



D^ª. M^ª DOLORES BLANCO ROJAS, con D. N. I. : 52.093.557 Y

AUTORIZA:

A que su tesis doctoral con el título: **“Planificación local basada en sensores para un manipulador móvil en tareas de colaboración con humanos”** pueda ser utilizada para fines de investigación por parte de la Universidad Carlos III de Madrid.

Leganés, 3 de julio de 2002

Fdo.: M^ª Dolores Blanco Rojas



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

TESIS DOCTORAL

**Planificación local basada en sensores
para un manipulador móvil en tareas de
colaboración con humanos**

Autor:
Dolores Blanco Rojas

Directores:
Dr. Luis E. Moreno Lorente
Dr. Carlos Balaguer Bernaldo de Quirós

Leganés, 2002

BLANCO XOTAS, DULO

RESUMEN

Un manipulador móvil, como cualquier otro sistema que opere en entornos reales, debe ser capaz de evitar los obstáculos que se presenten en su camino. Esta tesis propone una estrategia para dotar al manipulador móvil de esta habilidad basándose en la información del entorno proporcionada por un telémetro láser.

Se ha optado por un modelo único del entorno, el Diagrama de Voronoi Local, construido a partir de los datos sensoriales, que se utiliza por igual en los módulos de planificación y localización. El algoritmo propuesto puede utilizarse en línea para construir el DVL de una zona restringida del entorno alrededor de la posición actual del robot. La limitación en el tiempo de cómputo, permite actualizar el modelo del entorno con suficiente rapidez para detectar la presencia de obstáculos inesperados y planificar una trayectoria local que permita evitarlos.

El diseño de los módulos de construcción del mapa local, localización y planificación se ha hecho con la idea de que puedan ser aplicados a cualquier tipo de robot móvil dotado de un telémetro láser. De esta forma, los algoritmos desarrollados y presentados en esta tesis son aplicables a un considerable número de sistemas. Su funcionamiento ha podido comprobarse en la ejecución de una serie de experimentos cuyos resultados quedan recogidos a lo largo de este trabajo.

Por último, se presentan las adaptaciones de los algoritmos desarrollados para su integración en el sistema de control de un manipulador móvil. Teniendo como objetivo la colaboración del sistema con operarios humanos en tareas de transporte de piezas, el planificador de trayectorias locales se conecta directamente con el módulo de control cinemático coordinado y el bucle de control de impedancia previamente diseñados. A su vez, la realimentación de la señal de fuerza en el módulo de planificación permite estimar la dirección de movimiento del operario. Con esta información el planificador escoge, si es posible, aquella trayectoria local libre de obstáculos que más se adecúe al movimiento del operario.

TESIS DOCTORAL

**Planificación local basada en sensores
para un manipulador móvil en tareas
de colaboración con humanos**

Autor: **Dolores Blanco Rojas**

Directores: **Prof. Dr. Luis E. Moreno Lorente**
Prof. Dr. Carlos Balaguer Bernaldo de Quirós

Tribunal Calificador:

Presidente:

Vocales:

Vocal Secretario:

Calificación: SOBRESALIENTE CUM LAUDE POR UNANIMIDAD

Leganés, 3 de JULIO de 2002



Planificación local basada en sensores para un manipulador móvil en tareas de colaboración con humanos

Dolores Blanco

Directores:

Dr. Luis E. Moreno Lorente

Dr. Carlos Balaguer Bernaldo de Quirós

Tesis Doctoral

2002

Escuela Politécnica Superior
de la Universidad Carlos III de Madrid

Universidad Carlos III

Publication Data:

Dolores Blanco

Planificación local basada en sensores para un manipulador
móvil en tareas de colaboración con humanos

Universidad Carlos III

Copyright © 2002 Dolores Blanco

— *A mis padres* —

AGRADECIMIENTOS

Son siempre muchas las personas a las que deberíamos dar las gracias y demasiadas las veces que olvidamos hacerlo. Casi nada de lo que hacemos es fruto únicamente de nuestro trabajo, y mucho menos si estamos hablando de una tesis doctoral. Este es un buen momento para acordarme al menos de aquellos que de forma más directa han contribuido a que este proyecto llegase a su fin. Quisiera dar las gracias,

A José María Carles, Beatriz García, Nuria Díaz y José Ignacio Prada, por la realización de trabajos que han sido incluidos en esta tesis.

A Vicente Fernández por haberme dejado en herencia a *OTILIO* y su sistema de control.

A todos los miembros del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, los que están ahora y los que han estado, por su siempre desinteresada ayuda. En especial a Cristina Castejón, Beatriz López Boada, María Jesús López Boada, Mario Mata, Ramiro Díez, Verónica Egido y Ángela Nombela, por todo el trabajo compartido en estos años y por todo lo que no siendo trabajo también hemos compartido.

A mis directores de tesis. A Carlos Balaguer por darme una oportunidad que yo no esperaba y permitirme iniciar mi formación en la Universidad Carlos III. Y a Luis Moreno por dirigir esta tesis con dedicación, corrigiendo errores y aplaudiendo aciertos, por estar siempre dispuesto a pesar de que el tiempo escasea, por valorar nuestro trabajo y hacérselo saber, y por generar en todos los que trabajamos con él la confianza necesaria para seguir adelante a pesar de "cores", fuera de límites, encoders estropeados o robots accidentados.

Y porque todo esto no significaría nada sin ellos, gracias a los que probablemente menos entiendan de este trabajo pero más hayan influido en él. Gracias a mi familia, a mis padres y mis hermanos porque han conseguido hacerme siempre sentir feliz independientemente de las circunstancias de cada momento. Y a Andrés, entre un millón de cosas, por entender y admitir todo el tiempo que en lugar de pasar contigo he dedicado a esta tesis y, sobre todo, por querer que caminemos juntos.

RESUMEN

Un manipulador móvil, como cualquier otro sistema que opere en entornos reales, debe ser capaz de evitar los obstáculos que se presenten en su camino. Sin embargo, en el caso del manipulador móvil, la solución de este problema es mucho más compleja. Esta tesis propone una estrategia para dotar al manipulador móvil de esta habilidad basándose en la información del entorno proporcionada por un telémetro láser.

Se ha optado por un modelo único del entorno, el Diagrama de Voronoi Local, construido a partir de los datos sensoriales, que se utiliza por igual en los módulos de planificación y localización. El algoritmo propuesto puede utilizarse en línea para construir el DVL de una zona restringida del entorno alrededor de la posición actual del robot. La limitación en el tiempo de cómputo, permite actualizar el modelo del entorno con suficiente rapidez para detectar la presencia de obstáculos inesperados y planificar una trayectoria local que permita evitarlos.

El diseño de los módulos de construcción del mapa local, localización y planificación se ha hecho con la idea de que puedan ser aplicados a cualquier tipo de robot móvil dotado de un telémetro láser. De esta forma, los algoritmos desarrollados y presentados en esta tesis son aplicables a un considerable número de sistemas. Su funcionamiento ha podido comprobarse en la ejecución de una serie de experimentos cuyos resultados quedan recogidos a lo largo de este trabajo.

Por último, se presentan las adaptaciones de los algoritmos desarrollados para su integración en el sistema de control de un manipulador móvil. Teniendo como objetivo la colaboración del sistema con operarios humanos en tareas de transporte de piezas, el planificador de trayectorias locales se conecta directamente con el módulo de control cinemático coordinado y el bucle de control de impedancia previamente diseñados. A su vez, la realimentación de la señal de fuerza en el módulo de planificación permite estimar la dirección de movimiento del operario. Con esta información el planificador escoge, si es posible, aquella trayectoria local libre de obstáculos que más se adecúe al movimiento del operario.

ABSTRACT

A mobile manipulator, just like any other system operating in real environments, must be able to avoid obstacles that appear on its way. This thesis proposes a strategy to provide the mobile manipulator with this ability. It is based on environment information supplied by a laser range scanner.

The Local Voronoi Diagram (*LVD*), built from sensor data, has been adopted like the only one environment model. It is used the same in planning as localization modules. The proposed algorithm is able to be used on-line to construct the *LVD* of a visible region around the current location of the robot. Computing time is limited, this allows up to update the environment model in a short time, detecting the presence of unexpected obstacles and planning a local path to avoid its.

The design of local map construction, localization and planification modules have been developed with the intention to be putting in practice on any mobile robot with a scanner laser on board. Then, algorithms described in this thesis can be applied to a lot of systems. The algorithms performance has been tested running a sequence of experiments on real systems. The results are presented along this document.

Finally, the algorithms have been adapted to be integrated on the mobile manipulator control system. In order to collaborate with human operator in material handling tasks, the local path planning module is connected with the coordinated kinematic control module and with the damping control module previously designed. Force signal is used in planning module to estimate movement direction for the operator. The planning module uses this information to choose the best local free path, closer to the human movement.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
1. Introducción	1
1.1 La evolución de la robótica.	1
1.2 Manipuladores móviles.	2
1.3 Objetivos de la tesis	4
1.4 Estructura de la tesis	6
2. Estado del Arte	9
2.1 Introducción	9
2.2 Origen de los manipuladores móviles	10
2.3 Manipuladores móviles teleoperados	11
2.3.1 Algunos sistemas teleoperados	11
2.4 Manipuladores móviles autónomos	12
2.4.1 Sistemas base móvil + brazo manipulador	13
2.4.2 Sistemas integrados	15
2.5 Manipuladores móviles en cooperación con el hombre	17
2.6 Manipuladores móviles ante la presencia de obstáculos	20
2.7 Conclusiones	21
3. Arquitectura del Manipulador Móvil	23
3.1 Introducción	23
3.2 Arquitectura hardware	24
3.2.1 Características técnicas de los subsistemas	25
Base móvil RWI B21	25
Brazo manipulador CRS A465	25
Sistema sensorial	27

	Computador de a bordo	29
	Sistema de comunicación remota	30
3.3	Arquitectura de control	30
3.3.1	Módulo de control	31
3.3.2	Módulos de planificación	33
	Construcción del mapa local	34
	Localización	34
	Planificación	35
3.4	Interfaz gráfica de supervisión y operación remota	36
3.4.1	Procesos en la estación remota	36
3.4.2	Procesos de comunicación en el computador principal	38
3.5	Arquitectura software	38
4.	Extracción de la Información Local	41
4.1	Introducción	41
4.1.1	El Diagrama de Voronoi	42
4.2	Trabajos previos	44
4.3	Definiciones básicas	45
4.3.1	Diagrama ordinario de Voronoi para puntos	45
4.3.2	Diagrama de Voronoi para series de puntos	46
4.3.3	Algoritmos para construir diagramas de Voronoi	47
	Aproximación por puntos	47
	Aproximación por una imagen digital	48
4.4	Construcción del DVL	49
4.4.1	Agrupación de los datos	51
4.4.2	Discretización de la región visible	53
4.4.3	Cálculo de distancias a los grupos generadores	53
	Error cometido por la discretización del espacio.	
	Influencia de la resolución.	55
	Etiquetado de las celdillas	56
4.5	Resultados experimentales de la construcción del DVL	58
4.6	Adaptación del DVL al manipulador móvil guiado por un operario humano	60
4.6.1	Identificación de la posición del operario	62
4.6.2	Operario en zona vacía	62
4.6.3	Operario delante de una pared	64
4.6.4	Operario ocultando parcialmente una puerta	66
4.7	Conclusiones	69

5. Localización por Correlación	71
5.1 Introducción	71
5.2 Trabajos previos	72
5.2.1 Sistemas de posicionamiento incremental	73
5.2.2 Sistemas de posicionamiento absoluto	73
Sistemas basados en marcas	74
Sistemas basados en mapas	75
5.3 Exposición de nuestro problema y objetivos	77
5.4 Algoritmos de Correlación	78
5.4.1 Correspondencia por correlación	79
5.4.2 Coincidencia de modelos	80
5.5 Localización por correlación de Diagramas de Voronoi	82
5.6 Resultados Experimentales	85
5.6.1 Correlación sin odometría	87
5.6.2 Correlación con odometría	91
5.6.3 Influencia de la orientación	94
5.7 Conclusiones	95
6. Módulo de Control	97
6.1 Introducción	97
6.2 Arquitectura de control	98
6.3 La redundancia cinemática	99
6.3.1 Optimización	100
6.3.2 Inversión cinemática	100
6.4 El modelo cinemático	101
6.4.1 El modelo de estado	102
6.4.2 La matriz jacobiana de un manipulador móvil	104
6.5 El módulo de control cinemático coordinado	106
6.5.1 Método de la proyección del gradiente	107
6.5.2 Diseño del controlador	107
Control de velocidad calculada	108
El término homogéneo	109
6.5.3 La variante ponderada	109
6.5.4 Proyección del gradiente para robots no holónomos	110
Seguimiento del gradiente mediante linealización entrada- salida	110
6.6 Resultados de la aplicación del control GPM al seguimiento de trayectorias	113
6.7 Control de fuerza	116

6.7.1	El control de impedancia	116
6.7.2	Aplicación del control de impedancia	117
	El diseño del regulador	117
6.8	Aplicación conjunta del control GPM y el control de fuerza	118
6.9	Conclusiones	119
7.	Planificación Local de Trayectorias	123
7.1	Introducción	123
7.2	Planificación de trayectorias locales basadas en el DVL	124
7.3	Generación de caminos	124
7.4	Selección del camino más adecuado	128
	7.4.1 En función de una serie de puntos de referencia	130
	Ejemplos de evitación de obstáculos	131
	Ejemplos de paso por puertas	132
	Situaciones conflictivas	136
	7.4.2 En función de una dirección preferente	138
7.5	Planificación de la trayectoria atendiendo al objeto transportado	141
	Crecimiento de los obstáculos	143
	Desplazamiento de la trayectoria en función de la po- sible colisión	146
7.6	Generación de trayectoria cartesiana	147
7.7	Estimación de tiempos	149
7.8	Conclusiones	149
8.	Aplicación al Manipulador Móvil <i>OTILIO</i>.	151
8.1	Introducción	151
8.2	Funcionamiento autónomo del manipulador móvil	152
	8.2.1 Generación de la trayectoria cartesiana	153
8.3	Tarea de colaboración con operario humano	155
	8.3.1 Construcción del DVL con la presencia del operario	157
	8.3.2 Estimación de la dirección de movimiento	158
	8.3.3 Selección de la trayectoria local	161
	8.3.4 Conexión con el módulo de control	164
8.4	Conclusiones	165
9.	Conclusiones	167
9.1	Aportaciones	167
9.2	Futuros Desarrollos	169

Apéndice	173
A. AccuRange Line Scanner. Descripción y Calibración	175
A.1 Hardware del sistema	175
A.1.1 AccuRange 4000	175
A.1.2 Motor y encoder	176
A.1.3 High-Speed InterFace	178
A.1.4 Conexionado del AccuRange Line Scanner	179
A.2 Calibración del sistema	179
A.2.1 Calibración en distancias	180
A.2.2 Calibración en ángulos	181
A.2.3 Tiempo de barrido	182
A.2.4 Resolución angular	183
A.2.5 Parámetros seleccionados	184
B. Interpolación mediante “splines” cúbicos	187

ÍNDICE DE TABLAS

3.1	Características de la base móvil RWI B21	25
3.2	Especificaciones de funcionamiento del CRS A465	26
3.3	Características del AccuRange Line Scanner	29
3.4	Características del sensor de fuerza	29
4.1	Error en función de la resolución	56
4.2	Tiempos en función del tamaño de celdilla	60
5.1	Resultados de localización para entorno 1	87
5.2	Resultados de localización para entorno 2	90
5.3	Comparación: Correlación sin odometría - con odometría	93
5.4	Resultados de localización con búsqueda de orientación	95
6.1	Parámetros de Denavit-Hartenberg	103
7.1	Tiempos para planificación de trayectorias locales	149
8.1	Tiempos empleados en el método de crecimiento de obstáculos	161
A.1	Características del AR4000	175
A.2	Velocidad de giro en función de la tensión de alimentación	177
A.3	Calibración en distancias	180
A.4	Calibración en tiempo.vs.potencia	183
A.5	Calibración de la resolución	185

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1	Plataforma Experimental. Manipulador Móvil Otilio	24
3.2	Manipulador CRS A465 con controlador C-500	26
3.3	Detalle de la garra servocontrolada y el sensor fuerza-par en el extremo del manipulador.	27
3.4	AccuRange Line Scanner.	28
3.5	Arquitectura de control del manipulador móvil.	31
3.6	Arquitectura del módulo de control.	32
3.7	Estructura del módulo de planificación.	36
3.8	Entorno gráfico de operación remota.	37
3.9	Arquitectura software del manipulador móvil.	39
4.1	Diagrama de Voronoi para puntos	43
4.2	Agrupamiento en clusters por discontinuidades en las distancias medidas	52
4.3	Proceso de construcción del DVL	54
4.4	Error debido a la discretización	55
4.5	Comparación de distancias a clusters	56
4.6	Diagrama de Voronoi Local	57
4.7	Pasillo con puerta abierta a la izquierda	58
4.8	Obstáculo en el centro del pasillo con puertas cerradas	59
4.9	Pasillo con puertas abiertas a la derecha y a la izquierda	59
4.10	Vestíbulo con puerta al fondo y obstáculos. Tiempo: 1886 ms; d_{max} : 6 m	60
4.11	Influencia del tamaño de la celdilla	61
4.12	Situación 1: Operario en zona libre.	63
4.13	Medidas del telémetro láser para situación 1.	63
4.14	Situación 1: Operario aislado de los obstáculos.	64
4.15	Situación 2: Operario delante de una pared.	65
4.16	Medidas del telémetro láser para situación 2.	65
4.17	Situación 2: Operario delante de una pared.	66
4.18	Situación 3: Operario ocultando parcialmente una puerta.	67

4.19	Medidas de telémetro láser para situación 3.	67
4.20	Otros casos posibles.	68
4.21	Situación 3: Operario ocultando parcialmente una puerta. . .	69
5.1	Correlación $f(x,y)$ y $w(x,y)$	80
5.2	Esquema del módulo de localización	86
5.3	Entorno 1 - Prueba 1, Tiempo: 1269 <i>ms</i>	88
5.4	Entorno 1 - Prueba 2 , Tiempo: 1291 <i>ms</i>	88
5.5	Entorno 1 - Prueba 3, Tiempo: 1284 <i>ms</i>	89
5.6	Entorno 1 - Prueba 4, Tiempo: 1265 <i>ms</i>	89
5.7	Entorno 2 - Prueba 1, Tiempo: 5166 <i>ms</i>	90
5.8	Entorno 2 - Prueba 2. Tiempo: 5161 <i>ms</i>	91
5.9	Entorno 2 - Prueba 3. Tiempo: 5249 <i>ms</i>	92
5.10	Entorno 2 - Prueba 4. Tiempo: 5320 <i>ms</i>	93
5.11	Entorno 2 - Prueba 5. Tiempo: 395 <i>ms</i>	94
5.12	Localización con búsqueda angular. Tiempo: 10 <i>s</i>	96
6.1	Arquitectura de control	98
6.2	Modelo geométrico de un manipulador móvil de 8 grados de libertad, con base móvil no holónoma	102
6.3	Diagrama de bloques del controlador de RMRC.	108
6.4	Diagrama de bloques del controlador de proyección del gradiente para robots no holónomos.	112
6.5	Resultados del experimento 5-1	114
6.6	Resultados del experimento 5-2	115
6.7	Trayectoria de giro bajo el control de fuerza.	119
6.8	Cooperación hombre-robot.	120
7.1	Estructura del módulo de planificación.	125
7.2	Proceso de generación de caminos.	126
7.3	Ejemplo 1 de generación de caminos	128
7.4	Ejemplo 2 de generación de caminos	129
7.5	Condición de distancia de seguridad	130
7.6	Ejemplo de evitación de obstáculos	131
7.7	Ejemplo de evitación de obstáculos	132
7.8	Ejemplo con varios caminos	133
7.9	Ejemplo 1 de paso por puertas	134
7.10	Ejemplo 2 de paso por puertas	134
7.11	Ejemplo 3 de paso por puertas	135
7.12	Ejemplo 4 de paso por puertas	135

7.13	Ejemplo 1. Situaciones conflictivas	136
7.14	Ejemplo de trayectoria no adecuada	137
7.15	Ejemplo 1. Selección de camino según dirección preferente . . .	139
7.16	Ejemplo 2. Selección de camino según dirección preferente . . .	140
7.17	Ejemplo 3. Selección de camino según dirección preferente . . .	141
7.18	Ejemplo de selección de caminos	142
7.19	Proyección sobre el plano XY	144
7.20	Crecimiento de los obstáculos.	145
7.21	Desplazamiento de la trayectoria.	147
7.22	Estructura del módulo de planificación en tareas de colaboración.	148
8.1	Esquema de funcionamiento en tareas autónomas	152
8.2	Resultados del experimento 7-1	154
8.3	Resultados del experimento 7-2	155
8.4	Esquema de funcionamiento en tareas de colaboración	156
8.5	Sistemas de coordenadas del manipulador móvil	157
8.6	Posición del operario en el SDC del elemento terminal	158
8.7	Sistemas de coordenadas de base y láser	159
8.8	Vector de fuerza	159
8.9	Evolución del ángulo de dirección de movimiento estimada. . .	160
8.10	DVL con crecimiento de los obstáculos	162
8.11	DVL con crecimiento de los obstáculos	163
A.1	Dimensiones del AR4000 (medidas en pulgadas)	176
A.2	Dimensiones del AccuRange Line Scanner (medidas en pulgadas)	177
A.3	Tarjeta High-Speed Interface	178
A.4	Error en distancias	181
A.5	Método de calibración angular	182
A.6	Calibración angular gráfica	182

1. INTRODUCCIÓN

1.1 La evolución de la robótica.

Desde el inicio de la robótica como disciplina científica, la mayor parte del esfuerzo de investigación y desarrollo en este campo se ha centrado en los robots manipuladores, debido a sus inmediatas aplicaciones industriales. Desde los años sesenta los robots manipuladores se han introducido en la industria convirtiéndose en un elemento destacado del proceso productivo en las células de fabricación automatizadas. En su mayor parte estos manipuladores han estado destinados a labores repetitivas en un entorno de trabajo muy limitado, como pueden ser labores de soldadura, pintura o ensamblaje industrial, en las que son ampliamente utilizados. Tradicionalmente los robots industriales se limitaban a brazos manipuladores con la base fijada a una superficie rígida (suelo o techo), de forma que sólo podían evolucionar en un espacio de posiciones accesibles limitado por las dimensiones del brazo manipulador.

Es fácil imaginar que muy pronto se haría necesario salvar estas limitaciones dotando a los robots de una mayor movilidad y permitiéndoles así ampliar su entorno de trabajo. De esta forma se aumentan las aplicaciones de la robótica tanto en la industria como fuera de ella. Una primera solución fue el desarrollo de vehículos sobre railes para tareas de transporte de materiales, apareciendo los primeros vehículos guiados automáticamente (AGV) que se convierten en un elemento fundamental en la automatización de las tareas de transporte. La sustitución de los railes por otros sistemas de guiado como cables enterrados, caminos marcados con pintura en el suelo, etc., ha hecho posible la presencia a partir de los años 80 de los AGV's en muchas fábricas y almacenes, entornos muy estructurados en los que se conoce de forma bastante precisa la situación de todos sus elementos y en los que se puede intervenir situando los dispositivos de guiado necesarios para la tarea que va a desarrollar el robot móvil. Esta posibilidad de estructuración del entorno industrial permite la navegación de vehículos con capacidades sensoriales y de razonamiento muy limitadas, sin embargo estos sistemas son incapaces

de reaccionar ante cualquier cambio inesperado en el área de trabajo que les llevaría a no poder realizar la tarea encomendada.

El siguiente paso en el desarrollo de la robótica móvil surge a raíz de la búsqueda de un vehículo de propósito general apto para desenvolverse en cualquier ambiente, no sólo en un entorno industrial estructurado y controlado, sino en aplicaciones fuera del entorno industrial donde puede ser costoso o imposible actuar para situar los sistemas de guiado del vehículo. Es necesario en estos casos dotar a los sistemas robóticos de una mayor capacidad de razonamiento y de un mayor grado de percepción. Se pretende conseguir robots con capacidad de movimiento en entornos no estructurados, de los que no se tenga ningún conocimiento o éste sea incompleto, interpretando la información proporcionada por sus sensores. Se busca, por tanto, un sistema autónomo capaz de moverse sin más ayuda externa que sus propios sensores.

La investigación en robótica móvil ha dado lugar a importantes avances en diferentes facetas como la planificación de movimientos y trayectorias, la navegación, el control de colisiones, la interpretación y modelado del entorno sobre la base de los datos proporcionados por los diferentes tipos de sensores, etc.. Todos estos campos de investigación siguen abiertos, aunque hoy en día las soluciones aportadas permiten disponer de prototipos con aplicaciones prácticas sobre todo en entornos interiores. Desde los años setenta hasta nuestros días se han construido muchos robots móviles, desde microrobots hasta robots de gran tamaño tipo grúa.

Hasta el momento hemos hablado de los brazos manipuladores con un entorno de trabajo limitado pero con capacidad para realizar tareas complejas (pintura, soldadura, ensamblaje,...) y con una importante implantación en muchos sectores industriales. Por otro lado, hemos mencionado el fuerte esfuerzo investigador que se ha llevado a cabo en robots móviles autónomos, sin embargo estos sistemas por sí solos restringen sus capacidades a tareas de transporte en las que necesitan la colaboración de manipuladores u operarios humanos para la carga y descarga, tareas de vigilancia o servicios sin posibilidad de intervenir en forma alguna sobre el entorno. Un paso adelante en la incorporación de los robots a la vida cotidiana, es unir estas dos capacidades: manipulación y movilidad. Surge así el nuevo concepto de manipuladores móviles que constituye el objeto de estudio de esta tesis.

1.2 Manipuladores móviles.

La manipulación móvil es un área de investigación relativamente nueva. Los manipuladores móviles están constituidos por una plataforma móvil y un

brazo manipulador fijado a ella. Gracias a esta configuración, el espacio de posiciones accesibles por el sistema aumenta considerablemente respecto a los clásicos brazos manipuladores, por otro lado las posibles aplicaciones gracias a su capacidad para ejecutar tareas de manipulación son considerablemente más amplias que las que presentan los robots móviles desarrollados hasta el momento.

