grupo sino como puntos con medidas erráticas (*outliers*), los cuales, como ya se mencionó anteriormente, sólo podrán eliminarse completamente al incorporar la salida del algoritmo aquí descrito en un sistema superior que incluya información de la dinámica del sistema (p.e. un EKF).

⁶Entiéndase mismas condiciones de medida: número de puntos M , variaciones N y resto de parámetros de cámara y detección de centroides.

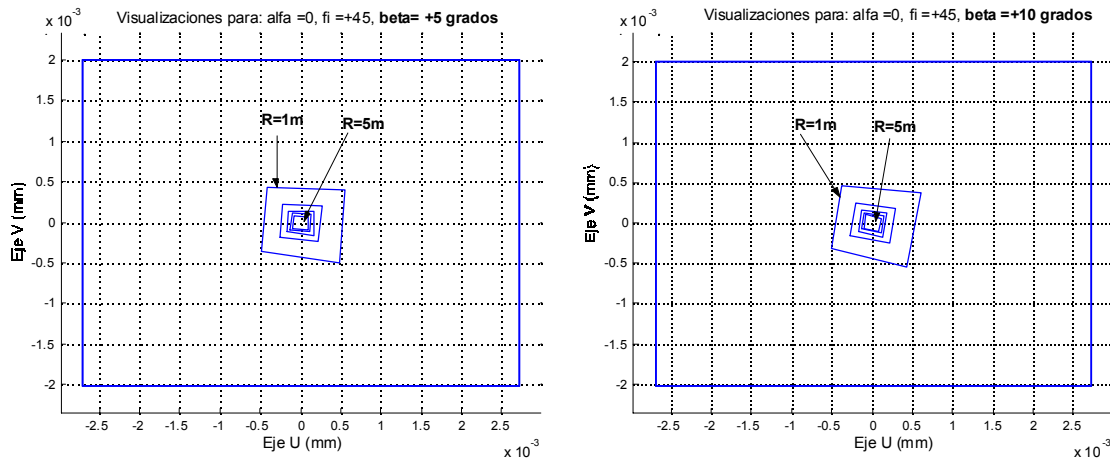


Figura 5-26: Efecto de los errores en el ajuste del alabeo β : imágenes de la marca para R entre 1 y 5 metros, $\alpha = 90^\circ$, $\phi = 45^\circ$ y con errores en β de $+5^\circ$ (gráfica izquierda) y de $+10^\circ$ (gráfica derecha).

Se demuestra, en consecuencia, la validez de la estimación del error derivado de la matriz $\mathbf{Q}_\mu$ hallada, contribuyendo precisamente la optimización no lineal a ajustar alguno de los puntos más desviados a los límites predichos.

Desviaciones de la posición de ajuste del alabeo β

Una de las premisas del presente algoritmo de posicionamiento es el conocimiento previo de dos de los ángulos de la matriz de rotación $\mathbf{R}$: el de elevación, α , y el de alabeo, β . De ellos, el primero puede recuperarse a partir de los datos de la unidad de *pan-tilt* existente, bien por un sistema de *encoders*, la mejor opción pero no habitual en estas unidades, o bien por estimación, mediante la acumulación de cuentas en motores paso a paso.

Respecto al ángulo β , éste depende de la mayor o menor precisión en el montaje de la cámara sobre la unidad de *pan-tilt*. Este ángulo, al ser considerado como cero, permitió simplificar notablemente las expresiones de los cosenos directores de las rectas de la marca en el SCA, tal y como se reflejaba en el sistema de ecuaciones 5.35; sin embargo, caso de ser no nulo, en todos los términos del sistema anterior aparecen bien $\sin \beta$ o $\cos \beta$, tal y como se comprueba en el sistema de ecuaciones 5.6. Esta circunstancia complica la formulación teórica de la dependencia de la solución en (R, ϕ) con respecto a errores en el ajuste de la posición β .

Dado que es relativamente fácil conseguir ajustes en el posicionamiento mecánico del orden de unos pocos grados, la solución propuesta es la de fijar como una '*condición de instalación*' este dato y observar, mediante simulaciones, si el error cometido puede considerarse despreciable en términos relativos.

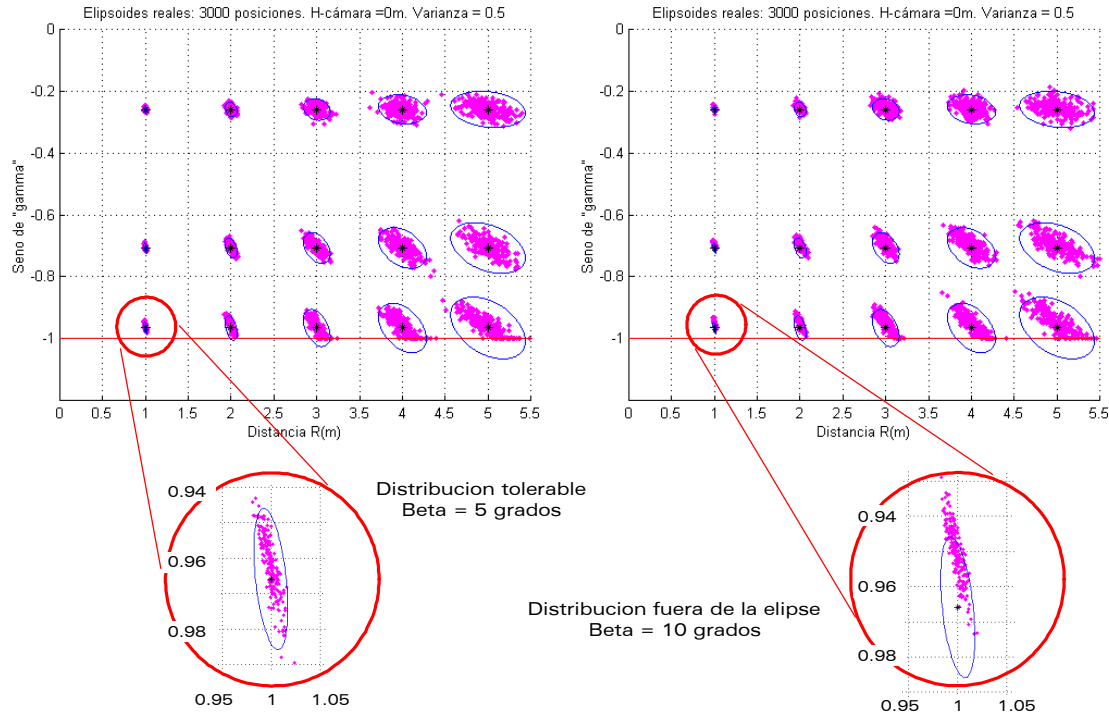


Figura 5-27: Efecto del error en el ajuste de β sobre la salida μ_s : elipses nominales y distribuciones de datos para un error en β de 5° (gráficas mitad izquierda) y de 10° (gráficas mitad derecha). Se incluyen sendos detalles de la dispersión más desviada en términos relativos.

A este respecto, la figura 5-26 muestra la visualización de la marca con la óptica usada como referencia en este estudio, con errores de $+5^\circ$ y $+10^\circ$ en el ajuste de β . La deformación de la marca en ambos casos, principalmente en sus líneas verticales, resulta evidente con lo que cualquier desviación de β que alcanzase estos valores sería fácilmente detectado, incluso a simple vista. El marco que rodea las proyecciones de la marca se corresponde con los límites del sensor de imagen, lo cual da idea clara tanto de la deformación existente como de lo reducida que resulta la imagen de la marca a la distancia límite elegida, que en este estudio es de 5 m.

Suponiendo una especificación de ajuste de β dentro de los límites $-5^\circ \leq \beta \leq +5^\circ$, relativamente fácil de cumplir y mantener, puede observarse que la distribución de puntos obtenida por simulación, una vez comparada con las elipses de error nominales para $\beta = 0$, no presenta desviaciones significativas dentro de los parámetros definidos por la matriz de covarianzas $\mathbf{Q}_\mu$ original (ver figura 5-27, gráficas a la izquierda); de esta forma se comprueba empíricamente que, con el límite de ajuste de β marcado, el error cometido es tolerable y se encuentra dentro de los márgenes de estimación nominales.

Por otro lado, en las gráficas de la derecha de la figura 5-27 se representa la misma comparativa para un ángulo $\beta = +10^\circ$. Aunque a simple vista las distribuciones se presentan similares al caso anterior, la desviación en la posición de las distribuciones de puntos respecto de las elipses nominales es algo mayor, especialmente a distancias cortas y ángulos ϕ reducidos. Esta circunstancia se muestra con claridad en el detalle ampliado, correspondiente a $R = 1$ m, $\phi = 15^\circ$; se comprueba cómo la distribución de puntos se encuentra, en términos relativos, notablemente desviada de la posición nominal, si bien en términos absolutos la desviación entre ambos centros es sólo de 0.5 cm (un 0.5%) en R y de 0.002 unidades (un 0.2%) en el $\sin \gamma$. El resto de desviaciones, aunque mayores en módulo, se encuentran mejor confinadas en las elipses definidas, con lo cual están mejor caracterizadas que el caso considerado.

Comparando ambas distribuciones, y en concreto los detalles ampliados, la aproximación realizada al considerar $\beta = 0$ en el algoritmo descrito se demuestra válida en el intervalo de ajuste definido y con un margen suficiente, pues un exceso del 100% en este ajuste no ocasiona un error de posicionamiento notable en términos relativos.

Errores de calibrado en la lectura del ángulo de elevación α

En lo que respecta a los errores en el ángulo de elevación α , su origen es doble: ajuste de montaje y errores de lectura en los codificadores de la unidad *pan-tilt*; ambos pueden englobarse como un único error $\Delta\alpha$. En el sistema de ecuaciones 5.46 se comprueba fácilmente cómo este error afectaría no linealmente a todas las ecuaciones del sistema, bien como $\sin(\alpha + \Delta\alpha)$ o como $\cos(\alpha + \Delta\alpha)$.

Siguiendo una metodología similar a la presentada en el caso anterior para errores en el ángulo de alabeo β , se considerarán los errores en α como especificaciones límite del sistema y se despreciarán estos efectos en términos relativos. La figura 5-28 ilustra el resultado de la prueba realizada; de nuevo se comprueban los efectos causados por errores de $+5^\circ$ y $+10^\circ$, esta vez en el ajuste de α ; a efectos prácticos, ambos errores pueden considerarse como bastante mayores de los existentes en un caso real, usando unidades *pan-tilt* y soportes de cámara de calidad estándar.

En ambas gráficas (izquierda y derecha) de la figura 5-28 se observan comportamientos similares a los ya vistos en la figura 5-27, aunque en esta ocasión las desviaciones resultan ser bastante mayores en general. De nuevo, un error de 5° puede considerarse como tolerable: las diferencias entre las distribuciones de puntos recuperados y la elipse nominal no son, en términos relativos, significativas. En concreto, observando la diferencia entre los centros de la distribución más desviada en términos relativos y la elipse nominal (ver detalle), el error en R es del orden de 0.8 cm sobre el metro (un 0.8%) y de 0.006 unidades en $\sin \gamma$ (un 0.6%), ligeramente mayor que en el caso de β .

Pero para un error en α de 10° la desviación entre distribuciones de puntos y elipses es muy

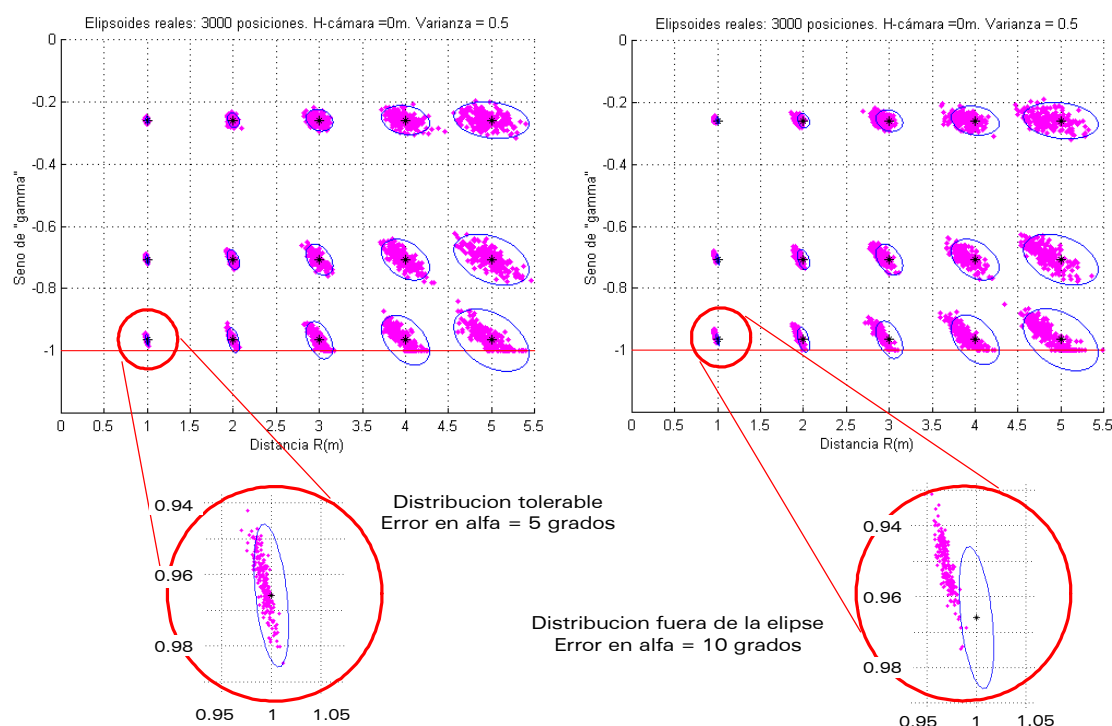


Figura 5-28: Efecto del error en la estimación de α sobre la salida μ_s : elipses nominales y distribuciones de datos para un error en α de 5° (gráficas mitad izquierda) y de 10° (gráficas mitad derecha).

notable. El peor caso vuelve a estar en las posiciones más próximas a la marca y en ángulos ϕ reducidos ($\sin \gamma \rightarrow -1$). En el detalle ampliado se observa cómo la distribución se encuentra completamente fuera de la elipse predicha por $\mathbf{Q}_\mu$, lo cual debe considerarse como un error no tolerable, pues aunque el error absoluto no llega a 1.5 cm en R , por ejemplo, el área encerrada por la covarianza estimada no se correspondería en absoluto con la distribución real existente. Si bien este efecto es debido a una desviación en el valor medio de la estimación (centro de la elipsoide), dicha posición estimada junto con su elipsoide de error no resultaría ser un buen modelo de la posición del móvil.

En resumen, tanto para el ángulo de elevación, α , como para el de alabeo, β , es completamente admisible un error máximo en ambos valores de $\pm 5^\circ$.

Errores dinámicos en α y β

Establecida la cota anterior cabe preguntarse por el efecto que otros procesos dinámicos, como por ejemplo son las vibraciones y oscilaciones del soporte de la cámara a bordo de la silla, tienen sobre

Parámetro	Margenes nominales	Margenes de tolerancia
Elevación α	$0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$-5^\circ \leq \Delta\alpha \leq +5^\circ$
Alabeo β	$\beta = 0^\circ$	$-5^\circ \leq \beta \leq +5^\circ$

Tabla 5.4: Valores, por defecto, de los parámetros de ajuste de la unidad de *pan-tilt* que afectan al algoritmo de posicionamiento.

la precisión del sistema. Para esto sólo hay dos alternativas:

- Especificar el margen anterior, de $\pm 5^\circ$, como el máximo admisible incluyendo además los efectos dinámicos mencionados.
- Incorporar algún medidor adicional en el soporte de cámara, como por ejemplo un inclinómetro, con vistas a detectar cualquier desviación excesiva de las posiciones nominales.

Esta última opción permitiría ampliar el margen de funcionamiento del sistema pero a costa de una mayor complejidad mecánica, electrónica y algorítmica, destinada además a garantizar en la práctica un acoplo temporal suficiente entre las lecturas de inclinación y las imágenes correspondientes a dichas lecturas.

Mayor interés práctico tendría el obtener tales ángulos partiendo de la propia imagen. Para ello puede hacerse uso del algoritmo basado en puntos de fuga descrito en las primeras secciones de este capítulo pero con las siguientes modificaciones:

- En distancias cortas, la propia marca puede dar las informaciones buscadas, usando para ello las propiedades de los puntos de fuga definidos en las ecuaciones 5.5 y 5.6.
- En distancias grandes, cuando se tuvieran errores de lectura en α y β significativos por el pequeño tamaño de la marca, se debieran usar los puntos de fuga de las rectas definidas por las juntas entre paredes, suelos y techos del recinto.

En este último caso, el proceso de imagen sería mucho más lento que el ahora descrito, al tener que localizar y segmentar las rectas apropiadas, esto es, aquéllas de grandes dimensiones cuyos puntos de fuga coinciden de forma aproximada con los puntos de fuga señalados por las rectas de la marca. No obstante, se trata de una interesante vía de futuro a seguir.

En todo caso el presente sistema, sin modificaciones, posee unas prestaciones comparables e incluso mejores que otros sistemas similares, por lo que se considera suficiente con especificar los márgenes nominales y de tolerancia para la unidad de *pan-tilt*, o soporte de cámara, y que se resumen en la tabla 5.4

5.4.5 Evolución de las componentes de la matriz de covarianza $\mathbf{Q}_\mu$

Una vez comprobado el margen de validez de las aproximaciones tomadas para los ángulos de elevación y alabeo (α y β , respectivamente), se analizarán las variaciones de las componentes de la matriz de covarianza, $\mathbf{Q}_\mu$, en función de los parámetros más importantes implicados en el sistema de posicionamiento descrito.

Dependencia de $\mathbf{Q}_\mu$ con el ángulo α de elevación

Tomando como base la misma óptica de referencia usada en los estudios de las secciones anteriores, se observarán en primer lugar las distintas evoluciones de $\mathbf{Q}_\mu$ respecto al ángulo de elevación, α . El valor de este ángulo no es un parámetro seleccionable a voluntad, pues se ve forzado por el punto de vista relativo entre cámara y marca, no existiendo además ninguna restricción a la hora de establecer la altura de instalación de ambos elementos.

Por razones evidentes de visibilidad, la altura de cámara estará comprendida entre 1.4 y 2 metros, abarcando desde poco más de la cabeza de una persona sentada (a bordo de la silla) y la de las personas que pudieran rodear el vehículo. Por su parte, una altura de marca entre 1.8 y 2.4 metros también puede considerarse típica, al permitir eludir los obstáculos más típicos como muebles, puertas o ventanas y poder ser visible desde la cámara por encima de otros obstáculos no adosados a los muros o de las personas que deambulen por el recinto. Esto deja unos ángulos de elevación comprendidos, en la práctica, entre los 90 grados (la horizontal) y los aproximadamente 45 grados que se tendrían al mirar la marca desde muy cerca. Estos serán, pues, los márgenes de interés de este estudio.

La figura 5-29 muestra, en una visión general, el efecto global que sobre las elipses de error tienen las variaciones en α . El formato de gráfica elegido es la representación de las elipses en coordenadas polares (R, ϕ) , por ser más intuitiva que la correspondiente a las coordenadas reales de salida, $(R, \sin \gamma)$, siendo las conclusiones extraíbles igualmente válidas, salvo las unidades implicadas. La varianza de la detección de centroides se mantiene en el mismo criterio de figuras y tablas anteriores, fijándose en $\sigma^2 = 0.5 \text{ pixel}^2$.

A grandes rasgos, el aumento en el ángulo de elevación acarrea una mayor fiabilidad de la medida, lo cual se hace evidente por la menor superficie encerrada por la elipse en el caso de valores bajos de α . La reducción se produce en ambos ejes, tanto en R como en ϕ , aunque la producida en la incertidumbre de medida de la distancia R es apreciablemente mayor que la experimentada por ϕ .

La evolución de las seis componentes de $\mathbf{Q}_\mu$ se muestra en la figura 5-30, tomando un ángulo $\phi = 45^\circ$ como referencia. Se comprueba que todas las varianzas (σ_{RR}^2 , $\sigma_{S\gamma S\gamma}^2$ y $\sigma_{C\gamma C\gamma}^2$) crecen monótonamente al crecer α , con lo que el análisis realizado para $\alpha = 90^\circ$ (cámara horizontal) puede

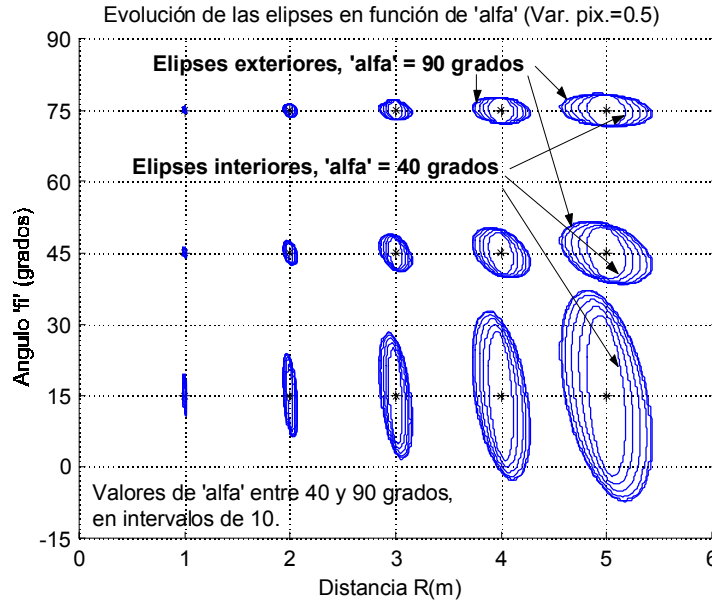


Figura 5-29: Evolución de las elipses de error en función de la posición y del ángulo de elevación, α , para una varianza de medida de centroides de 0.5 pixel².

considerarse como un análisis de peor caso. Cabe señalar aquí que este peor caso se corresponde con la observación realizada anteriormente respecto al ángulo γ : el error es máximo cuando se observa la marca justo de frente.

Por añadidura, precisamente el ángulo α tiende a ser 90° cuando la marca se observa desde grandes distancias, por la reducción relativa de la influencia de la diferencia de alturas $\Delta h = (h_{marca} - h_{camara})$ sobre el valor de α , pues éste es:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{\Delta h}{D}\right) \quad (5.52)$$

siendo D la distancia, en horizontal, entre marca y cámara.

Respecto a las covarianzas ($\sigma_{RS\gamma}^2$, $\sigma_{RC\gamma}^2$ y $\sigma_{S\gamma C\gamma}^2$), y haciendo obviada del signo (negativo en los casos de $\sigma_{RS\gamma}^2$ y $\sigma_{S\gamma C\gamma}^2$), se observa un comportamiento similar en $\sigma_{RC\gamma}^2$, mientras que $\sigma_{RC\gamma}^2$ y $\sigma_{S\gamma C\gamma}^2$ presentan máximos locales entre los 70 y 80 grados, más destacados en el caso de $\sigma_{S\gamma C\gamma}^2$. No obstante, y dado el carácter dominante de las varianzas (entre 1 y 4 órdenes de magnitud mayores) esta falta de monotonicidad no resulta significativa.

Puede concluirse que la precisión en el posicionamiento aumenta ligeramente al aumentar α , debiendo considerarse la posición horizontal de cámara, con $\alpha = 90^\circ$, como el caso peor.

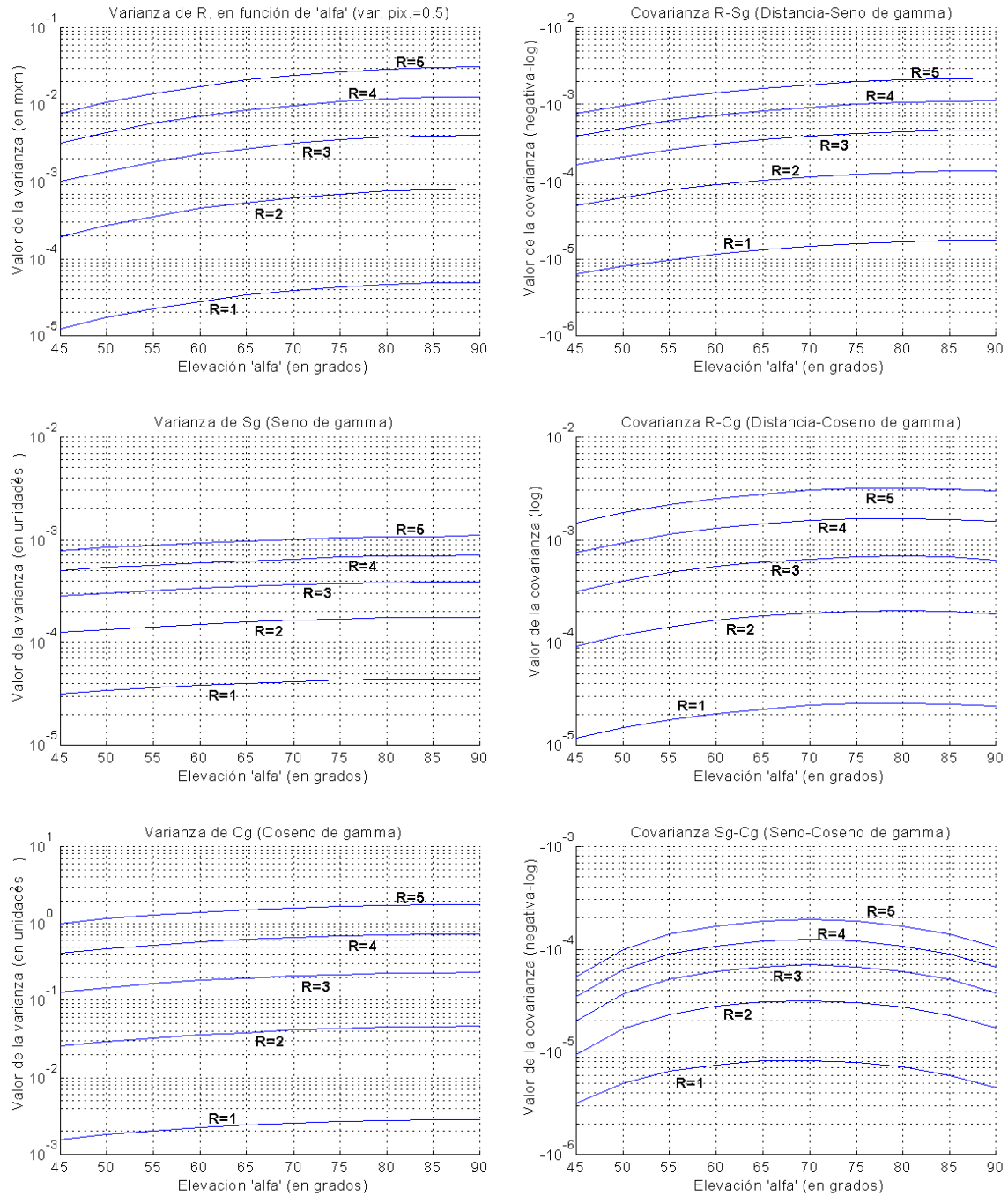


Figura 5-30: Representación de las componentes de Q_μ en función del ángulo de elevación α . Condiciones de medida: ángulo de giro $\phi = 45^\circ$, varianza de medida de centroides $\sigma^2 = 0.5$ pixel².

Dependencia de $\mathbf{Q}_\mu$ con la distancia R y el ángulo de giro ϕ

Una vez establecida la elevación $\alpha = 90^\circ$ como caso de referencia y cota máxima del error del sistema de posicionamiento, se fijará este valor para el resto del presente estudio. En la presente subsección se analizará la dependencia con la distancia radial, R , y el ángulo de giro, ϕ .

Las figuras 5-31 y 5-32 resumen la evolución de $\mathbf{Q}_\mu$ con respecto a ambos parámetros. El primer detalle que llama la atención es la práctica independencia de σ_{RR}^2 respecto al ángulo de visión de la marca, pues sus gráficas en función de R coinciden casi exactamente para cualquier punto de vista, fase ϕ en el espacio de referencia (R, ϕ) . Esta circunstancia corrobora la impresión causada por la proyección de las elipses de error sobre el eje R (ver, por ejemplo las figuras 5-22, 5-23 y 5-29).

Tal independencia se observa también en los valores de las covarianzas $\sigma_{RS\gamma}^2$ y $\sigma_{RC\gamma}^2$, las cuales siempre se mantienen más de un orden de magnitud por debajo de σ_{RR}^2 . Este último detalle no resulta muy visible en las gráficas de las covarianzas que se muestran en 5-31 y 5-32, pues su escala es lineal en lugar de logarítmica; la razón estriba en que las gráficas de las covarianzas $\sigma_{RC\gamma}^2$ y $\sigma_{S\gamma C\gamma}^2$ incluyen el valor cero en su representación, por lo que también se mantuvo el criterio de usar una escala lineal para $\sigma_{RS\gamma}^2$, con motivo de mantener cierta unidad visual en la representación de las covarianzas.

Fijando la atención en las varianzas de seno y coseno de γ , se confirma la tendencia creciente de ambas respecto a la distancia R y el valor notablemente mayor de $\sigma_{C\gamma C\gamma}^2$ en cualquier situación, lo que justifica la no inclusión del valor de $\cos \gamma$ en la recuperación del ángulo γ , salvo a efectos de signo. En lo que respecta a la evolución de ambas varianzas respecto al giro ϕ , la correspondiente a $\sin \gamma$ se reduce casi un orden de magnitud según aumenta ϕ , mientras que la correspondiente al $\cos \gamma$ evoluciona de forma opuesta, aunque sólo ligeramente; esta última circunstancia no es, sin embargo, significativa respecto a la recuperación del signo de γ , pues a pesar del aumento de $\sigma_{C\gamma C\gamma}^2$ la incertidumbre baja en realidad, al alejarse γ del límite de cambio de signo en $\cos \gamma$, correspondiente a $\gamma = \frac{3\pi}{2}$, y que equivale a una fase de $\phi = 0^\circ$ en el diagrama polar (R, ϕ) .

En lo que respecta a la evolución con la distancia radial R , la figura 5-31 confirma la idea intuitiva del aumento, en módulo, de todas las componentes de $\mathbf{Q}_\mu$ con R . Más interesante resulta observar la evolución de las covarianzas⁷ en $\mathbf{Q}_\mu$ con respecto a la fase ϕ (mitad derecha en la figura 5-32). En concreto las covarianzas $\sigma_{RS\gamma}^2$ y $\sigma_{RC\gamma}^2$ presentan evoluciones opuestas en módulo, pues mientras una decrece con ϕ la otra aumenta; esto refuerza la idea de la independencia de la medida de R respecto de ϕ , pues la influencia del seno y el coseno de γ tiende a ser uniforme y muy reducida en todo el intervalo de medida.

De hecho, la medida de R podría realizarse de forma independiente usando sólo el primer paso del

⁷ Las evoluciones de las varianzas σ_{RR}^2 , $\sigma_{S\gamma S\gamma}^2$ y $\sigma_{C\gamma C\gamma}^2$ ya han sido descritas respecto a ambos parámetros (R, ϕ) .

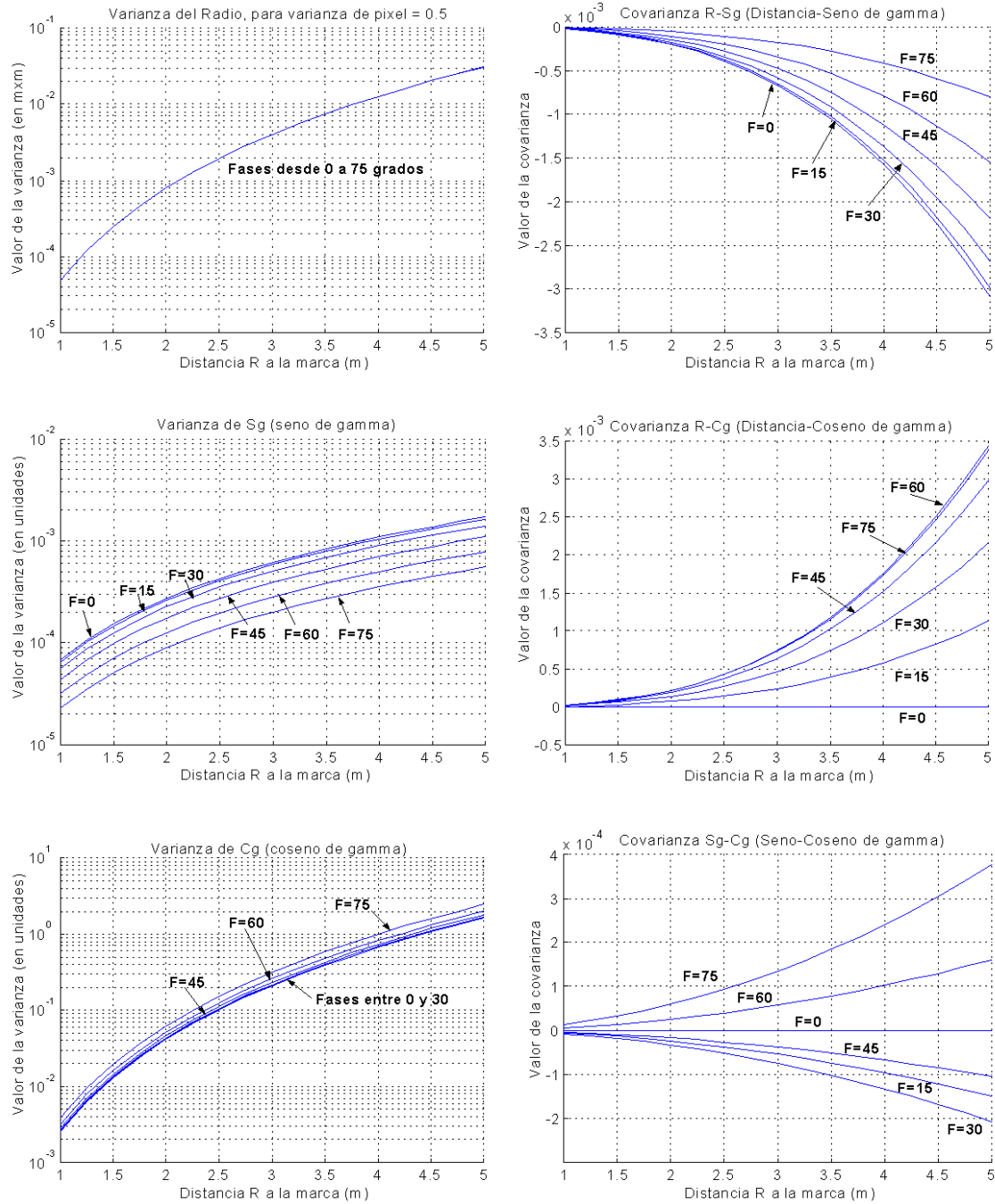


Figura 5-31: Evolución de las componentes de Q_μ en función de la distancia radial R . Condiciones de medida: $\alpha = 90^\circ$, varianza de medida de centroides $\sigma^2 = 0.5 \text{ pixel}^2$.

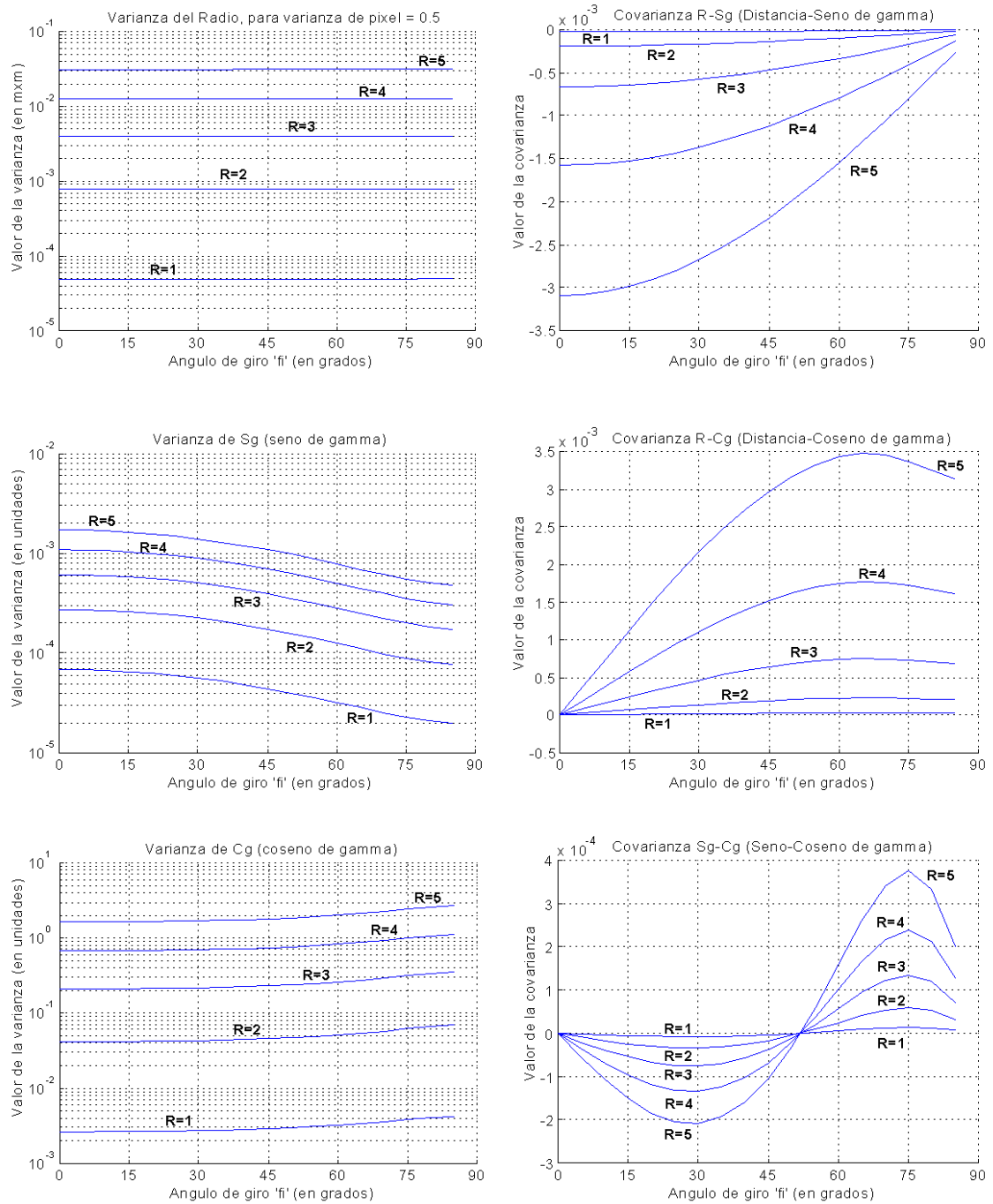


Figura 5-32: Evolución de las componentes de Q_μ en función del ángulo de giro ϕ . Condiciones de medida: $\alpha = 90^\circ$, varianza de medida de centroides $\sigma^2 = 0.5 \text{ pixel}^2$.

algoritmo de posicionamiento, correspondiente a la solución del subgrupo de ecuaciones reflejado en el sistema 5.36. No obstante, la obtención de una única matriz $\mathbf{Q}_\mu$, incluyendo el efecto simultáneo de todos los parámetros implicados, resulta más útil a efectos del presente estudio.

Por último, la evolución de la covarianza $\sigma_{S\gamma C\gamma}^2$ resulta llamativa por su cambio de signo para $\phi \approx 50^\circ$, hecho que resaltaba también en los datos de la tabla 5.3. En la misma tabla se mostraba cómo la influencia sobre $\cos \gamma$ puede considerarse despreciable, al ser varios ordenes de magnitud inferior a la propia varianza $\sigma_{C\gamma C\gamma}^2$, mientras que sí tiene cierta influencia en $\sin \gamma$, al ser de magnitudes similares.

Como conclusiones importantes de esta parte del estudio pueden establecerse las siguientes:

- Todas las medidas empeoran cuasi exponencialmente con la distancia R .
- La medida del ángulo de giro es mucho más fiable para ángulos de giro ϕ grandes, próximos a 90° .
- La medida de distancia radial, R , puede considerarse prácticamente independiente de la del ángulo de giro ϕ .

Esta última circunstancia resulta bastante interesante a efectos de establecer un criterio simplificado para caracterizar la calidad de la medida, por lo que se profundizará en este concepto en una sección posterior.

Dependencia de $\mathbf{Q}_\mu$ con respecto a la óptica usada

En los análisis anteriores se ha utilizado como referencia un sensor de imagen concreto, con una óptica dada. En la presente subsección se caracterizarán las dependencias de $\mathbf{Q}_\mu$ respecto a variaciones en la citada óptica; al igual que se hizo en la determinación del alcance del SPL en el capítulo anterior, el criterio elegido para caracterizar la misma no será la distancia focal sino el campo de visión horizontal (*Field of View*, FOV), medido en grados, pues así se tendrá en cuenta simultáneamente las dimensiones del propio sensor de imagen. La relación entre el valor del FOV y la distancia focal, λ , es:

$$FOV = 2 \arctan \left(\frac{W}{2\lambda} \right) \quad (5.53)$$

en donde W representa el ancho, esto es en la dimensión horizontal u , de la superficie activa del sensor de imagen; por ejemplo, el sensor de imagen OV7610, cuya dimensión $W = 5.4 \text{ mm}$, equipado

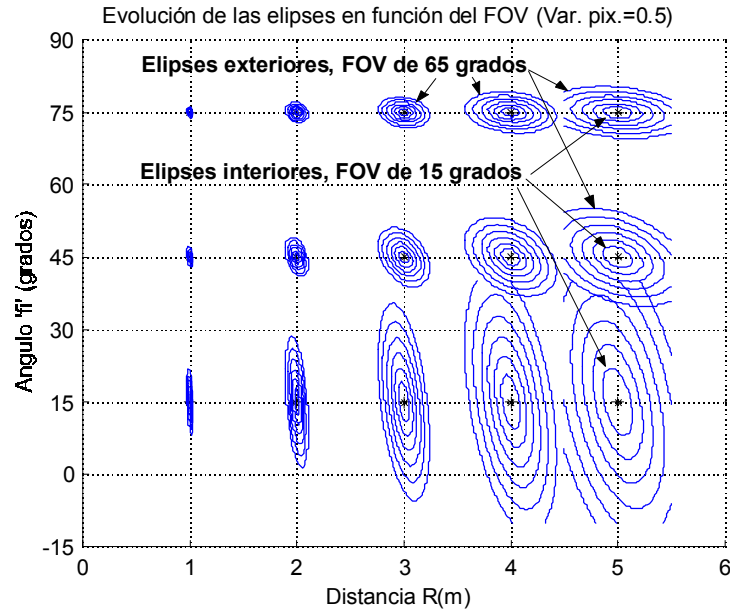


Figura 5-33: Evolución de las elipses de error en función de la posición y del campo de visión horizontal, FOV . Condiciones de medida: $\alpha = 90^\circ$, varianza de centroides $\sigma^2 = 0.5 \text{ pixel}^2$. Variaciones en FOV entre 15 y 65 grados, en intervalos de 10° .

con la óptica de 6.5 mm posee un FOV de:

$$FOV = 2 \arctan \left(\frac{5.4 \text{ mm}}{2 \times 6.5 \text{ mm}} \right) = 45.114^\circ;$$

no obstante las varianzas de centroides seguirán refiriéndose a una resolución correspondiente a sensores VGA (640×480 píxeles), la cual permite obtener una imagen de buena definición usando dispositivos estándar, de coste más reducido que otros sensores más específicos. En el caso del sensor descrito, el tamaño de pixel es de:

$$1\text{pixel} = 8.4 \mu\text{m} \simeq \frac{5.4 \text{ mm}}{640}.$$

La figura 5-33 ilustra la dependencia encontrada entre las elipses de incertidumbre y el campo de visión horizontal, FOV . Se corrobora la intuición de un escalado en las dimensiones de las elipses, pues una disminución de FOV equivale a realizar un *zoom* sobre la imagen lo cual aumentaría el tamaño relativo de los segmentos de la marca y, en consecuencia, reduciría los efectos del ruido de detección de centroides sobre los resultados μ .

Los detalles de la evolución particular de las seis componentes de $\mathbf{Q}_\mu$ se muestran en el montaje

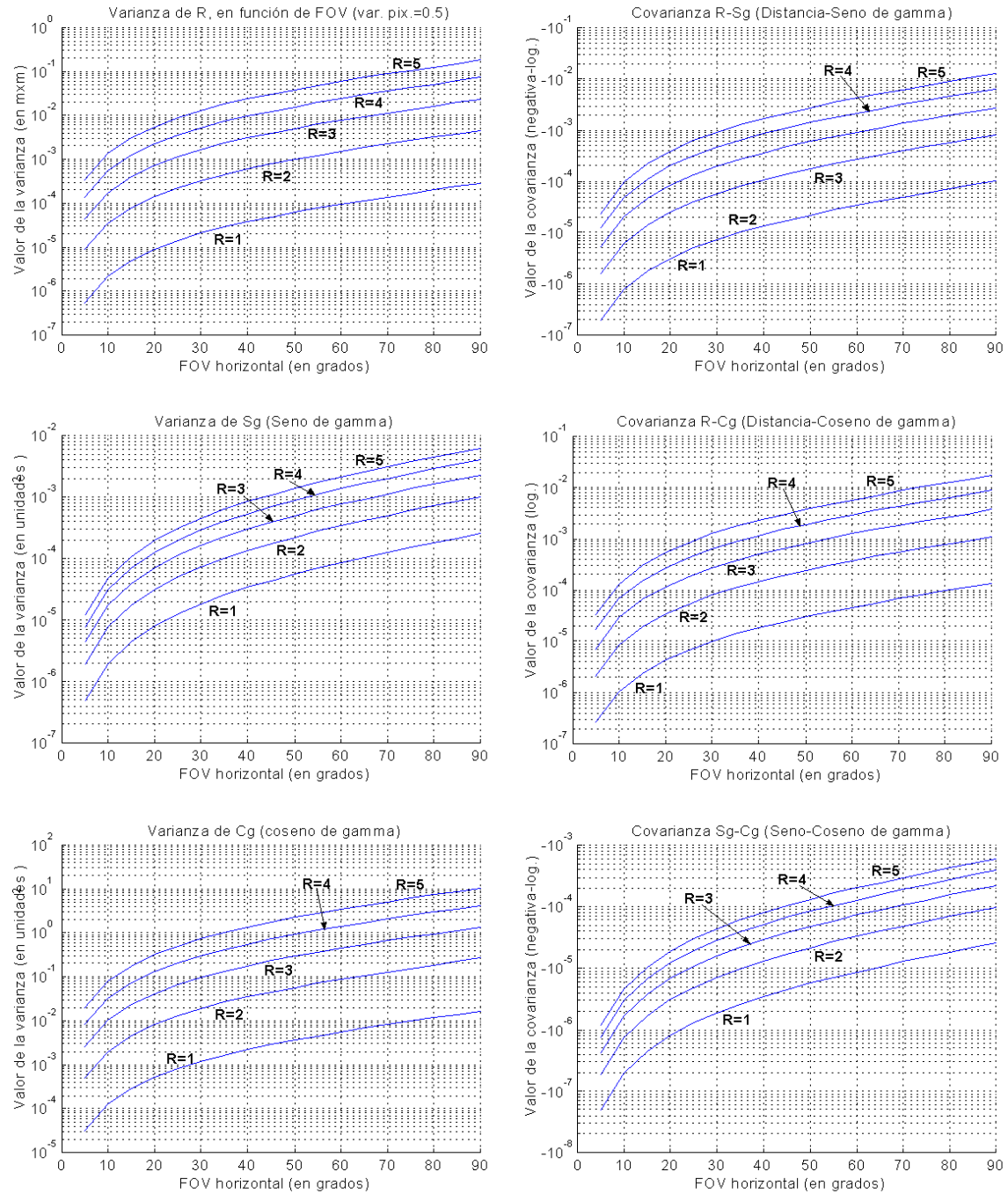


Figura 5-34: Representación de las componentes de Q_μ en función del campo de visión horizontal, FOV . Condiciones de medida: elevación $\alpha = 90^\circ$, giro $\phi = 45^\circ$, varianza de centroides $\sigma^2 = 0.5 \text{ pixel}^2$.