En el futuro, estos sistemas ayudarán a la automatización de tareas de alto nivel en todo tipo de entornos, no sólo industriales, sino en otras áreas como la agricultura, plantas nucleares, robots de ayuda a discapacitados, robots de servicios, robots de ayuda en el hogar, . . . Una característica que deben presentar este tipo de robots es la habilidad para realizar tareas en colaboración con el hombre. Para interactuar con los seres humanos en su entorno, estos robots deben estar provistos de funciones de movilidad y manipulación. Este tipo de aplicaciones, fuera de un ambiente industrial completamente controlado, sitúa al robot en entornos con población humana, con gran número de obstáculos y poco controlados. Deben ser por ello, sistemas capaces de adaptarse a entornos cambiantes, sólo parcialmente conocidos, realizando tanto tareas autónomas como tareas guiadas por operarios humanos. Se hará necesario en consecuencia, desarrollar capacidades para detectar obstáculos imprevistos y modificar en tiempo real la trayectoria planificada para evitarlos, además los movimientos deberán planificarse de forma dinámica de acuerdo a las acciones del operario que guíe la tarea; por último, es necesario integrar todas estas capacidades de manera que el manipulador móvil colabore eficazmente con el operario humano, a una velocidad razonable, en diversos entornos.

La utilización de un robot para asistir a un operario humano en ciertas tareas reducirá la fatiga, incrementando la precisión y mejorando la calidad; el humano aportará experiencia, un conocimiento global y comprensión sobre la ejecución de la tarea. El equipo hombre/robot deberá utilizar sus habilidades complementarias para completar la tarea de forma más precisa y eficaz. Durante una tarea de asistencia, el robot debe ser capaz de realizar operaciones básicas que involucren navegación y manipulación de forma autónoma. Para operaciones más elaboradas y delicadas, el asistente debe ser capaz de cooperar e interactuar con el hombre cuando realice una tarea guiada.

Incluso en aquellas tareas que se realicen de forma guiada, se necesita un nivel de autonomía suficiente para evitar obstáculos durante su movimiento, modificando en tiempo real la trayectoria definida por el operario humano o por cualquier otro planificador si es necesario para evitar colisiones.

Por lo expuesto hasta el momento, es fácil apreciar la complejidad de un

sistema como es el manipulador móvil. Es esencial que un robot de estas características sepa coordinar los movimientos de todos sus grados de libertad, tanto los de movilidad como los de manipulación, mientras se beneficia de su redundancia cinemática. En aplicaciones avanzadas que implican contactos con objetos fijos, un manipulador móvil autónomo forma una cadena cinemática cerrada que origina fuerzas de reacción en el extremo. En estos casos, el control de fuerza es indispensable. Por otro lado, los entornos reales contienen obstáculos y son dinámicos, lo cual lleva a la necesidad de integrar la reactividad en el comportamiento. En aquellas aplicaciones que requieran un desplazamiento en entornos de grandes dimensiones, es indispensable hacer frente a problemas de planificación de trayectorias y navegación.

Desarrollar un manipulador móvil suficientemente robusto, capaz de interactuar con su entorno y colaborar con operarios humanos y con cierta autonomía, obliga a enfrentarse a muchos problemas: planificación, control, comunicaciones, procesamiento de datos sensoriales, coordinación manipulador—base, . . . En algunos casos, las soluciones se originarán por una adaptación de las técnicas y algoritmos desarrollados para los robots móviles autónomos a las características de estos nuevos sistemas, puede ser el caso de la localización, planificación y navegación; en otros aspectos, como la coordinación de todos los grados de libertad, será necesario desarrollar nuevos algoritmos de control.

1.3 Objetivos de la tesis

En el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid, se ha diseñado un manipulador móvil para realizar tareas de asistencia al transporte de piezas en colaboración con un operario humano, en entornos interiores, estructurados, de los cuales se tiene un conocimiento general a priori, pero en los que pueden aparecer obstáculos inesperados. El objetivo de este trabajo es dotar a este manipulador móvil de capacidad suficiente para ejecutar una trayectoria libre de colisiones con los obstáculos del entorno y reaccionar de forma anticipada a las acciones del operario humano acomodando su movimiento para facilitar la ejecución de la tarea.

La plataforma experimental, el manipulador móvil autónomo "Otilio", está formado por una plataforma móvil no-holónoma construida sobre una base RWI B21, sobre la que se ha fijado un manipulador CRS A465 con seis grados de libertad. Como sistema sensorial, además del anillo de 24 sensores de ultrasonidos situados alrededor del perímetro de la base móvil, se

ha acoplado un telémetro láser que constituye el elemento central del sistema de percepción.

En nuestro caso, dado que la autonomía del sistema está limitada a la cooperación con el operario humano, será éste quien guíe el movimiento del robot manipulador móvil. Sin embargo, queremos dotar al robot de una relativa autonomía que le capacite para reaccionar y adaptarse ante ciertas condiciones del espacio de trabajo. Así en situaciones como movimiento en pasillos, giro en esquinas, paso por puertas, paso por zonas estrechas, etc. ... el manipulador móvil debe ser capaz de planificar de forma local sus movimientos con suficiente anticipación para facilitar el desarrollo de la tarea teniendo en cuenta la trayectoria marcada por el operario humano, las condiciones del entorno en cada momento y la geometría del conjunto operario, manipulador móvil y objeto transportado que debe ser conocida.

Para ser capaz de realizar estas tareas el sistema necesita la información proporcionada por su sistema sensorial. Para ello el manipulador móvil ha sido equipado con sensores de profundidad que le permiten detectar y medir distancias a los objetos de su entorno. Concretamente está dotado de un anillo de ultrasonidos y de un telémetro láser para barrer un plano paralelo al suelo. El análisis de los datos obtenidos en el proceso de percepción se usará para reducir la incertidumbre en la posición acumulada durante el movimiento e identificar características concretas del entorno (puertas, obstáculos, ...) que le permitan planificar las acciones apropiadas según la tarea a desarrollar.

La fusión de los datos obtenidos del sistema sensorial con los datos proporcionados por la odometría y la información previa conocida del espacio de trabajo representada en un mapa global del entorno, permitirán obtener un modelo del entorno y localizar el robot reduciendo la incertidumbre asociada al movimiento. De esta forma, podremos llevar a cabo una planificación local dinámica de la trayectoria para adaptarse a la tarea impuesta por el operario humano.

De entre todos los aspectos que deben afrontarse, el trabajo de esta tesis se centrará en dotar al manipulador móvil de autonomía en sus movimientos para evitar los obstáculos detectados por su sistema sensorial y acoplar su trayectoria a las características del entorno para facilitar la ejecución de la tarea. En este sentido, la trayectoria debe asegurar un camino libre de colisiones no sólo para el manipulador móvil en su conjunto, base y brazo, también para el objeto transportado. Es evidente que este problema es mucho más complejo que la planificación de trayectorias libres de colisión para un robot móvil que, generalmente, presenta una geometría fija.

Los aspectos relacionados con el control de fuerza, el tratamiento de la redundancia cinemática del sistema, o la coordinación de manipulación y movilidad, no son objetivo central de esta tesis, aunque se expondrán las soluciones adoptadas y como se acoplan en el sistema presentado en esta tesis.

1.4 Estructura de la tesis

Aparte del presente capítulo de introducción, en el que se expone el ámbito de investigación en el que se encuadra esta tesis así como los objetivos perseguidos, el contenido de la tesis se divide en otros ocho capítulos.

El siguiente capítulo presenta la situación actual de la investigación en el campo de los manipuladores móviles, haciendo un breve repaso de los antecedentes históricos y la evolución de este tipo de robots. Se hace referencia a los diferentes equipos de investigación que trabajan en este tema, principalmente aquellos que han desarrollado prototipos de manipuladores móviles.

El capítulo 3 describe la arquitectura general del sistema. Se distinguen dos aspectos: por un lado la arquitectura hardware del manipulador móvil que sirve de plataforma experimental, y los subsistemas que lo componen. Por otro, se describe la arquitectura de planificación y control que se ha implementado, detallando los diferentes módulos desarrollados y su interconexión. Por último se presenta brevemente la interfaz gráfica y los procesos disponibles en la estación remota para supervisión y teleoperación.

Los capítulos siguientes desarrollan por separado cada uno de los módulos que componen la arquitectura general del sistema:

El capítulo 4 expone la solución adoptada para la representación de la información adquirida sobre el entorno a través del sistema sensorial, concretamente del telémetro láser. En este punto se propone un nuevo algoritmo para la construcción de un Diagrama de Voronoi Local (al que nos referiremos en lo sucesivo como DVL) de forma rápida y en entornos desconocidos. En concreto el adjetivo "Local" hace referencia al hecho de que el mapa obtenido contiene información de una zona restringida del espacio limitada por el área percibida por el telémetro láser. Este mapa local se utilizará posteriormente tanto en el módulo de planificación de trayectorias como en la localización del manipulador móvil. En las últimas secciones de este capítulo se expone cómo se han adaptado los módulos de representación del entorno, es decir construcción del Diagrama de Voronoi Local, al caso concreto que nos ocupa: manipulador móvil guiado por un operario humano colaborando en el transporte de piezas. Los algoritmos desarrollados son aplicables en cualquier tipo

de robot móvil. Sin embargo, en este caso la presencia física de un operario guiando el sistema modifica la percepción del entorno que obtiene el sistema por medio del telémetro láser. De ahí la necesidad de modificar o corregir el algoritmo de construcción del DVL teniendo en cuenta la presencia ya conocida del operario para evitar que sea considerado un obstáculo.

En el capítulo 5 nos centramos en el problema de la localización. Se presenta un algoritmo de localización basado en la correlación del mapa local del entorno representado por el Diagrama de Voronoi Local, con el Diagrama de Voronoi extraído del mapa geométrico del entorno de trabajo, que es conocido previamente, y que se utilizará como referencia. Aunque este sistema no requiere de una localización precisa y podría realizar las tareas encomendadas sin necesidad de conocer su posición, se ha desarrollado un módulo de localización como apoyo en el proceso de planificación del movimiento. Este módulo se utilizará en aquellos entornos de trabajo conocidos a priori.

La arquitectura de control adoptada se expone en el capítulo 6. Los diferentes niveles de control que se han implementado, desde el control explícito de fuerza al control cinemático coordinado basado en el método de proyección del gradiente, son explicados en detalle así como su adaptación a sistemas que, como el nuestro, presentan restricciones no holónomas.

En el capítulo 7 se presenta el módulo de planificación. La información básica para la planificación de trayectorias locales libres de colisión es el DVL. El planificador, tal y como ha sido diseñado, es aplicable a cualquier tipo de robot móvil. Sin embargo, dadas las características que presenta la tarea de colaboración con humanos, se ha dotado al módulo de planificación de la capacidad para seleccionar el camino más adecuado para seguir la dirección de movimiento marcada por el operario.

Se ha dedicado el capítulo 8 a la presentación del sistema completo adaptado al manipulador móvil. Se recogen las pruebas realizadas sobre el manipulador móvil con la intervención del módulo de control para el seguimiento de las trayectorias generadas a partir del DVL calculado en cada instante. El acoplamiento de todos los módulos para incorporar la planificación local de trayectorias basada en sensores, a la tarea de transporte de una pieza en colaboración con un operario, se expone en la parte final de este capítulo.

Por último el capítulo 9 recoge las conclusiones extraídas del trabajo desarrollado y las aportaciones de la tesis. También se propone una serie de líneas de trabajo para la continuación de la investigación sobre manipuladores móviles.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En los últimos años, dos campos que hasta ahora se habían desarrollado paralelamente dentro de la robótica, los manipuladores y los robots móviles, convergen hacia el nuevo concepto de manipuladores móviles. El objetivo primordial es aumentar las capacidades de los sistemas robotizados para que operen en entornos poblados por personas y donde puedan realizar tareas en colaboración con operarios humanos, tanto de forma autónoma como guiados por ellos.

Aunque los manipuladores móviles son un área de investigación todavía muy reciente, hoy en día se pueden citar bastantes grupos que trabajan en este tema. En este capítulo se hace un breve recorrido por los distintos enfoques que estos investigadores han planteado y la evolución seguida por este tipo de robots. Hemos de tener en cuenta los múltiples problemas involucrados en el desarrollo de un manipulador móvil, de ahí que muchos de los trabajos que se describen en este capítulo se centren únicamente en algún aspecto particular del tema.

De forma general, pueden distinguirse dos maneras de abordar el tema. Por un lado, la mayoría de los sistemas desarrollados hasta el momento conciben el manipulador móvil como un manipulador clásico fijado a una base móvil, de esta manera ambos sistemas se ven como dos entidades independientes; se consideran las tareas de desplazamiento y manipulación como distintas, ejecutándose por lo general, una después de la otra. Cada uno de los subsistemas es responsable únicamente de una de las tareas: la base móvil ejecuta el desplazamiento situando el sistema completo en una posición que permita llevar a cabo posteriormente la manipulación, siendo esta parte de la tarea responsabilidad exclusiva del manipulador fijado a la base. Aún son muy pocos los sistemas desarrollados que consideran un enfoque global, tratando al manipulador móvil como un sistema único que integra las capacidades de manipulación y movilidad; el control visto de esta forma global se hace más complejo, al involucrar un mayor número de grados de

libertad, pero ofrece una solución mucho más robusta para coordinar ambas capacidades.

En esta tesis se entiende el manipulador móvil autónomo con un enfoque global. Sobre la plataforma experimental construida en este departamento se han diseñado esquemas de control cinemático que tratan todos los grados de libertad del robot. El objetivo en el presente trabajo es ampliar sus capacidades afrontando el problema de la planificación del movimiento del manipulador móvil de una forma más general, incluyendo ciertas capacidades de planificación automática de trayectorias en un entorno local y de evitación de obstáculos. Estas capacidades suponen un paso adelante en el desarrollo de los manipuladores móviles que hasta el momento ha sido muy poco explorado. En la mayoría de los sistemas la planificación de trayectorias se lleva a cabo de una forma completamente separada para el manipulador y para la base y, en los pocos casos en los que se ha tratado, la evitación de obstáculos es tarea casi exclusiva de la base móvil en la que no se tiene en cuenta la presencia del subsistema manipulador.

2.2 Origen de los manipuladores móviles

Probablemente los primeros manipuladores móviles que pueden citarse son los equipos diseñados para la intervención en los accidentes de las centrales nucleares de Three Mile Island, en 1979, y de Chernobyl, en 1986. Se trataba de vehículos especiales equipados con manipuladores teleoperados controlados desde una estación remota, [68]. Estos primeros ejemplos surgieron a raíz de situaciones de emergencia en las que el entorno altamente contaminado hacía imposible la presencia in situ de trabajadores, por lo que la utilización de un robot para tareas de inspección, limpieza o transporte era la única solución. Se requería un sistema capaz de moverse por un entorno no absolutamente conocido y, a la vez, realizar tareas de manipulación a veces complejas. Surgieron así los primeros manipuladores móviles que en ese momento eran completamente teleoperados, sin ningún tipo de autonomía y, con una separación casi absoluta entre las tareas de movimiento y manipulación. Se deben citar los vehículos robotizados "KLIN", "KLAN" y "STR-1", tipo "bulldozer", desarrollados por el Instituto de Ingeniería de Vehículos Móviles de Rusia (VNIITRANSMASH) para Chernobyl; y el *Remote Reconnaissance Vehicle* desarrollado por el *Field Robotics Center* (FRC) de la Universidad de Carnegie Mellon para los trabajos realizados en la central nuclear de Three Mile Island.

A partir de ese momento y en poco más de 20 años, las posibles apli-

caciones de los manipuladores móviles se han multiplicado: intervención en entornos hostiles, asistencia a personas discapacitadas, exploración planetaria, transporte de mercancías en entornos industriales o agricultura, son solo algunas de ellas. Los avances en el control coordinado de movilidad y manipulación, planificación de movimientos, control de fuerza, técnicas de colaboración con operarios humanos, navegación autónoma, etc., están permitiendo dar soluciones efectivas en muchos de estos campos.

En la evolución de los manipuladores móviles los orígenes, como acabamos de citar, se encuentran en sistemas teleoperados. Aún hoy, muchas de las principales aplicaciones de estos sistemas requieren de la directa intervención humana en el lazo de control. Sin embargo, el paso hacia los manipuladores móviles autónomos y semiautónomos permite asumir nuevas aplicaciones en las que se puede prescindir de un completo control humano.

2.3 Manipuladores móviles teleoperados

Son las actividades peligrosas en entornos hostiles como el reconocimiento de zonas contaminadas por radiactividad, descontaminación, retirada de desechos radiactivos, operaciones en zonas de gran desastre, desactivación de explosivos, accidentes industriales, . . . , las que en gran medida han servido de acicate al desarrollo de los manipuladores móviles. Requieren robots que puedan sustituir sin peligro a los seres humanos, con capacidad para realizar operaciones de manipulación en entornos peligrosos y, en muchas ocasiones, sólo parcialmente conocidos. A la vez exigen un gran nivel de fiabilidad. Se trata por ello habitualmente de sistemas teleoperados en los que el bucle de control se cierra de forma remota con un operario humano.

En estas condiciones, a partir de la década de los ochenta comenzaron a diseñarse vehículos teleoperados equipados con manipuladores y operados desde una estación remota. La mayor parte de estos manipuladores móviles están equipados con sistemas de visión que permiten al operario dirigir la navegación del vehículo y controlar la tarea de manipulación. Hoy en día los manipuladores móviles teleoperados siguen teniendo un importantísimo campo de aplicación.

2.3.1 Algunos sistemas teleoperados

Es el caso de los robots HAZBOT, [86] [95]. A principios de los años 90, el Jet Propulsion Laboratory (JPL) de California empezó un proyecto para desarrollar telerobots para respuesta a emergencias. La última versión,

HAZBOT III, es un manipulador móvil teleoperado que permite la exploración segura de lugares potencialmente peligrosos y el manejo de materiales peligrosos. Se comenzó con el robot comercial REMOTEC ANDROS V modificado, al que se le añadió un manipulador con 6 g.d.l. que permite al robot realizar tareas diversas incluyendo la apertura de puertas. Dos videocámaras proporcionan la información necesaria al operario para controlar el robot desde una estación de control remota.

Otro ejemplo es el sistema de inspección telerobótica también desarrollado en el JPL [82]. Se trata de un brazo manipulador tipo K1207 desarrollado por el mismo laboratorio, montado sobre una plataforma de traslación. La aplicación del sistema se centra en tareas de inspección de la estación espacial. Se han implementado diferentes estrategias de inspección, desde el control completo de todas las operaciones de forma remota por el operario humano, hasta un proceso automático en el que el operario sólo intervendrá en caso de detectarse algún problema.

Otros sistemas parecidos aunque con bases móviles que permiten mayores desplazamientos, son los empleados en la desactivación de explosivos o los robots tipo *rover* para la inspección y recogida de muestras en misiones espaciales. En cuanto a estos, los últimos *rover* diseñados por la NASA, como el Marsokhod-96, portan brazos manipuladores de hasta 4 g.d.l., por ejemplo, el rover FIDO (*Field Integrated Design and Operations*)[93] porta dos brazos de 4 g.d.l. cada uno.

2.4 Manipuladores móviles autónomos

Para que un manipulador móvil se considere un sistema autónomo debe ser capaz de generar en cada instante la conducta adecuada para llevar a cabo una determinada tarea en un entorno concreto, esto conlleva la necesidad de un sistema sensorial cuya información pueda ser interpretada por el robot. Evidentemente, además se requiere la capacidad para coordinar por sí solo los movimientos tanto de la base como del manipulador.

Un grupo de sistemas que pueden considerarse ya dentro de los manipuladores móviles autónomos, son los que se describen a continuación. En todos ellos la tarea se desarrolla de forma autónoma, la única intervención del operario humano proviene en algunos de los casos de la determinación de la trayectoria a seguir.

Como se mencionó en la introducción de este capítulo, muchos de los manipuladores móviles autónomos desarrollados hasta hoy no presentan una verdadera integración del sistema, por el contrario, las etapas de la tarea

relacionadas con el desplazamiento y con la manipulación se realizan de forma independiente y, en muchas ocasiones, temporalmente separadas.

2.4.1 Sistemas base móvil + brazo manipulador

La Universidad de Toyama [39] ha desarrollado un manipulador móvil para tareas de construcción. La tarea que desempeña el sistema consiste en la construcción de un muro de grandes dimensiones apilando bloques. Se consideran tres operaciones sucesivas: 1) una operación de recogida y carga de objetos; 2) una operación de transporte de los objetos cargados; y 3) una operación de descarga de los objetos en la posición predeterminada. En las operaciones 1) y 3) únicamente interviene el manipulador situado sobre la base, que se vale de un conjunto de marcas y un sistema de realimentación visual para establecer el error en posición de la base respecto a la posición esperada según la trayectoria definida previamente. Una vez estimado este error y el cambio en la postura del manipulador debido a las interacciones dinámicas entre manipulador y base durante el desplazamiento, se calcula la postura que debe adoptar el manipulador para situar el bloque en la posición requerida compensando los errores causados por el desplazamiento. El prototipo utilizado está compuesto de un manipulador Js-2 fabricado por Kawasaki y una base móvil no-holónoma de fabricación propia con dos ruedas motrices y direccionamiento diferencial. En el extremo del manipulador se ha situado una cámara para el reconocimiento de marcas. En este sistema no existe una verdadera integración de las capacidades de manipulación y movilidad, el único objetivo de la base móvil es transportar el manipulador hasta situarlo en una posición tal que la tarea de manipulación requerida se encuentre dentro de su espacio de trabajo. En este sentido este tipo de manipuladores móviles es muy similar al hecho de colocar un manipulador sobre una grúa, salvo por la autonomía en el movimiento de la base.

El proyecto AGROBOT, cuyo objetivo es la implantación de sistemas robotizados para trabajos agrícolas en invernaderos, ha sido desarrollado por el LIRA (*Laboratory for Integrated Advanced Robotics*) de la Universidad de Genova, [76]. Han construido un manipulador móvil compuesto por una plataforma móvil no holónoma y un brazo manipulador con seis grados de libertad. Ayudándose del sistema de visión para localizar las marcas de color situadas al final de cada línea de plantas, la plataforma móvil se coloca en el centro del corredor de cada fila de la plantación situándose frente a cada planta. Una vez situada la plataforma, comienza la tarea del brazo manipulador.

En el GRASP (*General Robotics and Active Sensory Perception*) de la Universidad de Pennsylvania se han llevado a cabo en los últimos años distintos trabajos relacionados con manipuladores móviles. Su plataforma experimental está formada por un brazo manipulador tipo PUMA 250 con seis grados de libertad y una base móvil no holónoma LABMATE con dos ruedas motrices. Concretamente, Y. Yamamoto y X. Yun [102] han centrado su investigación en el desarrollo de un sistema de control para un manipulador móvil basado en la "región de operación preferente". Los movimientos de manipulación y locomoción se coordinan de forma óptima en términos del criterio de medida de manipulabilidad. Se considera un manipulador montado sobre una plataforma móvil de forma que el extremo del manipulador es guiado siguiendo una trayectoria, por ejemplo por un operario humano. Se calcula un campo de potenciales artificiales de manera que las fuerzas derivadas actúan sobre las ecuaciones del manipulador, atrayéndole hacia puntos sucesivos de la trayectoria. La plataforma móvil se mueve para situar el manipulador en ciertas configuraciones preferidas seleccionadas por su índice de manipulabilidad. El manipulador se ve como un dispositivo pasivo cuya dinámica es despreciada. Cualquier error en el seguimiento de la trayectoria llevará el manipulador fuera de la configuración de preferencia, haciendo caer la medida de la manipulabilidad.

Huang y Sugano [41], han centrado su trabajo sobre manipuladores móviles en el problema del control de la estabilidad del sistema. En este tipo de sistemas es necesario considerar simultáneamente las tareas de estabilización y manipulación mientras se coordina el movimiento del vehículo y el movimiento del manipulador. Proponen un método para coordinar la planificación del movimiento del vehículo considerando las restricciones debidas a la tarea del manipulador, y la planificación del movimiento del manipulador considerando la estabilidad de la plataforma. En primer lugar se planifica el movimiento de la base móvil como una serie de posiciones sucesivas de forma que el vehículo siga una trayectoria planificada previamente obedeciendo a ciertas restricciones que consideran la dinámica del vehículo, el espacio de trabajo del manipulador y la estabilidad del sistema. Para hacer posible la tarea de manipulación durante el desplazamiento de la base, se impone como restricción en el cálculo de la trayectoria de la base que la distancia entre el vehículo y el extremo del manipulador esté dentro del espacio de trabajo efectivo del manipulador. Después, se deriva el movimiento del manipulador, considerando la compensación de la estabilidad y la configuración del manipulador para conseguir un máximo índice de manipulabilidad, y se corrige su configuración para conseguir que el ZMP (*Zero Moment Point*, punto del

suelo en el que los momentos de las fuerzas actuantes se anulan) se encuentre dentro de la región estable, conocida ya la trayectoria del vehículo. Los algoritmos desarrollados por este grupo de trabajo, han sido contrastados por medio de la simulación. El sistema simulado está formado por una base móvil no holónoma y un brazo manipulador con cinco grados de libertad.

2.4.2 Sistemas integrados

El LIRMM (*Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique*) de Montpellier ha desarrollado un prototipo de manipulador móvil pensado para entornos exteriores [66]. Sobre esta base se han estudiado distintos algoritmos para la generación de movimientos coordinados y el control del sistema brazo-vehículo. Su plataforma experimental está formada por un vehículo no holónomo con seis ruedas motrices y directrices para exteriores, sobre el que se ha instalado un manipulador PUMA 560 con seis g.d.l.. Su objetivo es gestionar el manipulador móvil como una entidad única, utilizando la redundancia del sistema para salvar parcialmente las restricciones debidas a la no holonomía de la base. Utilizan matrices homogéneas o cuaternios para representar los desplazamientos elementales del sistema en función de las variaciones de sus coordenadas generalizadas. De igual forma se representa la trayectoria a seguir como una sucesión de desplazamientos elementales entre cada dos puntos de la trayectoria. La solución se obtiene de una forma algebraica. Cada una de las matrices homogéneas o cuaternios duales que representan un desplazamiento elemental surge como la composición de una matriz que representa el desplazamiento de la base respecto a un sistema de referencia global en cada intervalo de muestreo, y otra que representa la posición del extremo del manipulador respecto al sistema de referencia ligado a la base según la variación de las coordenadas generalizadas del manipulador.