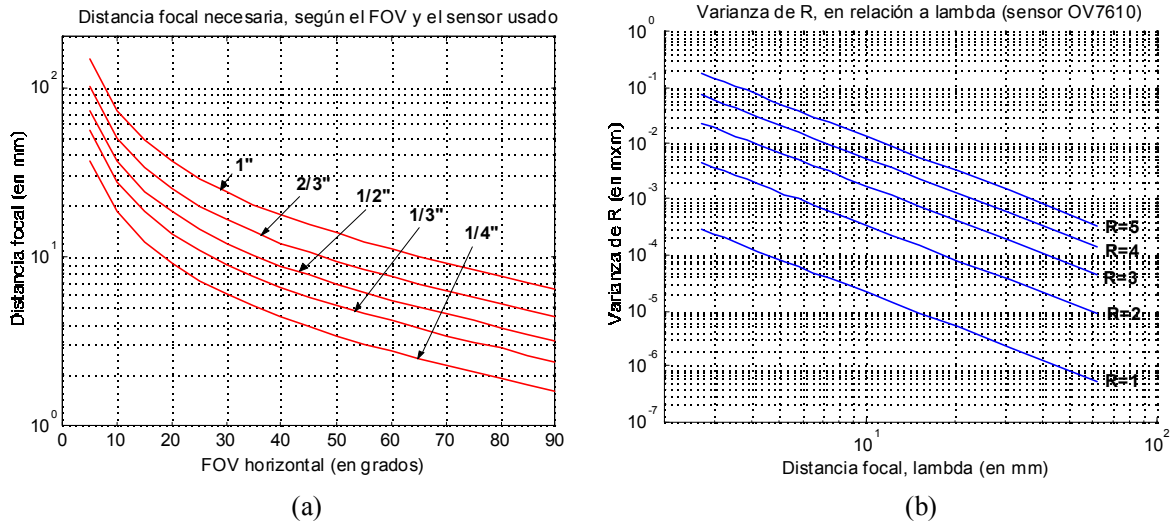


Figura 5-35: Características de interés en la óptica usada. (a) Distancia focal necesaria para un FOV dado, dependiendo del tamaño del sensor, en pulgadas. (b) Relaciones entre la distancia focal y la varianza σ_{RR}^2 obtenida, con la distancia R como parámetro; datos para el sensor OV7610, de $1/3''$.

de gráficas de la figura 5-34, las cuales se han particularizado para un ángulo de giro $\phi = 45^\circ$. Se comprueba la monotonía creciente, en módulo, de todas las varianzas y covarianzas según crece el FOV , aunque es más interesante observar la fuerte disminución (con mayor pendiente) experimentada al reducir ese mismo campo de visión al entorno de los 5° o 10° . Además, las ópticas de menor FOV experimentan menos problemas de distorsión que las de mayor FOV , lo cual incidiría en una mejor tolerancia a la imprecisión en el modelado de efectos de segundo orden como la distorsión radial.

La figura 5-35-a ilustra las relaciones existentes entre FOV , la distancia focal λ y el tamaño del sensor; para este último dato, se ha adoptado la clasificación habitual de los sensores de imagen en pulgadas, si bien las dimensiones reales pueden variar de uno a otro aún siendo del mismo tipo en pulgadas, por lo que siempre habrá que consultar el dato exacto según el fabricante del que se trate. Evidentemente, cuanto más grande es el sensor, mayor FOV se obtiene con la misma óptica λ .

Datos correspondientes al sensor ejemplo, el OV7610 clasificado como de $1/3''$, se han usado en la figura 5-35-b para obtener una relación entre la varianza en σ_{RR}^2 y la distancia focal λ , con la distancia R como parámetro. Se observa claramente cómo aumenta la fiabilidad de la medida al aumentar la distancia focal λ o, lo que es lo mismo, al hacer un *zoom* de la imagen reduciendo el FOV .

5.4.6 Estimación del alcance máximo del sistema de posicionamiento

Por alcance máximo se debe entender la distancia máxima R , entre marca y cámara, que podrá existir para un error tolerable en la medida de posición. Este dato no coincide, matemáticamente, con lo que sería la distancia D en la horizontal, la cual sería una proyección de R sobre el suelo y dependería del ángulo α de elevación, pero considerando α muy próximo a 90° :

$$D = R \sin \alpha|_{\alpha \rightarrow 90^\circ} \simeq R,$$

con lo que se considerarán los datos obtenidos para R como los de alcance también en horizontal. Recuérdese además que la incertidumbre de la medida crece con α , con lo que en la práctica se está realizando un análisis de peor caso.

Respecto al criterio a usar para la determinación del alcance, usar las seis componentes de la matriz de covarianzas $\mathbf{Q}_\mu$ no resulta eficaz, por el gran número de variables implicadas. Sin embargo, la varianza σ_{RR}^2 resulta interesante a estos efectos pues su evolución con cualquiera de los parámetros estudiados (elevación α , giro ϕ , campo de visión FOV) resulta similar a la del resto de componentes pero, además resulta ser prácticamente independiente a las otras dos variables de salida, $\sin \gamma$ y $\cos \gamma$, lo cual justifica un análisis restringido a la distancia R . Para diferenciar el valor estimado de σ_{RR}^2 del real, al que se obtenga del nuevo desarrollo se le denominará con un sólo subíndice: σ_R^2 .

Se tomará como base el estudio de la propagación del error de medida justificado en la sección 5.4.2, restringido a la medida de la distancia R . Se parte entonces del vector de salida siguiente:

$$\mu_R = \begin{bmatrix} z_1 & z_3 \end{bmatrix}^T,$$

reduciendo posteriormente la matriz $\mathbf{Q}_R$ obtenida a un único escalar σ_R^2 mediante la relación:

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{4}(\sigma_{z_1 z_1}^2 + \sigma_{z_3 z_3}^2 + 2\sigma_{z_1 z_3}^2),$$

ya definida anteriormente.

El sistema de ecuaciones correspondiente a la medida de las distancias parciales z_1 y z_3 , en forma implícita, es:

$$f_\alpha(\mathbf{w}_k, \mu_z) = \begin{bmatrix} (u_2 - u_1)z_1 + \delta_v u_2 \cos \alpha \\ (v_2 - v_1)z_1 - \delta_v (\lambda \sin \alpha - v_2 \cos \alpha) \\ (u_4 - u_3)z_3 - \delta_v u_4 \cos \alpha \\ (v_4 - v_3)z_3 + \delta_v (\lambda \sin \alpha - v_4 \cos \alpha) \end{bmatrix} = 0, \quad (5.54)$$

en donde el vector de medidas es el mismo $\mathbf{w}_k$ definido en el sistema 5.47, y el de parámetros a ajustar son las medidas de distancias, μ_z . No obstante, tal sistema aparece perfectamente desacoplado en z , pues las ecuaciones para z_1 (las dos primeras) no comparten ni medidas (u_i, v_i) ni distancias z_i con las correspondientes a z_2 (las dos segundas), por lo que podrán considerarse como sistemas independientes. De esta forma, dada la incorrelación existente entre z_1 y z_3 en el sistema 5.54, y apoyándose en la relación lineal $R = \frac{1}{2}(z_1 + z_3)$, la varianza σ_R^2 buscada será:

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{4} (\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_3}^2).$$

Consecuentemente con el objetivo de encontrar una expresión simplificada para determinar el alcance máximo, podemos considerar que, dada la gran distancia relativa existente $z_1 \simeq z_3$ al igual que sus propias varianzas, o sea:

$$\sigma_{z_1}^2 \simeq \sigma_{z_3}^2 \quad \Rightarrow \quad \sigma_R^2 = \frac{1}{4} (\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_3}^2) \simeq \frac{\sigma_{z_1}^2}{2}, \quad (5.55)$$

con lo que se obtendrá únicamente la expresión de $\sigma_{z_1}^2$ a partir de un sistema de ecuaciones reducido y se aplicará posteriormente la aproximación citada para obtener σ_R^2 . Sea pues el sistema

$$f_b(\tilde{\mathbf{w}}_k, \mu_z) = \begin{bmatrix} (u_2 - u_1)z_1 + \delta_v u_2 \cos \alpha \\ (v_2 - v_1)z_1 - \delta_v (\lambda \sin \alpha - v_2 \cos \alpha) \end{bmatrix} = 0, \quad (5.56)$$

con el vector reducido de medidas

$$\tilde{\mathbf{w}}_k = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_2 & v_2 \end{bmatrix}.$$

A partir de las definiciones dadas en la sección 5.4.2, los vectores $\mathbf{g}_k$ del sistema reducido resultan ser:

$$\mathbf{g}_k \rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1^T \\ \mathbf{g}_2^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z_1 & 0 & z_1 + \delta_v \cos \alpha & 0 \\ 0 & -z_1 & 0 & z_1 + \delta_v \cos \alpha \end{bmatrix},$$

de los cuales se obtienen los escalares:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_1^T \mathbf{S}_w \mathbf{g}_1 &= \sigma^2 (z_1^2 + (z_1 + \delta_v \cos \alpha)^2) = M \\ \mathbf{g}_2^T \mathbf{S}_w \mathbf{g}_2 &= \sigma^2 (z_1^2 + (z_1 + \delta_v \cos \alpha)^2) = M \end{aligned}$$

La matriz $\mathbf{H}$ se reduce a:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1^T \\ \mathbf{h}_2^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u_2 - u_1) \\ (v_2 - v_1) \end{bmatrix}.$$

y la matriz $\mathbf{G}$ queda:

$$\mathbf{G} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} \frac{(u_2 - u_1)}{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2} & \frac{(v_2 - v_1)}{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2} \end{bmatrix}$$

De esta forma, la varianza buscada es:

$$\sigma_{z_1}^2 = \mathbf{G} \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \mathbf{G}^T = \frac{M}{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2} = \frac{\sigma^2 (z_1^2 + (z_1 + \delta v \cos \alpha)^2)}{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}.$$

La expresión anterior admite una simplificación en su denominador; si se considera una elevación próxima a la horizontal ($\alpha \rightarrow 90^\circ$), las proyecciones de las líneas verticales de la marca sobre el PI son aproximadamente verticales también, independientemente del ángulo de giro γ , por lo que se puede establecer que:

$$(u_2 - u_1)^2 \ll (v_2 - v_1)^2.$$

La dimensión $(v_2 - v_1)$ puede ser nombrada como Δv , siendo su definición la medida de la proyección de las líneas verticales de la marca sobre el PI, con $\alpha \rightarrow 90^\circ$. De acuerdo con esta definición, se puede establecer la siguiente relación al aplicar semejanza de triángulos a la estructura resultante:

$$\frac{\Delta v}{\lambda} = \frac{\delta_v}{R} \quad \rightarrow \quad \Delta v = \lambda \frac{\delta_v}{R}.$$

Sustituyendo z_1 por R , Δv por su expresión equivalente y utilizando la relación definida en 5.55, resulta la siguiente expresión para σ_R^2 :

$$\sigma_R^2 = \frac{\sigma^2 (R^2 + (R + \delta v \cos \alpha)^2)}{2 \left(\lambda \frac{\delta_v}{R} \right)^2},$$

la cual, haciendo $\alpha \rightarrow 90^\circ$ y despejando R , como expresión del alcance máximo, lleva al resultado

final:

$$R = \sqrt{\lambda \delta_v \left(\frac{\sigma_R}{\sigma} \right)}. \quad (5.57)$$

La ecuación 5.57 muestra de forma cuantitativa la forma de aumentar el alcance que, de forma implícita, se ha hecho evidente en el resto del análisis; el alcance es mayor si:

- Aumenta la distancia focal de la óptica, lo que equivale a disminuir el FOV .
- La longitud de los segmentos verticales de la marca se aumenta.
- Se admite un mayor error (desviación típica σ_R) en la determinación de R .
- Se consigue un menor error (desviación típica σ) en la detección de centroides.

En este último caso cabe destacar que σ también se reduce si, para una misma superficie de sensor, se reduce el tamaño de pixel, lo cual equivale a sensores de mayor resolución (mayor número de píxeles), pues la precisión de la detección de centroides sólo puede establecerse en unidades de imagen, independientemente del tamaño físico de éstos.

En la expresión 5.57, la distancia focal λ puede ser sustituida en función del FOV del sensor, dato más útil al reflejar en un sólo número óptica y tamaño de sensor. Así, teniendo en cuenta la expresión del FOV dada por 5.53, se obtiene una expresión más práctica para el alcance:

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_R}{\sigma} \right) \frac{\delta_v W}{2 \tan(0.5 * FOV)}} \quad , \quad (5.58)$$

en donde W y FOV son el ancho del sensor y el campo de visión respectivamente, ambos en la horizontal.

La figura 5-36 se ha obtenido usando la expresión del alcance máximo definida por la ecuación 5.58. Como parámetro de la familia de curvas se ha tomado el FOV , mientras que para W se ha elegido el del sensor de referencia de este estudio (OV7610), de formato 1/3". El cociente $\frac{\sigma_R}{\sigma}$, entre la desviación típica de la medida de la distancia radial, R , y el de la medida de centroides, ambos en metros, es una variable de entrada adecuada a efectos prácticos, pues una vez conocida la precisión del sistema de visión en la detección de centroides, basta elegir la desviación típica σ_R deseada para la estimación de la distancia para saber el alcance máximo del sistema de posicionamiento.

Por ejemplo, sabiendo que el tamaño de pixel del OV7610 es de $8.4 \mu\text{m}$, una varianza de 0.5 pixel^2 se corresponde con una desviación típica de $\sigma = 5.94 \mu\text{m}$. Si se desease una desviación típica en la medida de R inferior a 10 cm, el cociente $(\sigma_R/\sigma) \simeq 1.7 \cdot 10^4$, que con una óptica de $FOV = 45^\circ$ (distancia focal de 6.5 mm), resulta en un alcance máximo de unos 4 metros, según una estimación

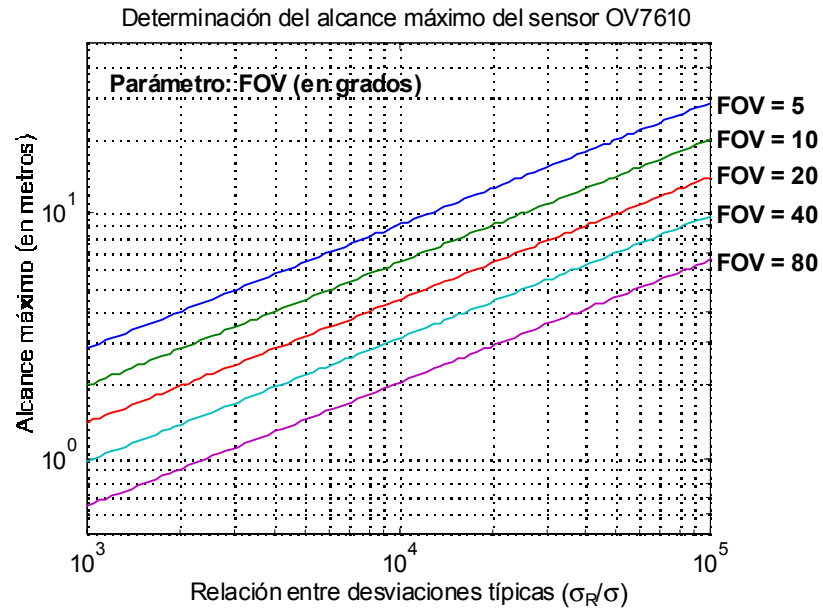


Figura 5-36: Alcance máximo, en metros, del sistema de posicionamiento en función del cociente entre desviaciones típicas en R y de detección de centroides (σ_R/σ), ambas en metros. Parámetro de la familia de curvas: campo de visión horizontal, FOV , en grados.

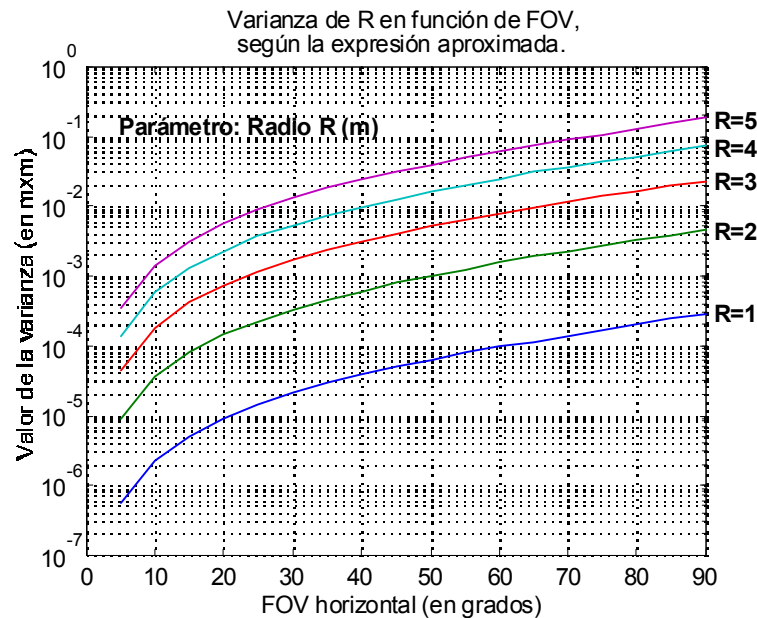


Figura 5-37: Varianza de la estimación de la distancia a la marca, o radio R , en función del FOV y obtenida mediante la expresión aproximada, con $\sigma = 0.5 \text{ pixel}^2$.

rápida sobre la gráfica, y un valor estimado de 3.73 m, usando la ecuación 5.58. De la misma forma, puede comprobarse cómo al disminuir el FOV hasta los 5° , con las mismas desviaciones típicas el alcance excede de los 10 m (llega hasta los 11.6 m).

La corrección de la aproximación para σ_R^2 , definida por la ecuación 5.58, se demuestra gráficamente en la figura 5-37; en la misma, se representa la evolución de la componente σ_{RR}^2 de la matriz de covarianzas $\mathbf{Q}_\mu$ en función del FOV , y con la distancia radial R como parámetro. Se comprueba la coincidencia, casi exacta, entre la gráfica de la figura 5-37 y la correspondiente a σ_{RR}^2 en la figura 5-34 (esquina superior izquierda). La muy ligera diferencia existente entre los valores estimado, σ_R^2 , y real, σ_{RR}^2 , de la varianza de la estimación de R estriba en la desestima de los efectos que el ángulo de giro, γ , provoca sobre el error de medida en la coordenada z .

5.4.7 Discusión sobre el emplazamiento de las marcas artificiales

Para finalizar el modelo del sistema de posicionamiento mediante marcas artificiales diseñado, cabe realizar una serie de reflexiones sobre los lugares más convenientes para la instalación del SPL, al respecto tanto de las marcas sobre los muros de los recintos como de la unidad de cámara a bordo del vehículo. Es propósito del autor no limitar sin necesidad las posibilidades de instalación del sistema, por lo que sólo se hará hincapié en ciertos detalles de interés aportando más bien *sugerencias* fácilmente realizables.

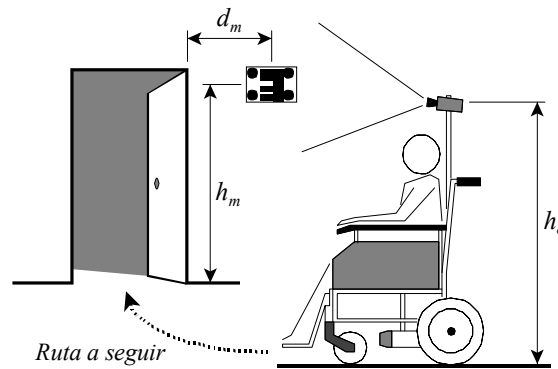


Figura 5-38: Notas sobre la ubicación de las MPL.

Respecto a la ubicación de la cámara, ésta no tiene más restricciones que las puramente físicas, es decir: métodos de anclaje, tipos de soporte, peso del conjunto unidad *pan-tilt* más cámara, etcétera. Si su aplicación es a bordo de una silla de ruedas, tal y como se plantea desde el origen de esta tesis, sí existe una única salvedad al respecto, lógica por otra parte; ésta es la altura a la cual se ubica el objetivo de la cámara: deberá permitir observar todos los alrededores de la silla y evitar

los obstáculos a la visibilidad más habituales, como son las propias personas que rodean al usuario del vehículo. Una posibilidad razonable de instalación está en una altura de cámara, h_c , de entre 1.4 y 2 metros, como ya se mencionó anteriormente. No obstante, la altura de la cámara puede estar limitada por otras razones como la estética o las vibraciones en lo alto del previsible mástil de instalación (figura 5-38).

Respecto a la marca artificial en sí, usando como criterio la visibilidad, se debería instalar en lugares despejados de los muros y en alturas, h_m , comprendidas entre 1.8 y 2.4 metros, aunque ninguno de estos valores en altura se muestra particularmente crítico. Sí resulta conveniente, no obstante, que la diferencia de alturas entre cámara y marca no sea exagerada para evitar aumentar la distancia radial R , innecesariamente, sobre la distancia horizontal D , la cual es la de verdadero interés práctico.

Respondida la pregunta sobre las alturas de cámara y marca, queda abierta aún la pregunta de los lugares más idóneos para su instalación. Para ello resultan de gran interés los resultados de los análisis anteriores.

El SPL es notablemente más preciso en la estimación de ángulos de giro más forzados respecto a la marca ($\phi \rightarrow \pm 90^\circ$) que en posiciones frontales a ella; por otro lado, la estimación de distancias es notablemente más precisa que la del ángulo de giro y resulta prácticamente independiente de esta última.

Todo esto lleva a la conclusión de que la mejor ubicación para las marcas sería aquella en la que las MPL aparecieran *de soslayo* en relación con la ruta preferente o más habitual del vehículo; por ejemplo: en el recorrido de un pasillo, debiera estar en las paredes laterales y no al fondo del mismo; si se trata de una habitación regular, debiera colocarse con el mismo criterio en las paredes secundarias, evitando ubicaciones aparentemente más lógicas como encima de la puerta de salida o sobre el puesto de trabajo (figura 5-39).

Una premisa a tener siempre en cuenta, y que ayudaría a encontrar una buena ubicación en todo caso, es la de mantener R por debajo del alcance máximo (cuanto más baja mejor, de hecho) pero buscando ϕ grandes. Así, para pasar con mayores garantías a través de una puerta, y supuesto un conjunto sensor-óptica como el estudiado, es preferible colocar la marca a 1 metro a izquierda o derecha del dintel de la misma (distancia d_m en la figura 5-38). Estos datos son extrapolables a otros sensores y ópticas, sin más que conocer datos sobre su alcance máximo, según lo establecido por las ecuaciones 5.57, 5.58 y las gráficas de las figuras 5-36 y 5-37.

Por último, resulta igualmente importante señalar que la marca en sí no limita el alcance máximo del SPL; con la misma MPL, en el formato DIN-A4 tan fácil de obtener, el alcance máximo puede aumentarse actuando sólo sobre el dispositivo a bordo del vehículo, esto es la unidad de *pan-tilt*,

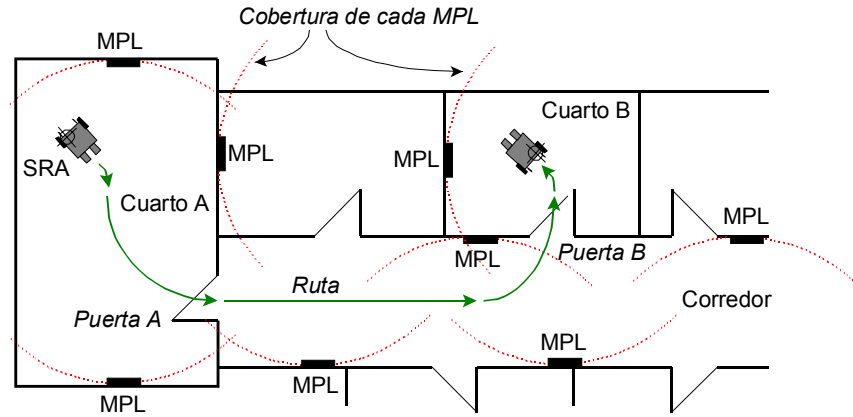


Figura 5-39: Sugerencia de ubicación de marcas en una ruta típica. Compruébese cómo las zonas de cobertura de las marcas se solapan convenientemente a lo largo del corredor y cómo se ubican las MPL en las paredes de un recinto dado.

la cámara y su óptica. Incluso, como ya se mencionó en el capítulo anterior, pueden combinarse distintas ópticas para distintos alcances, bien sea mediante un *zoom* motorizado, lo que plantearía problemas de calibrado y un coste de instalación y mantenimiento notables, o mediante sendas cámaras con distintas ópticas montadas sobre el mismo soporte, solución más económica e incluso fiable en el estado actual de la tecnología.

Es por tanto la unidad a bordo del vehículo la responsable de las prestaciones últimas del Sistema de Posicionamiento y Localización, llevando el coste del sistema sólo al vehículo, siendo mínima (prácticamente nula) la inversión a realizar en el edificio.

5.5 Comprobación experimental del sistema

En la comprobación de los modelos descritos se han empleado la misma batería inicial de 300 imágenes empleada para comprobar la detección y segmentación de características de la MPL. Tal y como se indicó en el capítulo anterior, este repertorio de datos procede de la captura de 10 imágenes en 30 posiciones-orientaciones distintas, identificadas como puntos $P_{R-\phi}$; las distancias R pertenecen al intervalo $[1..5]$, tomadas de metro en metro, y las desviaciones angulares ϕ , respecto a la normal de la marca, están entre 0° y 75° , espaciadas 15° entre sí.

De las 300 imágenes posibles, se han usado 280 (el 93.3%) como entradas al algoritmo de posicionamiento. Las otras 20 (el 6.7% restante), no pudieron ser usadas al fallar alguno de los procesos de obtención de centroides; las diferentes circunstancias referentes a estos casos se documentaron adecuadamente en su momento (capítulo cuarto).

Para la estimación de la matriz de covarianza de medida, $\mathbf{Q}_\mu$, es necesario establecer en primer lugar la varianza de medida de pixel, σ^2 . Esta covarianza, a la vista de los resultados de la tabla 4.2, resulta ser dependiente del punto de medida, aunque finalmente se pudo establecer un valor estimativo de $\sigma^2 = 0.022 \text{ pixel}^2$, correspondiente a una desviación típica estimada de valor $\sigma = 0.15$ pixels. Este será el valor de entrada adoptado en la comprobación teórica de los datos experimentales.

La cámara se calibró mediante el método de [Bouguet 99], referenciado asimismo en el capítulo cuarto. Las salidas normalizadas de los cuatro centroides de las 280 imágenes usadas finalmente en el experimento se representan en la figura 5-40; nótese que, siguiendo el modelo de Bouguet, la distancia focal, λ , es unitaria.

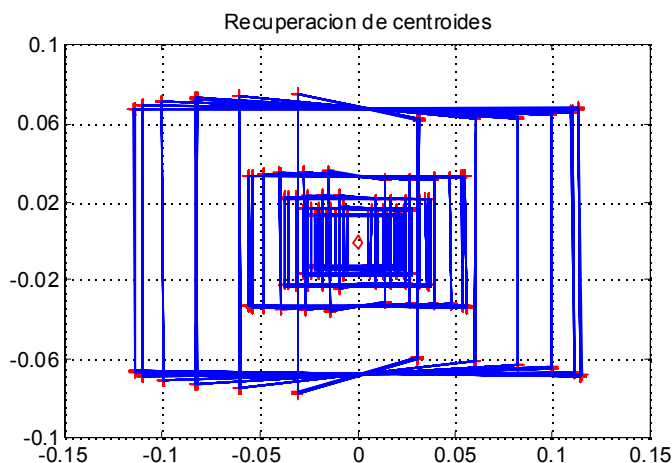


Figura 5-40: Proyección de los centroides de todas las imágenes recuperadas (280 en total), sobre el plano imagen normalizado ($\lambda = 1$).

En la figura citada se observa también la reconstrucción de todas las marcas, en todas las posiciones y orientaciones de prueba. No obstante, es preciso mencionar que el ajuste de estos puntos sobre el origen $(0, 0)$ del PI normalizado, se realizó sustrayendo a todas las coordenadas un cierto *offset*, constante y no superior a las 0.1 unidades, procedente del proceso de medida manual empleado.

5.5.1 Resultados del modelo basado en puntos de fuga.

La batería de datos experimentales se introdujo, en primer lugar, en el modelo de posicionamiento basado en puntos de fuga. Este modelo sólo necesita de la información de los centroides para recuperar la posición-orientación en 3D, vector $\mathbf{C}$.

El resultado de la verificación del modelo citado se muestra en la figura 5-41; a la izquierda se

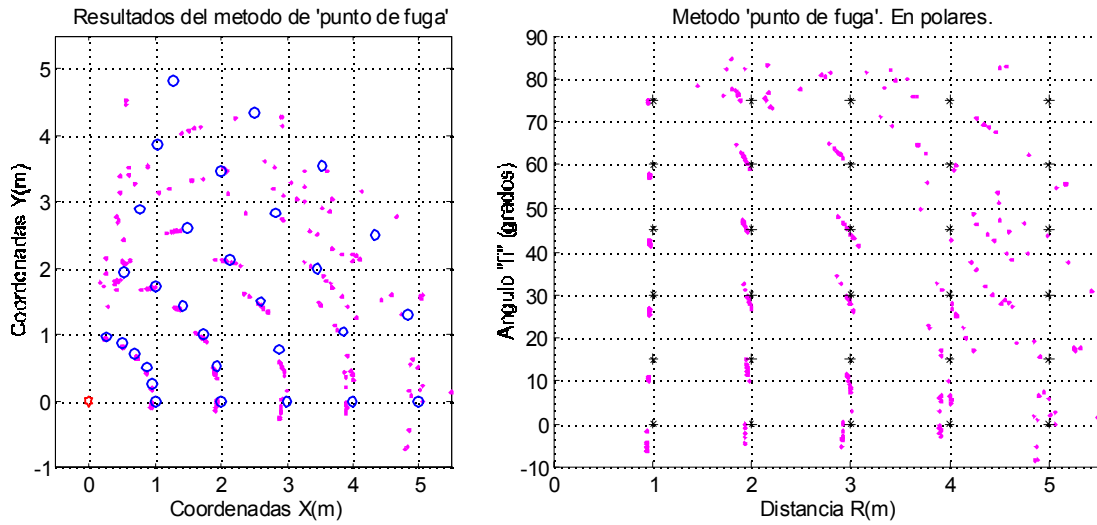


Figura 5-41: Resultados experimentales del modelo de posicionamiento basado en puntos de fuga.

muestran los resultados en coordenadas cartesianas, siendo los círculos las posiciones de referencia; a la derecha se representan los mismos datos en coordenadas polares.

Es de notar que, a pesar del bajo valor de la varianza de medida ($\sigma^2 = 0.022 \text{ pixel}^2$), éste no resulta ser lo suficientemente bajo como para obtenerse un posicionamiento fiable en un área de cobertura notable. Estos resultados no hacen otra cosa sino corroborar los argumentos expuestos en la sección 5.3; puede también comprobarse la similitud del patrón de puntos que, en coordenadas polares, existe entre los datos experimentales de la figura 5-41 y los procedentes de la simulación para una varianza similar, de valor $\sigma^2 = 0.01 \text{ pixel}^2$, y que se encuentran representados en la figura 5-7.

5.5.2 Resultados del modelo simplificado de posicionamiento

Los mismos datos de centroides, más los valores nominales de los ángulos de elevación y alabeo ($\alpha = \frac{\pi}{2}$, y $\beta = 0$), se pasaron como entradas al modelo de posicionamiento simplificado, del cuál se pretende obtener el vector de posición-orientación, $\mathbf{M}$, sobre el plano XY .

La figura 5-42 ilustra los resultados obtenidos. De nuevo se comprueba la validez del modelo propuesto en esta tesis y la bondad del algoritmo propuesto por el autor. En las figuras se observan las siguientes circunstancias:

- La concentración de puntos, correspondientes a las salidas del algoritmo de posicionamiento, en zonas de dimensiones relativas muy reducidas.

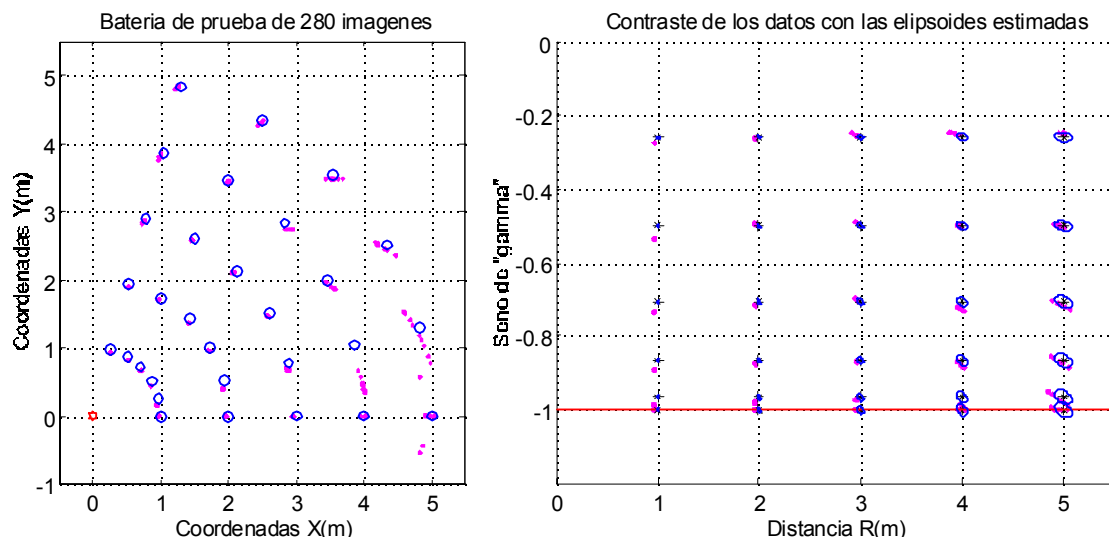


Figura 5-42: Resultados experimentales del modelo de posicionamiento simplificado.

- La correspondencia de la forma de tales zonas de agrupamiento con las elipsoides de error, estimadas para cada punto nominal usando la varianza de medida de referencia, esto es, $\sigma^2 = 0.022 \text{ pixel}^2$.

Es observable, sin embargo, una cierta desviación entre los datos reales y los puntos de referencia. Esta desviación es atribuible a los métodos manuales empleados en el emplazamiento de marcas y cámara, los cuales están sujetos a imprecisiones inevitables. No obstante, la exactitud de los algoritmos propuestos por el autor y la idoneidad del modelo del SPL para la aplicación al campo de la Asistencia a la Movilidad han quedado suficientemente probados.

La figura 5-43 es una ampliación de los datos correspondientes al punto de referencia P_{4-45} (distancia $R = 4 \text{ m}$, desviación angular $\phi = 45^\circ$). La elipsoide teórica indica una estimación de error de unos $\pm 5 \text{ cm}$, en distancia, y de $\pm 1^\circ$, en desviación angular; por su parte, la distribución de los puntos medidos presenta una desviación total de unos 8 cm , en distancia, y de poco más de 1° en ángulo; por otro lado, la diferencia existente entre el punto de referencia teórico, P_{4-45} , y el centro de la zona correspondiente a los datos reales resulta ser de apenas 2 cm y 1.5° ; es evidente que tales diferencias son perfectamente asumibles, teniendo en cuenta el entorno de experimentación ya citado.

En este punto puede hacerse una comparación de resultados con modelos documentados por otros investigadores; P. Remagnino *et al.*, en [Remagnino 95], usan una marca rectangular para estimar la posición de una cámara en un sistema de visión activa, obteniéndose errores del orden de metros en un punto situado a 2 m de distancia y con $\phi = 60^\circ$, lo cual resulta excesivo para poder

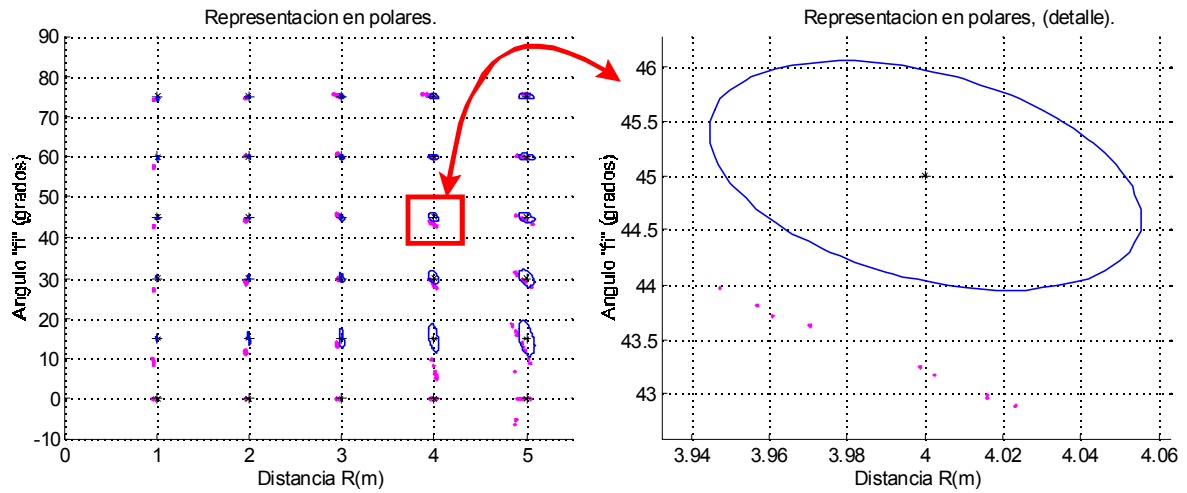


Figura 5-43: Resultados del modelo de posicionamiento simplificado en coordenadas polares. Detalle del punto P_{4-45} , para $R = 4$ m y $\phi = 45^\circ$; distribución de posiciones recuperadas y elipsoide asociada a dicho punto.

ser utilizado como referencia.

Jae Kim y Hyung Cho, en [Kim 94], utilizan una marca de 24 cm de ancho, basada en patrones verticales de 6 cm, para obtener la posición de un robot móvil. Los autores limitan el área de cobertura a 2 m de distancia de la marca, obteniendo a 1.8 m errores de posicionamiento del orden de ± 15 cm.

Otros sistemas, sin embargo, documentan mejores resultados que el SPL propuesto en esta tesis, como es el caso de [Lázaro 00]; sin embargo, cabe destacar que tales modelos hacen uso de procedimientos de triangulación, a partir de más de una marca, potencialmente mucho más exactos que el modelo de una sola marca aquí expuesto. A pesar de no ser situaciones comparables, sí pueden considerarse los resultados del SPL como muy prometedores, frente a estos sistemas, por sus altas prestaciones y por el bajo equipamiento necesario, tanto a bordo del vehículo como en infraestructura sobre el entorno.

5.6 Recapitulación

En el presente capítulo se han expuesto los fundamentos matemáticos y el modelado final del sistema de posicionamiento y localización, SPL, propuesto y diseñado por el autor. El SPL cubre los objetivos de una adecuada precisión, en consonancia con su aplicación a móviles autónomos como una SRA, a bajo coste gracias al uso de la marca artificial diseñada al efecto, la MPL, y necesitando sólo de

un subsistema de Visión Artificial de propósito general. El SPL estima la posición-orientación de la cámara a partir de la medida de la distorsión que experimenta el patrón de cuatro puntos de la MPL que, como esquinas de un rectángulo ficticio, se proyecta sobre el PI.

El autor analiza dos modelos para la determinación de la posición a partir de la información proporcionada por el citado patrón. Un primer modelo permite determinar la posición-orientación en 3D (esto es, el vector $\mathbf{C}$); éste usa exclusivamente los datos de la imagen para, estudiando los puntos de fuga de los rectángulos definidos por los cuatro puntos de la marca, obtener primero la orientación y luego, a partir de los ángulos de Euler recuperados, la posición del móvil, en un algoritmo de tipo $[\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{T}]$.

Este modelo, si bien no necesita de información externa para recuperar $\mathbf{C}$, es muy sensible a las imprecisiones en la recuperación de los parámetros de las rectas que conforman la marca, por lo que sólo es aplicable si la marca ocupa gran parte del PI, en caso contrario los errores en $\mathbf{C}$ resultan pronto inasumibles. El autor documenta las conclusiones del estudio realizado mediante simulaciones y análisis de sensibilidad.

El segundo modelo diseñado por el autor parte de este primero y mejora sus prestaciones. Con una ligera información adicional y ciertas restricciones posicionales respecto a los ángulos α y β de $\mathbf{R}$, se recupera la posición-orientación sobre el plano horizontal (vector $\mathbf{M}$, en 2D) con precisiones mucho mayores que en el primer modelo, lo cual aumenta notablemente su utilidad práctica a costa de una ligera complicación del *hardware* base (unidad de *pan-tilt*) y de los procedimientos de montaje y ajuste del sistema de cámara-soporte, al definir el autor unos márgenes de tolerancia en α y β que no deben ser rebasados.

Las prestaciones del segundo modelo del SPL han sido contrastadas mediante una serie de procedimientos matemáticos, tanto exactos como aproximados, observándose una indeterminación en el signo del ángulo de giro, ϕ , que provoca un patrón característico de errores '*en espejo*'.

La eliminación de tales errores necesita de información adicional sobre la dinámica del móvil, para lo cual se hace necesaria la incorporación de un sistema inercial de navegación (*dead-reckoning* mediante *encoders* o similar) que proporcione tal información. La conjunción de ambos sistemas, por ejemplo mediante un EKF tal y como se documenta en las referencias indicadas en su momento, representaría un potente sistema de posicionamiento absoluto-relativo, usando las características más destacadas de ambos sistemas con una redoblada fiabilidad; esta es, indudablemente, una de las más importantes líneas futuras de investigación a seguir a partir de los resultados de la presente tesis.

La comprobación experimental de los resultados predichos, refuerzan la conclusión de que el autor ha realizado una aportación importante en el campo de las Tecnologías de la Asistencia, AT, al haber diseñado un sistema de posicionamiento y localización, SPL, de notable precisión con una

relación prestaciones/coste perfectamente asumible por todos los implicados en el problema base cuya solución se pretendía conseguir:

1. Usuarios y familiares de usuarios de SRA's.
2. Fabricantes y suministradores de SRA's.
3. Terapeutas.
4. Responsables de edificios públicos o particulares, que deseen colaborar en la mejora de la accesibilidad.
5. Cualquier otro entorno en los que un vehículo autónomo necesite de un sistema de posicionamiento y localización.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

Para finalizar se exponen resumidamente, en el presente capítulo, las principales aportaciones realizadas por el autor en esta tesis y algunas conclusiones finales, extraídas de los trabajos que han acompañado su elaboración. Para terminar, se plantean una serie de líneas futuras de trabajo e investigación, en continuidad con los que hasta aquí se han expuesto.

6.1 Aportaciones y conclusiones finales

El conjunto de las aportaciones del autor en el campo de la Asistencia a la Movilidad puede dividirse en varios grupos. En primer lugar, tomando en consideración los trabajos sobre la arquitectura propuesta para una SRA se tiene:

- La propuesta y diseño de una estructura *hardware*, completamente modular, que cumple la premisa de escalabilidad, la cual es una condición indispensable para poder dar solución, con una sola plataforma base, a cualquier tipo de discapacidad motriz sin más que adaptar los interfaces necesarios a la silla de ruedas. En esta línea, el autor extiende la arquitectura hacia el entorno al especificar a bordo de la SRA un bus de comunicaciones estándar en el campo de la automatización industrial y doméstica, garantizando la interconectividad entre edificio y móvil. Con ello, el autor pretende resaltar la importancia de dar una solución global para este tipo de vehículos y en cualquiera de las actividades cotidianas que la persona con discapacidad debe afrontar.
- El diseño de una interfaz hombre-máquina orientada a permitir la conducción directa en caso de discapacidades motrices menos severas. Así, se responde a una de las condiciones previas de todo sistema de Asistencia a la Movilidad: dar prioridad al usuario frente a la máquina. En

esta línea, el autor diseñó dos alternativas de guiado adaptada a personas con distinto grado de discapacidad:

- Para aquellos que pueden aún realizar ciertos movimientos y acciones controlables con el *joystick*, aunque su tono muscular resulta insuficiente para una acción continuada, se ha diseñado un *joystick* discreto que permite manejar la silla únicamente con acciones momentáneas sobre el mismo.
- En caso de no poder usar las manos, el autor ha propuesto y diseñado un segundo modo de conducción, basado en la expulsión controlada de aire. Este método está concebido para sustituir a los lentos sistemas de barrido (o *scanner*) convencionales, siempre y cuando exista suficiente control de la respiración por parte del usuario.

En el deseo de aumentar la autonomía del vehículo, y pensando en disminuir las necesidades de atención y precisión en la conducción por parte del usuario, el autor realiza sus principales aportaciones con la propuesta y diseño de un sistema de navegación global, aplicable a entornos estructurados ligados a la actividad diaria de las personas con discapacidad motriz, tales como el hogar, el trabajo y otros lugares similares, todo ello con un coste mínimo en infraestructura.

- Los componentes principales del sistema de navegación propuesto son el mapa topológico del entorno, el cual se ha diseñado específicamente para los entornos descritos, y el Sistema de Posicionamiento y Localización (SPL) que forma el núcleo de esta tesis.
- Una de las aportaciones más importantes del autor es el diseño de una Marca de Posicionamiento y Localización (MPL) que incorpora en la misma múltiples informaciones, recuperables de forma eficiente mediante técnicas de Visión Artificial. La MPL presenta características distintivas que la hacen única entre los sistemas similares, diseñados por otros autores; así, dentro del actual conocimiento del autor, no existe ninguna otra marca artificial que reúna en la misma las siguientes características:
 - Combina información geométrica, para recuperar la posición relativa del sistema de visión respecto a la MPL, con información codificada, para indexar datos de interés para el sistema de navegación, como la localización absoluta de la marca respecto a un mapa topológico del entorno.
 - Es una marca 2D, plana, en formato estándar DIN-A4 y diseñada a partir de una serie de patrones geométricos en blanco y negro, fácilmente reproducible por cualquier usuario

potencial mediante medios informáticos de propósito general. Este factor incide positivamente en la posible implantación del sistema diseñado al requerir de una infraestructura mínima, para su puesta en marcha, y prácticamente nula, en su opción más simple, en el edificio.

- No se trata de un método de triangulación clásico, sino que se recupera de una sola MPL toda la información necesaria para obtener la posición-orientación y la localización del móvil, dentro de los márgenes de cobertura definidos.
- El diseño se ha realizado teniendo en cuenta las particularidades asociadas a un sistema móvil con ruedas, el cual se desplaza preferentemente sobre un mismo plano. De esta manera, se ha realizado un análisis en profundidad de las mejores condiciones de visibilidad para todos los parámetros geométricos presentes en la MPL; en consecuencia, la marca resulta ser visible en rangos superiores (en igualdad de condiciones) a los previstos por otros autores. Un efecto positivo de esta aumento de rango es el de poder cubrir mayores superficies con menor número de marcas; así, para cuartos de dimensiones y distribuciones medias, es suficiente una sólo marca por habitación en la mayoría de los casos.
- Una aportación más del autor, relacionada con la MPL, es la adopción de una estrategia rápida de detección de la presencia de marcas MPL en la imagen, mediante un análisis unidimensional de los datos de la imagen buscando un único patrón definitorio de la existencia de tal marca artificial. Se ha propuesto y diseñado un patrón de identificación de marca, basado en un código Barker de siete bits, y un algoritmo que permite su detección en un gran margen de distancias y ángulos de visión desde la cámara a bordo del móvil. Precisamente la incorporación al diseño de la marca de tal patrón de identificación permite una mayor eficiencia en el proceso de segmentación del resto de parámetros de la misma.
- En lo que atañe al proceso de posicionamiento del móvil a partir de los patrones circulares que a tal efecto incluye la MPL, el autor ha modelado dos procedimientos distintos.
 - El primero de los mismos sólo necesita como entrada los centroides de los patrones circulares de la MPL. Por contra, el estudio realizado por el autor demuestra la escasa utilidad práctica de tal modelo por las fuertes restricciones existentes al tratar de aumentar su rango de uso: la muy alta precisión en la detección de los centroides y el aumento de coste y/o tiempo de proceso asociado a tal condicionante limitan su interés. No obstante este modelo permitiría, en su caso, la calibración *on-line*, de los parámetros complementarios al segundo modelo.

- Con unas pequeñas restricciones referentes al sistema de cámara usado por el SPL, el autor especifica un segundo modelo para el SPL, el cual aumenta de forma drástica su aplicabilidad a sistemas móviles como aquellos que constituyen el objetivo inicial de la tesis: las SRA; sólo se necesita una restricción en el ángulo de alabeo del montaje y una cierta realimentación de los ángulos de elevación y giro, fáciles de obtener mediante una unidad de *pan-tilt* al uso. Con estas condiciones, el modelo especificado permite obtener la posición del móvil a distancias muy superiores, y con errores relativos inferiores, a los expuestos en trabajos similares y, por añadidura, a un coste muy inferior a sistemas comerciales comparables.
- Dadas las notables prestaciones del SPL restringido (segundo modelo), éste ha sido estudiado con el detalle necesario para su incorporación en sistemas de navegación con capacidades de integración multisensorial. A tal efecto, se ha obtenido un modelo de cuantificación del error cometido en la medida de la posición mediante la obtención de la matriz de covarianza asociada a cada solución. En este aspecto, cabe resaltar que el SPL no presenta errores acumulativos en tal estimación de la posición, tal y como sucede en los sistemas inerciales, por lo que cabe considerar al SPL como un sistema de posicionamiento absoluto, siendo las MPL sus correspondientes haces (o *beacons*) de referencia. Así, la fusión de los datos del SPL con otros sistemas sensoriales, como los inerciales, permitirán combinar las ventajas de ambos tipos de posicionamiento (absoluto y relativo, uno más lento el otro más rápido) aumentando en su conjunto la fiabilidad global de la estimación de la posición-orientación absoluta del vehículo.

6.2 Trabajos futuros

A partir de los resultados de esta tesis, en consonancia con las conclusiones extraídas y como continuación de éste y otros trabajos en Asistencia a la Movilidad, se plantean las siguientes acciones y trabajos futuros a realizar:

- Expandir las posibilidades de posicionamiento del SPL, incorporando la posibilidad de extraer cierta información de la estructura del propio entorno que refuerce la procedente del MPL. En concreto, se plantea la recuperación de las líneas más importantes formadas por la intersección entre paredes y/o suelos y, a partir de sus puntos de fuga, determinar la orientación de los planos principales del recinto, de forma similar a lo planteado en [Schuster 93] y [Nair 98]. Esta prestación facilitaría información adicional de posición relativa respecto a los planos citados, lo que permitiría actuar en una doble dirección:
 - Eliminar la incertidumbre angular en la recuperación de la orientación con el SPL.