K. Nagatani y S. Yuta [61], de la Universidad de Tsukuba, han diseñado un manipulador móvil no holónomo con un sistema de control distribuido. La tarea propuesta al manipulador móvil consiste en abrir una puerta y pasar a través de ella, para ello deben cooperar los tres módulos involucrados en el sistema: el módulo de manipulación, el de locomoción y el sensorial. La plataforma experimental recibe el nombre de "YAMABICO -10", este sistema está formado por una base móvil no holónoma con dos ruedas motrices montadas sobre un eje central, y un brazo manipulador con seis grados de libertad de fabricación propia. Se utiliza un sensor de fuerza situado en el extremo del manipulador, sensores de ultrasonido para la navegación y una cámara montada sobre el extremo del manipulador para confirmar la posi-

ción del picaporte. La tarea es dividida en nueve etapas, en cada una de las cuales tendrán que cooperar los distintos controladores de manipulación, locomoción y visión. En la primera etapa el sistema se comporta como un robot móvil simple situándose frente a la puerta. En la segunda y tercera etapas, sólo interviene el manipulador coordinado con el módulo de visión para encontrar y coger el picaporte, girándolo y empujándolo después para abrir la puerta. Es en la cuarta etapa cuando debe producirse la coordinación entre manipulación y movilidad, pues el robot debe moverse hacia delante mientras empuja la puerta; el avance de la base se controla según el ángulo de apertura de la puerta que se obtiene midiendo las fuerzas que actúan sobre la pinza del manipulador. Después el robot se sitúa al otro lado de la puerta y efectúa una serie de etapas análogas para cerrarla.

Un ejemplo parecido al anterior es el manipulador móvil desarrollado en el *Mobile Robot Laboratory* del Instituto de Tecnología de Georgia [12][54]. El sistema está construido con un robot móvil MRV-2 y un brazo manipulador CRS A251, y la tarea consiste en el transporte de muestras entre dos contenedores. Se realizan dos operaciones de forma paralela pero independiente: un desplazamiento hacia la zona de operación que es realizado por la base móvil y un reposicionamiento del brazo manipulador durante el desplazamiento para prepararse para la tarea de manipulación que se va a realizar. Para evitar el desplazamiento del robot con el manipulador en una configuración poco estable, éste se mantiene inmóvil en una configuración de seguridad hasta que el sistema se encuentra cercano al objetivo, en ese momento comienza el movimiento del manipulador hacia la meta. Se aplican principios de control reactivo a la fase de macromovimiento, en la que el manipulador se sitúa en la vecindad del objeto que se va a manipular. Durante la fase de micromovimiento, el sistema de visión y los sensores de fuerza proporcionan la realimentación para dirigir la manipulación.

El grupo RIA (*Robotique et Intelligence Artificielle*) del LAAS, lleva algunos años trabajando en la planificación y coordinación de movimientos para manipuladores móviles [23]. Su plataforma experimental, denominada Hilare2bis [33], se ha construido partiendo de una base móvil no holónoma de la familia HILARE, desarrollada en el propio Laboratorio, a la que se ha equipado con un brazo GT6A de GT Productique que presenta seis g.d.l.. Su sistema sensorial dispone de sensores de ultrasonido, un escáner láser y una cámara. Sobre esta plataforma se han estudiado problemas de coordinación de desplazamiento y manipulación, planificación, cooperación multirobots, etc.. En [33], se define un método para calcular los valores de coordenadas y velocidades generalizadas de un manipulador móvil cuando se impone una

trayectoria al extremo del manipulador.

La Universidad de Stanford dentro del proyecto SAMM (*Stanford Assistant Mobile Manipulator*), cuyo objetivo es estudiar sistemas de manipuladores móviles para nuevas aplicaciones (espacio, submarinas, construcción o servicios), ha construido dos manipuladores móviles a los que denomina "Romeo" y "Julietta" [47] [48]. Sus plataformas experimentales están constituidas por un brazo manipulador Puma 560 con seis grados de libertad montado sobre una base móvil holónoma. Se considera el manipulador móvil como la asociación de una macroestructura con una dinámica lenta y poco precisa, la base móvil, y una microestructura mucho más rápida y precisa, el brazo manipulador. Se desarrolla una estrategia control y coordinación dinámica de ambos subsistemas. La coordinación tiene lugar en una función potencial asociada a las articulaciones de la miniestructura cuyo gradiente las atrae hacia el punto medio de su rango. Para evitar que esta fuerza afecte al movimiento del extremo del robot, se lleva a cabo una proyección en el espacio nulo. Su esquema de control se apoya en dos metodologías. La *Operational Espace Formulation* se ocupa del movimiento del robot orientado a tarea y del control de fuerza. La denominada *Dynamic Coordination of Macro/Mini Structures* resuelve la coordinación de robots con distintas características dinámicas, aplicada a la base móvil y el brazo manipulador. Por otra parte, Khatib añade capacidades multi-robot a su solución. Su propuesta de cooperación de un conjunto de robots asistentes para mover y manipular objetos es una de las más relevantes en este terreno.

Posiblemente uno de los desarrollos más llamativos es el robot humanoide HERMES [3] [4], construido por el *Institute of Measurement Science* en la *Bundeswehr University Munich*. Constituido por una base móvil omnidireccional y dos brazos de seis g.d.l cada uno, dispone además de la posibilidad de doblar el torso aumentando así su capacidad de manipulación. Su sistema sensorial se compone principalmente de dos cámaras que proporcionan información visual del entorno. El sistema de control está basado en la combinación de conductas básicas seleccionadas conforme a una valoración previa de la situación en cada instante.

2.5 Manipuladores móviles en cooperación con el hombre

La colaboración directa hombre/robot es uno de los más claros campos de aplicación de los manipuladores móviles, y concretamente el objetivo de

nuestro sistema. Por un lado, los manipuladores móviles son especialmente útiles en las tareas de asistencia a personas discapacitadas, la investigación desarrollada en este terreno se orienta principalmente a dotar al manipulador móvil de capacidades que suplan las limitaciones de movilidad de estas personas [19].

Por ejemplo Helpmate [44] [99], es un manipulador móvil construido por el Laboratorio de Robótica Inteligente de la Universidad de Vanderbilt. Está concebido como un robot asistente que será guiado por un operario humano por medio de su voz. Las tareas para las que ha sido pensado están relacionadas con ayuda a personas físicamente discapacitadas. Se incluye la participación del usuario en la interpretación de los datos que proporcione el sistema sensorial, la planificación de las tareas, ayuda ante errores en etapas de navegación, etc.. Está constituido por una base móvil Yaskawa Helpmate con direccionamiento diferencial, equipada con sensores de ultrasonido, a la que se le ha añadido un láser, una cámara para el sistema de visión y un manipulador montado en el lado izquierdo del robot. El manipulador es un brazo Softarm, de diseño propio, que tiene cinco grados de libertad. En este caso la base móvil ejecuta los desplazamientos de un punto a otro por medio de un mapa del lugar de trabajo. Una vez situado el robot cerca del objetivo se llevan a cabo las tareas de manipulación de una forma completamente independiente. No hay ningún tipo de coordinación entre locomoción y manipulación.

Otros ejemplos de este tipo de manipuladores móviles con aplicaciones médicas son el sistema URMAD ("Mobile Robotics Unit for the Assistance to the Disabled") desarrollado en Italia [21], y su continuación a través del proyecto europeo MOVAID cuyo objetivo es su adaptación a un entorno doméstico estándar [20] [19]; y el proyecto MOVAR del *Veterans Administration Medical Center* [26]. También puede citarse el robot ROMAN [27], un robot asistente para realizar tareas simples de transporte y manipulación en hospitales.

Aparte de estas aplicaciones especiales, las posibles aplicaciones industriales de los manipuladores móviles son muy variadas. Muchas tareas en las que sería deseable la intervención de robots, son difíciles de automatizar completamente, sin embargo, podrían ser ejecutadas por un robot en cooperación con humanos. Este es el caso del transporte de piezas grandes o pesadas en entornos complejos, aquí la ayuda del robot es particularmente útil. Es lógico que en este tipo de tareas el operario humano, con mejores capacidades de percepción y decisión, actúe como guía del movimiento. En este tipo de aplicaciones el manipulador móvil opera generalmente de forma

semiautónoma, ya que en gran medida las decisiones sobre planificación de trayectorias y navegación recaen en el operario humano.

La aplicación presentada por Fukuda en [34] es un ejemplo en el que el manipulador móvil sustenta cargas pesadas. En este caso el operario humano efectúa una fuerza de empuje para mover la carga que puede ser percibida por el robot, esto le permite seguir los movimientos marcados por el operario. En la misma línea está la tarea descrita por Yamamoto en [101], consiste en el transporte de un objeto por colaboración entre el manipulador móvil y un humano, el humano dirige el movimiento y el robot soporta la mitad del peso del objeto en el eje vertical mientras que se acomoda a la fuerza de reacción en el plano horizontal.

Otro ejemplo de este tipo de colaboración, es el presentado en [77]. Se propone una estrategia de control del movimiento basada en el seguimiento de la trayectoria del objeto. La tarea es el transporte de un objeto por cooperación entre un operario humano y el manipulador móvil MrHelper, constituido por una base móvil omnidireccional y dos brazos manipuladores de 7 g.d.l..

El objetivo del proyecto SAMM de la Universidad de Stanford, que ya se ha citado, es desarrollar robots asistentes semi-autónomos para nuevas aplicaciones (espacio, submarinas, construcción o servicios), que ayuden a un operario humano en varias tareas de manipulación, por ejemplo para mover objetos pesados y grandes en respuesta a las fuerzas ejercidas por el operario. Sobre sus plataformas experimentales se han probado diversos algoritmos para la coordinación brazo-vehículo en varias tareas, técnicas para evitar colisiones durante un movimiento coordinado, y tareas cooperativas entre varios manipuladores o entre un manipulador móvil y un operario humano.

En el trabajo de Sugar y Kumar [88], se estudia la coordinación de dos manipuladores móviles para transportar objetos de forma conjunta. La coordinación se desarrolla sobre el movimiento de las bases móviles de cada robot, el papel de los manipuladores es controlar las fuerzas de agarre para asegurar la pieza transportada. Las plataformas experimentales utilizadas están formadas cada una de ellas por una base TRC Labmate y un brazo manipulador paralelo de tres grados de libertad especialmente diseñado para esta tarea.



2.6 Manipuladores móviles ante la presencia de obstáculos

En la mayoría de los trabajos descritos en apartados previos, la tarea del manipulador móvil se especifica por medio de una trayectoria a seguir sin considerar la presencia de obstáculos en el camino del robot, [101]. En algunos casos, como en [77], la responsabilidad de evitar la colisión es exclusiva del operario humano que guía el movimiento.

Si realmente se quiere que los manipuladores móviles realicen tareas de asistencia en entornos reales (oficinas, industrias, en tareas domésticas, etc.), debe tenerse en cuenta la presencia de obstáculos no previstos y nuestro sistema debe ser capaz de responder a ella de forma autónoma.

En ausencia de obstáculos, el estudio de manipuladores móviles concierne principalmente al problema de coordinar locomoción y manipulación. En presencia de obstáculos, deben considerarse simultáneamente los problemas de evitar los obstáculos y coordinar el movimiento. Aunque hay muchos trabajos relacionados con la forma de evitar los obstáculos tanto para manipuladores fijos como para plataformas móviles, hay muy pocos todavía que se hayan ocupado de este tema en manipuladores móviles. Al ser uno de los puntos clave que se tratarán en el desarrollo de la tesis, mencionaremos algunas referencias sobre las soluciones adoptadas ante este problema. Dejando de lado los sistemas teleoperados en los que esta tarea es responsabilidad del operario humano que dirige el robot para evitar los posibles obstáculos captados por los sensores, nuestro interés se centra en manipuladores móviles autónomos o semiautónomos capaces evitar los obstáculos por sí solos.

La mayor parte de las aproximaciones a este problema se han llevado a cabo con métodos locales basados en campos de potenciales. En [103], Yamamoto adopta métodos de campos de potencial con funciones supercuadráticas para evitar los obstáculos. En el caso de seguimiento de una trayectoria predeterminada, los obstáculos, rectangulares y estáticos, actúan como un término de potencial repulsivo y la trayectoria que se desea seguir actúa como un potencial atractivo sobre el punto de control del manipulador. La presencia de los obstáculos en la trayectoria a seguir obliga a la modificación de la configuración del manipulador, siendo necesario acomodar después el movimiento de la plataforma para conseguir mantener el manipulador en la región de operación preferente. Por el contrario, en la propuesta de Jagannathan [42] solamente se considera la influencia de los obstáculos sobre el movimiento de la base móvil, este se adapta al potencial resultante de la atracción de la trayectoria y la repulsión de los obstáculos.

Una de las ideas básicas del esquema desarrollado en el Instituto de Tecnología de Georgia [12], es guiar el movimiento del brazo y la base respondiendo a las fuerzas artificiales, pseudo-fuerzas, generadas por la meta y los obstáculos durante la fase de macromovimiento. Los movimientos se generan como un conjunto de comportamientos primitivos como: evitar un obstáculo o moverse hacia la meta; cada uno de estos comportamientos recibe mayor o menor peso según la fase de la tarea que se esté realizando.

En el trabajo de L. Cellier [14] de la Universidad de Montpellier II, se propone un método para evitar colisiones basado también en comportamientos reactivos, aunque el control sólo se efectúa sobre el brazo manipulador considerando el vehículo únicamente como una fuente de perturbaciones. En Cacitti [11], el método DVZ (*Deformable Virtual Zone*), basado igualmente en comportamientos reactivos, se aplica al caso de manipuladores móviles, aunque no se han efectuado pruebas sobre plataformas reales.

El equipo de Nassal [62] desarrolla un sistema de control al que denomina "transparente". La plataforma se usa como un medio para soportar los manipuladores. El movimiento de la base se controla de forma que los manipuladores queden en su espacio de trabajo óptimo. Se consideran desacoplados los movimientos de la plataforma y el manipulador, de forma que el desplazamiento de la base no afecta al movimiento de los manipuladores. Se lleva a cabo una descomposición en dos movimientos: el movimiento externo resultado únicamente del movimiento de los manipuladores; y el movimiento interno controlado por la plataforma que intenta mantener los manipuladores en su configuración óptima mientras evita obstáculos.

La aproximación de "*correa elástica (elastic strip)*" propuesta en [9] por Brock y Khatib, intenta aunar la planificación global de una trayectoria libre de colisión con la evitación de obstáculos en tiempo real por medio del control reactivo. En este método, el espacio libre se representa en el espacio de trabajo del robot en lugar de en el espacio de configuraciones de dimensión mucho más alta. Su método se ha aplicado a los manipuladores móviles de Stanford.

En el GRASP [24] se ha utilizado un equipo de manipuladores móviles no-holonómicos para realizar tareas de transporte en presencia de obstáculos. El problema se resuelve con un planificador de trayectorias óptimas.

2.7 Conclusiones

En este capítulo se ha expuesto brevemente la situación actual de la investigación en manipuladores móviles. Hablar de manipulación móvil supone

referirse a un problema complejo con múltiples aspectos diferentes. Aunque ya se dispone de soluciones parciales para algunos de los problemas involucrados, principalmente en lo referente al control y coordinación de movimientos, siguen abiertas muchas líneas de investigación no sólo para ofrecer nuevas y mejores soluciones a estos temas sino en lo relacionado con la cooperación con el ser humano, la navegación y planificación de movimientos, evitación de obstáculos,....

Como se explicó en la introducción de esta tesis, el ámbito en el que se ha desarrollado este trabajo es la aplicación de un manipulador móvil al transporte de piezas en colaboración con un operario humano. La mayor parte de los trabajos dedicados a este tipo de aplicaciones se enfocan a la acomodación del robot a los movimientos del operario humano percibidos a través de la medición de la fuerza en su elemento terminal. Sin embargo, casi todos ellos suponen un entorno sin obstáculos. Las referencias en las que se aborda la presencia de obstáculos, mencionadas en el apartado anterior, limitan la tarea de evitarlos a una de las dos partes del sistema: base o manipulador. La meta de la presente tesis es que el manipulador móvil sea tratado como un sistema único, involucrando en la tarea de evitar obstáculos todos sus grados de libertad.

El objetivo es que el manipulador móvil tenga una participación activa en la tarea. Para ello le dotaremos de cierta autonomía en la planificación de sus movimientos, no se trata únicamente de que se acomode a los movimientos del operario humano sino que sea capaz de adaptar su trayectoria a las características del entorno. Es preciso por tanto, que disponga de un conocimiento del entorno en cada momento. Nuestra propuesta es que el manipulador disponga de un sistema sensorial basado en telemetría láser que le permita construir mapas locales del entorno de forma continua. Estos mapas le servirán como base para que, en conjunción con la percepción del movimiento del operario que se consigue a través del sensor de fuerza, sea capaz de ejecutar movimientos que faciliten la realización de la tarea evitando los posibles obstáculos que aparezcan en el área de trabajo.

La solución adoptada pretende evitar los problemas derivados de comportamientos puramente reactivos incluyendo la planificación local. Una planificación global de la trayectoria a seguir por el sistema precisa del conocimiento previo del entorno de trabajo y carece de capacidad para reaccionar a los cambios en dicho entorno. De ahí que se planifique en zonas limitadas del espacio que se modelan partiendo de la información sensorial, de esta manera se incorporan al modelo local del entorno los posibles cambios en la situación de los obstáculos.

3. ARQUITECTURA DEL MANIPULADOR MÓVIL

3.1 Introducción

En la mayor parte de los casos, un manipulador móvil es una base móvil sobre la que se ha instalado un brazo manipulador. Para navegar de forma autónoma o semi-autónoma, el sistema debe disponer además de un conjunto de sensores que le permitan obtener información de su entorno. Una de las tareas más complejas en el diseño del manipulador móvil es la integración de todos estos subsistemas tanto desde el punto de vista hardware como software. La necesidad de intercambio de datos entre los diferentes subsistemas, principalmente desde el computador principal al resto, plantea importantes problemas en cuanto a sincronización y homogeneización de los formatos.

La plataforma experimental que se ha utilizado para el desarrollo de la presente tesis es un manipulador móvil autónomo, diseñado y construido en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III, que recibe el nombre de "Otilio". Otilio es un manipulador móvil de 8 grados de libertad, los dos primeros pertenecen a la base móvil y el resto al manipulador. Puede navegar en entornos interiores evitando los obstáculos que su sistema sensorial pueda detectar. Mientras se desplaza, puede utilizar su brazo para manipular objetos, bien por sí mismo o cooperando con otros robots o con personas.

Este manipulador móvil fue diseñado con el objeto de servir como plataforma para el desarrollo y experimentación de diferentes técnicas de control, planificación de trayectorias basada en sensores, cooperación con operarios humanos, etc.. Concretamente, ya ha sido utilizado para la comprobación de los algoritmos de control desarrollados por Vicente Fernández y que se recogen en su tesis doctoral, ver [30].

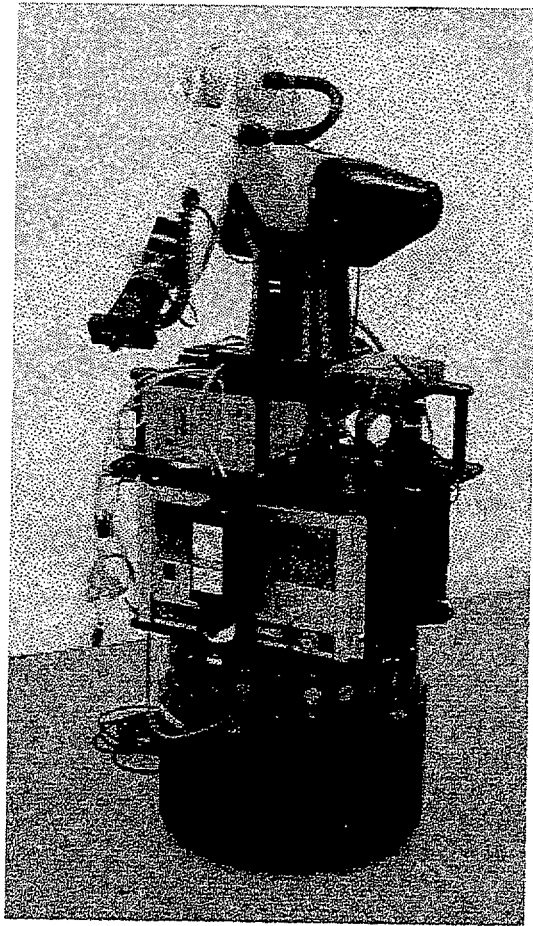


Fig. 3.1: Plataforma Experimental. Manipulador Móvil Otilio

3.2 Arquitectura hardware

Los subsistemas básicos del manipulador móvil son la base móvil, el manipulador, el sistema de control y supervisión soportado por el computador de a bordo, el subsistema sensorial y el subsistema de comunicación remota.

La movilidad de Otilio reside en la base móvil RWI B21. Sobre la base se ha montado una estructura que aloja el controlador C500 del manipulador CRS y puede portar dos computadores aunque hasta el momento solo se ha incorporado un computador Pentium conectado a una red ethernet. Los computadores de a bordo se enlazan a una estación remota a través de un "bridge" sin hilos Aironet ARLAN 640-2400. Sobre esta estructura se sitúa el manipulador CRS A465 de 6 grados de libertad. La base aporta el sistema básico de percepción que consta de un anillo de sensores de infrarrojos y

otro de sensores de ultrasonido, además se ha instalado un telémetro láser AccuRange Line Scanner. Para realizar tareas complejas de manipulación, habitualmente en modo semi-autónomo, el brazo de Otilio porta en su extremo un sensor de fuerza-par JR3 y una garra servocontrolada. La autonomía, desde el punto de vista energético, depende de las baterías de a bordo que aseguran un tiempo de operación sin hilos de 1 hora aproximadamente.

3.2.1 Características técnicas de los subsistemas

Base móvil RWI B21

La base móvil dota de movilidad al sistema. En este caso se ha utilizado el modelo B21 de RWI (Real World Interface) diseñada para entornos interiores. Se trata de una base con sistema motriz de tipo *synchro-drive*, esto es, las cuatro ruedas motrices se encuentran mecánicamente acopladas de forma que todas giran en la misma dirección y a la misma velocidad. Sus dos grados de libertad corresponden a las velocidades lineal y angular. La interfaz de comunicación entre la base y el computador de a bordo es un puerto serie RS-232. Las características más relevantes de este subsistema se recogen en la tabla 3.1.

Tab. 3.1: Características de la base móvil RWI B21

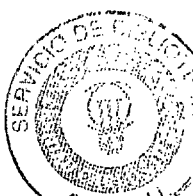
Capacidad de Carga	91 Kg
Velocidad lineal máxima	0.9 m/s
Velocidad angular máxima	2.9 rad/s
Diámetro	52 cm

El software de control de la base se ha desarrollado empleando la interfaz de aplicación *RAI*[®], desarrollada por RWI para sus robots móviles.

Además, la base contiene las baterías que proporcionan energía a todos los subsistemas. Dispone de 4 baterías que suman 1500 Wh, lo que proporciona una autonomía energética de aproximadamente 1 hora dependiente de las condiciones de funcionamiento.

Brazo manipulador CRS A465

El brazo manipulador es un robot industrial modelo A465 de CRS Robotics Corporation, constituido por un brazo articulado con 6 g.d.l. de tipo



angular equipado con una garra eléctrica servocontrolada, y el controlador multitarea C-500.

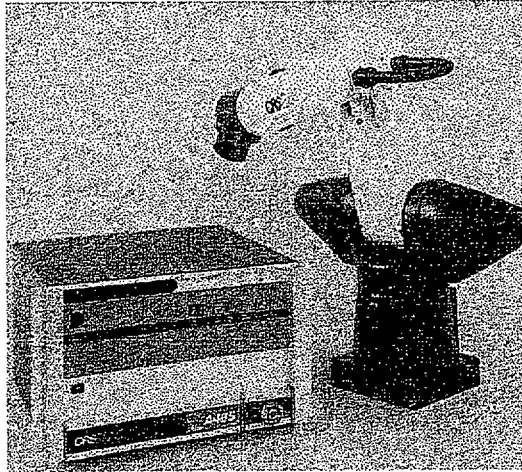


Fig. 3.2: Manipulador CRS A465 con controlador C-500

Sus características principales son:

1. Configuración del brazo:

Brazo articulado con 6 g.d.l.

Servo motores DC con encoders ópticos y reductores armónicos.

2. Controlador C500:

Microprocesador 80286/80287.

Red configurable de transputers.

Lenguaje de programación *RAPL - II*[®].

Las especificaciones de funcionamiento se encuentran recogidas en la siguiente tabla:

Tab. 3.2: Especificaciones de funcionamiento del CRS A465

Capacidad de carga	2kg
Alcance	700mm
Repetividad	+/- 0.05mm

El manipulador está equipado con una garra servocontrolada de dos dedos con movimiento paralelo, ver figura 3.3. Puede ser operada mediante comandos RALP-II tanto en distancia de apertura como en fuerza de agarre. La apertura entre los dedos puede ir de 0 a 50.8 mm.

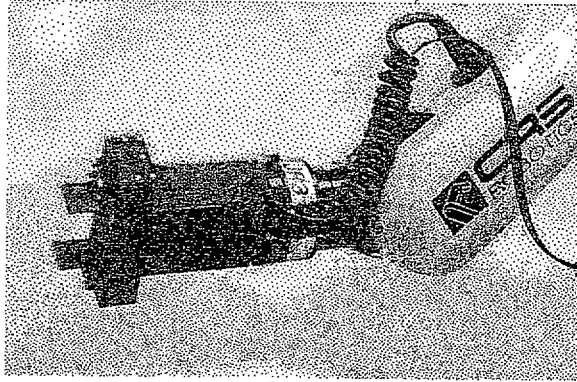


Fig. 3.3: Detalle de la garra servocontrolada y el sensor fuerza-par en el extremo del manipulador.

El lenguaje de programación RALP-II presenta dos características que han sido fundamentales para la integración del brazo manipulador con los otros subsistemas: los programas PCP y el modo de funcionamiento remoto. Por un lado, los programas PCP (*Process Control Program*) permiten interactuar directamente con el hardware de la arquitectura Intel, son programas que se codifican en lenguaje C, se compilan y se transfieren al controlador del robot donde pueden ser ejecutados. El modo de funcionamiento remoto permite controlar el movimiento del brazo desde un computador externo, en este caso es el computador de a bordo, en lugar de hacerlo desde el controlador C500. Las consignas generadas por el computador son enviadas a través del puerto serie del controlador a frecuencia constante y configurable.

Sistema sensorial

Sensores de la base B21 El sistema sensorial aportado por la base móvil B21 está compuesto por:

- Anillo de 24 sensores de alcance por ultrasonidos (alcance 9 metros).
- Anillo de 32 sensores de alcance por infrarrojos.
- Sensores táctiles alojados en los paneles exteriores.

Los sensores de ultrasonido permiten detectar obstáculos a grandes distancias, mientras que los sensores de infrarrojos son fiables a distancias muy pequeñas, del orden de centímetros. La función de los sensores táctiles es detectar colisiones de la base con algún obstáculo que no haya podido evitarse.