- Facilitar la acción de los propios módulos de navegación a bordo del móvil en tareas como seguimiento de muros o pasillos.
 - Incrementar la información sobre la dinámica del vehículo, a partir de un análisis de la evolución temporal de las características de la imagen.
- Establecer un protocolo de elaboración de mapas topológicos y de codificación de recintos que facilite la integración del SPL en los entornos para los que se ha definido, esto es: hogar, puesto de trabajo y edificios oficiales y/o públicos. Este protocolo debiera partir de una cantidad de información mínima por parte de los potenciales usuarios, como pudieran ser los planos, en soporte informático o bien como imagen *bitmap*, y la descripción del tipo de edificio o recinto y su ubicación. La aplicación informática procedente del protocolo especificado sería parte integrante del propio SPL y permitiría a cualquier usuario generar los códigos de marcas e imprimir las mismas.
- Especificar completamente y diseñar una arquitectura de control a bordo de la SRA que permita hacer uso, de forma óptima, de las prestaciones que el modelo de SPL diseñado posee. A tal efecto, y como línea principal, se han de integrar otras técnicas más convencionales, como la navegación inercial, siguiendo un esquema basado en filtros de Kalman extendidos (EKF) similar al presentado en [Bonnifait 98].
- Profundizar en la definición de los módulos de interfaz de usuario (HMI) a fin de facilitar la interacción entre hombre y máquina. A tal efecto se pretende ubicar una pantalla táctil en la SRA, como medio de introducir o verificar comandos y cualquier otro flujo de información entre usuario y vehículo. Tal componente sería de gran importancia a la hora de establecer, sin ambigüedades, el plan de ruta deseado por el usuario, sea éste capaz de introducir su destino de forma directa, punteando sobre la pantalla, o indirecta, usando la información visual de la misma y algún procedimiento voluntario de confirmación tipo *scanner*, aplicable en casos severos de discapacidad motriz.
- Finalmente, aunque no menos importante, debe insistirse en la búsqueda de soluciones al problema de la seguridad a bordo de una SRA. Este es el gran tema pendiente en este tipo de vehículos y la barrera que separa las SRA de su extensión a los usuarios finales. Una de las opciones a explorar sería la de incorporar un sistema de marcado de aquellas zonas que constituyan un peligro a los usuarios de sillas de ruedas, tales como huecos de escaleras y similares, y que podrían hacer uso de las imágenes entregadas por el subsistema de visión artificial del SPL.

Apéndice A

Buses Serie en las Tecnologías de Rehabilitación

En el presente Anexo se presenta un estudio actualizado de los Buses Serie aplicables a una Silla de Ruedas Autónoma. El estudio comienza con aquellos sistemas específicamente concebidos para su aplicación a una silla de ruedas motorizada: el sistema DX, de la empresa Dynamic Controls Ltd; y el bus M3S, proyectado y promovido dentro de las iniciativas PITER de la Comunidad Europea.

Pero el estudio no se queda sólo en estos dos sistemas, sino que se amplía hacia los buses estándar dentro de lo que sería el entorno inmediato al usuario de una SRA: domicilio, trabajo y desplazamiento. Así se pretende resaltar el importante concepto de la *interacción con el entorno*, facilitada en el caso de usar alguno de estos buses a bordo de la SRA.

A.1 El sistema DX

La empresa Dynamic Controls Ltd.¹, sita en Nueva Zelanda, es líder en la producción y comercialización de componentes para sillas de ruedas motorizadas, tales como unidades de potencia, *joysticks*, controles alternativos (con el dedo, por ejemplo), controladores de luces (sillas de exteriores), motores secundarios (asientos ajustables), etc.

Entre los productos desarrollados por este fabricante se encuentra un amplio repertorio de dispositivos interconectables a través de un protocolo propietario: el sistema **DX**. Se trata de un bus a cuatro hilos:

- Dos hilos de intercambio de datos.

¹<http://www.DynamicMobility.co.nz>

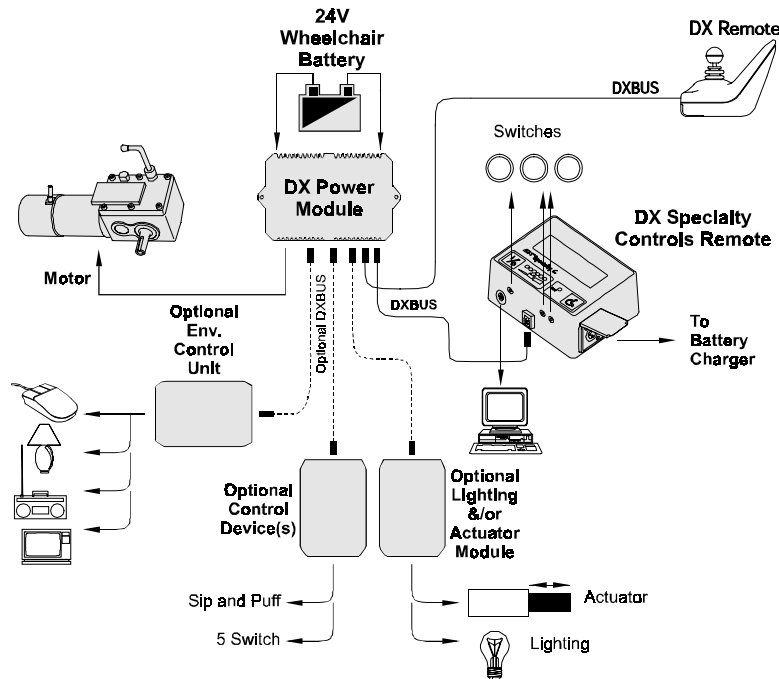


Figura A-1: Esquema de Bloques de una configuración completa de una silla de ruedas con el Bus DX, de Dynamic Controls Ltd. (Nueva Zelanda).

- Dos hilos de alimentación (positivo y negativo de batería).

La figura A-1 muestra un esquema de bloques de una configuración para una silla de ruedas, usando el bus DX, con múltiples opciones instaladas. Aunque los propietarios del sistema declaran a éste como un sistema abierto, la realidad es que no está reconocido como estándar por ningún organismo de normalización; tampoco es posible encontrar información técnica, en ámbitos públicos, para conocer más datos de su sistema (interfaz físico, velocidades de transferencia, tipo de datos, etc.) aunque sí es posible realizar desarrollos con este bus utilizando herramientas de desarrollo y documentación proporcionadas por el fabricante [Meade 97].

A.2 El bus M3S

El bus **M3S** (*Multiple Master Multiple Slave*) [Woerden 95] [Nelisse 98] fue inicialmente desarrollado en un proyecto específico dentro de la fase piloto del programa de investigación TIDE (*Technology Initiative for Disabled and Elderly people*) de la Comunidad Europea; su propósito inicial era el de crear una arquitectura modular que mejorase el acceso de dispositivos y sistemas dentro del campo de las Tecnologías de Asistencia y/o Rehabilitación. El concepto inicial se completó posteriormente

en otros proyectos TIDE, como el proyecto FOCUS [Overboom 97], comenzado en 1994, y cuyo propósito fue el establecimiento y completa definición de un método abierto de comunicación y control de sistemas integrados en este campo. La estandarización de este sistema corre a cargo del grupo de trabajo ISO de referencia ISO/TC-173/SC-1/WG-7, el cual ha generado el estándar ISO 7176 parte 17 (ISO 7176-17) con el nombre de *Interfaz serie para controladores de sillas de ruedas eléctricas*.

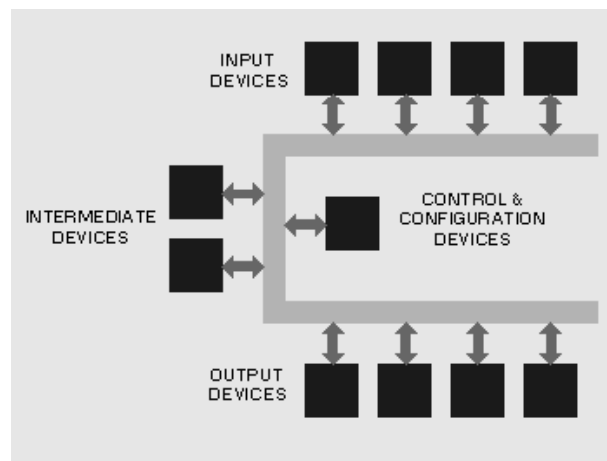


Figura A-2: Esquema funcional del sistema M3S.

En la figura A-2 se muestra un esquema funcional de los nodos del sistema; en esta figura puede apreciarse la igualdad de nivel de todos los nodos respecto al acceso al Bus. La agrupación de los mismos es a nivel lógico, siguiendo las pautas marcadas por el nodo o nodos de Control y Configuración; el resto de los nodos son agrupables en alguna de estas categorías:

- Nodos de entrada, correspondientes a los dispositivos de comando como: joystick, pulsadores, *scanners*, etc.
- Nodos de salida, que engloban a los actuadores, de distintos niveles y efectos, como: motores, brazos robóticos, controles remotos, interacción con el entorno, etc.

El bus M3S hace uso de una interfaz a 250kbit/s sobre un bus CAN (*Controller Area Network*), disponible en ciertos microcontroladores industriales. El bus CAN normaliza las dos primeras capas del modelo ISO/OSI (*Open Systems Interconnect*): la capa física y la de enlace; el propósito de la norma M3S es proporcionar el resto de soportes (capas 3-6) hasta la capa de aplicación, además de incluir ciertas prestaciones de seguridad. A nivel físico [Linnman 96], el bus M3S consta de seis líneas:

- Dos líneas de alimentación, que llevan el positivo y el negativo de la batería principal.

- Dos líneas de Bus CAN. Este bus es bidireccional y se propaga en modo diferencial.
- Dos líneas de seguridad y señalización.

La intención del equipo de desarrollo del Bus M3S es incluir el sistema a bordo de la silla de ruedas dentro de una super-red que permita, entre otras prestaciones, teleoperar otros dispositivos compatibles fuera de la propia silla pero en el entorno del usuario, como pueden ser: electrodomésticos, puertas automatizadas, ascensores, etc. Más detalles sobre este sistema pueden encontrarse en el servidor del Instituto TNO de Delft, en Holanda, más concretamente en la oficina de diseminación del proyecto M3S². Además, y en consecuencia con el deseo de implantar este sistema como un estándar abierto, el TNO facilita a los diseñadores de equipos para sillas de ruedas los códigos fuente de las rutinas de acceso a canal y protocolo de comunicaciones. En la figura A-3 se muestra un ejemplo de silla de ruedas, construida en el TNO (Holanda) como prototipo experimental, y que incorpora dispositivos procedentes de seis fabricantes distintos a bordo de una silla de ruedas estándar fabricada por Permobil, Suecia.

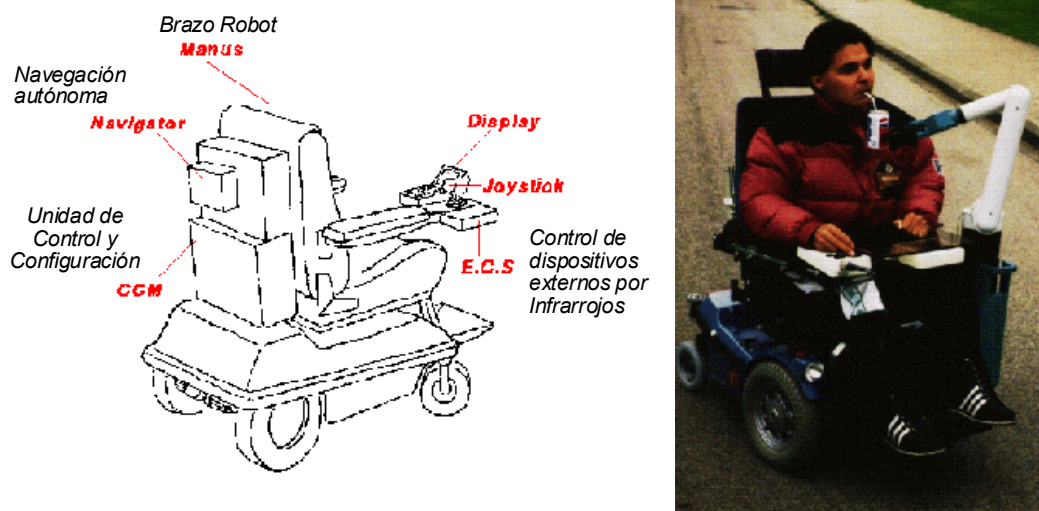


Figura A-3: Prototipo construido por el TNO: módulos experimentales incorporados y vista del mismo.

El sistema M3S es una constante referencia en numerosos documentos relacionados con la Tecnología de la Asistencia, habiendo despertado un interés inicial muy notable [Katevas 95] [Oderud 97] [Peussa 98]. En el proyecto MobiNet³, acrónimo de *Mobile Robotics Technology for Health Care*

²<http://www.tno.nl/m3s>

³<http://www.biomed.ntua.gr/mobinet>

Services Research Network, en desarrollo durante el periodo Octubre-1996/Octubre-1999, uno de los objetivos planteados es precisamente la difusión e implantación de este bus como un estándar [Matía 98a].

No obstante, a pesar de sus potencialidades y del tiempo transcurrido desde su primera especificación, no ha conseguido implantarse en la práctica fuera del entorno de la empresa, eje principal y líder del desarrollo, Permobil (esto es Suecia y otros países escandinavos), y del instituto TNO y asociados. Como ejemplo de este interés en los países escandinavos cabe destacar el proyecto *ROLL-Talk*⁴, desarrollado por la empresa noruega **IGEL Kompaniet** dentro del programa ESPRIT de la Unión Europea (proyecto número 27737); la compañía citada desarrolló numerosos periféricos adaptables al estándar mencionado incorporándolos a bordo de una silla Permobil Koala. Curiosamente los procesadores y periféricos del sistema operan usando en realidad un bus ISA empotrado (PC104) y tarjetas basadas en la familia Intel x86 quedando el bus M3S sólo como mero enlace de comunicaciones entre los diversos nodos del sistema desarrollado, lo cual no parece ser una solución del todo óptima habiendo, además, otros medios de comunicación estándar más seguros entre procesadores empotrados, como por ejemplo Ethernet (solución adoptada en [Pires 97]).

Otro caso peculiar es el prototipo modular desarrollado por la empresa finlandesa **VTT Automation** dentro de un proyecto denominado *Tracker: Smart Functions for Wheelchairs*⁵; dejando a un lado el proyecto en sí y observando únicamente su arquitectura interna, resulta llamativo comprobar cómo, aun manteniéndose la idea de modularidad y el uso de un Bus Serie como elemento de enlace, se han desarrollado módulos compatibles tanto con el bus M3S como con el DX.

En conclusión, a pesar del interés manifiesto en afirmar el estándar (sobre todo en los años centrales de la década de 1990) por parte equipos de investigación, como el *CALL Center* (silla *Smart*) y el proyecto *OMNI*, en la actualidad este interés parece haberse diluido notablemente. Un caso muy significativo es precisamente la silla *Smart*; los módulos para este concepto de silla de ruedas son fabricados por la empresa británica *Smile Rehab Ltd*⁶, y puede comprobarse que la opción elegida ha sido el bus DX. Con respecto al proyecto *OMNI*, la solución finalmente adoptada es una combinación entre el protocolo, más simple, definido para la silla *Smart*, junto con las dos líneas de seguridad especificadas en el bus M3S [Borgolte 98].

Posibles causas a esta escasa respuesta por el entorno industrial e incluso de investigación, después de casi 10 años de desarrollo de la norma, son:

- La existencia de una sola empresa importante asociada al sistema: el resto de empresas fabricantes de sillas de ruedas motorizadas no se ven impulsadas a apoyar a un teórico competidor.

⁴<http://www.rolltalk.com>

⁵<http://www.vtt.fi/aut/kau/results/tracker/index.html>

⁶<http://www.smilerehab.com>

- La complejidad del sistema: paradójicamente, las grandes potencialidades y sus supuestas prestaciones *Plug & Play* disuaden a los diseñadores de abordar la construcción de sistemas basados en un complejo protocolo, por más que se oferten sistemas de desarrollo gratuitos.

A.3 El problema de la interconectividad

Aun sin ser lo más importante, la capacidad de comunicación con el entorno inmediato (sea el medio doméstico o el laboral) es lo que hace más interesante el uso de un Bus de comunicaciones en lugar de señales o interfaces eléctricas específicas.

Diversas organizaciones, principalmente europeas y norteamericanas, se han ocupado de este tema. Sin duda, los trabajos más interesantes corresponden al **Trace Center**⁷, dependiente de la Universidad de Wisconsin, en Estados Unidos. Sus actividades comenzaron en 1971, estudiando las necesidades de comunicación de personas mudas o con severas discapacidades, con lo que se convirtió en un centro pionero en lo que ahora se conoce como *Comunicación Aumentativa*. Sin duda, su página *web* es una fuente de información de primera magnitud en las *Tecnologías de la Rehabilitación*.

Una de las líneas de actuación del Trace Center es la especificación de un estándar para facilitar el acceso al entorno de aquellos que lo necesitan; así, se encuentran especificaciones como el protocolo **URCC** (*Universal Remote Console Communication*), o el más reciente **UDIRCL** (*Universal Disability Infrared Communications Link*). No obstante, las tendencias actuales parecen ir más rápidas que las especificaciones citadas haciendo obsoletas algunas propuestas incluso antes de haber sido completamente especificadas, como es el caso del URCC. Este cambio de rumbo parece notarse en la misma forma de trabajar del Trace Center, el cual modificó sus publicaciones en *web* a lo largo de los años 1999 y 2000, añadiendo enlaces más abiertos hacia las últimas tendencias en interconectividad con el entorno⁸.

Una de las primeras consecuencias que puede extraerse al estudiar del problema del acceso al entorno por parte de las personas discapacitadas, es la de la sutil convergencia existente entre diversos mundos, hasta ahora paralelos e incluso divergentes:

- la industria,
- el hogar y
- el soporte a los discapacitados.

⁷<http://trace.wisc.edu>

⁸http://trace.wisc.edu/docs/universal_remotes_and_interconnectivity/linkpage.htm

La necesidad de incrementar la capacidad de comunicación entre toda clase de equipos, derivada del auge de las telecomunicaciones e Internet, principalmente, ha provocado dos efectos de notable importancia también para las Tecnologías de la Asistencia:

- la existencia de más y más recursos *hardware*, cada vez de mayor potencia y prestaciones, mayor repertorio de aplicaciones, incluso domésticas, y cada vez con menores precios.
- la aparición de nuevas formas de acceso y/o control desde o hacia otros equipos, en definitiva: el aumento de la interconectividad, añadiendo enlaces o Buses serie de mayor capacidad de transferencia y mayor flexibilidad en su conexión, incluso mediante enlaces inalámbricos.

Sin embargo, en el momento preciso de elegir una determinada opción de entre las existentes, no existe un claro candidato a imponerse como estándar (bien oficial o bien *de facto*) en los diversos entornos en los que un usuario de sillas de ruedas pueda encontrarse. Es más: en lugar de converger, parecen existir cada vez más soluciones al mismo problema, ligada cada solución a un fabricante, grupo de fabricantes, grupo económico o industrial, e incluso nacional.

A.3.1 Buses de aplicación en el entorno doméstico: Europa y Estados Unidos.

La multiplicidad de estándares y fabricantes que hacen uso de buses de comunicación serie, tanto en el entorno doméstico como en el industrial, hacen necesario un estudio previo, lo más global posible, de la situación actual. Tomando como base los informes publicados por la revista *HTINews*⁹, dedicada al sector de la automatización doméstica; el elaborado por Bob Allen y Brian Dillon [Allen 97] en el Central Remedial Clinic de Dublín¹⁰; y actualizando dichos informes a la situación dentro del primer trimestre de 2001, se han elaborado los resúmenes que se muestran en las tablas A.1, A.2 y A.3.

La situación actual del mercado europeo de Buses domésticos se ilustra en la tabla A.1. A grandes rasgos, tres grandes grupos se reparten el pastel: el bus EHS, cuyo mayor soporte es el grupo SGS Thomson; el BatiBUS, de mayor implantación en el área de influencia francesa; y el EIB, apoyado por empresas del sector germánico-nórdico, como Bosch y ABB. De los datos resumidos en la tabla se extraen las siguientes conclusiones:

- Ninguno de los tres buses mencionados ha conseguido desplazar a los demás e imponerse como un estándar europeo, e incluso el Bus EHS ha sido rechazado por el CENELEC¹¹.

⁹<http://hometoys.com/htinews.htm>

¹⁰<http://www.crc.ie>

¹¹Comité Europeo para la Normalización Electrotécnica: <http://www.cenelec.org>

Bus	EHS	BatiBUS	EIB
Fuente principal	European Home Systems Asoc.	BatiBUS Club Internacional (BCI)	Asociación de firmas
Página Web	www.ehsa.com	www.batibus.com	www.eiba.com
Otras, asociados	SGS Thomson	Merlin Gerin, EDF Landis & GYR	ABB, Bosch, Siemens, etc.
Lanzamiento en	(1987) 1990	1989	1990
Área de influencia	Europa (escasa)	Europa (Francia)	Europa (Alemania, Suecia)
Campos ppales. de aplicación	Hogar	Hogar	Hogar y edificios inteligentes
Velocidad max.	9600 bit/s	4800 bit/s	9600 bit/s
Medios físicos	Par trenzado, RF IR, Red Eléctrica	Par trenzado	Par trenzado
Max. #nodos	256	7680	64 ($\times 12$)
Chip de acceso	No	No	Si: BAU-Bus Access Unit (?)
Estándar	<i>Rechazado por el CENELEC</i>	Francia, NFC46620 ISO/IEC JTC 1 SC25	DIN V VDE0829 ISO/IEC 802-2
Estándar Abierto	No (miembros)	Sí	Sí
Interfaces a M3S	No	Sí	Sí

Tabla A.1: Principales Buses de Campo en el entorno doméstico. Europa: European Home Systems (EHS), BatiBUS y European Installation Bus

- Son idóneos sólo en entornos domésticos por su baja velocidad, limitada a 9600Bd, y por el escaso número de nodos posibles en una misma red.
- Utilizan preferentemente el par trenzado en el nivel físico, aun existiendo interfaces inalámbricos (infrarrojos y radiofrecuencia, en el caso del EHS) y también a través de la red eléctrica.
- No existe *hardware* específico para acceso al Bus (salvo el caso anunciado del EIB), confiando la tarea de cumplir con el estándar a los diseñadores de los equipos.

La posibilidad de perder mercado en favor de opciones extracomunitarias y la falta objetiva de una opción mayoritaria, llevaron a los tres grupos mencionados a un proceso de *Convergencia* (así llamado) hacia un estándar común, usando los elementos positivos de cada uno de los sistemas ya existentes. Este proceso se inició en 1998 con un aparente entusiasmo. Sin embargo, los resultados no pueden más que calificarse como frustrantes: sólo el buscar un nombre para el nuevo sistema ha llevado casi dos años, decidiéndose finalmente en Junio de 2000 que el nombre del nuevo estándar sería *Konnex*, abreviado como *KNX*¹².

La situación americana es notablemente más dinámica (ver tabla A.2). Aunque condenado a desaparecer a corto o medio plazo por sus escasas prestaciones, uno de los Buses domésticos más

¹²<http://www.konnex.org>

Bus	CEBus	LonTalk	X10
Fuente principal	CEBus Industry Council (CIC)	Echelon (LonWorks)	X10 Incorporated
Página Web	www.cebuse.org	www.echelon.com	www.x10.com
Otras, asociados	IBM, Honeywell Motorola, RCA	Toshiba, Cypress LonMark Assoc.	(no abierto)
Lanzamiento en	1992	1991	1978
Área de influencia	EEUU	EEUU, Asia	EEUU
Campo ppal de aplicación	Hogar y edificios inteligentes	Industria, hogar y edificios inteligentes	Hogar
Velocidad max.	7500 bit/s (reales)	2.5 Mbit/s	60 bit/s
Medios físicos	Par trenzado, RF, IR, Red Eléctrica	Par trenzado, RF, IR, Red Eléctrica	Red Eléctrica
Max. #nodos	$4 \cdot 10^9$ (teóricos)	32000	256
Chip de acceso	Si: Intellon, www.intellon.com	Si: NeuronChip www.toshiba.com	Si (series X10)
Estándar	EIA-600	EIA 709.1/.2/.3	No
Estándar Abierto	Sí	Sí	No
Interfaces a M3S	No	No	No

Tabla A.2: Principales Buses de Campo en el entorno doméstico. América: Consumer Electronics Bus (CEBus), LonWorks y X10.

populares (y más antiguos) es el X10, para el cual existen multitud de pequeños dispositivos útiles sobre todo para tareas simples, tipo *on-off*. Su popularidad se debe a su bajo coste, su facilidad de programación (normalmente con *dip-switches*) y a utilizar la propia red eléctrica como medio de transmisión, con lo que pueden automatizarse incluso hogares no preparados con una red de datos propia, haciendo innecesario realizar obras o cableados nuevos en edificios ya existentes.

Mucho mayor interés tienen CEBus y el protocolo LonTalk. El CEBus tiene su origen en la *Electronic Industries Association* (EIA) americana, la cual en 1984 decidió estandarizar la señalización infrarroja usada en los telemandos de diversos electrodomésticos; tras estos trabajos iniciales se amplió el alcance inicial hacia la obtención de un estándar para un Bus de uso doméstico, creándose un primer borrador del *Consumer Electronics Bus* (CEBus) en 1992. Actualmente, la especificación CEBus se encuentra disponible como recomendación **EIA-600**; en esta norma se recogen detalles tanto del nivel físico como de protocolo, definiéndose un denominado *Common Application Language* (CAL), que proporciona una base para la comunicación en una red doméstica equipada con aparatos y sistemas procedentes de sectores industriales y fabricantes diversos, por ejemplo: videoconsolas, aparatos de audio/video, electrodomésticos, aparatos de climatización, etc.

Las distintas empresas asociadas a CEBus se agrupan en el denominado *CEBus Industry Council* (CIC) organización sin ánimo de lucro (*sic*) encargada, entre otras tareas, de la diseminación y soporte del sistema. En el CIC se encuentran representadas alrededor de un centenar de empresas

de primera fila en el sector de la automatización y la electrónica, tanto industrial como de consumo. Cabe destacar la presencia, como subvencionadoras del CIC, de empresas como ABB, AT&T, Compaq, Hewlett Packard, Honeywell, IBM, Intel, Landis, Panasonic y otras del sector energético norteamericano.

En lo que respecta a las características técnicas del CEBus es necesario resaltar su gran versatilidad, admitiendo múltiples medios físicos lo que lo habilita para ser instalado incluso en edificaciones no equipadas con un cableado de datos separado. A destacar también la existencia de una familia de chips, los SSC-Px (para *Power Line*) y -Rx (para RF), de la firma **Intellon**, diseñados para facilitar el acceso al Bus cumpliendo la especificación EIA-600, por un lado, y proporcionando un enlace SPI (interfaz serie síncrono, compatible con periféricos estándar de Motorola) hacia un procesador digital compatible.

A.3.2 El sistema LonWorks

En lo que respecta al LonTalk, se trata de un protocolo completamente desarrollado por la empresa *Echelon Corporation*, fundada en 1988 con el fin de especificar y obtener la tecnología necesaria para interconectar eficientemente sensores, actuadores y controladores en un entorno industrial. Las redes de datos diseñadas con el protocolo LonTalk han dado en llamarse redes **LON**[©], de *Local Operating Network*; este nombre fue específicamente creado por Echelon para distinguirlo de las LAN, orientadas a la comunicación entre ordenadores. Echelon también proporciona las herramientas *hardware*, *software* y el *firmware* necesario para la construcción de sistemas LON completos. El conjunto de red, *hardware* y *software*, recibe el nombre genérico de **LonWorks**[©].

El núcleo de todo el sistema reside en un chip específico de acceso a la LON, denominado **Neuron Chip**[©]. Este circuito integrado facilita en *firmware* el desarrollo de sistemas *abarcando los 7 niveles del modelo de referencia OSI*, aportando un lenguaje especial de desarrollo de aplicaciones, denominado **Neuron C**[©], en el cual es posible acceder a variables de comunicaciones con sentencias simples, tipo escritura/lectura.

La ventaja más notable de LonWorks es, no obstante, el *tiempo acotado* entre el envío de un mensaje en una aplicación de un nodo determinado (nivel 7 del modelo OSI) y la recepción del mismo en la aplicación (de nuevo, nivel 7) del nodo o nodos destino. Este detalle, secundario en las redes de ordenadores, es sin embargo vital en las redes de control, pues al garantizarse los tiempos de transacción¹³ es posible diseñar una auténtica red de control distribuida con un esfuerzo de desarrollo mínimo.

¹³En condiciones de tráfico normales (no saturados) y a la velocidad máxima del Neuron Chip estándar, de 2.5Mbit/s, el tiempo de transacción de un mensaje está entre los 7 y los 10 ms, dependiendo del tamaño del paquete de datos (máximo de 244bytes).

La facilidad del desarrollo de aplicaciones, la fiabilidad del sistema LonTalk y la versatilidad en cuanto a medios físicos de transmisión (que incluyen la red eléctrica y nodos inalámbricos), son puntos a favor de este sistema, a pesar de los inconvenientes indudables de haber comenzado como estándar cerrado, ligado únicamente a los productos Echelon. Uno de los inconvenientes principales es, además, la dependencia de dos únicas compañías para el suministro de chips de acceso a LonTalk, actualmente Toshiba y Cypress. No obstante, Echelon abrió su protocolo en 1996 y solicitó su estudio por EIA, la cual elaboró el estándar abierto **EIA-709** con el que, al menos en teoría, es posible acceder a los niveles más bajos del modelo OSI (físico y de protocolo) sin necesitar de los Neuron Chip's.

Hasta el año 2000, Echelon declara la existencia de 13 millones de nodos instalados alrededor del mundo. Actualmente las aplicaciones de LonWorks abarcan las siguientes áreas:

- Automatización Industrial: interconectando sensores y actuadores en cadenas de fabricación y similares.
- Automatización Doméstica: en donde Echelon pretender introducirse abriendo enlaces entre Internet y las redes domésticas.
- Edificios Inteligentes: en donde se ha convertido en un estándar *de facto*, siendo usado por más de mil compañías del sector de instalaciones, como aire acondicionado, control de ascensores, seguridad, monitorización, etc.
- Transportes: habiendo sido instalado en aviones comerciales y redes de transporte ferroviario, en donde se cubre el estándar IEEE 1473-1999, de comunicaciones a bordo de trenes.

Como ejemplos de sistemas reales instalados podemos entresacar: el tren rápido de San Francisco, **BART**; el metro de Nueva York, **New York City Transit**; los electrodomésticos **Ariston**, con lavadoras y cocinas controlables desde Internet; y los sistemas de control de las famosas **Torres Sears** de Chicago y el museo del **Louvre**, en París. Como ejemplo final, destacar a la empresa italiana de distribución eléctrica **Enel**, que planea la instalación de *27 millones de contadores eléctricos inteligentes*, con prestaciones no sólo de medición energética a distancia sino aportando valor añadido a la red con funciones extras y de seguridad. Este último caso, y algunos más dentro del entorno europeo, dan una formidable voz de alarma respecto a la parálisis objetiva del proyecto europeo de convergencia KNX y su incapacidad para ir al compás del mercado real.

A.3.3 Capa sobre capa

Hacia dónde se dirigirán finalmente los estándar en Buses, tanto domésticos como industriales, es una cuestión que en realidad no tiene solución predecible; constantemente aparecen nuevas necesidades y

Sistema/Concepción	Año	Empresas líderes	Propósito
Bluetooth	1999	Ericsson, IBM, Intel, Nokia, Toshiba	Comunicaciones móviles entre PC's, teléfonos, etc.
HAVi (Home Audio/Video Interoperability)	1998	Sun, Pioneer, Sony, Philips, Sharp, Toshiba	Hogar: Electrodomésticos y otros dispositivos en red.
Jini	1998	Sun	Máquinas Virtuales en red, mediante Java, en el Hogar.
MODAL (TSpaces)	1998	IBM	Interconectividad total: Hogar, Internet, etc.
Residential Gateway	1999	Siemens	Acceso a todos los servicios y controles por un único punto
UPnP (Universal Plug and Play)	1998	Microsoft	Un único entorno <i>software</i> para todas las aplicaciones.

Tabla A.3: Nuevas tendencias en Interconectividad: comunicaciones inalámbricas e integración con Internet.

potenciales aplicaciones que en muchos casos obligan a adoptar soluciones de compromiso o, incluso, a crear nuevas soluciones. En los últimos cinco años la explosión de usuarios domésticos de Internet, y la consiguiente reducción de precios y aumento de prestaciones en dispositivos y sistemas, han venido a interferir en el panorama presentado anteriormente (tablas A.1 y A.2). Algunas de las más interesantes de entre las nuevas vías abiertas se resumen en la tabla A.3.

Sin embargo, la compatibilidad entre todos los sistemas ya existentes ha de ser garantizada; por otro lado, resulta prácticamente imposible saber cuál será, a bajo nivel, la opción u opciones que prevalecerán en el futuro. Quizás por las experiencias previas en otros campos, en los que tras un esfuerzo de normalización las soluciones adoptadas han quedado obsoletas en poco tiempo (inclusive antes de nacer), existe una tendencia a trabajar en soluciones que, a modo de sucesivas capas, permitan una compatibilidad a diversos niveles.

Este es el propósito, por ejemplo, del *Universal Plug and Play* (UPnP) promovido entre otros por Microsoft. UPnP pretende establecer un único entorno *software* para todas las aplicaciones: hogar, industria, etc. La organización CEBus apoya fuertemente esta iniciativa, utilizando su propia base, EIA-600, para el nivel físico y la base o *esqueleto* del protocolo, mediante el *Common Application Language* (CLA). Un objetivo adicional de Microsoft es abarcar por debajo a otros Buses a fin de garantizar la compatibilidad desde arriba hacia abajo de cualquier sistema; así también está implicado en el desarrollo de interfaces hacia el protocolo LonTalk, con el visto bueno y el apoyo de Echelon.

Finalmente, no habría que mantener al margen a otros enlaces serie, de alta velocidad, que podrían convertirse a su vez en estándares *de facto*, en función de su implantación real y aplicaciones disponibles. En este punto cabría resaltar las capacidades proporcionadas por el *Universal Serial Bus* (USB) y el *FireWire* (IEEE-1394), sobre todo para los casos de gran volumen de datos y alta

velocidad, rondando los 400Mbits/s tanto para *FireWire* como para USB 2.0 (el USB 1.0 presenta el inconveniente, frente a *FireWire*, de una velocidad de sólo 1.5Mbits/s).

Apéndice B

Características del sistema de código de barras EAN-13

El estándar EAN-13 (siglas correspondientes a *European Article Numbering* y número que indica la cantidad de dígitos codificados) se encuentra en prácticamente todos los productos de consumo a nuestro alrededor. Este estándar es uno de los más extendidos y conocidos dentro de los sistemas de identificación y tarificación automática, técnicamente conocidos como UPC (*Universal Product Code*). No obstante, el sistema de identificación EAN-13 no es, en sí mismo, un sistema de codificación sino más bien una norma que fija el uso comercial de una codificación básica de dígitos decimales mediante una distribución unidimensional de barras oscuras y claras de anchos uniformes.

En el EAN-13 cada cifra se codifica como una secuencia de siete espacios, blancos o negros según un patrón predefinido, lo cual permite codificar los diez dígitos decimales 0-9. Además, se establecen tres formas distintas de codificación (ver tabla B.1), dos de ellas (tipos A y B) comenzando por un espacio blanco y la tercera (tipo C) por un espacio negro; esta peculiaridad hace que puedan codificarse más cifras que símbolos existan en el código de barras, pues el tipo de cada caracter puede encerrar una codificación secundaria. Así, el código EAN-13 que se encuentra en los productos de consumo codifica 13 dígitos en el espacio asignado a 12 números.

Como ejemplo ilustrativo, tómese el código de barras de un producto español, como los '**donuts**' de Panrico S.A.: su código es, tal y como se muestra en la figura B-1 el 84-10022-000032, siendo el prefijo 84 el que lo identifica como de comercialización registrada en nuestro país. En España, es AECOC¹ (*Asociación Española de Codificación Comercial*) la organización encargada de controlar y asignar los códigos correspondientes a los distintos productos y empresas comercializadoras; AECOC

¹<http://www.aecoc.es>

Digito	Tipo A	Tipo B	Tipo C
0	...BB.B	.B...BBB	BBB...B.
1	..BB...B	.BB...BB	BB...BB.
2	..B...BB	..BB.BB	BB.BB..
3	.BBBB.B	.B....B	B....B.
4	.B...BB	..BBB.B	B.BBB..
5	.BB...B	.BBB..B	B..BBB.
6	.B.BBBB	B.B	B.B....
7	.BBB.BB	..B...B	B...B..
8	.BB.BBB	...B..B	B..B...
9	...B.BB	..B.BBB	BBB.B..

Tabla B.1: Codificación EAN primaria: dígitos del 0 al 9, tipos A, B y C. El carácter (.) simboliza una barra o espacio claro; mientras que el carácter (B) simboliza una barra o espacio oscuro.

administra el prefijo 84, aunque este hecho no indica exactamente el origen español del producto sino sólo su registro en España.

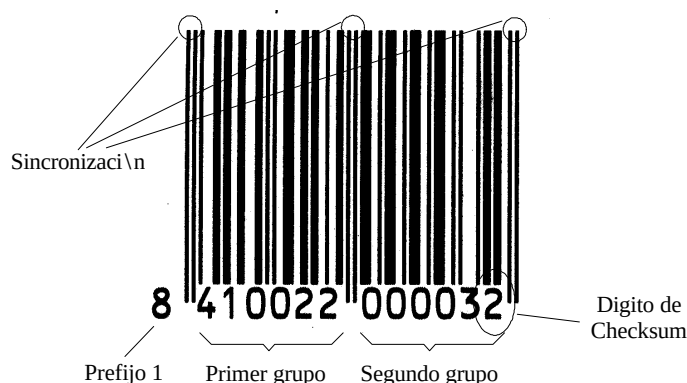


Figura B-1: Código de barras de un paquete de seis donuts.

El prefijo es de dimensiones e incluso significados variables; al igual que antaño los prefijos telefónicos dependían de la provincia o región, así sucede con este número en el UPC: países menores tienen tres cifras de prefijo, mientras que otros poseen más de un prefijo. Por ejemplo: USA y Canadá abarcan los prefijos 00 al 13 (salvo el 02 y el 04); Francia posee del 30 al 37. Además los prefijos 97 tienen significados especiales: el 977 pertenece al ISSN (*International Standard Serial Number for periodicals*); el 978 identifica los ISBN (*International Standard Book Number*); y el 979 a los productos musicales ISMN (*International Standard Music Number*).

Siguiendo con el código de la figura B-1, es posible identificar dos grupos de seis cifras situados dentro del dibujo de barras; estos dos grupos están delimitados por dos barras estrechas y oscuras que forman, junto con sus respectivos espacios estrechos blancos el tren de sincronización de lectura del código. El tren de sincronización de lectura aparece tres veces: al inicio, justo a la mitad (seis

Primer Dígito	Segundo Prefijo	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Dato 4	Dato 5
0	A	A	A	A	A	A
1	A	A	B	A	B	B
2	A	A	B	B	A	B
3	A	A	B	B	B	A
4	A	B	A	A	B	B
5	A	B	B	A	A	B
6	A	B	B	B	A	A
7	A	B	A	B	A	B
8	A	B	A	B	B	A
9	A	B	B	A	B	A

Tabla B.2: Codificación EAN secundaria: tipos A o B de los seis primeros dígitos representados para poder obtener la primera cifra del prefijo.

cifras) y al final. El dígito 8 inicial aparece fuera, antes del primer grupo de seis cifras, por lo que la lectura del código podría ser: **8-sinc-410022-sinc-000032-sinc**.

El segundo grupo de seis cifras (000032) siempre se codifica en tipo C, por lo que fácilmente se comprueba un patrón repetitivo de espacios blancos y negros correspondientes a los cuatro ceros seguidos. Sin embargo, a pesar de que el primer grupo de seis cifras contiene dos repeticiones (410022: dos ceros y dos doses) no es visible tal repetición en la estructura de barras; esto es así por la alternancia de tipos A y B en la codificación de este primer grupo. Tal alternancia de tipos permite una codificación secundaria del número 8 inicial de este ejemplo (ver tabla B.2). Una comprobación final de seguridad del código de barras se realiza con un *check-sum* conveniente, cuyo resultado se indica en la última cifra del código (en este caso, el número 2 final).

Apéndice C

Sistemas de referencia y ecuaciones fundamentales

En el presente Anexo se resumen las notaciones correspondientes a los distintos sistemas de coordenadas referenciados en capítulos anteriores, así como las matrices de transformación (rotación y traslación) utilizadas. Se han tomado como base las notaciones presentes tanto en [Fu 88] como en [Haralick 93], adaptándolas a conveniencia del autor de esta tesis.

Teniendo en cuenta el contexto de aplicación del sistema de localización propuesto, se parte de una cámara situada sobre un robot móvil (SRA) la cual está dotada de una cierta libertad de movimiento respecto a la plataforma mediante el uso de una unidad de *pan-tilt*. Se tratará, en suma, de obtener las ecuaciones y variables necesarias para transformar las características de la imagen de una marca artificial recuperada por la cámara, supuestas conocidas las coordenadas absolutas de la marca citada.

Para este estudio se identificarán cuatro sistemas de coordenadas independientes (ver figura C-1):

$O = [X, Y, Z] \Rightarrow$ Sistema de coordenadas absolutas (SCA). Los ejes X e Y , delimitan el plano horizontal, mientras que el eje Z representa la elevación sobre el suelo. Los ángulos de giro respecto a los ejes de coordenadas se definen como *positivos* en el *sentido opuesto a las agujas del reloj*, y se corresponden como: $(\alpha \rightarrow X)$ elevación (*pitch*); $(\beta \rightarrow Y)$ alabeo (*yaw*); y $(\gamma \rightarrow Z)$ rotación (*roll*).

$O' = [X', Y', Z'] \Rightarrow$ Sistema de coordenadas ligado al centro O' del móvil (SCM), en donde se convendrá que el eje X' corresponde al eje longitudinal del móvil; el eje Y' , corresponde al eje transversal al mismo; y el eje Z' representa la elevación sobre el centro del móvil, O' . Los ángulos de giro respecto a los ejes de coordenadas, al igual que en el sistema O , se definen

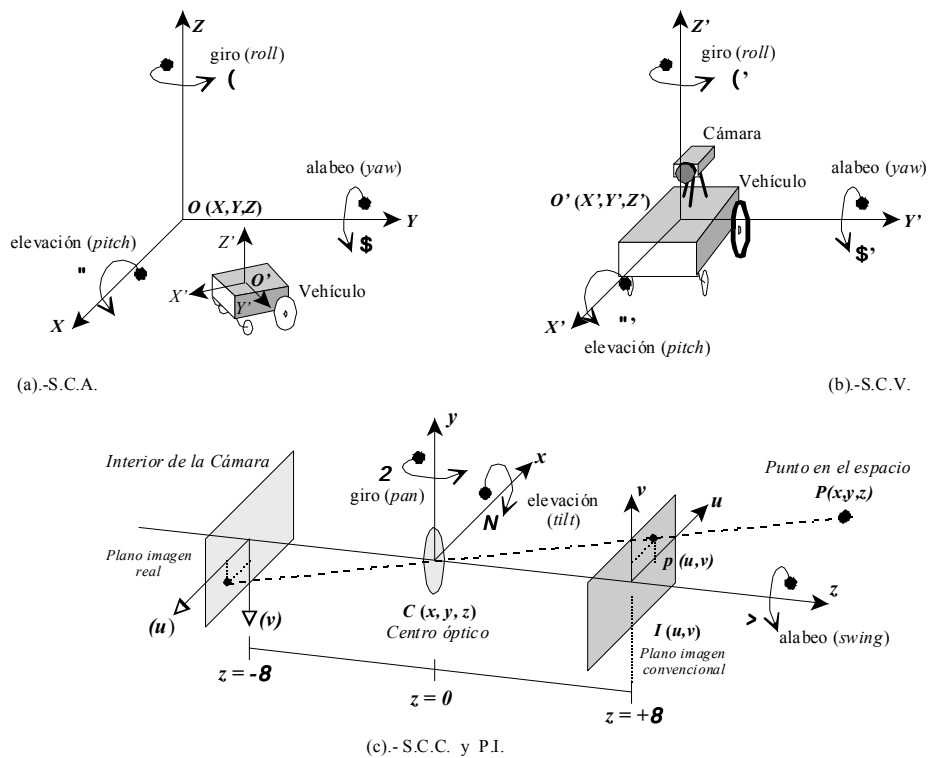


Figura C-1: Convenio de los sistemas de coordenadas implicados: (a) Sistema de Coordenadas Absoluto (SCA); (b) Sistema de Coordenadas del Vehículo (SCV); (c) Sistemas de Cámara (SCC) y de Plano Imagen (PI).

como *positivos* en el *sentido opuesto a las agujas del reloj*, y se corresponden como: $(\alpha' \rightarrow X')$ elevación (*pitch*); $(\beta' \rightarrow Y')$ alabeo (*yaw*); y $(\gamma' \rightarrow Z')$ rotación (*roll*).

$C = [x, y, z] \Rightarrow$ Sistema de coordenadas del centro óptico de la cámara (SCC). En este sistema, los ejes x e y se corresponden con el plano paralelo al de formación de la imagen y que pasa por el centro del sistema óptico de la cámara, siendo el eje x el correspondiente al eje horizontal y el eje y el correspondiente al eje vertical; el eje z sigue la dirección del eje óptico y representa distancias a los objetos observados, siendo de dimensiones positivas hacia los objetos y negativas hacia el plano imagen. Los ángulos de giro respecto a los ejes de coordenadas se definen como *positivos* en el *sentido opuesto a las agujas del reloj*, y se corresponden como: $(\phi \rightarrow x)$ elevación (*tilt*); $(\theta \rightarrow y)$ rotación (*pan*); y $(\xi \rightarrow z)$ alabeo (*yaw*). Nótese el cambio de nomenclatura y significado físico en los ángulos alrededor de los ejes (x, y, z) , respecto a los equivalentes en los sistemas O (SCA) y O' (SCM), dado el cambio de posición relativo del plano definido por los ejes (x, y) del sistema C (SCC) respecto a los anteriores.

$I = [u, v] \Rightarrow$ Sistema de coordenadas del plano imagen (PI). Éste es esencialmente bidimensional y sufre una inversión respecto al plano (x, y) del SCC, suponiendo una óptica tipo 'cámara oscura' (*pinhole*) sin aberraciones, al pasar todos los rayos por el centro óptico C . Este plano se encuentra a una distancia $-\lambda$ de C (distancia focal) y detrás de él. Una simplificación trivial pero útil del sistema óptico consiste en colocar el plano imagen *delante* de C a una distancia igual a la distancia focal, pero positiva, esto es en $z = +\lambda$ (ver figura C-1-c). De esta forma, la imagen proyectada no está invertida, desaparecen los signos negativos y el sentido de los ejes (u, v) coincide con el de los ejes (x, y) del SCC.

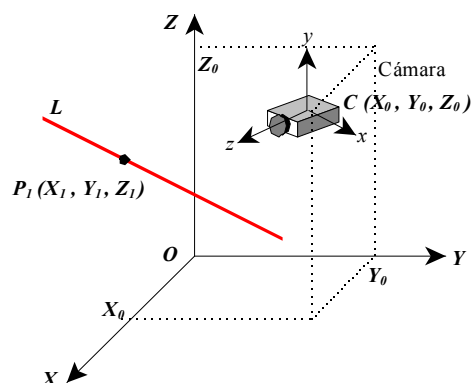
El problema de localización del vehículo, O' , respecto del sistema de coordenadas absoluto, O , puede redefinirse como el de encontrar la posición del centro óptico de la cámara C respecto a O , puesto que la posición de C respecto de O' siempre será posible de recuperar con operaciones convencionales de traslación-giro, conocidas a partir de *encoders* o dispositivos similares asociados a la cámara. Por tanto, el objetivo de este estudio puede limitarse al de encontrar la posición y orientación de C respecto de O , esto es el vector $\mathbf{C} = (X_0, Y_0, Z_0, \alpha, \beta, \gamma)$ obteniendo esta información a partir de una única imagen de una marca artificial, de posición y orientación conocidas en el SCA.

Se trata de un problema geométrico en el que a partir de las proyecciones de perspectiva (esto es cruzando un único punto o *foco*) de N puntos de coordenadas conocidas sobre un determinado plano, se han de determinar las coordenadas espaciales del citado foco o del plano de proyección; abreviadamente, se pretenden conocer las rotaciones y traslaciones necesarias para llevar el sistema de coordenadas óptico hasta el sistema de coordenadas de referencia, que en este caso se expresa como llevar el SCC hasta el SCA. Este problema se conoce como el de *orientación exterior*, y ha sido abordado y resuelto en numerosas ocasiones [Thompson 59] [Rosenfield 59] [Hinsken 88] [Haralick 93].