Todos estos sensores están conectados a un mismo bus de tipo *Access Bus*[®], para su control se ha instalado una tarjeta controladora de bus en el computador principal.

Telómetro láser El elemento principal del subsistema sensorial de nuestra plataforma es el telómetro láser. El sensor utilizado es el *AccuRange Line Scanner* de Acuity Research Inc. (figura 3.4). Las características que han favorecido la elección de este sensor frente a otros similares son sus pequeñas dimensiones y peso, ver tabla 3.3. Por otro lado, el sistema puede trabajar con una tarjeta HSIF (*High Speed Interface*) que permite recoger datos a gran velocidad y, gracias a su buffer de almacenamiento, libera al procesador principal de las tareas de calibración y almacenamiento de los datos procedentes del sensor.

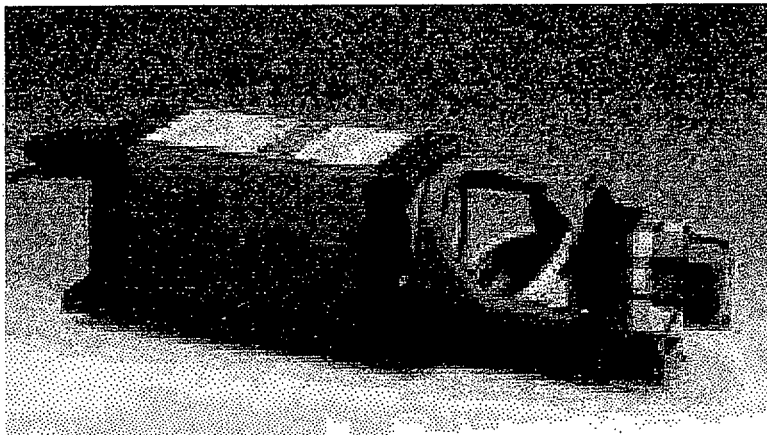


Fig. 3.4: AccuRange Line Scanner.

El apéndice A recoge de forma detallada las características del telómetro láser y los resultados del proceso de calibración desarrollado.

El telómetro se ha instalado en la parte frontal del manipulador móvil, a unos 50 cm del suelo. De esta forma, el láser barre 360° en un plano paralelo al suelo proporcionándonos medidas de distancias a los objetos del entorno. Debido al montaje y a consideraciones posteriores de programación, el campo de visión útil se ha limitado a $\pm 90^\circ$ respecto a la dirección de movimiento positivo de la base.

Tab. 3.3: Características del AccuRange Line Scanner

Peso	1.6 Kg
Dimensiones	32.44 × 7.62 × 8.89 cm
Emisión	Infrarrojo 780 nm
Potencia emisión	20 mW
Rango de medida	0 a 15,2 m
Barrido máximo	300°

Sensor de fuerza Acoplado a la garra servocontrolada se ha instalado un sensor fuerza-par JR3 67M25A – U560 necesario para el control de fuerza.

Tab. 3.4: Características del sensor de fuerza

Capacidad de carga 25 lb (11 kg)
Proporciona medidas de fuerza y par en 6 ejes
Frecuencia de hasta 8 KHz

El sensor se ha conectado a un receptor basado en DSP, con formato de tarjeta para bus ISA, de esta forma la corriente de medidas de fuerza y par accesibles por el software de control tiene un gran ancho de banda.

Computador de a bordo

El sistema de control tiene como elemento principal el computador personal de a bordo. Aunque la estructura diseñada permite que el manipulador móvil lleve hasta dos computadores, en estos momentos, no se ha instalado el segundo. El computador de a bordo está dedicado a procesos de control y monitorización local del robot, y al tratamiento de la información proporcionada por los sensores.

Características del computador de a bordo:

- Procesador Intel Pentium 120 Mhz.
- Sistema Operativo Linux, con kernel 2.0.32.

El control del movimiento del brazo manipulador y la base móvil se lleva a cabo en este computador. Para realizar esta tarea es necesario el intercambio

de datos entre ambos subsistemas y el computador que se realiza a través de dos líneas serie RS-232, computador-brazo y computador-base, configuradas a una velocidad de 38400 baudios.

También los datos procedentes del subsistema sensorial son recibidos por el computador de a bordo. Tanto las medidas de los sensores de alcance (telémetro láser) como las del sensor de fuerza-par son captadas a través de tarjetas insertadas en el bus ISA del computador.

Sistema de comunicación remota

Se dispone de una estación remota para tareas de supervisión y teleoperación.

Entre el computador de a bordo y la estación remota de supervisión existe un enlace transparente sin hilos. Este enlace es soportado por un "bridge" ethernet Aironet ARLAN 640-2400. El ancho de banda de la red en el enlace es de 1 Mbps.

3.3 Arquitectura de control

La arquitectura de control diseñada para el manipulador móvil se recoge en la figura 3.5. Se distinguen dos partes principales: el módulo de control y los módulos de planificación basada en sensores.

El diseño e implementación del módulo de control no es el objetivo de esta tesis. Partimos del módulo de control previamente desarrollado en este departamento, ver el trabajo desarrollado por Vicente Fernández en [30], cuya estructura se describe de forma detallada en el capítulo 6. El desarrollo de esta tesis se centra en el diseño de los módulos relacionados con la planificación basada en sensores. La meta perseguida es proporcionar referencias adecuadas al módulo de control para que el manipulador móvil siga trayectorias locales planificadas que permitan evitar obstáculos y reaccionar con anticipación para favorecer la ejecución de la tarea. Para esta planificación se utiliza un mapa local del entorno construido a partir de la información proporcionada por el telémetro láser.

A lo largo de los siguientes capítulos se exponen los algoritmos implementados para la construcción del mapa local y su utilización en el planificador que genera las referencias a seguir por el módulo de control.

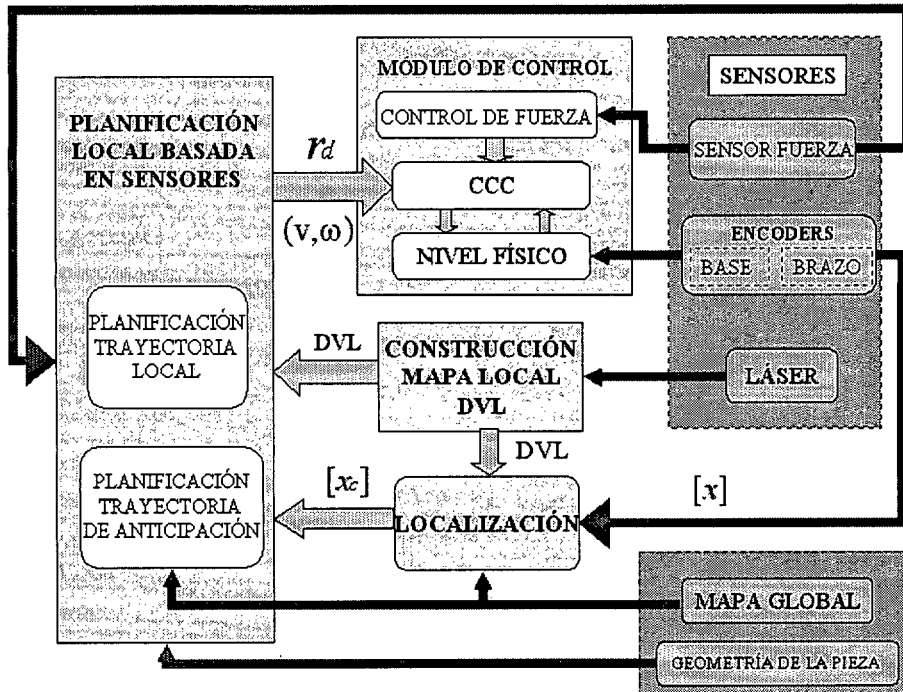


Fig. 3.5: Arquitectura de control del manipulador móvil.

3.3.1 Módulo de control

El módulo de control desarrollado para esta plataforma experimental incorpora tres niveles:

- **Nivel Físico:** controladores hardware cerrados a bajo nivel para brazo y base.
- **Nivel de control cinemático coordinado:** es el núcleo del módulo de control. Se basa en el método de proyección del gradiente adaptado a robots no-holónomos. A partir de la trayectoria de referencia genera las consignas de velocidades articulares que se pasarán a los respectivos controladores de brazo y base.
- **Nivel de control de fuerza:** basado en un control de impedancia. Genera un vector de corrección de la posición para adaptar la configuración del robot a la fuerza ejercida por el maestro humano.

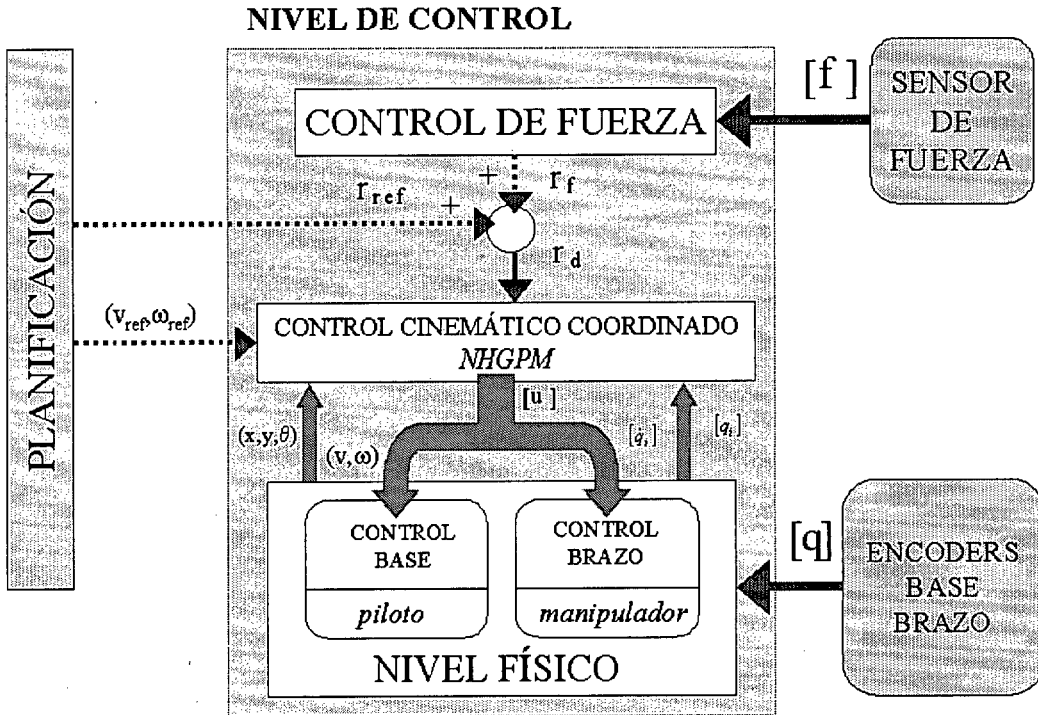


Fig. 3.6: Arquitectura del módulo de control.

En el nivel físico del módulo de control se han implementado dos procesos cuya misión es comunicar con los controladores hardware, se trata de:

◊ piloto

Es el proceso dedicado a la comunicación con la base móvil del robot, para lo cual emplea las funciones de la interfaz de aplicación RAI. Sigue un patrón de funcionamiento cíclico dado por un temporizador de intervalos. En cada ciclo, el proceso piloto envía a la base móvil una consigna de velocidades de traslación y rotación y recibe datos odométricos, lecturas de los sensores de alcance alojados en la base y de la carga de la batería.

◊ manipulador

Al igual que el proceso piloto está asociado a la base móvil, el proceso manipulador desempeña la función de comunicación con el controlador del brazo. Este funciona en modo remoto bajo el control de un programa PCP que escucha y procesa los comandos que llegan por el puerto serie. Para conseguir un control continuo de la trayectoria del brazo,

el modo remoto exige que el computador principal le envíe consignas articulares incrementales a intervalos muy regulares, marcados por un temporizador de intervalos. Esto hace del proceso manipulador un proceso de tiempo real. La respuesta del programa PCP a cada consigna de movimiento enviada por el proceso manipulador es la posición angular actual de las articulaciones del brazo.

El proceso central del módulo de control es:

◇ `ccc`

El proceso `ccc` ejecuta el algoritmo de control cinemático coordinado del manipulador móvil. Entre éste y el proceso manipulador existe un semáforo de sincronización que asegura que un ciclo de control cinemático no tiene lugar hasta que la anterior consigna de movimiento no ha sido transmitida al controlador del brazo. Un ciclo del proceso consiste en la lectura del vector de estado del robot en la memoria compartida, el procesamiento del algoritmo de control cinemático y la escritura, también en memoria compartida, de las órdenes de movimiento resultantes.

3.3.2 Módulos de planificación

Para lograr el objetivo de que el manipulador móvil disponga de autonomía en la planificación de sus movimientos, el sistema debe interpretar la información del entorno proporcionada por sus sensores. El esquema de planificación que se ha implementado en el desarrollo de esta tesis se centra en la construcción de un mapa local del entorno, *DVL*. Este mapa se utiliza para generar las trayectorias libres de colisión que el planificador proporciona como referencia al módulo de control. En el caso de disponer de un mapa global del entorno de trabajo, el mismo mapa local generado se utilizará en el módulo de localización para corregir la posición proporcionada por la odometría; en estos casos, dado que se conoce la posición del manipulador móvil y el mapa global del entorno, el planificador puede generar trayectorias que anticipen y acomoden los movimientos del sistema a la intención del operario que actúa como guía. Si la tarea a realizar, como es el objetivo último de este trabajo, implica la colaboración en el transporte de un objeto de grandes dimensiones, la trayectoria local planificada debe tener su presencia. En la sección 7.5 se analizan las soluciones aportadas para este problema, así como la estructura final del módulo de planificación que se ha implementado para este caso concreto.

Construcción del mapa local

El núcleo central de los módulos de planificación desarrollados es la construcción de un mapa local a partir de los datos proporcionados por el telémetro láser, se ha optado por el Diagrama de Voronoi como representación del espacio libre. En el capítulo 4 se presenta detalladamente el algoritmo propuesto que permite construir el Diagrama de Voronoi de la zona percibida por el láser en tiempo real, de esta forma puede ser utilizado dinámicamente por el resto de los módulos de planificación.

Para este módulo se han desarrollado dos procesos:

◇ laser

Es el encargado de adquirir y procesar los datos procedentes del telémetro láser. Un temporizador de intervalos rige el comportamiento de este proceso, con intervalos fijos de tiempo se reciben series de muestras de la tarjeta HSIF, se procesan y se guarda en memoria compartida la serie de datos correspondientes a las medidas de distancias para un barrido completo del escáner láser.

◇ calculadv1

El proceso `calculadv1` genera los mapas bidimensionales del entorno, representados por los correspondientes Diagramas de Voronoi Locales, que sirven de referencia al módulo de planificación para planificar trayectorias libres de colisión y al módulo de localización para establecer la posición del manipulador móvil. Recibe las distancias a los objetos del entorno desde el proceso `laser`.

Localización

La arquitectura del sistema no requiere un proceso de localización ya que el manipulador móvil es capaz de ejecutar las tareas de colaboración con el operario humano sin necesidad de conocer a priori el entorno de trabajo, ni de localizarse respecto a un sistema de referencia global. Sin embargo, se ha incorporado un módulo de localización que puede ser utilizado en el caso de encontrarnos en entornos de trabajo conocidos de los que se disponga de un mapa a priori. El módulo de localización realiza una corrección de la estimación de posición proporcionada por los sensores odométricos, para ello lleva a cabo una comparación del mapa local, *DVL*, con el Diagrama de Voronoi del entorno global de trabajo que se almacena previamente en memoria.

El proceso que realiza esta misión es:

◊ **localiza**

Utiliza el DVL generado por el proceso `calculadvl` para establecer la posición actual del manipulador móvil. Dispone de un mapa de referencia del entorno de trabajo almacenado en memoria, y recibe datos odométricos y mapas locales por memoria compartida.

La utilización o no de este módulo de localización depende de la tarea a ejecutar y del conocimiento previo que se tenga del entorno de trabajo, ya que se requiere un mapa global para llevar a cabo la localización. Es importante destacar que en relación al tipo de tarea prevista para nuestro sistema, colaboración con un operario humano en el transporte de piezas, no es necesaria una localización muy precisa del manipulador móvil puesto que no realiza la tarea de forma completamente autónoma; es suficiente con mantener el error en la posición limitado para poder establecer la zona del mapa global en la que se encuentra el sistema en caso necesario.

Planificación

La misión de este módulo es generar una trayectoria cartesiana de referencia válida para el manipulador móvil en base al mapa local generado a partir de la información sensorial. La situación más general es que el sistema no conozca a priori el entorno de trabajo. En este caso el planificador genera una trayectoria que tiende a acercar el sistema al camino más seguro para evitar los obstáculos, representado por el Diagrama de Voronoi Local, al mismo tiempo que se sigue la dirección de movimiento marcada por el guía humano, que se determina a partir de la lectura del sensor de fuerza.

En caso de disponer de un mapa global del entorno de trabajo, entra en funcionamiento el módulo de localización. Aplicando el método de localización por correlación que se describe en el capítulo 5, se reduce el error de estimación de la posición que genera la odometría. El planificador utiliza en estas condiciones tres fuentes de información: la posición corregida proporcionada por el módulo de localización, el mapa global del entorno de trabajo, y la dirección de movimiento del operario humano estimada a partir de la lectura del sensor de fuerza. Con esta información genera una trayectoria local que anticipa situaciones concretas como el paso por una puerta o el giro en una esquina, acomodando el movimiento del manipulador móvil para que el sistema complete la tarea evitando las posibles colisiones.

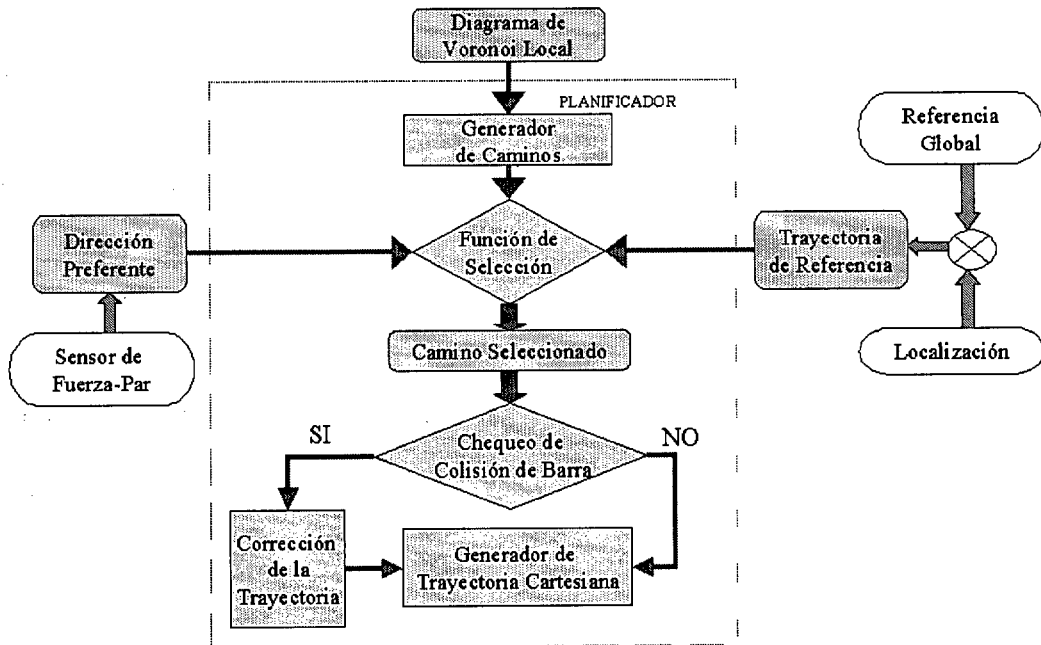


Fig. 3.7: Estructura del módulo de planificación.

3.4 Interfaz gráfica de supervisión y operación remota

La arquitectura general del sistema descrita en la sección previa se ha completado con un módulo auxiliar de supervisión y operación remota. Este módulo no se encuentra alojado en el computador de a bordo, como lo están todos los módulos previamente descritos, sino en la estación remota de teleoperación. Se dispone así de una interfaz gráfica que ha sido de especial utilidad en las etapas de desarrollo, permitiendo la supervisión y teleoperación del sistema durante la realización de los experimentos.

3.4.1 Procesos en la estación remota

En la estación remota de supervisión residen dos procesos: el proceso *gui* y el proceso *maestro*. Ambos tienen como misión proporcionar funciones para la interacción entre el operario humano y el manipulador móvil.

◇ *gui*

La principal función de este proceso es la presentación y gestión de un entorno gráfico de asistencia a la operación remota del robot, véase

la figura 3.8. El entorno facilita el envío de ordenes o comandos al manipulador móvil y, por otra parte, ordena la presentación gráfica de la información que éste suministra para que su funcionamiento pueda ser supervisado. A través del entorno gráfico, el operario puede seleccionar diversos modos de funcionamiento, accionar todos los grados de libertad del manipulador móvil e introducir órdenes en una línea de comandos que son procesadas por un módulo interprete de comandos. Al mismo tiempo, puede visualizar diversos datos de supervisión, tales como las coordenadas cartesianas o articulares del robot, la carga de la batería y los mensajes de error.

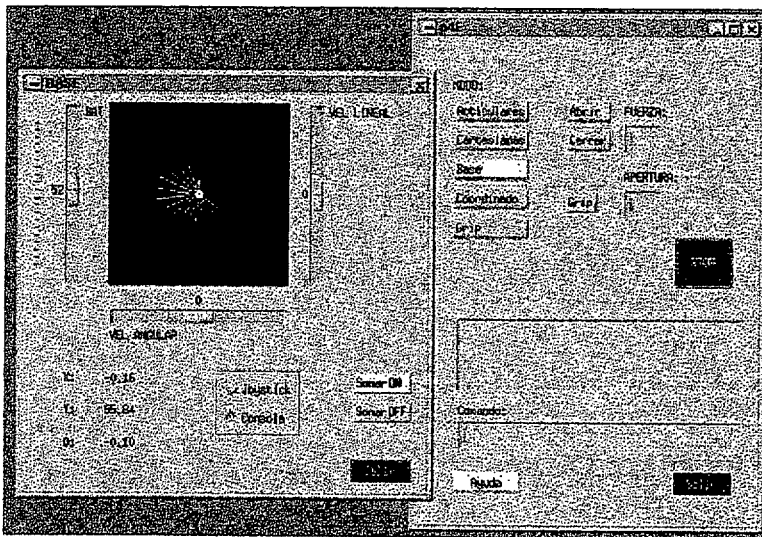


Fig. 3.8: Entorno gráfico de operación remota.

◇ maestro

Este proceso está dedicado a la gestión del dispositivo maestro de teleoperación, concretamente el *joystick* de 2 grados de libertad. Leyendo el estado de los dos botones del *joystick*, el proceso maestro multiplica por tres las posibilidades de movimiento teleoperado, para accionar hasta 6 grados de libertad sin cambiar el modo de funcionamiento. El proceso funciona en un ciclo continuo, con un periodo marcado por un temporizador de intervalos, intercambiando datos a través de un socket con el proceso de control esclavo. Envía al proceso esclavo el estado del *joystick*, y recibe del mismo el estado del robot.

Los procesos gui y maestro se comunican entre sí a través de una zona de memoria común, de la que el proceso gui lee el estado del robot para visualizarlo en el entorno gráfico.

3.4.2 Procesos de comunicación en el computador principal

En el computador principal del manipulador móvil se ejecutan dos procesos para la comunicación con la estación remota. Estos procesos son mmi y esclavo.

◇ mmi

Su función principal es recibir comandos procedentes del proceso de supervisión gui y ejecutarlos, devolviéndole los datos requeridos o una confirmación de ejecución, según cada caso. Este proceso se ha diseñado de forma que también pueda actuar independientemente del proceso gui. En caso de no disponer de la estación de supervisión, la interacción entre el operario humano y el manipulador móvil se puede realizar en modo texto a través de este proceso.

◇ esclavo

El proceso esclavo es el proceso complementario del proceso maestro durante la operación remota del manipulador móvil. Recibe el estado del *joystick* desde la estación de supervisión, y lo traduce a referencias físicas de movimiento en función del modo de funcionamiento actual del robot. En caso de funcionamiento sin estación de supervisión, directamente a través del proceso mmi, el proceso esclavo permite enviar las consignas de movimiento a través de un teclado.

3.5 Arquitectura software

Uno de los objetivos principales sobre el que se ha estructurado la arquitectura software del sistema es la modularidad. Se ha pretendido desarrollar una serie de módulos con funciones diferentes que puedan trabajar conjuntamente mediante el intercambio de datos. Esta modularidad facilita el desarrollo y comprobación de diferentes algoritmos, modificando únicamente el módulo al que correspondan. Así han sido probados sobre la misma plataforma, sin modificar su arquitectura software, diversos algoritmos de control,

diversos subsistemas de pilotaje y diferentes algoritmos para manejar el subsistema sensorial, construcción de mapas del entorno y localización.

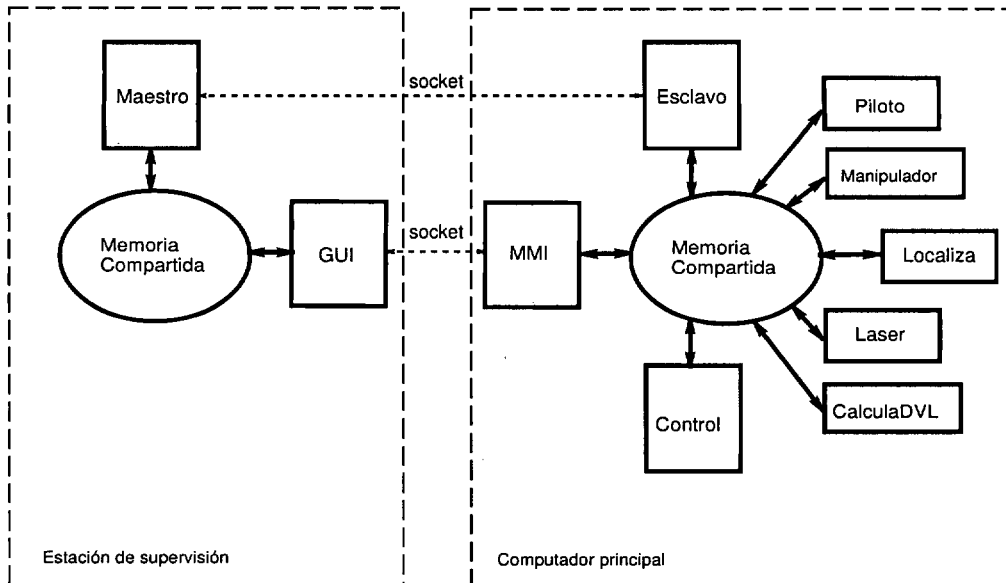


Fig. 3.9: Arquitectura software del manipulador móvil.

Los diferentes procesos se distribuyen entre la estación remota de supervisión y el computador principal a bordo del manipulador móvil (figura 3.9). En la estación remota se han situado los que denominamos procesos de supervisión, cuya misión principal es servir de interfaz hombre-máquina. En el computador principal se alojan los procesos de control y planificación.

El intercambio de datos entre procesos se realiza a través de zonas de memoria compartida, por ser la opción más rápida, para aquellos procesos que residen en el mismo computador. La comunicación entre procesos que residen en computadores distintos se hace por medio de sockets de tipo *stream* orientados a conexión para proporcionar enlaces de datos fiables.

4. EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN LOCAL

4.1 Introducción

Para conseguir que un robot móvil se desplace sin colisionar con los objetos del entorno y sea capaz de realizar una tarea, es necesario que esté dotado de un sistema sensorial que le proporcione información sobre el estado actual del entorno. Estos datos se utilizarán en el proceso de planificación de las trayectorias que debe seguir el robot para ejecutar su tarea de manera satisfactoria. La planificación de trayectorias basada en la información sensorial surge como un compromiso entre la necesidad de dotar al sistema de capacidad de reacción ante situaciones inesperadas y la necesidad de definir trayectorias eficientes para realizar la tarea encomendada.

La planificación basada en sensores ha sido abordada desde muy diferentes puntos de vista. En muchos casos, el modelo del entorno se representa mediante un campo de potenciales. La función de potencial, cuyo valor se intenta minimizar en la planificación de la trayectoria, considera una función de distancia a los obstáculos del entorno, que repelen al robot, y la influencia del punto destino que actúa como atractor. Este enfoque es el que se sigue en los trabajos de Canny [73] o, en el caso de manipuladores móviles, la aproximación de *elastic band* propuesta por Khatib [46] [70]. En otras ocasiones se han utilizado los mapas basados en celdillas, como los mapas de ocupación utilizados por Thrun [91]. Entre las diferentes técnicas aplicadas a la planificación basada en sensores, en los últimos años se ha rescatado un método clásico, la planificación de trayectorias basada en el Diagrama de Voronoi del espacio libre, especialmente interesante es la línea de investigación seguida por Choset [16]. De forma muy simple, el Diagrama de Voronoi representa la serie de puntos que equidistan de los objetos del entorno.

Este reciente interés de la robótica móvil por utilizar el Diagrama de Voronoi como representación del espacio entorno al robot se justifica principalmente por tratarse de una representación concisa de la geometría del

espacio libre que proporciona directamente trayectorias seguras. La clave que permite adaptar este método a la planificación basada en sensores es el desarrollo de algoritmos que permitan extraer Diagramas de Voronoi del entorno de una forma rápida y eficaz.

En nuestro caso, nos interesa construir un modelo del entorno que pueda utilizarse directamente en las tareas de navegación, planificación local de trayectorias y localización que se abordan en esta tesis, así como en otras, como la exploración del entorno y construcción de mapas, que están siendo desarrolladas por nuestro grupo. Además el modelo elegido debe obtenerse a partir de los datos proporcionados por el telémetro láser como elemento fundamental del sistema sensorial, con la rapidez suficiente como para actualizarse en tiempo real. El Diagrama de Voronoi cumple todas estas condiciones, además de representar la topología del espacio libre de una forma simple, incluye información métrica y permite filtrar los errores inherentes a la información sensorial. Por todas estas razones, nuestro trabajo se basa en la utilización del Diagrama de Voronoi como representación de espacio que rodea al robot.

El objetivo de este trabajo es construir un Diagrama de Voronoi a partir de la información proporcionada por un sensor láser acoplado al robot móvil. Dado que la zona de la que se tiene información es restringida, por las limitaciones de los sensores, se trata de un diagrama local. Este Diagrama de Voronoi Local se utilizará posteriormente tanto para localizar el robot móvil en el entorno de trabajo conocido éste a priori, como para planificar localmente las trayectorias de acuerdo con la tarea encomendada y con el estado actual del entorno que se desprende de la interpretación de este mapa local. Nuestra intención es realizar ambos procesos lo más rápidamente posible de forma que puedan ser ejecutados por el robot durante el movimiento.

4.1.1 El Diagrama de Voronoi

El Diagrama de Voronoi se basa en un concepto muy simple. Dada una serie finita de puntos distintos y aislados en un espacio continuo, asociamos todas las localizaciones en ese espacio al miembro más cercano de la serie de puntos. El resultado es una partición del espacio en un conjunto de regiones mutuamente excluyentes salvo en sus bordes. Las fronteras de estas regiones formadas por los puntos del espacio equidistantes de dos o más puntos generadores, constituyen el Diagrama de Voronoi, en la figura 4.1 se puede ver un ejemplo.

La simplicidad del concepto explica que haya sido aplicado en muchas ocasiones y en diversos campos a lo largo de la historia aunque recibiendo

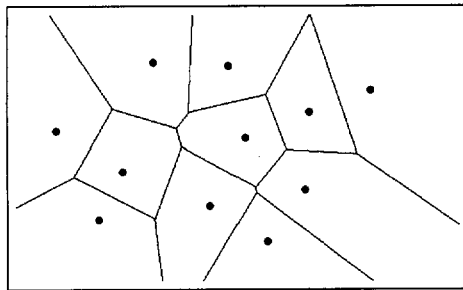


Fig. 4.1: Diagrama de Voronoi para puntos

diferentes denominaciones, ver [64]. De entre todas ellas la más comúnmente extendida es Diagrama de Voronoi, sobre todo en el campo de la robótica que es el que nos ocupa. Los diagramas de Voronoi se han aplicado en áreas muy diversas (cristalografía, astronomía, geografía, geología, biología, planificación urbana, meteorología,...), adaptándose de forma particular a cada uno de estos campos de investigación pero manteniendo una misma formulación básica: la división del espacio en regiones de pertenencia a los diferentes elementos generadores según una función de distancia.

Aunque es muy probable que el concepto de diagrama de Voronoi sea considerablemente antiguo, ya que muchas estructuras de la naturaleza presentan un estrecho parecido a este tipo de división, los primeros documentos que pueden citarse pertenecen a Descartes. En su tratamiento de fragmentación cósmica, en 1644, Descartes usa diagramas como los de Voronoi para mostrar la disposición de la materia en el sistema solar y su entorno. Las primeras referencias indiscutibles que presentan una formulación matemática de este concepto aparecen en los trabajos de Dirichlet (1850) y Voronoi (1908). Como resultado de estos trabajos se adoptó el nombre usado para describir este tipo de diagramas, diagrama de Voronoi y teselación de Dirichlet.

En robótica, los Diagramas de Voronoi se propusieron hace años para la planificación de movimientos y la navegación en robots móviles, utilizándose como herramienta en la planificación de trayectorias para examinar si un robot puede pasar entre dos puntos dados sin colisionar con los obstáculos presentes (Takahashi y Schilling, [90]; Ó'Dúnlaing y Yap, [63]; Schwartz y Yap, [80]). Una ventaja del Diagrama de Voronoi es que da lugar a trayectorias que tienden a maximizar la distancia entre el robot y los obstáculos, originando así caminos seguros. Más recientemente, los grafos de Voronoi se han usado en la construcción de mapas topológicos, planificación y localización a partir de la información sensorial (Choset [17], [60]; Van Zwynsvoorde, Simeon y Alami [92]).

4.2 Trabajos previos

Como se cita en la introducción de este capítulo, los Diagramas de Voronoi fueron propuestos hace años por diferentes grupos de investigación para planificación de trayectorias en robótica móvil. En todos estos casos el mapa del entorno se considera absolutamente conocido a priori y tanto la construcción del Diagrama de Voronoi por técnicas geométricas, como la planificación de las trayectorias es previa al inicio de la ejecución de la tarea. Posteriormente, ya en los años 90, algunos autores han desarrollado algoritmos para construir Diagramas de Voronoi usando la información del entorno recogida por los sensores, eliminando la necesidad de disponer de un mapa previo. Es el caso del método aplicado por Mahkovic en [55] para la construcción de un Diagrama de Voronoi Local Generalizado (GLVG) a partir de las medidas proporcionadas por un telémetro láser. Su algoritmo divide los datos recogidos por el láser en 'clusters', grupos de generadores, que representan el conjunto de puntos pertenecientes al mismo objeto del entorno, el Diagrama de Voronoi para la serie completa de puntos se calcula a continuación, el paso final del algoritmo consiste en eliminar los bordes del Diagrama de Voronoi generado que se encuentran fuera de la región visible o cuyos generadores son puntos del mismo grupo. En [87], Sudha construye un Diagrama de Voronoi a partir de una imagen binaria del espacio de trabajo obtenida usando una cámara digital.

Otro tipo de algoritmos son los que implican la construcción incremental del Diagrama de Voronoi durante el proceso de exploración de un entorno desconocido. Nagatani, Choset y Thrun construyen un Grafo de Voronoi Generalizado (GVG) localmente y de forma aproximada, ver [16] y [60]. En su caso, los bordes del diagrama se van construyendo punto a punto de forma incremental. Un robot móvil dotado de sensores de ultrasonido se mueve a lo largo de una trayectoria que se va generando con la condición de mantener la equidistancia a los dos objetos más cercanos al robot, esto se evalúa a partir de las distancias medidas en cada instante. A diferencia de los algoritmos descritos anteriormente, en este caso la información proporcionada por los sensores no se utiliza para del cálculo del Diagrama de Voronoi para toda la región del entorno observada, sino para dirigir el movimiento del robot sobre los bordes del grafo durante la fase de exploración. De esta forma, cada lectura de datos procedentes de los sensores sólo proporciona un punto de un borde del Diagrama de Voronoi del entorno de trabajo.

Otro ejemplo se puede encontrar en el trabajo presentado por Van Zwynswoorde, Simeon y Alami [92], en este caso el grafo local de Voronoi se calcula

a partir de los datos recogidos por un telémetro láser y se usan para construir incrementalmente un mapa topológico del entorno.

4.3 Definiciones básicas

El diagrama de Voronoi divide el espacio libre en una serie de regiones distintas, regiones de Voronoi, cada una de las cuales está constituida por aquellos puntos del espacio que se encuentran más cerca de un objeto que de todos los demás. Los puntos del espacio que limitan dos o más regiones de Voronoi forman los bordes del diagrama de Voronoi, serán pues aquellos puntos que equidisten de dos o más objetos. El método propuesto en este capítulo construye el diagrama de Voronoi discreto del entorno en una región alrededor del robot basándose en la información proporcionada por un telémetro láser. Lo denominaremos Diagrama de Voronoi Local (DVL).

En este método las lecturas del sensor determinan los límites del espacio libre, espacio no ocupado por obstáculos. Este espacio libre se considera dividido en celdillas regulares. El algoritmo propuesto se basa en analizar, para todas las celdillas que pertenezcan al espacio libre, si forman parte del diagrama de Voronoi calculando su distancia euclídea a los objetos del entorno. En este trabajo se considera el movimiento del robot en un plano. Los datos proporcionados por el sensor están igualmente restringidos al plano en el que se lleva a cabo el barrido. En consecuencia, nos limitamos a considerar el Diagrama de Voronoi en \mathbb{R}^2

4.3.1 Diagrama ordinario de Voronoi para puntos

Se suponen una serie de puntos dados en el plano euclídeo. Asumiendo que el número de puntos es dos o más pero finito y que todos ellos son distintos en el sentido de que no coinciden en el plano. Dada esta serie de puntos, cada localización en el plano se asigna al miembro más cercano de la serie. Si ocurre que una localización está igualmente cerca de dos o más miembros de la serie, se asigna la localización a ambos miembros. Como resultado, el conjunto de localizaciones asignadas a cada miembro en la serie de puntos forman su propia región. Las regiones resultantes son colectivamente exhaustivas en el plano ya que cada localización se asigna al menos a un miembro en la serie de puntos. Las localizaciones asignadas a dos o más miembros de la serie de puntos forman los bordes de las regiones. Regiones adyacentes se solapan sólo en sus bordes. Por tanto, la serie de regiones es colectivamente

exhaustiva y mutuamente exclusiva por bordes, formando una "teselación". Esta teselación recibe el nombre de *Diagrama de Voronoi planar ordinario*.

Matemáticamente, se define el diagrama ordinario de Voronoi como:

Sea

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \quad (4.1)$$

donde $2 \leq n < \infty$, un conjunto de puntos en el plano, y p un punto cualquiera del plano. La región dada por

$$V(p_i) = \{p | p \in \mathbb{R}^2, d_E(p, p_i) \leq d_E(p, p_j), j \neq i\} \quad (4.2)$$

se denomina *región de Voronoi* asociada con p_i donde $d_E(p, p_i)$ es la distancia euclídea desde el punto p al punto p_i . Y la serie dada por:

$$V = \{V(p_1), \dots, V(p_n)\} \quad (4.3)$$

el *diagrama de Voronoi* generado por P .

El borde de una región de Voronoi puede estar formado por segmentos, semirectas o líneas infinitas, llamados *bordes del Voronoi*. Un extremo de un borde de Voronoi se denomina *vértice de Voronoi*. Un vértice puede definirse como un punto compartido por tres o más regiones de Voronoi.

4.3.2 Diagrama de Voronoi para series de puntos

Sea $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ una colección de n series de puntos en el plano que no se solapan

$$g_i \subset \mathbb{R}^2, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.4)$$

y

$$g_i \cap g_j = \emptyset, i \neq j \quad (4.5)$$

Para cualquier punto $p \in \mathbb{R}^2$ se denomina $d_E(p, g_i)$ a la mínima distancia euclídea desde p a cualquier punto de g_i . La región de Voronoi se define como

$$V(g_i) = \{p | p \in \mathbb{R}^2, d_E(p, g_i) \leq d_E(p, g_j), j \neq i\} \quad (4.6)$$

Y la serie dada por:

$$V = \{V(g_1), \dots, V(g_n)\} \quad (4.7)$$

el *diagrama de Voronoi generalizado* generado por G . Se utiliza la denominación de diagrama de Voronoi generalizado cuando los elementos generadores son series de puntos en lugar de puntos aislados.

4.3.3 Algoritmos para construir diagramas de Voronoi

Son muchos los algoritmos que se han descrito para el cálculo del diagrama de Voronoi en el plano. La mayoría de ellos resuelven el problema del cálculo del diagrama de Voronoi para series de puntos generadores aislados, aunque las definiciones de diagramas generalizados de Voronoi se extienden a cualquier otro tipo de generadores como líneas o áreas.

En nuestro caso, cada uno de los objetos del entorno observado está construido por una serie de puntos. Consideramos por tanto, la definición anterior para la construcción del diagrama generalizado de Voronoi. Entre todos los algoritmos utilizados para resolver estos casos, hacemos referencia a algunos esquemas de aproximación que se utilizan cuando no se tiene necesidad de una computación exacta y cuando el número de series de puntos generadores es suficientemente pequeño. La principal ventaja de estos algoritmos es su sencillez. Este tipo de soluciones son las que se aplican a nuestro problema puesto que al tratarse de la construcción de un mapa local directamente con los datos procedentes de los sensores no tiene sentido buscar una solución exacta, la incertidumbre en los datos limitará de por sí la precisión del diagrama calculado.

A continuación se mencionan dos métodos aproximados para el cálculo del diagrama de Voronoi en el plano [64] que han sido aplicados en el campo de la robótica.

Aproximación por puntos

Si los generadores son series de puntos mutuamente disjuntas (como curvas o áreas) y se quiere construir el diagrama de Voronoi para ellos con respecto a la distancia d , el problema puede reducirse a construir un diagrama de Voronoi para puntos con respecto a d de la forma siguiente. Dada una serie de generadores, primero se reemplaza cada generador con un número finito de puntos que dan una aproximación del generador, después se construye el diagrama de estos puntos, y finalmente se eliminan los bordes y vértices superfluos. Por tanto, obtenemos el algoritmo siguiente:

- Entrada: Serie de $\Gamma = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ de n figuras disjuntas en el plano.
- Salida: Aproximación del diagrama de Voronoi para Γ .

- Procedimiento:

- Paso 1: Para cada $i = 1, \dots, n$, crear una serie finita P_i de puntos que aproximen el borde de A_i .
- Paso 2: Construir el diagrama de Voronoi V para la serie de puntos.
- Paso 3: Eliminar de V aquellos bordes cuyos puntos generadores pertenecan a la misma figura original. Eliminar vértices aislados, si los hay.

Un inconveniente que presenta este tipo de solución es la necesidad de disponer de un algoritmo rápido y eficaz para calcular el diagrama de Voronoi de los puntos seleccionados.

Un algoritmo muy similar a éste es el utilizado por Mahkovic y Slivnik en [55] inspirándose en el trabajo de Sugihara [89]. En su propuesta las series de puntos que representan cada una de las figuras generadoras, no se obtienen a partir de los modelos de tales figuras como se hace en [89], sino que son medidas proporcionadas por un telémetro láser en un entorno a priori desconocido. En este aspecto nuestro trabajo parte del mismo tipo de información sobre el entorno.

Aproximación por una imagen digital

Otro esquema de aproximación más simple es el uso de técnicas de imagen digital. Una imagen digital es una matriz bidimensional, $I(i, j)$, $1 \leq i, j \leq N$, donde la entrada $I(i, j)$ representa alguna propiedad de la imagen en el punto con coordenadas (i, j) . Cada punto (i, j) se denomina pixel, y se denomina valor del pixel a $I(i, j)$.

En el siguiente esquema, se construye una aproximación de un diagrama de Voronoi en la forma de una imagen digital. Primero, cada generador se reemplaza con una serie de pixeles, y después a partir de estos pixeles las regiones correspondientes a los generadores se expanden simultáneamente a la misma velocidad hasta que se da la colisión de una región con otra. Esto puede hacerse repitiendo operaciones paralelas locales sobre los vecinos de los pixeles en la forma siguiente:

- Entrada: Entero N y serie $\Gamma = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ de n figuras disjuntas en el plano.

- Salida: Imagen digital $I(i, j)$, ($1 \leq i, j \leq N$) aproximando el diagrama de Voronoi de Γ , donde $I(i, j) = k > 0$ si el pixel (i, j) pertenece a la región de Voronoi de A_k , y $I(i, j) = -1$ si el pixel (i, j) es incidente a dos o más regiones de Voronoi diferentes.
- Procedimiento:

Paso 1: $\forall 1 \leq i, j \leq N$,

$I(i, j) \leftarrow k$ si existe k tal que $(i, j) \in A_k$

$I(i, j) \leftarrow 0$ en otro caso

Paso 2: Repetir el paso 2.1 hasta que los valores de los pixeles no cambien.

2.1. $\forall (i, j)$ tal que $I(i, j) = 0$, hacer simultáneamente:

$I(i, j) \leftarrow k$ si todos los pixeles en su vecindad con valor distinto de 0, tienen el mismo valor k .

$I(i, j) \leftarrow -1$ si los pixeles en su vecindad admiten dos o más valores.

Este esquema de aproximación es conceptualmente simple y no requiere ningún algoritmo exacto para calcular diagramas de Voronoi de puntos, sin embargo consume mucho tiempo y espacio. Otro inconveniente es que la salida de este algoritmo no es una estructura de datos; la salida da meramente una aproximación de las regiones de Voronoi y necesita un procesamiento posterior para extraer relaciones de incidencia entre regiones, los bordes y los puntos. Además la distancia es no euclídea. Un esquema similar a este se presenta en [87] a partir de una imagen digital del espacio de trabajo y en [67].

4.4 Construcción del DVL

En nuestro caso, cada uno de los objetos del entorno observado está constituido por una serie de puntos extraídos directamente de la información del sensor, de forma similar a [55]. Se trata por tanto del cálculo de un diagrama de Voronoi generalizado para series de puntos. EL problema es determinar la mínima distancia de cada punto del espacio a cada una de las series de generadores.

Para ello vamos a utilizar una discretización de la zona visible, y por lo tanto obtendremos un diagrama de Voronoi digital. Sin embargo, a diferencia de los algoritmos basados en imágenes digitales [87], no partimos de una

representación digital del espacio de trabajo, los datos proporcionados por el láser se utilizarán directamente. La equidistancia a los objetos de cada celdilla del espacio se estima basándonos en cálculos con distancias euclídeas punto-punto, algo similar se hace en [16].

La característica clave del mapa obtenido es que se construye directamente a partir de los datos proporcionados por el sistema sensorial. La información que nos da el telémetro láser es una serie ordenada de distancias medidas desde la posición del sensor hasta el objeto más cercano en ángulos sucesivos desde 0° hasta 360° con una resolución angular de 0.5° . El algoritmo para calcular el Diagrama de Voronoi Local se aplica directamente sobre las medidas proporcionadas por el sensor que representan una aproximación del borde de los objetos que se encuentran dentro del área de visión definida y que generarán los bordes y nodos del DVL en esa región.

El objetivo del algoritmo que proponemos es construir un mapa local del entorno en el que se mueve el robot. La palabra local es clave puesto que el espacio de trabajo se restringe, y por tanto el espacio de cálculo del Diagrama de Voronoi Local (DVL), a una zona limitada en torno a la posición actual del robot en cada momento, descartando la información obtenida para distancias superiores a un determinado valor, d_{max} .

Nos basamos en la siguiente definición del diagrama de Voronoi en el plano:

Para cada punto del espacio libre $(x, y) \in C$ hay uno o más puntos más cercanos en el espacio ocupado, \bar{C} . Estos puntos son denominados puntos base de (x, y) . El diagrama de Voronoi es la serie de puntos en el espacio libre que tienen al menos dos puntos base diferentes, es decir se encuentra a la misma distancia de al menos dos puntos del espacio ocupado siendo esta distancia menor a la que le separa del resto de los puntos del espacio ocupado.

El algoritmo para calcular el Diagrama de Voronoi Local para la región de visión que proponemos puede describirse por los siguientes pasos:

1. Agrupamiento de los puntos de la serie en grupos de generadores ("clusters"). Se consideran dentro de un mismo grupo generador todos los puntos que por continuidad en las medidas se pueda suponer que pertenecen a un mismo objeto.
2. Se considera una discretización de la región visible dividiéndola en celdillas cuadradas con la adecuada resolución. La elección de esta resolución deberá hacerse por compromiso entre la precisión requerida y el tiempo de procesamiento admisible.

3. Para cada celdilla del espacio libre se evalúa su pertenencia a las regiones de Voronoi definidas por los obstáculos presentes en el entorno observado. Ya que las regiones de Voronoi tienen la propiedad de cubrir todo el plano, cualquier punto de éste pertenece al menos a una de las regiones de Voronoi de los obstáculos. Se evalúa la distancia de cada una de las celdillas a todos los grupos generadores, de forma que la celdilla pertenecerá a la región de Voronoi de un objeto si está más cerca de éste que de todos los demás; si es equidistante a dos objetos del entorno, pertenecerá a un borde del DVL; y, por último, si es equidistante a más de dos objetos, tal celdilla es etiquetada como un nodo del DVL.

4.4.1 Agrupación de los datos

Los datos obtenidos del telémetro láser se clasifican en diferentes grupos generadores. Esta clasificación consiste en introducir en el mismo grupo aquellos datos que pertenezcan al mismo objeto del entorno. Las medidas proporcionadas por el sensor cuando hace un barrido sobre la superficie de un objeto varían de forma continua. Es esta continuidad la que utilizamos para clasificar los datos en diferentes objetos. Las discontinuidades, o saltos pronunciados en las medidas consecutivas proporcionadas por el telémetro láser, indican el paso de un objeto a otro. En la figura 4.2 se muestran gráficamente los datos leídos por el láser en un determinado entorno, (a); su representación en distancias en las 361 medidas de un barrido, (b), se han señalado con números del 1 al 6 los puntos donde se producen saltos que corresponden a los extremos de los distintos objetos presentes en el entorno; en (c) se representa la diferencia entre cada dos medidas consecutivas, haciéndose evidente las discontinuidades correspondientes a los puntos antes señalados; por último, en (d) se muestra el resultado de la división en grupos generadores que se ha llevado a cabo basándose en estas discontinuidades.

Este algoritmo está diseñado fundamentalmente para entornos estructurados de interiores, donde los objetos en su mayoría tienen formas regulares y bordes bien definidos, ver figuras 4.3(a) y 4.3(b) en la página 54. En estos casos, la utilización de las discontinuidades en las medidas del láser para discriminar diferentes objetos ha probado dar buenos resultados en casi todas las situaciones comprobadas experimentalmente.