C.1 Transformaciones de perspectiva de líneas y puntos

Pártase de una situación en la que la cámara visualiza una recta en el SCA, de la que suponemos conocidos todos sus parámetros. Una de las formas de caracterizar la citada recta sería con las ecuaciones de cada una de sus tres componentes en el espacio. Sea, por tanto (ver figura C-2), una recta $\mathbf{L}$ definida respecto a C como:

$$\mathbf{L} = (X, Y, Z) = \begin{bmatrix} X_1 + k \cdot a_X \\ Y_1 + k \cdot b_Y \\ Z_1 + k \cdot c_Z \end{bmatrix}^T = \mathbf{P}_1 + k\mathbf{D} \quad (\text{C.1})$$

Figura C-2: Transformación de la recta **L** sobre el SCC

en donde $\mathbf{P}_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$ son las coordenadas de un punto cualquiera, perteneciente a la recta, y $\mathbf{D} = (a_X, b_Y, c_Z)$ son las componentes del vector director. Conocidas las coordenadas de $\mathbf{P}_1$ las nuevas coordenadas respecto a otro sistema diferente, como por ejemplo el SCC se obtendrían como consecuencia de la transformación:

$$\mathbf{p}_1 = (x_1, y_1, z_1, 1) = \mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{R} = (X_1, Y_1, Z_1, 1) \mathbf{T} \mathbf{R}$$

en coordenadas homogéneas, siendo $\mathbf{T}$ y $\mathbf{R}$ las matrices de traslación y rotación respectivamente del SCC respecto del SCA.

Suponiendo un desplazamiento $\mathbf{S}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ del centro C respecto de O y generalizando la matriz de rotación $\mathbf{R}$ dando sólo sus componentes elementales, se tiene en coordenadas homogéneas:

$$\mathbf{p}_1 = \mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{R} = (X_1, Y_1, Z_1, 1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -X_0 & -Y_0 & -Z_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.2})$$

Dado que la aplicación planteada se trata de un problema de localización de la cámara respecto al SCA y no de extraer propiedades geométricas de un objeto en una escena dada, lo más conveniente resulta ser definir las rotaciones respecto de los ejes del SCA, definiendo el orden de las mismas como $\alpha \longrightarrow \beta \longrightarrow \gamma$, esto es primero alrededor del eje X , luego alrededor de Y , y finalmente alrededor de Z . En todo caso, los ángulos son positivos rotando en el *sentido contrario a las agujas del reloj*, tal y como se indicaba en la figura C-1. Supuestos conocidos los ángulos α , β y γ , la matriz de rotación

quedaría en la forma siguiente:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R} = \mathbf{R}_\gamma \mathbf{R}_\beta \mathbf{R}_\alpha &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & -\sin \gamma \cos \alpha + \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha & \sin \gamma \sin \alpha + \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \cos \gamma \cos \alpha + \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha & -\cos \gamma \sin \alpha + \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \tag{C.3}
 \end{aligned}$$

Con las consideraciones anteriores, la transformación de un punto $\mathbf{P}_1$ perteneciente a la recta $\mathbf{L}$ sobre el SCC puede escribirse resumidamente como:

$$\mathbf{p}_1 = (x_1, y_1, z_1) = (X_1 - X_0, Y_1 - Y_0, Z_1 - Z_0) \mathbf{R}_\gamma \mathbf{R}_\beta \mathbf{R}_\alpha \tag{C.4}$$

En lo que atañe al nuevo vector director, $\mathbf{d}$, dado que su orientación es independiente del desplazamiento $\mathbf{S}_0$, puede obtenerse simplemente conociendo $\mathbf{R}$ como:

$$\mathbf{d} = (a_x, b_y, c_z) = \mathbf{DR} = (a_X, b_Y, c_Z) \mathbf{R}_\gamma \mathbf{R}_\beta \mathbf{R}_\alpha \tag{C.5}$$

con todo ello la ecuación de la recta $\mathbf{L}$ referida al SCC sería, en forma reducida:

$$\mathbf{l} = \mathbf{p}_1 + k\mathbf{d} \tag{C.6}$$

C.2 Proyecciones sobre el plano imagen: punto de fuga

Conocidas las componentes de una recta $\mathbf{l}$ con referencia al SCC, se puede obtener fácilmente su transformación sobre el plano imagen PI. En el caso de la recta $\mathbf{l}$ su proyección $\mathbf{i}$ sobre el PI resulta

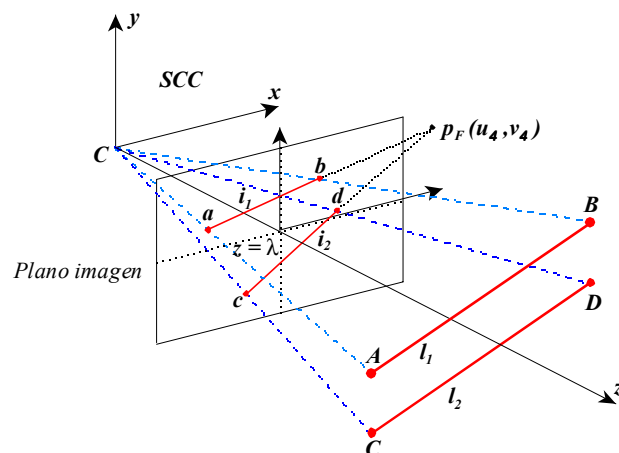


Figura C-3: Proyección de sendas rectas paralelas sobre el PI: punto de fuga.

ser:

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda \frac{x_i + k a_x}{z_i + k c_z} \\ \lambda \frac{y_i + k b_y}{z_i + k c_z} \end{bmatrix} \quad (\text{C.7})$$

en donde λ representa la distancia focal de la cámara; k es un parámetro con dimensiones de longitud; (x_i, y_i, z_i) son las coordenadas de un punto de referencia cualquiera de la recta $\mathbf{l}$, y (a_x, b_y, c_z) las componentes de su vector director, en todo caso ya referidas al SCC.

Las ecuaciones (C.7) muestra varias propiedades interesantes del problema planteado:

1. Se verifica que la proyección de una recta cualquiera en el SCC se transforma en otra línea recta en el PI [Haralick 93].
2. Si existieran N rectas paralelas en el espacio SCC (X, Y, Z) , también serían paralelas en el SCC (x, y, z) . Si además estas rectas tienen una pendiente no nula a lo largo del eje óptico de la cámara (en nuestro caso el z) todas ellas se cortarían en un único punto del plano (u, v) , conocido como *punto de fuga*, $\mathbf{p}_F$ (ver figura C-3). La demostración de esta propiedad es muy sencilla: sea el conjunto de N rectas paralelas en el SCC definido como

$$\mathbf{l}_n = \mathbf{p}_n + \lambda \mathbf{d} \big|_{1 \leq n \leq N}$$

todas ellas con el mismo vector director $\mathbf{d}$, pues son paralelas. Sea este vector $\mathbf{d} = (a_x, b_y, c_z)$, si se fuerza a que éste sea un vector unitario, sus componentes habrán de cumplir que $a_x^2 + b_y^2 + c_z^2 =$

1, coincidiendo entonces con los cosenos directores de la recta $\mathbf{l}_n$. Sus proyecciones en el PI vendrían dadas por C.7. Por tanto, el punto infinito de todas las N rectas consideradas se obtendría haciendo $k \rightarrow \infty$ en las citadas ecuaciones, punto único en todas ellas pues se obtendría que:

$$\mathbf{p}_F = \mathbf{i}_{k \rightarrow \infty} = \begin{bmatrix} u_\infty \\ v_\infty \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda \frac{a_x}{c_z} \\ \lambda \frac{b_y}{c_z} \end{bmatrix} \quad (\text{C.8})$$

C.3 Transformación de rectas entre el SCA y el PI

A partir de las ecuaciones (C.3) (C.4) (C.5) y (C.7) se pueden escribir, finalmente, las siguientes relaciones entre las coordenadas de una recta conocida en el SCA sobre el PI:

$$\mathbf{i}_i \leftarrow \mathbf{l}_i = \mathbf{p}_i + k\mathbf{d} \leftarrow \mathbf{L}_i = \mathbf{P}_i + k\mathbf{D}$$

las coordenadas de $\mathbf{p}_i$, conocidas las de $\mathbf{P}_i$ en el SCA, resultarían ser:

$$\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, z_i) = (X_i - X_0, Y_i - Y_0, Z_i - Z_0) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix},$$

siendo por tanto las componentes del punto $\mathbf{p}_i$:

$$\begin{aligned} x_i &= (X_i - X_0) r_{11} + (Y_i - Y_0) r_{21} + (Z_i - Z_0) r_{31} \\ y_i &= (X_i - X_0) r_{12} + (Y_i - Y_0) r_{22} + (Z_i - Z_0) r_{32} \\ z_i &= (X_i - X_0) r_{13} + (Y_i - Y_0) r_{23} + (Z_i - Z_0) r_{33} \end{aligned}$$

Respecto al vector director $\mathbf{d}$ se obtendrían expresiones similares al aplicarse la misma matriz de rotación sobre el vector original $\mathbf{D}$:

$$\begin{aligned} a_x &= a_X r_{11} + b_Y r_{21} + c_Z r_{31} \\ b_y &= a_X r_{12} + b_Y r_{22} + c_Z r_{32} \\ c_z &= a_X r_{13} + b_Y r_{23} + c_Z r_{33} \end{aligned} \quad (\text{C.9})$$

y al aplicar la transformación (C.7) se obtendrían las componentes de la recta $\mathbf{i}$ en el PI a partir de

los parámetros, supuestos conocidos, de la recta $\mathbf{L}$ en el SCA:

$$\mathbf{u} = \lambda \frac{(X_i - X_0) r_{11} + (Y_i - Y_0) r_{21} + (Z_i - Z_0) r_{31} + k(a_X r_{11} + b_Y r_{21} + c_Z r_{31})}{(X_i - X_0) r_{13} + (Y_i - Y_0) r_{23} + (Z_i - Z_0) r_{33} + k(a_X r_{13} + b_Y r_{23} + c_Z r_{33})}, \quad (\text{C.10})$$

$$\mathbf{v} = \lambda \frac{(X_i - X_0) r_{12} + (Y_i - Y_0) r_{22} + (Z_i - Z_0) r_{32} + k(a_X r_{12} + b_Y r_{22} + c_Z r_{32})}{(X_i - X_0) r_{13} + (Y_i - Y_0) r_{23} + (Z_i - Z_0) r_{33} + k(a_X r_{13} + b_Y r_{23} + c_Z r_{33})}. \quad (\text{C.11})$$

Apéndice D

Notas sobre la Esperanza matemática

Dada una variable aleatoria X , su valor esperado viene dado por:

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f_x(x) dx, \quad f_x(x) = f dp \text{ (función densidad de probabilidad).}$$

Si X es una variable aleatoria continua con $f dp = f_x(x)$, y se define otra variable aleatoria $Y = g(x)$, siendo g otra función continua, se tiene que:

$$E(Y) = \int_{-\infty}^{\infty} y \cdot f_y(y) dy,$$

en donde $f_y(y)$ es la $f dp$ de la variable aleatoria y .

De la misma forma. si X e Y son dos variables aleatorias, si se define otra variable aleatoria $Z = g(X, Y)$, con g continua, entonces:

$$E(Z) = \int_{-\infty}^{\infty} z \cdot f_z(z) dz,$$

siendo $f_z(z)$ la $f dp$ de la variable aleatoria z .

Es evidente que aplicando las relaciones anteriores, se tiene que:

$$E \left[\sum_1^n a_k g_k(X, Y) \right] = \sum_1^n a_k E [g_k(X, Y)],$$

lo que implica que:

$$E[X + Y] = E[X] + E[Y].$$

La covarianza entre dos variables aleatorias X e Y viene definida por:

$$C = E[(X - m_x)(Y - m_y)],$$

siendo $m_x = E[X]$ y $m_y = E[Y]$; por tanto, se puede escribir que:

$$C = E[X \cdot Y] - E[X] \cdot E[Y].$$

Definido el coeficiente de correlación como:

$$r = \frac{C}{\sigma_x \sigma_y},$$

se tiene que si $|r| \leq 1 \Rightarrow |C| \leq \sigma_x \sigma_y$.

Si las funciones están incorreladas, entonces $C = 0$; esto supone que:

$$C = 0, \quad r = 0, \quad E[X \cdot Y] = E[X] \cdot E[Y].$$

Supóngase ahora que $Z = (X + Y)$; entonces se tiene que $m_z = (m_x + m_y)$, lo cual implica que:

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 &= E[(Z - m_z)^2] = E\left\{[(X - m_x) + (Y - m_y)]^2\right\} \\ &= \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 2r\sigma_x\sigma_y. \end{aligned}$$

Téngase presente que:

$$\begin{aligned} E\left\{[(X - m_x) + (Y - m_y)]^2\right\} &= E[(X - m_x)^2 + (Y - m_y)^2 + 2(X - m_x)(Y - m_y)] \\ &= E[(X - m_x)^2] + E[(Y - m_y)^2] + 2E[(X - m_x)(Y - m_y)] \\ &= \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 2C. \end{aligned}$$

Particularizando al caso en el que Z sea un promedio de las dos v.a., X e Y , se tiene que:

$$Z = \frac{X + Y}{2} \quad \rightarrow \quad \sigma_z^2 = \frac{1}{4} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 2r\sigma_x\sigma_y).$$

Bibliografía

- [Aigner 99] Janet L. Aigner & Greg Blalock. Assistive technology on the threshold of the new millenium, volume 6 de *Assistive Technology Research Series*, capítulo Assessing Assistive Technology Needs of Children with Disabilities, pags. 358–361. IOS Press, Amsterdam, 1999. ISBN: 1-58603-001-9.
- [Allen 97] Bob Allen & Brian Dillon. *Environmental Control and Field Bus Systems*. Informe técnico, Central Remedial Clinic, Vernon Avenue, Clontarf, Dublin 3, Ireland, December 1997. <http://www.stakes.fi/cost219/COSA150.html>.
- [Amat 99] J. Amat, A. Monferrer, J. Batlle & X. Cufí. *GARBI: a low-cost underwater vehicle*. Microprocessors and Microsystems, no. 23, pags. 61–67, 1999.
- [Arahal 98] Manuel R. Arahal & Manuel Berenguel. *Constructive Radial Basis Function Networks for Mobile Robot Positioning*. En Proceedings of the 1998 IFAC Conference on Intelligent Components for Vehicles - ICV'98, pags. 207–212, 1998.
- [Armingol 98] J. M. Armingol, L. Moreno, A. de la Escalera & M. A. Salichs. *Landmark Perception Planning for Mobile Robot Localization*. En Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, volume 4, pags. 3425–3430, Leuven, Belgium, May 1998.
- [Barea 00] R. Barea, L. Boquete, M. Mazo, E. López & L. M. Bergasa. Actas del Congreso Iberoamericano, Iberdiscap 2000, capítulo Sistema de comunicación Hombre-Máquina mediante movimientos oculares, pags. 333–336. Octubre 2000. ISBN: 84-699-3235-5.
- [Barea 01] Rafael Barea, Luciano Boquete, Manuel Mazo, Elena López & L. M. Bergasa. *Electrooculographic Guidance of a Wheelchair Using Eye Movements Codification*. En Proceedings of the 3rd. International Conference on Field and Service Robotics, pags. 107–112, Finland, June 2001. FSR'2001.

- [Beattie 95] P. Beattie. *SENARIO: SENsor Aided intelligent wheelchaiR navigatION*. En IEE Colloquium on New Developments in Electric Vehicles for Disabled Persons, London, 1995. The Institution of Electrical Engineers.
- [Beattie 98] P. D. Beattie & J. M. Bishop. *Self-Localisation in the 'Senario' Autonomous Wheelchair*. Journal of Intelligent and Robotic Systems, no. 22, pages. 255–267, 1998.
- [Bell 94] D. Bell, J. Borenstein, S. Levine, Y. Koren & A. Jaros. *The Navchair: An Assistive Navigation System for Wheelchairs, Based on Mobile Robot Obstacle Avoidance*. En Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages. 2012–2017, San Diego, California, May, 8-13 1994. IEEE.
- [Bellacasa 00] Ramón Puig de la Bellacasa. Actas del Congreso Iberoamericano, Iberdiscap 2000, capítulo Discapacidad y Tecnología: por una Comunidad de los Saberes, pages. 1–7. Octubre 2000. ISBN: 84-699-3235-5.
- [Bergasa 99] Luis Miguel Bergasa. *Seguimiento Facial, mediante Visión Artificial, orientado a la Ayuda a la Movilidad*. Tesis Doctoral, Escuela Politécnica. Universidad de Alcalá, Julio 1999. Director: Dr. Manuel Mazo Quintas.
- [Bergasa 00] L. M. Bergasa, M. Mazo, A. Gardel & R. Barea. Actas del Congreso Iberoamericano, Iberdiscap 2000, capítulo Guiado de una Silla de Ruedas para minusválidos mediante movimientos faciales, pages. 367–370. Octubre 2000. ISBN: 84-699-3235-5.
- [Betke 97] Margrit Betke & Leonid Gurvits. *Mobile Robot Localization Using Landmarks*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 13, no. 2, pages. 251–263, April 1997.
- [Bonnifait 98] Philippe Bonnifait & Gaëtan Garcia. *Design and Experimental Validation of an Odometric and Goniometric Localization System for Outdoor Robot Vehicles*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 14, no. 4, pages. 541–548, August 1998.
- [Borenstein 90] J. Borenstein, S. Levine & Y. Koren. *The Navchair - A New Concept in Intelligent Wheelchair Control for People with Multiple Handicaps*. En CSUN's Fifth Annual Conference on Technology and Persons with Disabilities, pages. 117–124, Los Angeles, California, March, 21-24 1990. CSUN.

- [Borenstein 96a] J. Borenstein, H. R. Everett & L. Feng. Where am I? The University of Michigan, April 1996. <http://www-personal.engin.umich.edu/~johannb/>.
- [Borenstein 96b] J. Borenstein & L. Feng. *Gyrodometry: A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots*. En Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pags. 423–428., Minneapolis, Minnesota, April 22–28 1996.
- [Borgolte 95] U. Borgolte, R. Hoelper, H. Hoyer, H. Heck, W. Humann, J. Nedza, I. Craig, R. Valleggi & A. M. Sabatini. *Intelligent Control of a Semi-Autonomous Omnidirectional Wheelchair*. En Proceedings 3rd International Symposium on Intelligent Robotic Systems (SIRS'95), Pisa, 1995.
- [Borgolte 98] Ulrich Borgolte, Helmut Hoyer, Christian Bühler, Helmut Heck & Ralf Hoelper. *Architectural Concepts of a Semi-Autonomous Wheelchair*. Journal of Intelligent and Robotic Systems, no. 22, pags. 233–253, 1998.
- [Bottos 99] M. Bottos, C. Biolcati, E. Brunati, V. Merlo, F. Pullini, L. Sciuto & C. Ruggeri. Assistive technology on the threshold of the new millenium, volume 6 de *Assistive Technology Research Series*, capítulo Powered assistive devices and indepenence in severely disabled children: a study of 29 cases with tetraplegia, pags. 362–366. IOS Press, Amsterdam, 1999. ISBN: 1-58603-001-9.
- [Bouguet 99] Jean-Yves Bouguet. *Visual methods for three-dimensional modeling*. Thesis, in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, California Institute of Technology, Pasadena, California (USA), May 1999.
- [Bourhis 98] G. Bourhis & Y. Agostini. *Man-Machine Cooperation for the Control of an Intelligent Powered Wheelchair*. Journal of Intelligent and Robotic Systems, no. 22, pags. 269–287, 1998.
- [Bourhis 01] G. Bourhis, O. Horn, O. Habert & A. Pruski. *An Autonomous Vehicle for People with Motor Disabilities*. IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 7, no. 1, pags. 20–28, March 2001.
- [Brooks 86] Rodney Brooks. *A Layered Intelligent Control System for a Mobile Robot*. IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. RA-2, pags. 14–23, April 1986.
- [Bugmann 98] Guido Bugmann, Kheng L. Koay, Nigel Barlow, Mike Phillips & Donald Rodney. *Stable Encoding of Robot Trajectories Using Normalised Radial Basis Functions:*

- Application to an Autonomous Wheelchair*. En Proceedings of 29th International Symposium Robotics (ISR'98), pags. 232–235. DMG Publishers: London., April 1998.
- [Bühler 97] Christian Bühler, Helmut Heck & Wolfram Humann. Advancement of assistive technology, volume 3 de *Assistive Technology Research Series*, capítulo User-Driven Human-Machine Interface Configuration for a Wheelchair with Complex Functionality, pags. 375–380. IOS Press, 1997. ISBN: 90-5199-361-7.
- [Butler 86] C. Butler. *Effect of Powered Mobility on Self-Initiated Behaviours of Very Young Children with Locomotor Disability*. Development Medicine and Child Neurology, no. 28, pags. 325–332, 1986.
- [Candelos 97] Amparo Candelos. Guía de acceso al ordenador. 1997. ISBN: 84-88986-71-8.
- [Cassinis 98] R. Cassinis, A. Rizzi & M. Volta. *Results and Comparisons for a Self-Localization System Based on an Optical Pre-Processing Device*. En Proceedings of the 1998 IFAC Conference on Intelligent Components for Vehicles - ICV'98, pags. 189–193, 1998.
- [Ceres 00] R. Ceres, J. M. Martín, L. Calderón, J. L. Pons, A. R. Jiménez, D. Jiménez, L. Azevedo, C. Basil, D. Lupi, M. Nunes, V. González, L. Cernuzzi, J. R. Oliveira, M. Guarini, N. Salazar & A. Aguilar. Actas Del Congreso Iberoamericano, Iberdiscap 2000, capítulo Vehículo Personalizable para Movilidad Lúdica de Niños con Discapacidades Neuromotoras Graves, pags. 163–168. Octubre 2000. ISBN: 84-699-3235-5.
- [Chong 99] Kok Seng Chong & Lindsay Kleeman. *Mobile robot map building for an advanced sonar array and accurate odometry*. International Journal on Robotics Research, vol. 18, no. 1, pags. 20–36, January 1999.
- [Civit-Balcells 96] A. Civit-Balcells, F. Díaz del Rio, J. L. Sevillano & G. Jiménez. *SIRIUS: A Low Cost High Performance Computerized Wheelchair*. En Proceedings of the International Workshop on Medical Robots, pags. 23–30, Viena, October 1996.
- [Civit-Balcells 97] A. Civit-Balcells, F. Díaz del Rio, G. Jiménez & J. L. Sevillano. Advancement of assistive technology, volume 3 de *Assistive Technology Research Series*, capítulo A Proposal for a Low Cost Advanced Wheelchair Architecture, pags. 297–302. IOS Press, 1997. ISBN: 90-5199-361-7.

- [Coelho 99] L. S. Coelho & M. F. M. Campos. *Pose Estimation of Autonomous Dirigibles Using Artificial Landmarks*. En Computer Graphics and Image Processing, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on CG and IP., volume 4, pages. 2584–2589, 1999.
- [Connell 90] Jonathan H. Connell. Minimalist mobile robotics. a colony-style architecture for an artificial creature, volume 5 de *Perspectives in Artificial Intelligence*. Academic Press, Inc, Boston, 1990. ISBN: 0-12-185230-X.
- [Craig 93] I. Craig & P. Nisbet. *The Smart Wheelchair: An Augmentative Mobility 'toolkit'*. En Proceedings ECART-2, Stockholm, May 1993. Swedish Handicap Institute. ISBN: 91-88336-19-0.
- [Crisman 98] Jill D. Crisman, Michael E. Cleary & Juan Carlos Rojas. *The Deictically Controlled Wheelchair*. Image and Vision Computing, no. 16, pages. 235–249, 1998.
- [Crowley 98] James L. Crowley, Frank Wallner & Bernt Schiele. *Position estimation using principal components of range data*. Robotics and Autonomous Systems, no. 23, pages. 267–276, 1998.
- [DeMenthon 92] Daniel DeMenthon & Larry S. Davis. *Exact and Approximate Solutions of the Perspective-Three-Point Problem*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no. 11, pages. 1100–1105, November 1992.
- [Easy Rider] Easy Rider. HulpMiddelenCentrale NV, E3-Iaan 89, B-9800 Deinze, Belgica.
- [Einsele 97] Tobias Einsele. *Real-Time Self-Localization in Unknown Indoor Environment Using a Panorama Laser Range Finder*. En Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, volume 2, pages. 697–702, September 1997. ISBN: 0-7803-4119-8.
- [Eren 97] Halit Eren & Chun Che Fung. *Position Estimation of Mobile Robots Based on Coded Infrared Signal Transmission*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 46, no. 6, pages. 1280–1283, December 1997.
- [Friman 99] Ingela Friman. Assistive technology on the threshold of the new millenium, volume 6 de *Assistive Technology Research Series*, capítulo User Requirements for Electric Wheelchairs, pages. 204–208. IOS Press, Amsterdam, 1999. ISBN: 1-58603-001-9.