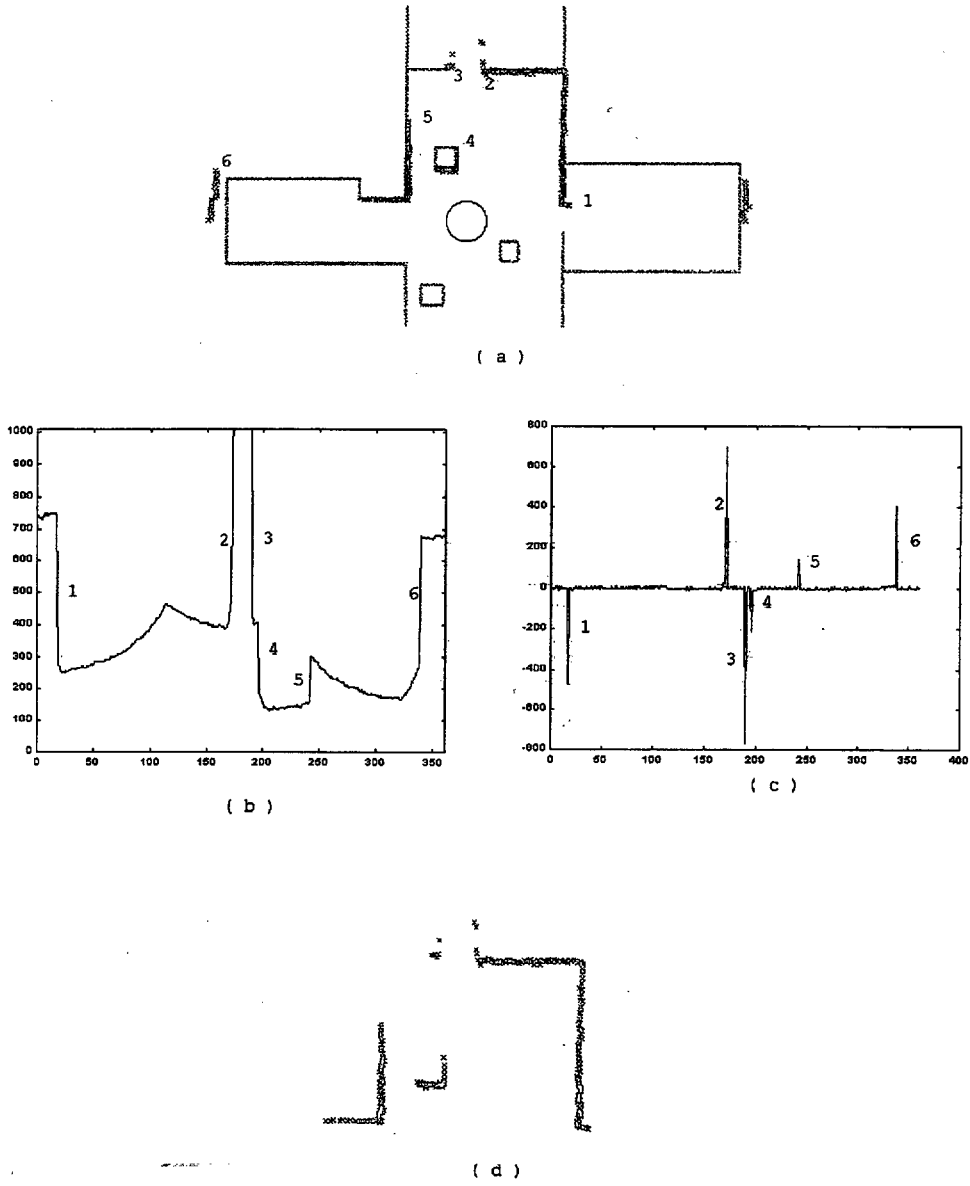


Fig. 4.2: Agrupamiento en clusters por discontinuidades en las distancias medidas

4.4.2 Discretización de la región visible

Definimos d_{max} como la distancia máxima válida para los datos medidos por el sensor láser. Este valor máximo se determina basándose en primer lugar en las características de nuestro sensor, debe ser seleccionado con un valor inferior al rango de medidas que es capaz de proporcionar el telémetro láser con una precisión suficiente. Además se ha de tener en cuenta que el objetivo es construir un mapa local del entorno lo más rápidamente posible para que pueda efectuarse con el robot en movimiento. Si puede actualizarse la información con la suficiente rapidez, no es necesario analizar una zona muy amplia pues es posible disponer de un nuevo mapa antes de que el robot haya salido del espacio estudiado en el ciclo anterior. De esta forma, ya que el tamaño del área estudiada determina el tiempo empleado por el algoritmo en el cálculo del DVL, las limitaciones que se establezcan sobre el tiempo de procesamiento influirán de forma directa en el radio máximo del área que puede ser procesada. En la figura 4.3(d) se muestra la limitación impuesta por d_{max} .

Este parámetro se determina experimentalmente de acuerdo a la velocidad del robot, la complejidad del entorno y la capacidad de procesamiento del computador de a bordo. En nuestros experimentos hemos comprobado que es suficiente con considerar distancias de 4 a 6m en torno a la posición del robot en cada momento para obtener el DVL de ese área en un tiempo moderado.

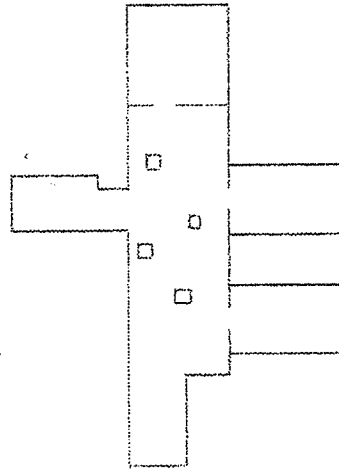
El siguiente paso en el algoritmo es la discretización de este espacio en celdillas cuadradas con una resolución adecuada. Si fuese posible calcular la pertenencia de cada punto del espacio a una u otra región de Voronoi, podría calcularse de forma precisa la situación de los puntos pertenecientes a los bordes del diagrama con la única limitación del error en las medidas proporcionadas por los sensores. Por consiguiente, cuanto menor sea la resolución de la discretización del espacio más nos acercaremos a la solución buscada. Sin embargo, es evidente que el tiempo de procesamiento aumentará de forma linealmente proporcional al número de celdillas que se analicen, se hace por tanto necesario adoptar un compromiso entre precisión y tiempo de procesamiento para la elección de la resolución de la celdilla.

4.4.3 Cálculo de distancias a los grupos generadores

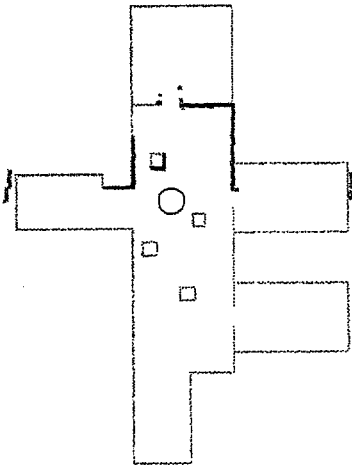
Para cada una de las celdillas del espacio discretizado, debería calcularse la distancia a todos los puntos de cada uno de los objetos. La distancia mínima de las calculadas sería la distancia de la celdilla al objeto.



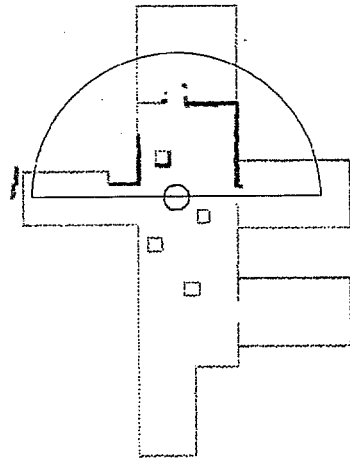
(a) Fotografía del entorno



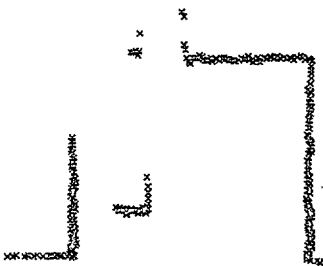
(b) Proyección del entorno en el plano barrido por el láser



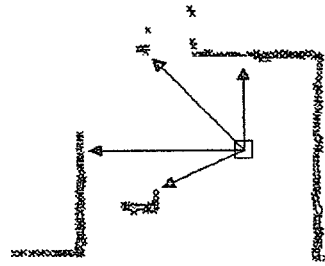
(c) Datos recogidos por el láser



(d) Distancia máxima admisible



(e) Agrupamiento de datos en clusters



(f) Distancias celdilla-clusters

Fig. 4.3: Proceso de construcción del DVL

El número de puntos que describen el entorno en cada momento está determinado por el número de distancias que es capaz de medir el sensor en cada barrido. En el caso que nos ocupa, el telémetro láser proporciona 361 medidas. Si todas las medidas fuesen válidas, es decir, estuviesen dentro de la región que se analiza, para cada celdilla visible habrían de evaluarse las distancias a cada uno de estos 361 puntos. En lugar de ello, no consideramos todos los puntos que constituyen cada uno de los grupos generadores sino un conjunto representativo de ellos y se calculan las distancias de cada celdilla del espacio a este conjunto. En la figura 4.3(f) se representa este paso del algoritmo.

Error cometido por la discretización del espacio. Influencia de la resolución.

Para calcular la distancia entre una celdilla y los puntos de cada uno de los grupos generadores se evalúa la distancia euclídea entre el punto central de dicha celdilla y los puntos del objeto. ¿Qué error se comete?. Si d_c es la distancia del centro de la celdilla a un punto, cualquier otro punto de la celdilla se encontrará a una distancia d del mismo punto comprendida en el intervalo:

$$d_c - \frac{res}{\sqrt{2}} \leq d \leq d_c + \frac{res}{\sqrt{2}} \quad (4.8)$$

Siendo res la resolución de discretización, es decir, el tamaño de las celdillas, véase la figura 4.4.

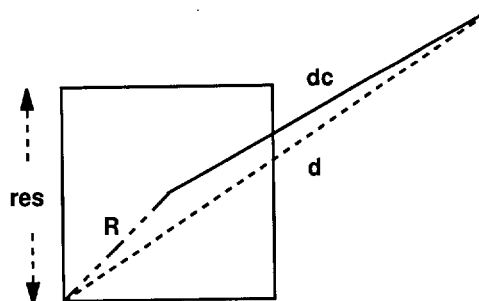


Fig. 4.4: Error debido a la discretización

De esta forma se puede evaluar el error máximo cometido, E , al considerar el punto central:

<i>res</i>	$E = d_c - d $	$2 \times E$
2	1.41	2.8
5	3.53	7.1
10	7.07	14.14

Tab. 4.1: Error en función de la resolución

Etiquetado de las celdillas

En función de las distancias calculadas a los diferentes objetos presentes en el entorno, cada celdilla de la región visible se considera perteneciente a la región de Voronoi asignada a un objeto; a la frontera entre las regiones de Voronoi asignadas a dos objetos, es decir, a uno de los bordes del Diagrama de Voronoi; o en último caso, si ha sido asignada a dos o más bordes, se considera un nodo del DVL.

Si la distancia del punto central de una celdilla a un objeto, A_1 , es al menos una cantidad $2 \times E$ menor que la distancia a cualquier otro objeto, se puede asegurar que todos los puntos de la celdilla están dentro de la región de Voronoi del objeto A_1 .

Si las distancias del punto central de una celdilla a dos objetos del entorno difieren en una cantidad menor a $2 \times E$, es posible que algún punto dentro de la celdilla sea equidistante a los dos obstáculos, es decir, forme parte de un borde del Diagrama de Voronoi.

Esto puede comprobarse teniendo en cuenta lo siguiente:

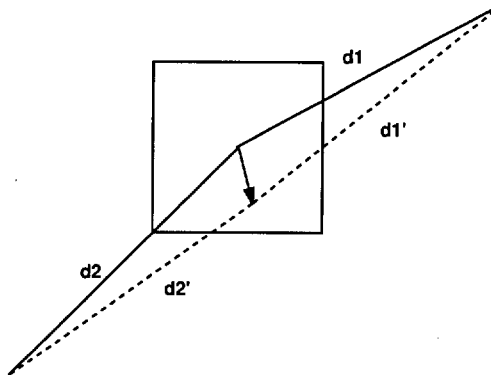


Fig. 4.5: Comparación de distancias a clusters

La distancia de cualquier punto de la celdilla, distinto del centro, al obstáculo 1, cumple:

$$d_1 - E \leq d'_1 \leq d_1 + E \quad (4.9)$$

La distancia de cualquier punto de la celdilla, que no sea su centro, al obstáculo 2, cumple:

$$d_2 - E \leq d'_2 \leq d_2 + E \quad (4.10)$$

En consecuencia, si d_1 es la distancia calculada al obstáculo más cercano, y por tanto, $d_1 < d_2$, para que se pueda dar la coincidencia de distancias d'_1 y d'_2 en algún punto dentro de la celdilla de discretización, es necesario que se cumpla la siguiente condición:

$$d_2 < d_1 + 2 \times E \quad (4.11)$$

Las celdillas que se etiquetan como nodos del DVL, cumplen la condición expresada en (4.11) para tres o más grupos generadores.

El resultado final del algoritmo se muestra en la figura 4.6: en rojo se muestran los datos recogidos por el telémetro láser, los puntos señalados en gris corresponden a los puntos centrales de las celdillas etiquetadas como pertenecientes a los bordes del DVL y en azul se han marcado las etiquetadas como nodos.

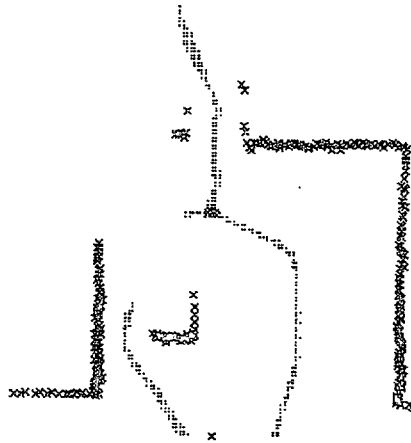


Fig. 4.6: Diagrama de Voronoi Local

4.5 Resultados experimentales de la construcción del DVL

Para comprobar el algoritmo desarrollado se han realizado una serie de experimentos usando un telémetro láser de la marca SICK modelo PLS200 con el que se obtiene en cada barrido una serie de 361 distancias a los objetos que rodean al robot en 180° con una resolución de 0.5° . Los datos adquiridos por el láser han sido procesados en un computador con un microprocesador Pentium II a $350MHz$.

Las pruebas se han realizado en un entorno estructurado de interiores compuesto por un pasillo en el que aparecen puertas abiertas y donde se colocan obstáculos para modificar el entorno, y un vestíbulo con puertas a diferentes salas y obstáculos.

En las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se presentan algunos de los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo al entorno del pasillo. En todas ellas se ha tomado una región visible limitada a $d_{max} = 4m$ alrededor de la posición del telémetro láser. La resolución de la discretización del espacio es de $2cm$.

En las figuras de la izquierda se representan los puntos medidos directamente por el telémetro láser en diferentes situaciones. A la derecha, se presentan los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo propuesto para la construcción del Diagrama de Voronoi Local a partir de estos datos. En ellas se indica el tiempo empleado por este algoritmo en extraer el DVL a partir de los datos de las lecturas del sensor, que para este tipo de entornos se encuentra alrededor de 1 segundo, recordemos que el área estudiada tiene unas dimensiones aproximadas de $8 \times 4 m^2$.

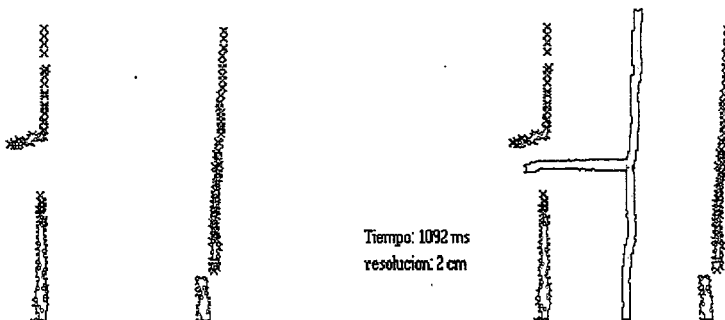


Fig. 4.7: Pasillo con puerta abierta a la izquierda

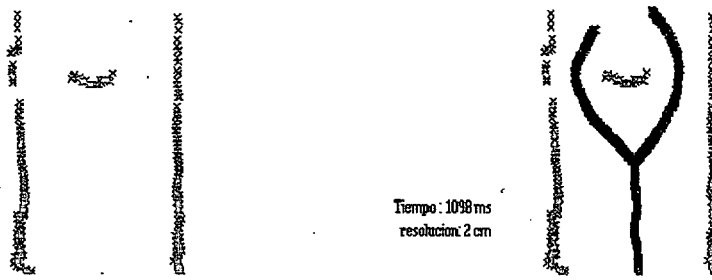


Fig. 4.8: Obstáculo en el centro del pasillo con puertas cerradas

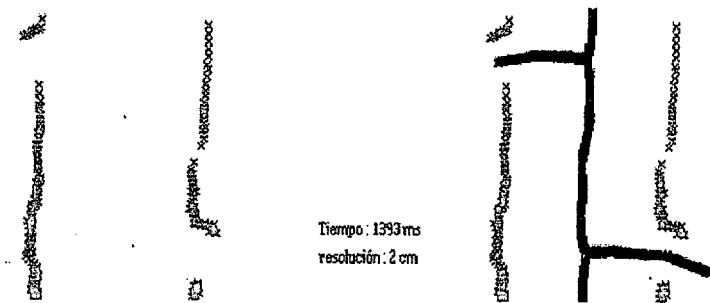
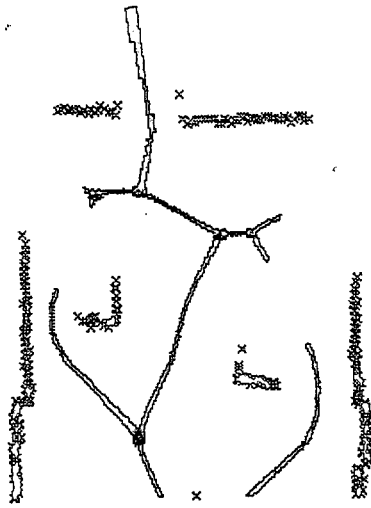


Fig. 4.9: Pasillo con puertas abiertas a la derecha y a la izquierda

La figura 4.10 muestra el resultado obtenido aplicando el algoritmo a una zona de vestíbulo con dos obstáculos situados en el centro y una puerta abierta al fondo. Este entorno presenta un mayor número de objetos, es por tanto más complejo e implica más cálculos. Además se ha tomado un valor de $d_{max} = 6m$ ampliando la zona visible considerada. Ambas condiciones dan como resultado un tiempo de procesamiento algo mayor que en los casos anteriores, aún así dado que el área estudiada es mayor, el tiempo continúa siendo aceptable, menos de 2 s.

Como puede observarse, el aumento en el tamaño de la celdilla de discretización del espacio de trabajo provoca una pérdida en la precisión del diagrama calculado pero reduce de forma muy notable el tiempo de cómputo necesario desde más de 1 segundo en el caso de una resolución de 2 cm hasta 57 ms para resoluciones de 10 cm. La elección de este parámetro dependerá de la aplicación concreta y de las condiciones de precisión y tiempo de procesamiento que requiera. En concreto, el tiempo de cálculo es inversamente proporcional al tamaño de la celdilla, es decir, al cuadrado de la resolución



*Fig. 4.10: Vestíbulo con puerta al fondo y obstáculos.
Tiempo: 1886 ms; d_{max} : 6 m*

seleccionada. La tabla 4.2 recoge los tiempos de cómputo con diferentes tamaños de celdillas sobre el mismo entorno.

<i>res</i>	Celdillas visibles	Tiempo (ms)
2	29362	1422
5	4696	225
10	1180	57

Tab. 4.2: Tiempos en función del tamaño de celdilla

En la figura 4.11 se muestra el resultado de aplicar diferentes resoluciones a los mismos datos.

4.6 Adaptación del DVL al manipulador móvil guiado por un operario humano

En las secciones precedentes se ha desarrollado un método rápido y eficaz para representar el entorno percibido por el sistema sensorial del robot en forma de Diagrama de Voronoi Local. Este algoritmo es completamente general y puede ser aplicado a cualquier robot móvil dotado de un telémetro

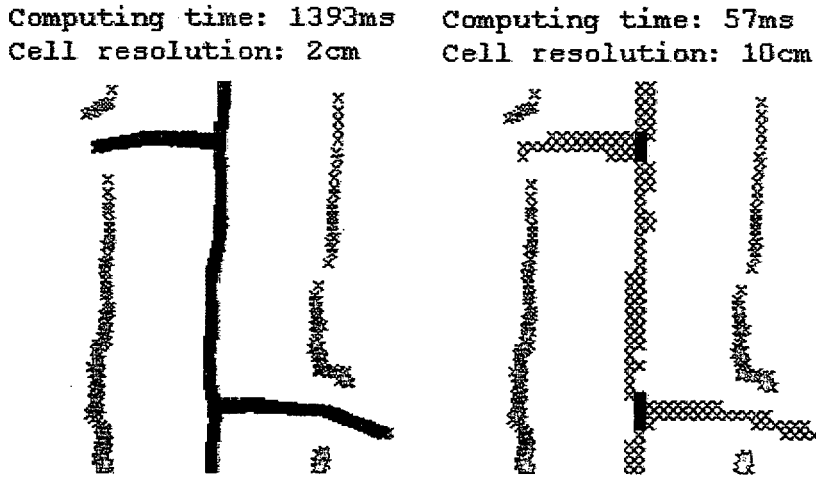


Fig. 4.11: Influencia del tamaño de la celdilla

láser, así en [6] se presentaron los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo de construcción del DVL en un robot RWI B21 dotado de un escáner láser PLS-220 de SICK.

Cuando el manipulador móvil se mueve de forma independiente, sin ser guiado por un operario, el planificador puede utilizar los algoritmos en la forma descrita para generar trayectorias locales que permitan evitar los obstáculos imprevistos. Los resultados obtenidos en este caso se presentan en el capítulo 8.

Sin embargo, el objetivo de esta tesis es que el manipulador móvil coopere con un operario humano en la tarea de transporte de una pieza. Esta tarea implica ciertas condiciones específicas que deben ser tratadas. En primer lugar, para guiar al sistema el operario se sitúa al otro extremo de la pieza a transportar sujetándola y ejerciendo a través de ella la fuerza que permita dirigir al robot. En esta situación, el operario humano aparece dentro del campo de visión del robot y es captado por el sistema de telemetría láser como un obstáculo más del entorno. En los siguientes apartados vamos a explicar qué adaptaciones del algoritmo de cálculo del DVL se han adoptado para hacer frente a esta situación y se presentan los resultados obtenidos.

4.6.1 Identificación de la posición del operario

Conocida la configuración del manipulador móvil en un instante, es inmediato el cálculo a través de la transformada cinemática directa, de la posición del elemento terminal. Dado que el manipulador móvil conoce la posición de su elemento terminal en cada instante, y que también es conocida la geometría y dimensiones de la pieza transportada, el sistema tiene datos para estimar la posición aproximada del operario.

En estas condiciones, los datos suministrados por el telémetro láser en cada barrido se analizan teniendo en cuenta la posición estimada del operario dentro del campo de visión. En la región angular ocupada por el operario que guía el sistema, se hacen una serie de suposiciones que nos permiten estimar la composición más probable del entorno, o al menos la que menos pueda afectar al correcto desarrollo de la tarea.

La opción adoptada es considerar que en esa zona de "sombra", las distancias - medidas desde el robot a los objetos del entorno proporcionadas por el telémetro láser - varían de forma continua, es decir, no hay discontinuidades o nuevos obstáculos detrás del operario. Estas suposiciones son en la mayoría de los casos restrictivas, por ejemplo, si el operario está tapando parte de una puerta, según nuestras suposiciones estimaremos que detrás de él continúa la pared. Sólo en algunas ocasiones, podrían producir que el sistema no detectase obstáculos presentes en su camino, es el caso de un obstáculo situado detrás del operario guía; es evidente que en estas situaciones, y dado que el obstáculo también se encuentra en el camino del operario, las sucesivas actualizaciones del mapa local permitirán detectar el obstáculo cuando el operario se desplace para evitarlo.

Detallamos a continuación las suposiciones adoptadas en las distintas situaciones que pueden presentarse en el tipo de entornos de trabajo en los que se mueve nuestro sistema.

4.6.2 Operario en zona vacía

En la mayoría de las situaciones que se presentan en el tipo de tarea que se va a realizar y en el entorno típico de trabajo, generalmente zonas de trabajo constituidas por pasillos y habitaciones, el operario se sitúa delante del manipulador móvil. En estas condiciones, la "sombra" producida dentro del campo de percepción del robot por el operario se encuentra aislada del resto de los obstáculos del entorno y claramente separada de estos, como muestra la figura 4.12.

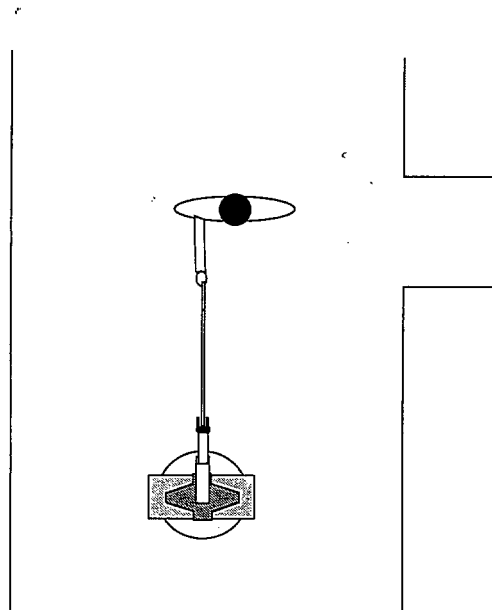


Fig. 4.12: Situación 1; Operario en zona libre.

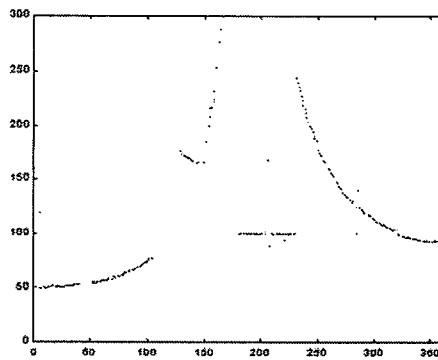


Fig. 4.13: Medidas del telémetro láser para situación 1.

Para detectar esta situación, se analizan los datos proporcionados por el barrido del láser, en la zona que se prevé ocupa el operario aparecerá un obstáculo aislado como se ve en la figura 4.13. La opción elegida es eliminar los datos de esta zona suponiendo que detrás del operario no se encuentra ningún obstáculo y, por tanto, las medidas de distancia que debería proporcionar el sensor sin su presencia corresponderían a una zona vacía, es decir, superiores a la distancia máxima seleccionada, ver sección 4.4.2.

En la figura 4.14 se presenta el resultado de aplicar esta suposición.

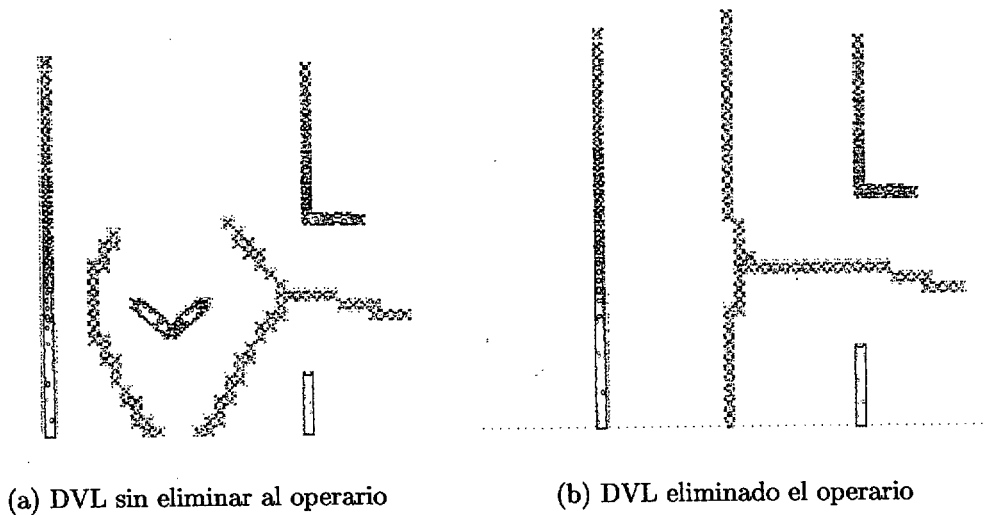


Fig. 4.14: Situación 1: Operario aislado de los obstáculos.

4.6.3 Operario delante de una pared

Otra posible situación que se ha considerado es el caso de que el operario se sitúe delante de una pared tapando parte de ésta. Como puede verse en la figura 4.15, la zona de "sombra" impide percibir la continuidad de la pared entre los puntos 1 y 2.

Esta situación se detecta fácilmente porque en la zona angular donde se espera la presencia del operario aparece una discontinuidad característica. Las medidas a lo largo de la pared varían de forma continua, al llegar al límite inicial de la zona de *sombra* se observa una brusca disminución en la distancia medida por el láser que posteriormente, al finalizar la región

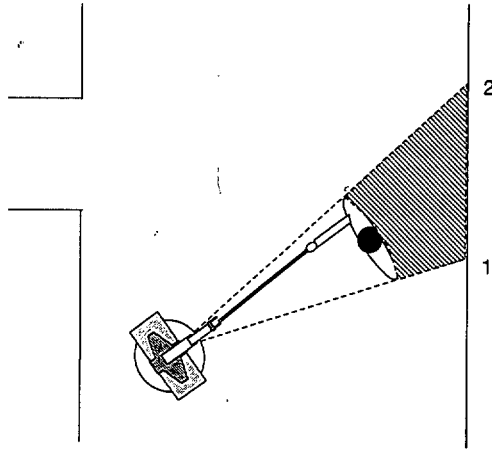


Fig. 4.15: Situación 2: Operario delante de una pared.

angular ocupada por el operario, aumenta de nuevo al reanudar las medidas sobre la pared. En la figura 4.16 puede verse la representación gráfica de las medidas tomadas por el telémetro láser en esta situación.

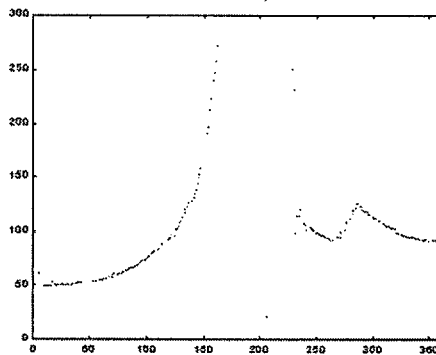


Fig. 4.16: Medidas del telémetro láser para situación 2.

En estos casos, no puede asegurarse, basándose en los datos proporcionados por el telémetro láser, que detrás del operario tengamos una pared, podría darse el caso de que en esa zona existiera una puerta. Hemos optado por suponer la continuidad de la pared por tratarse de la situación más restrictiva.

Bajo esta suposición los datos en la zona de *sombra* se sustituyen por los correspondientes a la continuación de la recta que describe la pared. Para calcular esta recta se considera una pequeña serie de puntos anteriores y posteriores a los límites de la zona de *sombra*.

Las figuras 4.17 recogen los resultados obtenidos en la construcción del DVL en situaciones de este tipo.

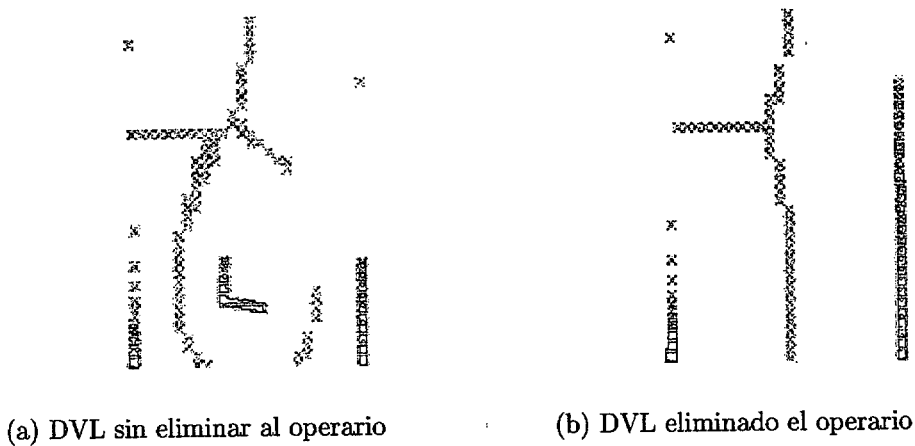


Fig. 4.17: Situación 2: Operario delante de una pared.

4.6.4 Operario ocultando parcialmente una puerta

La última situación considerada es el caso en que el operario se encuentre ocultando parcialmente una puerta, como se muestra en la figura 4.18.

Este tipo de situaciones presenta un patrón característico para poder detectarlas: la distancia medida por el láser en el límite 1 de la zona de *sombra* sufre un descenso respecto a las medidas previas, aparece una discontinuidad, al llegar a la zona ocupada por el operario; el límite 2 de la zona de *sombra* presenta otra brusca discontinuidad pues se pasa de medir la distancia al operario a medir distancias en una zona abierta, es decir, superiores a d_{max} . Este patrón puede presentarse igualmente cambiando los límites 1 y 2.

En la figura 4.19, se muestra el conjunto de medidas tomado en un barrido del láser en una situación de este tipo.

El patrón descrito puede corresponder a varios casos, figura 4.20: el operario puede encontrarse delante de un obstáculo ocultándolo parcialmente, o

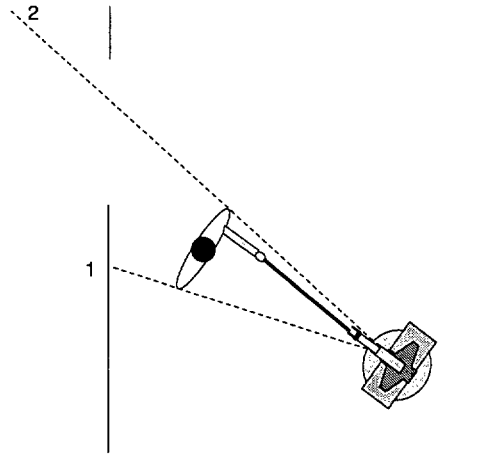


Fig. 4.18: Situación 3: Operario ocultando parcialmente una puerta.

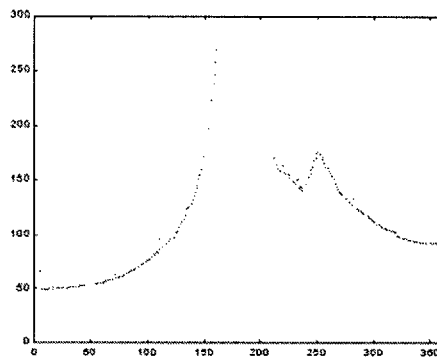
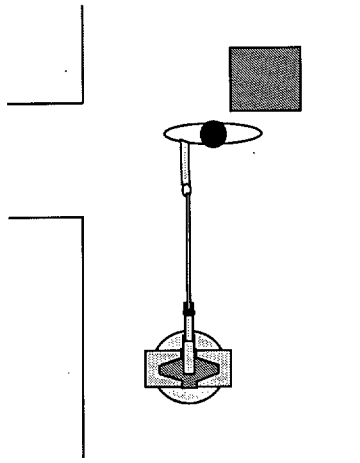
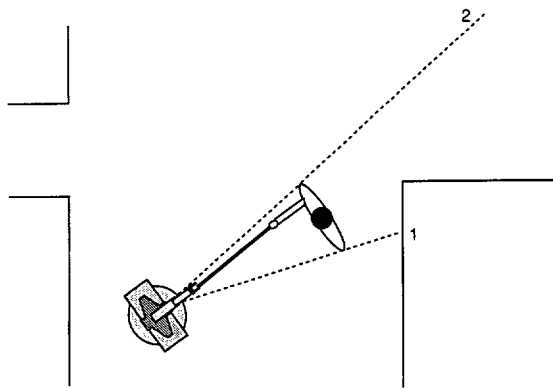


Fig. 4.19: Medidas de telémetro láser para situación 3.

delante de una esquina sin permitir percibir el extremo de la pared. Cualquiera de estos casos son percibidos de la misma forma por el telémetro láser y las suposiciones adoptadas son válidas en todos ellos.



(a) Operario delante de un obstáculo



(b) Operario ocultando una esquina

Fig. 4.20: Otros casos posibles.

En estos casos se asume que el objeto situado en uno de los extremos de la zona angular ocupada por el operario continúa por detrás de él hasta llegar al límite de la zona. En la mayoría de los casos, con esta suposición se reduce el espacio libre del entorno, como en casos anteriores adoptamos la posibilidad más restrictiva.

Los resultados en la aplicación del algoritmo de cálculo del DVL bajo estas suposiciones se muestran en la figura 4.21.

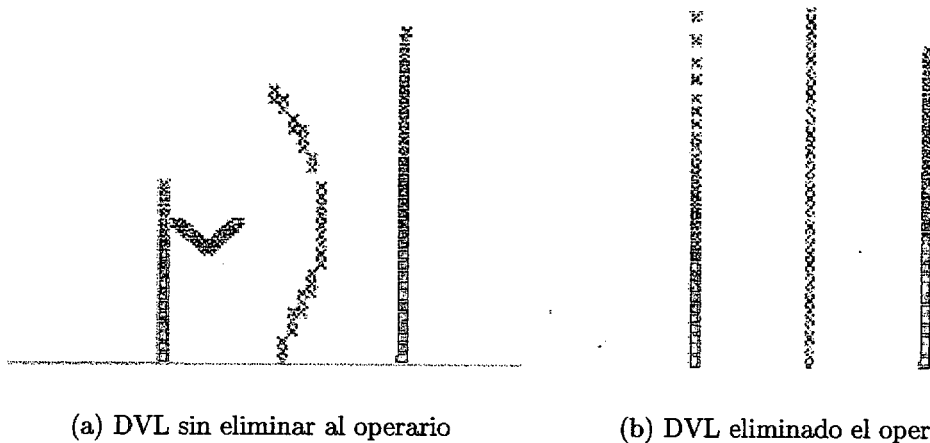


Fig. 4.21: Situación 3: Operario ocultando parcialmente una puerta.

4.7 Conclusiones

Este capítulo presenta un nuevo método para la construcción de un mapa del entorno a partir de los datos recogidos por un telémetro láser. La representación elegida es el Diagrama de Voronoi de un área restringida en torno a la posición actual del robot. Se ha escogido el Diagrama de Voronoi por su capacidad para representar el espacio libre de una forma simple y eficaz. Trabajos previos relacionados con la utilización de este tipo de mapas en robótica han demostrado su utilidad en el proceso de planificación de trayectorias. Sin embargo, la utilización de esta técnica en la planificación basada en sensores es un tema todavía no resuelto. Es en este punto donde hemos

querido aportar una solución nueva que, aunque de forma aproximada, es capaz de construir el Diagrama de Voronoi de una zona partiendo de los datos proporcionados directamente por los sensores.

El método propuesto permite construir el DVL de forma aproximada en la zona visible alrededor del robot basándose en la discretización del espacio libre y en el cálculo de distancias euclídeas desde los puntos de dicho espacio a los diferentes obstáculos del entorno, representados por las distancias medidas por el láser. Los experimentos llevados a cabo demuestran la validez de nuestro método.

Como se ha mostrado, el tiempo de procesamiento puede reducirse incrementando el tamaño de las celdillas en que se divide el espacio libre, a costa de reducir la precisión del mapa obtenido. Dado que el objetivo no es la obtención de una representación precisa del entorno sino disponer de un mapa del espacio libre que sirva de apoyo en el proceso de planificación de movimientos del manipulador móvil, resoluciones de 5 *cm* son perfectamente válidas. Otro hecho que ha de tenerse en cuenta es que la parte final de los bordes del DVL calculado podría verse afectada por objetos que no se encuentren en la zona visible. Por tanto, estas zonas pueden no representar el Diagrama de Voronoi real del entorno y no deberían ser consideradas. Sin embargo, cuando el DVL se utiliza para planificación local de trayectorias este error no afecta al movimiento del robot ya que el DVL se actualiza con suficiente rapidez, de forma que se dispone de un nuevo mapa antes de que el robot alcance esa región.

El tiempo de ejecución puede mantenerse dentro de los límites adecuados para su funcionamiento en tiempo real, lo cual permite utilizar el mapa extraído del entorno local en el proceso de planificación dinámica de trayectorias. Esta característica es fundamental para que el manipulador móvil pueda ejecutar una trayectoria libre de colisiones con los obstáculos tomando como referencia DVL calculado en cada instante.

Por último, se han requerido ajustes del algoritmo general para el caso concreto en que el manipulador móvil sea guiado por un operario humano que de forma continua se sitúe dentro del área barrida por el telémetro láser. Hemos considerado las posibles situaciones que pueden presentarse en el tipo de entornos en los que se desenvuelve el sistema. Los resultados obtenidos, que se presentan en los últimos apartados de este capítulo, demuestran que las soluciones adoptadas son completamente válidas.

5. LOCALIZACIÓN POR CORRELACIÓN

5.1 Introducción

La localización, entendiendo ésta como la medida absoluta de la posición, es un tema de gran importancia en la robótica móvil pues determina la capacidad del vehículo para seguir una trayectoria definida y para ejecutar la tarea encomendada. Aunque este tema ha sido ampliamente estudiado y se han propuesto un gran número de métodos para localización de robots móviles puede considerarse aún una línea de investigación abierta [75].

Cuando un robot está en movimiento la primera fuente de información de que se dispone para su localización es la odometría, esto es, la estimación de su posición a través de las medidas de los encoders de sus motores, conocida la cinemática del vehículo y su posición absoluta respecto a un sistema de referencia global en el momento de iniciar el movimiento. Sin embargo, los errores que se desprenden de este tipo de estimación de la posición crecen a medida que transcurre el movimiento del robot. La diferencia entre la posición estimada por la odometría y la posición real del robot en el entorno aumenta según se mueve debido a los errores causados por el deslizamiento entre las ruedas y la superficie del suelo, por diferencias entre el diámetro nominal y real de las ruedas, etc.. De ahí que se requiera una localización periódica basada en referencias independientes y externas al robot para corregir estos errores acumulativos. El sistema sensorial es el encargado de proporcionar la información necesaria para realizar esta localización.

El objetivo final de este trabajo, un manipulador móvil para colaborar en el transporte de piezas con un operario humano, confiere ciertas características particulares al método de localización que se requiere. Por un lado, la autonomía del sistema en estas aplicaciones es sólo parcial puesto que el operario se encarga de guiar al robot por la trayectoria deseada para la ejecución de la tarea. Esto permite cierta relajación en los requerimientos de precisión del proceso de localización, no es necesario conocer de manera

exacta la posición del sistema en el área de trabajo puesto que el operario se encarga de planificar de forma general el movimiento del conjunto. Sin embargo, nuestra intención es dotar al manipulador móvil de capacidad para anticiparse a ciertas situaciones presentes en su entorno local (puertas, esquinas, pasillos estrechos, obstáculos, ...) planificando de forma local una trayectoria que ayude a la correcta ejecución de la tarea. Esta capacidad requiere que el sistema mantenga un conocimiento, cuando menos aproximado, de su posición respecto al entorno de trabajo conocido. De esta forma, podrá anticipar la presencia de esos elementos y acoplar su movimiento a cada situación. En consecuencia, puede decirse que este sistema precisa de un método de localización "relajado", no se trata tanto de tener una estimación precisa de la posición respecto a un sistema de coordenadas fijo sino de poder estimar, en caso necesario, la posición del sistema respecto al mapa almacenado del entorno de trabajo y, fundamentalmente respecto a posibles situaciones particulares como pueden ser puertas, esquinas u obstáculos fijos y conocidos.

El método de localización propuesto en este capítulo utiliza como fuente de información externa los datos suministrados por los sensores del robot móvil, concretamente el telémetro láser que proporciona medidas de distancia desde el robot a los objetos del entorno. A partir de estos datos, las características del entorno se representan por el Diagrama de Voronoi Local (descrito en el capítulo anterior) y comparadas con un Diagrama de Voronoi Global del espacio de trabajo previamente calculado [5]. La estimación de la posición se lleva a cabo evaluando la máxima coincidencia entre ambos mapas para todas las posibles posiciones del robot en el área de trabajo. Esta evaluación de la posición más probable se utiliza para corregir los errores en la información proporcionada por la odometría manteniendo la incertidumbre en la localización en límites admisibles.

5.2 Trabajos previos

Entre los métodos de localización de robots móviles que se han desarrollado ampliamente en los últimos años, pueden distinguirse de forma general dos grandes grupos: sistemas de posicionamiento por incrementos y sistemas de posicionamiento absolutos. En el primer grupo se deben considerar principalmente los sistemas odométricos y de navegación inercial; en el segundo grupo, la localización puede hacerse por métodos basados en reconocimiento de marcas o por métodos basados en mapas, principalmente.

5.2.1 Sistemas de posicionamiento incremental

Estas técnicas de posicionamiento se basan en un proceso de seguimiento de la localización del robot a partir de una posición inicial. Es necesario, por tanto, conocer dicha posición inicial respecto a un sistema de coordenadas fijo.

El primer método de localización en robótica móvil es la odometría. El desplazamiento de un vehículo a lo largo de una trayectoria se deriva directamente de algún "odómetro" de a bordo. Cuando en robótica hacemos referencia a instrumentación odométrica nos referimos usualmente a encoders directamente acoplados a las armaduras de los motores o los ejes de las ruedas motrices y sensores de velocidad. La posición y orientación del robot se estima integrando la trayectoria a partir de las medidas de estos sensores internos. Estos sensores de desplazamiento derivan los parámetros de navegación directamente de la rotación de las ruedas y por tanto, están sujetos a problemas que provienen del deslizamiento, desgaste, . . . , unos son errores sistemáticos (diferencias entre el diámetro nominal y real de las ruedas, desalineación de las ruedas, resolución de los encoders, etc.) y otros errores no sistemáticos (deslizamientos, pérdidas de contacto con la superficie, etc.). La influencia de estos errores en los robots móviles depende fundamentalmente de su configuración mecánica.

En ciertas aplicaciones, se emplean las técnicas de navegación inercial para reducir los efectos de tales fuentes de error. Se utilizan entonces acelerómetros y giróscopos para calcular variaciones de velocidad y orientación respectivamente. En todo caso, los sistemas de posicionamiento incremental conllevan errores que aumentan con el tiempo de movimiento.

5.2.2 Sistemas de posicionamiento absoluto

Determinan la posición del robot respecto a un sistema de referencia fijo, sin conocimiento previo de la localización del robot al iniciar el movimiento.

El sistema más fiable de posicionamiento absoluto es el GPS. El GPS se basa en el cálculo de las distancias desde un receptor, situado en la plataforma móvil, a varios satélites cuyas posiciones fijas en el espacio son conocidas. Este sistema permite situar de forma muy precisa un móvil en tiempo real en cualquier punto de la Tierra. Sin embargo, es un sistema válido únicamente en entornos exteriores. Para localizar un vehículo en entornos interiores es necesario recurrir, como se ha citado previamente, a sistemas basados en marcas o a sistemas basados en mapas.



Sistemas basados en marcas

En este caso, la estimación de la posición real del robot se hace basándose en la búsqueda y localización de marcas, ya sean naturales o artificiales, situadas en posiciones conocidas y fijas del entorno. Estableciendo la posición relativa del robot respecto a la marca o marcas perceptibles en un instante, cuyas coordenadas absolutas respecto a un sistema de referencia global son conocidas, se determina la posición absoluta del robot en el entorno.

Las marcas artificiales han sido utilizadas desde hace años y existen muchos ejemplos prácticos. En algunos casos, se utilizan sistemas de triangulación con ultrasonidos, como en [100], en los cuales se equipa al robot con un receptor que recoge las señales procedentes de balizas situadas en posiciones perfectamente conocidas. Otro método muy utilizado son los sensores de infrarrojo, unas veces situados en el robot para permitirle detectar el rayo de luz enviado por el emisor en posición y orientación conocida; en otros casos, como en el robot Hilare [45], tanto el emisor como el receptor están situados sobre el robot, en posiciones conocidas del entorno de trabajo se sitúan marcas de material reflector que devuelven hacia el receptor parte de la luz recibida sobre ellos. Es también bastante frecuente el uso del láser para detectar la luz devuelta por marcas reflectoras situadas en posiciones fijas del entorno de trabajo. Muchos de estos sistemas de localización han sido desarrollados para la industria. Se puede consultar una descripción detallada de algunos de ellos en el Capítulo 15 de [29].

Otro grupo de sistemas que utilizan marcas artificiales son aquellos basados en visión, las marcas situadas en posiciones fijas y conocidas del entorno, y cuyas características (tamaño, forma o color) también se conocen, se reconocen por el análisis de la imagen proporcionada por una cámara embarcada en el robot. Este tipo de sistemas asume generalmente que la posición y orientación del robot se conocen de forma aproximada, de manera que la búsqueda de la marca se realiza sólo en una zona limitada. El tipo de marcas utilizadas en estos casos es muy variado: marcas circulares [43] [38], círculos concéntricos [10], dos círculos [72], en forma de diamante [35], rectangulares [15], franjas verticales [49], conos rojos como en el proyecto PANORAMA o la detección de marcas circulares y rectangulares que se presenta en [1]. En algunos casos, es el robot quien lleva la marca y una serie de cámaras situadas en posiciones determinadas del espacio de trabajo detectan su posición [32] [25].

Frente a las marcas artificiales, las marcas naturales presentan la ventaja de no tener que modificar el entorno, sin embargo en general son más difíciles

de detectar. En entornos interiores, las marcas naturales que se utilizan con más frecuencia corresponden a los bordes de puertas, esquinas, bordes entre la pared y suelo, luces en el techo, etc., siendo en muchos casos detectadas por medio de un sistema de visión. Como ejemplos pueden citarse [52], [36], [94] y [79]. En [56], se ha desarrollado un algoritmo que permite la localización topológica de un robot móvil usando marcas naturales y artificiales [8].

En [98], las marcas se extraen de los datos proporcionados por el sonar. En este caso se trata de puntos bidimensionales extraídos por el método denominado "Triangulation Based Fusion (TBF)" y que representan puntos característicos del entorno (por ejemplo, las esquinas de los objetos). Dado un conjunto de marcas extraídas de los datos sensoriales, cuyas posiciones respecto al robot han sido calculadas, se compara con la serie de marcas de referencia cuyas coordenadas se han establecido respecto a un sistema de referencia global. La comparación entre ambas series permite estimar la transformación lineal que relaciona ambos sistemas de coordenadas, estableciendo por tanto la posición absoluta del robot.

Sistemas basados en mapas

Los algoritmos basados en mapas generalmente disponen de un modelo del espacio de trabajo con el que se compara el modelo del entorno obtenido a partir de las medidas proporcionadas por los sensores. Ambos modelos representan el mismo tipo de características del entorno, mientras que el modelo almacenado representa todo el espacio de trabajo, el modelo derivado de la información sensorial tan sólo representa una parte de él, la zona perceptible desde la posición del robot en un instante. De la comparación de ambos, se determina la posición del robot en el entorno y se identifican los errores cometidos por la estimación odométrica.

Entre este tipo de algoritmos puede citarse el trabajo llevado a cabo por Cox [18], quien en el vehículo Blanche utiliza un telémetro óptico que proporciona medidas de distancias a los objetos que rodean al robot, después se busca la transformación (rotación y traslación) que minimiza las distancias entre los puntos obtenidos por los sensores y el mapa del entorno, desplazando a continuación los puntos según esta transformación.

En muchos casos se utilizan mapas de ocupación. Por ejemplo, en [104], el mapa de ocupación local derivado de la percepción del robot en un instante se compara con el mapa de ocupación que se ha construido en una fase previa. Dado que el proceso se realiza regularmente en cortos intervalos temporales, los errores odométricos a corregir son pequeños y sólo es necesario buscar en

una zona pequeña en torno de la posición estimada del robot. Los mapas de ocupación también son utilizados en [78], donde se evalúa la correlación del mapa local y de la sección correspondiente de un mapa global de ocupación. En [91], utilizan una técnica similar en la que la estimación de la posición se hace basándose en tres fuentes de información: la odometría, la correlación entre los mapas de ocupación global y local, y la estimación de la orientación de las paredes.

En algunos casos, la información utilizada son las rectas extraídas de la información sensorial. Por ejemplo, Reina y González presentan en [71] un método de localización basado en el solapamiento del mapa local del entorno extraído a partir de los datos de un escáner láser y un mapa global utilizando la transformada de Hough generalizada. Escalera et al [22], utilizan la información de un sensor CCD-láser de la cual se extraen las rectas asociadas a los diferentes objetos, aplicando un filtro de Kalman Extendido se evalúa la correspondencia entre las observaciones y la información del mapa a priori del entorno.

Aunque en la mayoría de los algoritmos desarrollados hasta el momento, citados en los párrafos previos, la localización pretende establecer las coordenadas del robot respecto a un sistema de referencia global, algunos investigadores proponen una aproximación distinta. En su caso, se intenta establecer la posición de un robot sobre un mapa topológico sin actualizar sus coordenadas respecto a ningún sistema de referencia. Por ejemplo, Nagatani, Choset y Thrun [59] [60] utilizan un mapa topológico parcialmente construido por el robot en el proceso de exploración, RGVG, como mapa de referencia con el que se compara un nuevo mapa local generado a partir de los datos sensoriales. También Kuipers y Byun [50], utilizan un mapa topológico construido durante la exploración como una red de nodos y arcos con información geométrica.

El enfoque de esta tesis se encuadra en los métodos de localización absoluta basados en un mapa a priori del entorno. La información local del entorno proviene de los datos recogidos por un telémetro láser, y la característica utilizada para la comparación con un mapa global es el mapa de retracción constituido por los bordes y nodos del Diagrama de Voronoi del entorno.

5.3 Exposición de nuestro problema y objetivos

Nuestro robot ha sido diseñado para realizar tareas en entornos interiores y estructurados de los que se conocen a priori al menos sus características generales. El objetivo de nuestro trabajo es dotar al manipulador móvil de capacidad suficiente para ejecutar una trayectoria libre de colisiones con los obstáculos del entorno y, en las tareas de asistencia al transporte de piezas en colaboración con un operario humano, reaccionar de forma anticipada a las acciones del operario a la vez que selecciona trayectorias locales libres de colisión tanto para el propio manipulador como para la pieza que se transporta.

En algunos casos se requiere del manipulador móvil que realice de forma autónoma, sin colaborar con el operario, una tarea definida a través de un módulo de planificación global en un entorno de trabajo conocido. En estas situaciones se hace imprescindible disponer de un módulo de localización que permita al sistema determinar la posición del mapa local extraído a partir de la información sensorial con respecto al mapa conocido del entorno de trabajo y, en consecuencia, con respecto a la tarea. Esta localización, que no necesita de gran precisión, permitirá seleccionar la trayectoria local más adecuada para cumplir la tarea propuesta.