- [Fu 88] K. S. Fu, R. C. Gonzalez & C. S. G. Lee. Robótica. control, detección, visión e inteligencia. McGraw-Hill, 1988. ISBN: 84-7615-214-0 : 007.52 FU -30.0000272.
- [García 97] Juan Carlos García, Marta Marrón, Juan A. García, Miguel A. Sotelo, Jesús Ureña, J. L. Lázaro, F. J. Rodríguez, M. Mazo & Marisol Escudero. *An Autonomous Wheelchair with a LonWorks Network Based Distributed Control System*. En Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics, pags. 420–425, Canberra (Australia), December 1997. FSR'97.
- [García 99a] J. C. García, M. Mazo, L. M. Bergasa, J. Ureña, J. L. Lázaro, M. Escudero, M. Marrón & E. Sebastián. Assistive technology on the threshold of the new millenium, volume 6 de *Assistive Technology Research Series*, capítulo Human-Machine Interfaces and Sensory Systems for an Autonomous Wheelchair, pags. 272–277. IOS Press, Amsterdam, 1999. ISBN: 1-58603-001-9.
- [García 99b] J. C. García, M. Mazo, J. Ureña, M. Marrón, M. Escudero & E. Sebastián. Assistive technology on the threshold of the new millenium, volume 6 de *Assistive Technology Research Series*, capítulo Modular Architecture for Wheelchairs with Environment Integration capabilities, pags. 214–219. IOS Press, Amsterdam, 1999. ISBN: 1-58603-001-9.
- [García 00a] J. C. García, M. Mazo, J. Ureña, M. Marrón & M. Escudero. *Sistema de Posicionamiento Absoluto mediante Marcas Artificiales*. En Proceedings of the TELECOM'2000 International Conference, pags. 1–10 (de la referencia P433 de la publicación en CD-ROM). Universidad de Alcalá, España, July 2000. ISBN: 84-8138-393-7.
- [García 00b] Juan C. García, Marta Marrón, Jesús Ureña & Luis M. Bergasa. Actas del Congreso Iberoamericano, Iberdiscap 2000, capítulo Conducción Asistida de Sillas de Ruedas Motorizadas, pags. 363–366. Octubre 2000. ISBN: 84-699-3235-5.
- [Giai-Checa 93] B. Giai-Checa, R. Deriche, Th. Viéville & O. Faugeras. *Suivi de segments dans une séquence d'images monoculaire*. Rapport de recherche 2113, INRIA, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, Sophia-Antípolis, Décembre 1993. ISSN: 0249-6399.
- [Gips 96] J. Gips, P. DiMattia, F. X. Curran & P. Olivieri. *Using Eagle-Eyes -an Electrodes Based Device for Controlling the Computer with Your Eyes- to Help People with*

- Special Needs*. En 5th International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP'95), Linz, Austria, July 1996.
- [Giuffrida 98] Francesco Giuffrida, Pietro G. Morasso & Renato Zaccaria. Improving the quality of life for the european citizen, capítulo PARTNER - a semi-autonomous mobile service robot in a wireless network for biomedical applications, pages. 342–345. IOS Press, 1998.
- [Gomi 96] Takashi Gomi & Koichi Ide. *The Development of an Intelligent Wheelchair*. En Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pages. 70–75, 1996.
- [Haralick 93] Robert M. Haralick & Linda G. Shapiro. Computer and robot vision, volume II. Addison-Wesley Publishing Company, 1993. ISBN 0-201-56943-4 (v.2).
- [Heikkilä 96] Janne Heikkilä & Olli Silvén. *Calibration Procedure for Short Focal Length Off-the-Shelf CCD Cameras*. En Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition, pages. 166–170, Vienna, Austria, 1996.
- [Heikkilä 00] Janne Heikkilä. *Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, no. 10, pages. 1066–1077, October 2000.
- [Hinsken 88] L. Hinsken. *A Singularity-Free Algorithm for Spatial Orientation of Bundles*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 27, 1988.
- [Hirose 92] S. Hirose, T. Sensus & S. Aoki. *The TAQT Carrier: A Practical Terrain-Adaptive Quadru-Track Carrier Robot*. En Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Sys., pages. 2068–2073, Raleigh, NC, USA, July 1992.
- [Hoyer 96] H. Hoyer & U. Borgolte. *OMNI. Office Wheelchair with High Manoeuvrability and Navigational Intelligence for People with Severe Handicap*. Edited Final Report TIDE Project TP1097 - OMNI, OMNI Konsortium, FernUniversität Hagen, RFA, December 1996.
- [Hu 98] Huosheng Hu, Dongbing Gu & Michael Brady. *A modular computing architecture for autonomous robots*. Microprocessors and Microsystems, no. 21, pages. 349–361, 1998.
- [Jörg 99] Klaus-Werner Jörg, Torsten Gattung & Joachim Weber. *Supporting Mobile Robot Localization by Visual Bar Code Recognition*. En Proceedings of the IASTED

- International Conference in Robotics and Applications, RA'99, pags. 352–357, October 28-30 1999.
- [Juncà 97] José Antonio Juncà. Movilidad y transporte accesible. Madrid, 1a edición, 1997. ISBN: 84-88986-64-5.
- [Kajita 96] Shuuji Kajita & Kazuo Tani. *Experimental Study of Biped Dynamic Walking*. IEEE Control Systems, vol. 16, no. 1, pags. 13–19, February 1996.
- [Katevas 95] N. Katevas, S. Tzafestas, J. M. Bishop, R. Preuss, P. Rabischong, D. Koutsouris, A. Ikonomopoulos, G. Papakonstantinou, P. Tsanakas & N. Uzunoglou. The european context for assistive technology, volume 1 de *Assitive Technology Research Series*, capítulo SENARIO - The Autonomous Mobile Robotics Technology for the Locomotion Handicap: Operational and Technical Issues, pags. 371–374. IOS Press, 1995. ISBN: 90-5199-220-3.
- [Katevas 97] N. I. Katevas, N. M. Sgouros, S. G. Tzafestas, G. Papakonstantinou, P. Beattie, J. M. Bishop, P. Tsanakas & D. Koutsouris. *The Autonomous Mobile Robot SENARIO: A Sensor-Aided Intelligent Navigation System for Powered Wheelchairs*. IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 4, no. 4, pags. 60–70, December 1997.
- [Kim 94] Jae H. Kim & Hyung S. Cho. *Experimental investigation for the estimation of a mobile robot's position by linear scanning of a landmark*. Robotics and Autonomous Systems, no. 13, pags. 39–51, 1994.
- [Krieg-Brückner 98] Bernd Krieg-Brückner, Thomas Röfer, Hans-Otto Carmesin & Rolf Müller. Spatial cognition, volume 1404 de *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, capítulo A Taxonomy of Spatial Knowledge for Navigation and its Application to the Bremen Autonomous Wheelchair, pags. 373–397. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.
- [Krovi 95] Venkat Narayan Krovi. Modeling and control of a hybrid locomotion system. Master's thesis, University of Pennsylvania. School of Engineering and Applied Science, Philadelphia, Pennsylvania, USA, December 1995.
- [Krummel 96] Larry Krummel. *Bar Codes in Document Imaging*. Informe técnico, Seaport Imaging, Inc. San Jose, CA, USA, <http://www.seaportimaging.com>, August 1996. Accesible en: <http://www.allmypapers.com>.

- [Kubitz 97] Olaf Kubitz, Matthias O. Berger, Marcus Perlick & René Dumoulin. *Application of Radio Frequency Identification Devices to Support Navigation of Autonomous Mobile Robots*. En IEEE 47th Vehicular Technology Conference, volume 1, pages. 126–130, 1997.
- [Kumar 94] Rakesh Kumar & Allen R. Hanson. Robust methods for estimating pose and a sensitivity analysis, 1994. Available at <ftp://vis-ftp.cs.umass.edu/Papers/kumar/cvgip94.ps.gz>.
- [Lankenau 01] Axel Lankenau & Thomas Röfer. *A Versatile and Safe Mobility Assistant*. IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 7, no. 1, pages. 38–45, March 2001.
- [Lavest 99] Jean-Marc Lavest, Marc Viala & Michel Dhome. *Quelle précision pour une mire d'étalonnage?* Traitement du Signal, vol. 16, no. 3, pages. 241–254, 1999.
- [Lázaro 98] Jose Luis Lázaro. *Modelado de Entornos mediante Infrarrojos. Aplicación al guiado de Robots Móviles*. Tesis Doctoral, Escuela Politécnica. Universidad de Alcalá, Septiembre 1998. Director: Dr. Manuel Mazo Quintas.
- [Lázaro 00] Jose Luis Lázaro, Felipe Espinosa, Alfredo Gardel, César Mataix, Raúl Mateos, Elena López & Emilio J. Bueno. *Quadrascopic sensorial system for positioning with arrays of photodiode detectors*. En Proceedings of the TELECOM'2000 International Conference, pages. 1–7. Universidad de Alcalá, 2000. CD-ROM, ISBN: 84-8138-393-7.
- [Lázaro 01] J. L. Lázaro, J. C. García, M. Mazo, A. Gardel, P. Martín, I. Fernández & M. Marrón. *Distributed architecture for control and path planning of autonomous vehicles*. Microprocessors and Microsystems, no. 25, pages. 159–166, 2001.
- [Levine 99] Simon P. Levine, David A. Bell, Lincoln A. Jaros, Richard C. Simpson, Yoram Koren & Johann Borenstein. *The NavChair Assistive Wheelchair Navigation System*. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, vol. 7, no. 4, pages. 443–451, December 1999.
- [Lin 98] Long-Ji Lin, Thomas R. Hancock & J. Stephen Judd. *A robust landmark-based system for vehicle location using low-bandwidth vision*. Robotics and Autonomous Systems, no. 25, pages. 19–32, 1998.

- [Linnman 96] Sven Linnman. *M3S: The Local Network for Electric Wheelchairs and Rehabilitation Equipment*. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, vol. 4, no. 3, pags. 188–192, September 1996.
- [Madarasz 86] Richard L. Madarasz, Loren H. Heiny, Robert F. Crompt & Neal M. Mazur. *The Design of an Autonomous Vehicle for the Disabled*. IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-2, no. 3, pags. 117–126, September 1986.
- [Madsen 98] Claus B. Madsen & Claus S. Andersen. *Optimal Landmark Selection for Triangulation of Robot Position*. Robotics and Autonomous Systems, no. 23, pags. 277–292, 1998.
- [Maíllo 93] Santiago Maíllo. Aplicación Práctica del Reconocimiento de Voz. Unidad Móvil Comandada Vocalmente. Proyecto Fin de Carrera, grado de Ingeniero Técnico en Equipos Electrónicos, Escuela Politécnica, Universidad de Alcalá, Marzo 1993. Director: D. Manuel Mazo Quintas.
- [Marrón 00] Marta Marrón. Navegación Autónoma de una Silla de Ruedas en Interiores Parcialmente Estructurados. Proyecto Fin de Carrera, grado de Ingeniero en Electrónica, Escuela Politécnica, Universidad de Alcalá, Septiembre 2000. Director: D. Juan Carlos García García.
- [Martens 01] Christian Martens, Nils Ruchel, Oliver Lang, Oleg Ivlev & Axel Gräser. *A FRIEND for Assisting Handicapped People*. IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 7, no. 1, pags. 57–65, March 2001.
- [Matía 98a] F. Matía, N. Katevas & F. Wawak. *MobiNet: Research Training Network for the Application of Mobile Robotics Technology in Health Care Services*. En Paul P. Wang, editor, JCIS'98 Proceedings, volume I: 6th International Conference on Fuzzy Theory and Technology and 2nd International Workshop on Intelligent Control, pags. 211–232, Raleigh, NC, USA, October 1998.
- [Matía 98b] F. Matía, R. Sanz & E. A. Puente. *Increasing Intelligence in Autonomous Wheelchairs*. Journal of Intelligent and Robotic Systems, no. 22, pags. 211–232, 1998.
- [Matsumoto 98] Yoshio Matsumoto, Masayuki Inaba & Hirochika Inoue. Field and service robotics, capítulo Memory-Based Navigation using Omni-View Sequence, pags. 171–176. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998. ISBN: 1-85233-039-2.

- [Mazo 95a] M. Mazo, F. J. Rodríguez, J. Lázaro, J. Ureña, J. C. García, E. Santiso, P. Revenga & J.J. García. *Wheelchair for Physically Disabled People with Voice, Ultrasonic and Infrared Sensor Control*. Autonomous Robot, no. 2, pags. 203–224, 1995.
- [Mazo 95b] M. Mazo, F. J. Rodríguez, J. L. Lázaro, J. Ureña, J. C. García, E. Santiso & P. A. Revenga. *Electronic Control of a Wheelchair Guided by Voice Commands*. Control Engineering Practice, vol. 3, no. 5, pags. 665–674, May 1995.
- [Mazo 01] Manuel Mazo & SIAMO Research Group. *An Integral System for Assisted Mobility*. IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 7, no. 1, pags. 46–56, March 2001.
- [Meade 97] Mike Meade. DX key technical description. for DX key application designers. Dynamic Controls Ltd., 1997.
- [Méndez 93] Nicolás Méndez. Aplicación Práctica del Reconocimiento de Voz. Silla de Ruedas Comandada Vocalmente. Proyecto Fin de Carrera, grado de Ingeniero Técnico en Equipos Electrónicos, Escuela Politécnica, Universidad de Alcalá, Marzo 1993. Director: D. Manuel Mazo Quintas.
- [Miller 95] D. P. Miller & M. G. Slack. *Design and Testing of a Low-Cost Robotic Wheelchair Prototype*. Autonomous Robots, no. 2, pags. 77–88, 1995.
- [Moon 99] Inhyuk Moon, Jun Miura & Yoshiaki Shirai. *On-Line Viewpoint and Motion Planning for Efficient Visual Navigation under Uncertainty*. Robotics and Autonomous Systems, no. 28, pags. 237–248, 1999.
- [Nair 98] Dinesh Nair & Jagdishkumar K. Aggarwal. *Moving Obstacle Detection From a Navigating Robot*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 14, no. 3, pags. 404–416, June 1998.
- [Nelisse 98] M. W. Nelisse. *Integration Strategies Using a Modular Architecture for Mobile Robots in the Rehabilitation Field*. Journal of Intelligent and Robotic Systems, no. 22, pags. 181–190, 1998.
- [Nisbet 88] P. D. Nisbet, I. R. Loudon & J. P. Odor. *The CALL Centre Smart Wheelchair*. En Proceedings 1st International Workshop on Robotic Applications to Medical and Health Care, Ottawa, Canada, 1988.
- [Nunes 00] Margarida Nunes, Luis Azevedo & Ana Londral. Actas del Congreso Iberoamericano, Iberdiscap 2000, capítulo Proyecto PALMA: Avaliação do Protótipo com

- Utentes do Centro de Reabilitação de Paralisia Cerebral de Lisboa, pags. 169–170. Outubro 2000. ISBN: 84-699-3235-5.
- [Oderud 97] Tone Oderud. Advancement of assistive technology, volume 3 de *Assistive Technology Research Series*, capítulo Experiences from the Evaluation of a Manus Wheelchair-mounted Manipulator, pags. 20–23. IOS Press, 1997. ISBN: 90-5199-361-7.
- [Okhotsimski 77] D. E. Okhotsimski, V. S. Gurfinkel, E. A. Devyanin & A. K. Platonov. Machine intelligence, volume 9, capítulo Integrated walking Robot development. 1977.
- [Oraltec] Oraltec. Gessellschaft für Rehatechnik mbH, Monnetstrasse 24, D-52146 Würselen, RFA. <http://members.aol.com/oraltec>.
- [Ottaviani 99] E. Ottaviani, A. PAvan, M. Bottazi, E. Brunelli, F. Caselli & M. Guerrero. *A common Image Processing Framework for 2D Barcode Reading*. En Seventh International Conference on Image Processing and its Applications, Conference Publication No. 465, volume 2, pags. 652–655, 1999.
- [Overboom 97] Gemma Overboom, Martin Nelisse & Koos Van Woerden. Advancement of assistive technology, volume 3 de *Assistive Technology Research Series*, capítulo FOCUS on the Central position of Users in integrated Systems (TIDE-FOCUS), pags. 303–313. IOS Press, 1997. ISBN: 90-5199-361-7.
- [Palmer 89] Roger C. Palmer. *The Bar Code Book*. Helmers Publishing, 1989. ISBN: 0-1911261-05-02.
- [Peussa 98] P. Peussa, A. Virtanen & T. Johansson. *Improving the Mobility of Severely Disabled*. En Proceedings of the 2nd European Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies, pags. 169–176, Skövde, Sweden, September, 10-11 1998.
- [Pires 97] G. Pires, N. Honório, C. Lopes, U. Nunes & A. T. Almeida. *Autonomous Wheelchair for Disabled People*. En Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE'97, volume 3, pags. 797–801, July 1997. ISBN: 0-7803-3936-3.
- [Prassler 01] Erwin Prassler, Jens Scholz & Paolo Fiorini. *A Robotic Wheelchair for Crowded Public Environments*. IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 7, no. 1, pags. 38–45, March 2001.

- [Press 93] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling & Brian P. Flannery. Numerical Recipes in C: the Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, 2 edición, 1993. ISBN: 0-521-43108-5.
- [Remagnino 95] P. Remagnino, J. Illingworth, J Kittler & J Matas. *Intentional control of a camera look direction and viewpoint in an active vision system*. Image and Vision Computing, vol. 13, no. 2, pags. 79–88, March 1995.
- [Rio 97] F. Díaz del Río, A. Civit-Balcells, G. Jiménez & J. L. Sevillano. Advancement of assistive technology, volume 3 de *Assistive Technology Research Series*, capítulo Path Tracking in the SIRIUS Wheelchair, pags. 370–374. IOS Press, 1997. ISBN: 90-5199-361-7.
- [Röfer 97] Thomas Röfer. *Panoramic Image Processing and Route Navigation*. Tesis Doctoral, grado Doktors der Ingenieurwissenschaften, Fachbereich Mathematik und Informatik der Universität Bremen, January 1997.
- [Röfer 98a] T. Röfer & R. Müller. Distributed autonomous robotics systems, capítulo Navigation and Routemark Detection of the Bremen Autonomous Wheelchair, pags. 183–192. Springer, 1998.
- [Röfer 98b] Thomas Röfer & Axel Lankenau. *Architecture and Applications of the Bremen Autonomous Wheelchair*. En Proceedings of the 1998 Joint Conference on Information Sciences, JCIS'98, pags. 365–368, Raleigh, North Carolina, October, 23-28 1998. Association for Intelligent Machinery.
- [Romero 00] Juan Antonio Romero. *Contribución al control de un Robot Móvil guiado mediante Visión Artificial*. Tesis Doctoral, Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid, 2000.
- [Rosenfield 59] G. H. Rosenfield. *The Problem of Exterior Orientation in Photogrammetry*. Photogrammetric Engineering, vol. 25, pags. 536–553, 1959.
- [Salminen 99] Anna-Liisa Salminen & Helen Petrie. Assistive technology on the threshold of the new millenium, volume 6 de *Assistive Technology Research Series*, capítulo The Impact of Computer Augmented Communication on the Daily Lives of Severely Disabled Speech Impaired Children and Youngsters, pags. 367–370. IOS Press, Amsterdam, 1999. ISBN: 1-58603-001-9.

- [Sarwate 80] Dilip V. Sarwate & Michael B. Pursley. *Crosscorrelation Properties of Pseudo-random and Related Sequences*. Proc. of the IEEE, vol. 68, no. 5, pags. 593–619, May 1980.
- [Scharstein 01] D. Scharstein & A. J. Briggs. *Real-time recognition of self-similar landmarks*. Image and Vision Computing, vol. 19, no. 11, pags. 763–772, September 2001.
- [Schilling 98a] K. Schilling & H. Roth. *Convoy Driving and Obstacle Avoidance Systems for Electrical Wheelchairs*. En Proceedings of the 1998 Joint Conference on Information Sciences, JCIS'98, pags. 353–356, Raleigh, North Carolina, October, 23-28 1998. Association for Intelligent Machinery.
- [Schilling 98b] Klaus Schilling, Hubert Roth, Robert Lieb & Hubert Stützle. Improving the quality of life for the european citizen, capítulo Sensors to Improve the Safety for Wheelchair Users, pags. 331–335. Assistive Technology Research Series. IOS Press, 1998.
- [Schuster 93] Rolf Schuster, Nirwan Ansari & Ali Bani-Hashemi. *Steering a Robot with Vanishing Points*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, no. 4, pags. 491–498, August 1993.
- [Sebastián 99] Eduardo Martínez Sebastián. Guiado Semiautomático de una Silla de Ruedas. Proyecto Fin de Carrera, grado de Ingeniero en Electrónica, Escuela Politécnica, Universidad de Alcalá, Octubre 1999. Director: D. Juan Carlos García García.
- [Serradilla 97] Francisco Serradilla. *Arquitectura cognitiva basada en el gradiente sensorial y su aplicación a la Robótica Móvil*. Tesis Doctoral, Departamento de Inteligencia Artificial. Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid, 1997.
- [Song 87] S. M. Song & R. J. Waldron. *Geometric Design of a Walking Machine for Optimal Mobility*. ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, vol. 109, no. 1, 1987.
- [Taylor 98] Camillo J. Taylor & David J. Kriegman. *Vision-Based Motion Planning and Exploration Algorithms for Mobile Robots*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 14, no. 3, pags. 417–426, June 1998.
- [Thompson 59] E. H. Thompson. *An Exact Linear Solution of the Problem of Absolute Orientation*. Photogrammetria, vol. 15, pags. 152–159, 1958-1959.

- [Thrun 96] Sebastian Thrun. *A Bayesian Approach to Landmark Discovery and Active Perception in Mobile Robot Navigation*. Informe técnico CMU-CS-96-122, School of Computer Science, Carnegie Mellon University. Pittsburgh, PA 15213, U.S.A., May 1996.
- [Trahalias 99] Panos E. Trahalias, Savvas Velissaris & Stelios C. Orphanoudakis. *Visual Recognition of Workspace Landmarks for Topological Navigation*. *Autonomous Robots*, vol. 7, no. 2, pags. 143–158, September 1999.
- [Tsai 87] R. Y. Tsai. *A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses*. *IEEE Journal in Robotics Automation*, vol. RA-3, no. 4, pags. 323–344, 1987.
- [Ureña 98] Jesús Ureña. *Contribución al diseño e implementación de un Sistema Sonar para la Automatización de un Vehículo Industrial*. Tesis Doctoral, Escuela Politécnica. Universidad de Alcalá, Abril 1998. Director: Dr. Manuel Mazo Quintas.
- [Ureña 99] J. Ureña, M. Mazo, Juan Jesús García, A. Hernández & E. Bueno. *Correlation Detector Based on a FPGA for Ultrasonic Sensors*. *Microprocessors and Microsystems*, no. 23, pags. 25–33, January 1999.
- [Vicente Díaz 00] S. Vicente Díaz, D. Cascado Caballero, L. Miró Amarante, M.A. Rodríguez Jodar, F. Díaz del Río & A. Civit-Balcells. *Actas Del Congreso Iberoamericano, Iberdiscap 2000, capítulo Silla de ruedas inteligente: TetraNauta*, pags. 125–128. Octubre 2000. ISBN: 84-699-3235-5.
- [Wand 91] Ling-Ling Wand & Wen-Hsiang Tsai. *Camera Calibration by Vanishing Lines for 3-D Computer Vision*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, no. 4, pags. 370–376, April 1991.
- [Wang 91] Ling-Ling Wang & Wen-Hsiang Tsai. *Camera Calibration by Vanishing Lines for 3-D Computer Vision*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, no. 4, pags. 370–376, April 1991.
- [Ward 98] Koren Ward & Alexander Zelinsky. *Field and service robotics*, capítulo *An Exploratory Robot Controller which Adapts to Unknown Environments and Damaged Sensors*, pags. 457–463. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998. ISBN: 1-85233-039-2.

- [Wellman 95] Parris Wellman, Venkat Krovi, Vijay Kumar & William Harwin. *Design of a Wheelchair with Legs for People with Motor Disabilities*. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, vol. 3, no. 4, pags. 343–353, December 1995.
- [Woerden 95] J.A. Van Woerden & M.W. Nelisse. The european context for assistive technology, volume 1 de *Assitive Technology Research Series*, capítulo Integrated solutions for assistive devices, pags. 387–392. IOS Press, 1995. ISBN: 90-5199-220-3.
- [Yoder 96] John-David Yoder, Eric T. Baumgartner & Steven S. Skaar. *Initial Results in the Development of a Guidance System for a Powered Wheelchair*. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, vol. 4, no. 3, pags. 143–151, September 1996.
- [Zhang 98] Zhengyou Zhang. *A Flexible New Technique for Camera Calibration*. Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Research, December 1998. Available together with the software at <http://research.microsoft.com/~zhang/Calib/>.
- [Zhang 99] Jianwei Zhang, Alois Knoll & Volkmar Schwert. *Situated Neuro-Fuzzy Control for Vision-Based Robot Localization*. Robotics and Autonomous Systems, no. 28, pags. 71–82, 1999.