En las tareas de asistencia al transporte, la autonomía del sistema está limitada a la cooperación con el operario humano, será éste quien guíe el movimiento del robot manipulador móvil. Sin embargo, queremos dotar al robot de una relativa autonomía que le capacite para reaccionar y adaptarse ante ciertas condiciones del espacio de trabajo. Así, en situaciones como movimiento en pasillos, giro en esquinas, paso por puertas, paso por zonas estrechas, . . . el manipulador móvil debe ser capaz de planificar de forma local sus movimientos con suficiente anticipación para facilitar el desarrollo de la tarea teniendo en cuenta la trayectoria marcada por el operario humano, las condiciones del entorno en cada momento y la geometría del conjunto operario, manipulador móvil y pieza transportada.

Esta capacidad de anticipación requiere que el robot se mantenga localizado en el entorno de trabajo de forma que pueda prever situaciones con tiempo suficiente para planificar un movimiento suave que favorezca la tarea a realizar en cada instante. Por ejemplo, si el sistema es capaz de conocer la existencia de una puerta en las proximidades de su posición puede determinar si la intención del operario conduce al paso por dicha puerta con suficiente antelación para planificar su movimiento con las restricciones necesarias que aseguren no colisionar.

La fusión de los datos obtenidos del sistema sensorial con los datos proporcionados por la odometría y la información del espacio de trabajo representada en un mapa global del entorno, permitirán localizar el robot reduciendo la incertidumbre asociada al movimiento. De esta forma, puede llevar a cabo una planificación local dinámica de la trayectoria para adaptarse a la tarea impuesta por el operario humano.

La solución que se presenta en esta tesis al problema de la localización se puede encuadrar dentro de los métodos de localización absoluta basados en mapas. Así, partiendo de los datos recogidos por el telémetro láser se construye un diagrama local de Voronoi, DVL, como se detalló en el capítulo anterior. Este mapa local se compara con el Diagrama de Voronoi Global del entorno de trabajo, que se habrá construido previamente, estableciendo la posición más probable del robot dentro del Mapa Global. Para evaluar la correspondencia entre ambos mapas recurrimos a técnicas basadas en correlación. Este tipo de algoritmos se utilizan habitualmente con imágenes en escala de grises para reconocimiento de patrones.

5.4 Algoritmos de Correlación

El problema general de la correlación ha sido ampliamente estudiado en el campo de la visión artificial. La mayoría del trabajo se ha centrado en hacer corresponder una imagen de posición y orientación arbitrarias con un modelo fijo.

La correlación de dos funciones continuas, $f(x)$ y $g(x)$, viene definida por la relación:

$$f(x) \circ g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(x) g(x + \alpha) d\alpha \quad (5.1)$$

donde $*$ es el conjugado complejo de $f(x)$. Por tanto, para realizar la correlación, simplemente se desplaza $g(x)$ por $f(x)$ integrando el producto desde $-\infty$ a ∞ para cada valor de desplazamiento x . El equivalente discreto se define como:

$$f(x) \circ g_e(x) = \sum_{m=0}^{M-1} f_e^*(m) g_e(x + m), \forall x = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (5.2)$$

Se obtienen expresiones similares para funciones de dos dimensiones. Por tanto, si $f(x,y)$ y $g(x,y)$ son funciones de variables continuas, su correlación se define como:

$$f(x,y) \circ g(x,y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\alpha, \beta) g(x + \alpha, y + \beta) d\alpha d\beta \quad (5.3)$$

En el caso discreto:

$$f(x, y) \circ g_e(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_e^*(m, n) g_e(x + m, y + n) \quad (5.4)$$

para $x = 0, 1, \dots, M - 1; y = 0, 1, \dots, N - 1$

Una de las principales aplicaciones de la correlación es la localización de un patrón dentro de una imagen ya que la posición para la que la correlación sea máxima corresponde a las coordenadas donde éste se encuentre. Otra aplicación similar es la localización de prototipos, donde el problema es encontrar el mejor emparejamiento entre una imagen desconocida y una serie de imágenes conocidas. Para ello se computa la correlación entre la imagen desconocida y cada una de las imágenes conocidas, la mayor coincidencia puede encontrarse seleccionando la imagen que proporciona una función de correlación de mayor valor.

5.4.1 Correspondencia por correlación

Una de las aplicaciones más utilizadas de las técnicas de correlación es la búsqueda de réplicas de una subimagen $w(x, y)$ en otra imagen $f(x, y)$ de dimensiones mayores, ver [37]:

$$c(s, t) = \sum_x \sum_y f(x, y) w(x - s, y - t) \quad (5.5)$$

La subimagen se desplaza sobre $f(x, y)$ evaluando para cada posición el valor de la función de correlación. El máximo valor de $c(s, t)$ indica la posición en la que se produce la mayor correspondencia entre $w(x, y)$ y $f(x, y)$. En imágenes con niveles de grises, la función de correlación es sensible a los cambios de amplitud de las funciones derivados de las diferencias en la luminosidad, por ello suele utilizarse el coeficiente de correlación para realizar la correspondencia:

$$\gamma(s, t) = \frac{\sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)] [w(x - s, y - t) - \bar{w}]}{\left\{ \sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [w(x - s, y - t) - \bar{w}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (5.6)$$

donde \bar{w} es el valor medio de los píxeles de $w(x, y)$ y $\bar{f}(x, y)$ es el valor medio de $f(x, y)$ en la región coincidente con la ubicación de w . El coeficiente de

correlación $\gamma(s, t)$ está normalizado en el rango -1 a 1, y es independiente de los cambios de escala aplicados a la amplitud de $f(x, y)$ y $w(x, y)$.

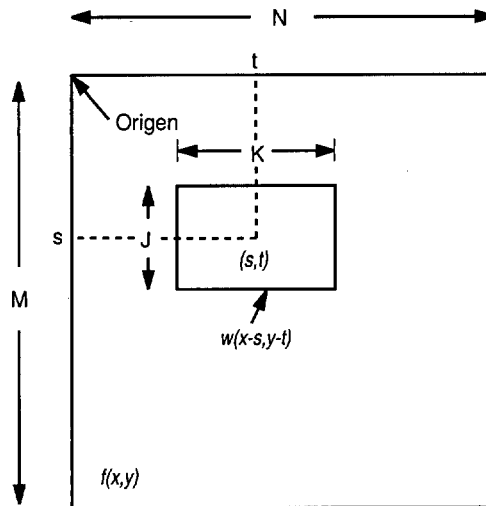


Fig. 5.1: Correlación $f(x,y)$ y $w(x,y)$

Un problema difícil es el derivado de las variaciones de rotación entre las dos imágenes. Si se puede conocer aproximadamente la rotación que presenta $w(x, y)$ respecto a $f(x, y)$, entonces simplemente se gira $w(x, y)$ para que tenga el mismo grado de rotación que $f(x, y)$. Sin embargo, si la naturaleza de la rotación es desconocida, la búsqueda de la mejor concordancia requiere exhaustivos giros de $w(x, y)$. Este procedimiento requiere mucho tiempo, por lo que rara vez se utiliza la correlación en los casos que presenten rotación arbitraria o libre.

5.4.2 Coincidencia de modelos

Una técnica similar a la correlación descrita previamente es la “coincidencia de modelos” [65]. Los modelos se usan muy a menudo para identificar caracteres impresos, números y otros objetos pequeños y simples, generalmente en imágenes blanco y negro. Una plantilla es un pequeño objeto imagen en dos niveles, en este caso, para la letra “e” podría ser:

```

1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 0 0 0 0 0 1
1 0 1 1 1 1 0 1
1 0 0 0 0 0 0 1
1 0 1 1 1 1 1 1
1 0 1 1 1 1 1 1
1 1 0 0 0 0 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1

```

Los píxeles del objeto tienen valor 0, y los píxeles de fondo que rodean al objeto valor 1. Para que esta plantilla sea útil, las imágenes a identificar deben también tener píxeles objeto con valor 0. El proceso de comparación mueve la imagen plantilla a todas las posiciones en una imagen de datos grande y calcula un índice numérico que indica como de bien coincide el modelo con la imagen en esa posición. La coincidencia se da sobre una base pixel-a-pixel, por tanto las diferencias en escala u orientación causarán índices de coincidencia muy bajos en imágenes que de otra forma serían idénticas.

La bondad de la coincidencia entre la plantilla y la imagen prueba en cada posición puede medirse en diferentes formas:

- En una aproximación de máxima correlación se cuenta el número de coincidencias (valor 0 coincidiendo con valor 0 y valor 1 coincidiendo con valor 1), es decir, el número de píxeles cuyo valor coincide en ambas imágenes.
- En una aproximación de mínimo error se cuenta el número de desacuerdos (valor 0 en una imagen y valor 1 en la otra). Se considera la posición de coincidencia más probable la que presenta un menor número de desacuerdos.
- Por último, contando el número de píxel objeto (valor 0) que coinciden entre la plantilla y la imagen, y después restando a este valor el número de píxeles del objeto que no coinciden; los píxeles de fondo se ignoran. Un índice de coincidencia negativo indica una pobre coincidencia y, por lo general, debe rechazarse ya que esto significa que hay más píxeles en desacuerdo que píxeles que concuerden. Los valores positivos indican en general una mejor coincidencia, pero para evaluar la calidad de la coincidencia es mejor dividir el índice por el número total de entradas, se consigue entonces el índice de coincidencia normalizado. Una coincidencia perfecta daría un índice de valor 1, siendo el menor valor posible -1.

En cualquiera de estos casos sigue existiendo el problema de la rotación de una imagen respecto a otra. La orientación puede normalizarse encontrando el eje principal de los datos del objeto y rotándolo hasta que corresponda con el eje principal de la imagen. Por supuesto, la rotación siempre introduce errores y los resultados pueden no ser admisibles.

5.5 Localización por correlación de Diagramas de Voronoi

Como explicamos anteriormente, la solución que se presenta en esta tesis al problema de la localización se puede encuadrar dentro de los métodos de localización absoluta basados en mapas.

La característica del entorno que se extrae partiendo de la información sensorial y que se utiliza en el procedimiento de comparación es la retracción del espacio libre en el Diagrama de Voronoi. Así, partiendo de los datos recogidos por el telémetro láser se construye un diagrama local de Voronoi, DVL, como se detalló en el capítulo anterior. Este mapa local será comparado mediante técnicas de correlación con el Diagrama de Voronoi Global del entorno de trabajo, que se habrá construido y almacenado en memoria previamente, estableciendo la posición más probable del robot dentro del Mapa Global. Para evaluar la correspondencia entre ambos mapas recurrimos a técnicas basadas en correlación.

La información de que nos servimos para localizar el robot es: un modelo del diagrama de Voronoi del área de trabajo (los experimentos se han realizado en dos tipos de entornos) ¹ y un diagrama de Voronoi local construido a partir de los datos de distancia a los objetos medidos por el telémetro láser durante la ejecución de la tarea.

- Para la construcción del Diagrama de Voronoi Global se utiliza el módulo de generación de diagramas de Voronoi desarrollado por Seel [81] que se encuentra en el paquete denominado AVD, concretamente la aplicación que construye el Diagrama Euclídeo de Voronoi generado por series de puntos y segmentos. Este software está construido utilizando la librería LEDA (Library of Efficient Data types and Algorithms) [57].

Este programa proporciona un diagrama de Voronoi del espacio de trabajo constituido por una serie de segmentos y parábolas. De cara

¹ Entorno 1: Habitación con varias puertas y diversos obstáculos en su interior. Entorno 2: Zonas B y C de la tercera planta del edificio Agustín de Betancourt de la Universidad Carlos III de Madrid, Campus de Leganés.

a poder aplicar las técnicas de correlación, se transforma este mapa en una imagen bidimensional en dos niveles representando los bordes y nodos del diagrama de Voronoi como un conjunto de píxeles objeto en una matriz, píxeles de valor 0 para el fondo y píxeles de valor 1 para las posiciones ocupadas por el Diagrama de Voronoi. La resolución con que se discretiza la imagen del espacio de trabajo debe coincidir con la seleccionada para construir el DVL.

Los datos del Diagrama de Voronoi Global se almacenan en la memoria del computador del robot para la posterior comparación con el mapa local en forma de una matriz denominada MG.

- El Diagrama de Voronoi Local, que constituye el patrón que se va a buscar en la imagen del mapa global, se construye directamente a partir de los datos proporcionados por el sensor láser, como se detalló en el capítulo 4.

El algoritmo utilizado para la construcción del DVL, proporciona una representación discretizada de los bordes y nodos del Diagrama de Voronoi Local que utiliza directamente el módulo de localización. Esta información se almacena en una matriz a la que denominamos ML.

Ya que la comparación entre ambos modelos es muy costosa computacionalmente, cuando el espacio de búsqueda es muy grande el tiempo necesario para la estimación de la posición puede ser excesivo, por ello es muy frecuente guiar la búsqueda por medio de algún tipo de estimación previa de la posición. En nuestro caso, se utiliza la estimación de posición proporcionada por la odometría del robot, de esta manera puede reducirse la zona del mapa global con la que se compara el mapa local y por consiguiente el tiempo de procesamiento de manera que el proceso de localización puede llegar a realizarse con el robot en movimiento.

Como ya se ha comentado, este tipo de algoritmos son muy sensibles a la desalineación entre modelo e imagen, es decir, si el mapa local presenta una rotación respecto al eje del mapa global, los algoritmos de correlación no proporcionan resultados correctos. En las primeras pruebas de este módulo de localización se considera que ambos mapas se encuentran alineados, o que se conoce de manera precisa el ángulo del mapa local respecto al global (orientación del robot) con lo que se podrá hacer la correspondiente transformación angular antes del proceso de correlación. En la sección 4.5.2, exponemos la solución adoptada cuando la suposición de alineamiento no es posible.



Un inconveniente que se plantea al utilizar técnicas de correlación, es la escasa información que proporcionan nuestros mapas. Al utilizar como patrón de búsqueda el DVL, el número de celdillas que describen el mapa comparado con el número de celdillas de fondo, sin información ninguna, es muy pequeño, esto hace que en la mayoría de los casos los índices de correlación obtenidos sean muy bajos. Sin embargo, como se ha podido comprobar experimentalmente, la utilización de estos mapas en dos niveles y un adecuado ajuste del algoritmo conducen a una técnica de localización suficientemente rápida para corregir los errores odométricos con el robot en movimiento. En nuestra aplicación no es necesario conseguir una localización muy precisa de ahí que podamos sacrificar la precisión del algoritmo para obtener mayor velocidad y simplicidad en las técnicas utilizadas.

Al tratarse de mapas en dos niveles, 0 y 1, el algoritmo desarrollado se basa en las técnicas de búsqueda de coincidencia de modelos que se explicaron en la sección 5.4.2. Dado que el número de píxeles de fondo, con valor 0, es muy superior al número de píxeles que representan al modelo buscado hemos evitado utilizar aquellas técnicas en las que se evalúa la coincidencia de píxeles de fondo que en nuestro caso no son representativos del entorno. Por consiguiente, se ha elegido la evaluación de la correspondencia con una aproximación de máxima coincidencia, para cada posible posición del mapa local sobre el mapa global, se contabilizan todas las coincidencias entre celdillas de objeto. Para normalizar este índice, se divide por el número total de celdas de valor 1 en el mapa local. Una coincidencia perfecta conduce a un valor del índice de correlación igual a 1, y el peor de los casos corresponde a un valor 0.

El algoritmo queda en la forma siguiente:

1. Lectura de datos
 - Lectura de la odometría
 - Lectura de la matriz ML (representación del DVL)
 - Lectura de la matriz MG (representación del mapa global)
2. Área de búsqueda: Se establece la zona de búsqueda de coincidencia en torno a la posición estimada por la odometría, la extensión de esta zona es un parámetro configurable.
3. Correlación: Para cualquier posible situación de la matriz local sobre la matriz global en el área de búsqueda, se evalúa el índice de coincidencia. Esto es, para cada pixel de valor 1 de la matriz ML (perteneciente a

una rama del DVL) se aumenta en una unidad el valor del índice de correlación si el correspondiente pixel de la matriz MG también tiene valor 1, en caso contrario no se modifica.

Por tanto, el índice numérico de correlación para una posición (s, t) del mapa local sobre el mapa global, se evalúa según el algoritmo:

```

forall (Mlocal[i][j]=1) {
    ntotal++;
    si (Mglobal[i+s][j+t]=1)
        c[s][t]++;
}
indice_correlacion[s][t]= $\frac{c[s][t]}{ntotal}$ ;

```

4. Determinación de la posición corregida: El máximo valor del índice de coincidencia indica la posición en la que se produce la mayor correspondencia entre el mapa local, ML, y el mapa global, MG. Conocidos los índices de la matriz que dan lugar al máximo de coincidencia, se puede extraer directamente las coordenadas de la posición más probable del robot en el sistema de referencia absoluto.

La figura 5.2 muestra un esquema del proceso de localización. La salida de este módulo se corresponde con una estimación de la posición absoluta del robot respecto al sistema de referencia fijo en el espacio de trabajo. Esta estimación de la posición se utiliza para actualizar la posición del robot disminuyendo los errores causados por la odometría.

Por otro lado, atendiendo al objetivo que nos planteamos para nuestro sistema concreto, no es necesaria una técnica de localización muy precisa puesto que el movimiento del robot va a ser guiado por un operario humano y ayudado de una planificación local basada en la información proporcionada por los sensores. Sin embargo, la rapidez de procesamiento si es un requisito fundamental ya que, salvo en casos especiales, se realizará con el robot en movimiento sin detener ni ralentizar el desarrollo de la tarea.

5.6 Resultados Experimentales

En las páginas siguientes se muestran algunos de los resultados obtenidos con el método de localización descrito.

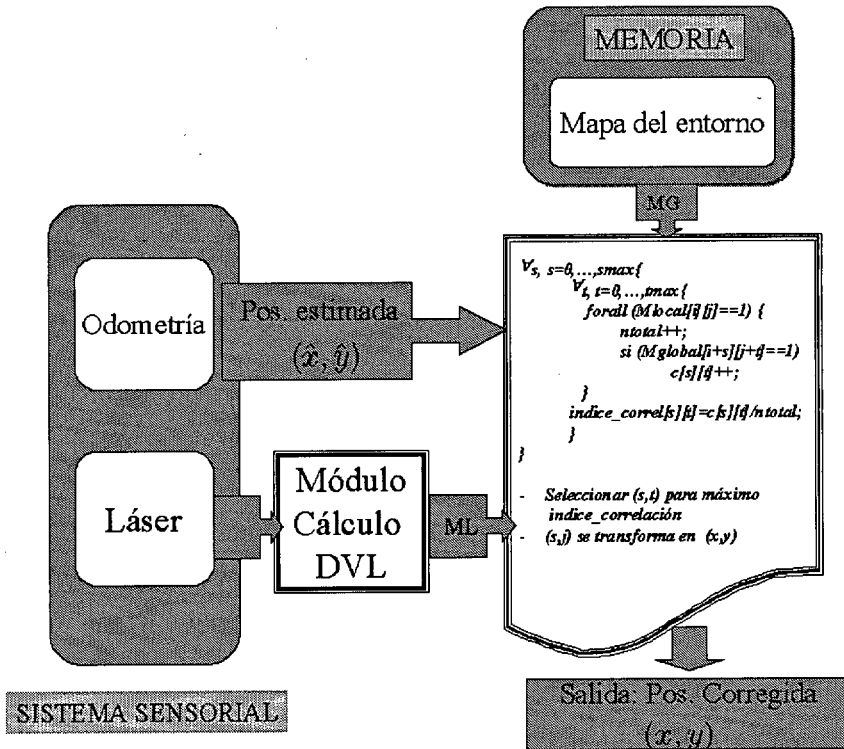


Fig. 5.2: Esquema del módulo de localización

Se han utilizado dos entornos de características diferentes sobre los que llevar a cabo los experimentos. En primer lugar, un vestíbulo de aproximadamente 4 m de ancho por 11 m de largo al que se abren 4 habitaciones y en el cual se han colocado una serie de cajas simulando obstáculos en posiciones perfectamente conocidas. Este primer entorno se caracteriza por la ausencia de simetrías, los datos recogidos por el láser en una posición son diferentes a los de cualquier otra. Este tipo de entornos favorece el funcionamiento del método utilizado para la localización. El segundo entorno se trata del pasillo del departamento al que se abren una serie de despachos. Este entorno presenta un gran número de simetrías pues los datos obtenidos en diferentes posiciones del pasillo pueden coincidir. Como veremos los resultados obtenidos en este segundo entorno son peores que en el primero y obligan a utilizar como fuente de información adicional los datos de odometría.

5.6.1 Correlación sin odometría

En esta serie de experimentos se ha considerado la alineación del robot con el mapa global del entorno y se ha efectuado la búsqueda de coincidencia sobre el mapa global completo. Un parámetro que limita la precisión del algoritmo es la resolución de la malla de discretización de los mapas, es decir, el tamaño del pixel de la representación. En los ejemplos presentados a continuación se ha optado por una resolución de 10 *cm*, de esta forma el tiempo del cómputo del DVL a partir de los datos proporcionados por el telémetro láser y de ejecución del algoritmo de localización se mantienen suficientemente bajos ².

Las figuras 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6, presentan los resultados obtenidos al aplicar este algoritmo de correlación en el entorno 1 (con pocas simetrías). La estimación de la posición que se obtiene en estos casos, como puede observarse en la tabla 5.1, es aceptable con errores del orden de la resolución de la discretización en ambos ejes. En este tipo de entornos, la utilización de la información adicional proporcionada por la odometría del robot sólo presenta la ventaja de reducir el tiempo de cómputo, ya que, al no aparecer ambigüedades en la estimación de la localización, no es necesario dirigir la búsqueda previamente. Únicamente en la prueba 4, los resultados obtenidos no son definitivos; el proceso de localización da tres zonas posibles con índices de correlación suficientemente altos aunque el resultado obtenido eligiendo el máximo es el correcto. En este caso la información adicional proporcionada por la odometría eliminará cualquier ambigüedad.

Tab. 5.1: Resultados de localización para entorno 1

Entorno 1	Posición Real	Posición Calculada	Índice	Tiempo
Prueba 1	(-7.62, -0.29)	(-7.50, -0.27)	0.57	1269 <i>ms</i>
Prueba 2	(-5.78, 1.61)	(-5.90, 1.73)	0.24	1291 <i>ms</i>
Prueba 3	(-7.36, 4.00)	(-7.30, 4.03)	0.37	1284 <i>ms</i>
Prueba 4	(-7.24, 7.01)	(-7.20, 7.03)	0.57	1265 <i>ms</i>

² Los tiempos se han medido sobre un procesador Pentium II a 350 *MHz*

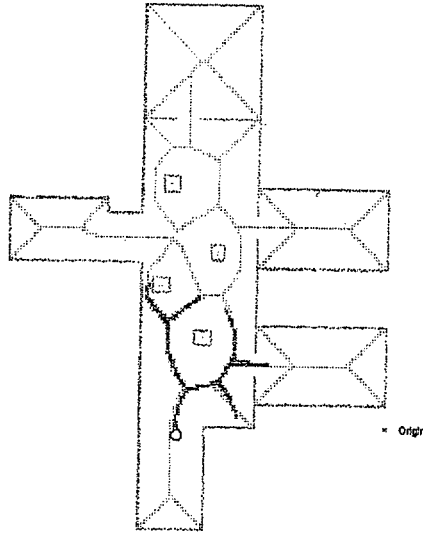


Fig. 5.3: Entorno 1 - Prueba 1, Tiempo: 1269 ms

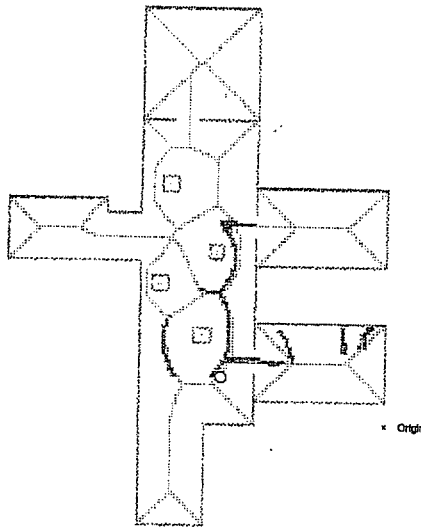


Fig. 5.4: Entorno 1 - Prueba 2, Tiempo: 1291 ms

Las figuras que se presentan a continuación muestran los resultados obtenidos al aplicar este algoritmo de localización en un entorno con más simetrías, al que se ha denominado entorno 2.

Como puede comprobarse en 5.7 y 5.8, cuando el robot está situado en

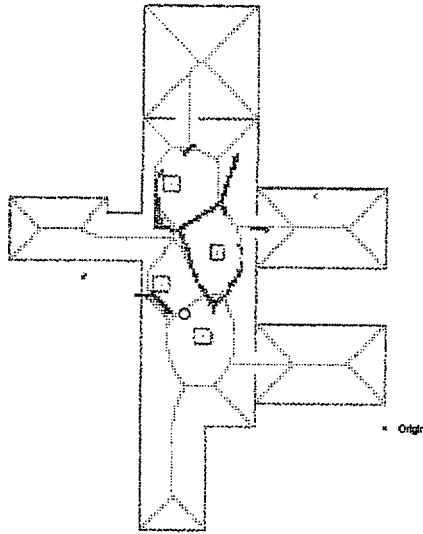


Fig. 5.5: Entorno 1 - Prueba 3, Tiempo: 1284 ms

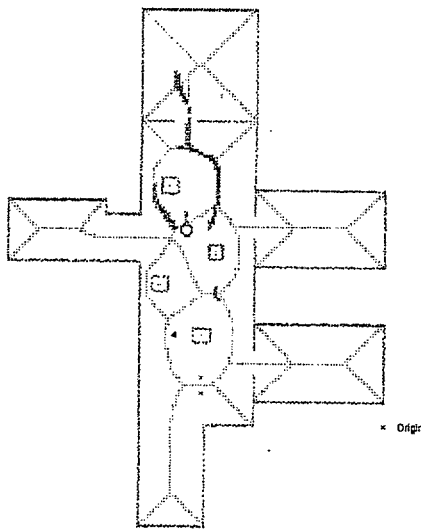


Fig. 5.6: Entorno 1 - Prueba 4, Tiempo: 1265 ms

una posición fácilmente distinguible, no se presentan ambigüedades en la localización, al no existir otra posición posible que produjese unos datos similares. Sin embargo, la solución encontrada por el algoritmo en casos como los presentados en las figura 5.9 y 5.10, puede ser incorrecta; esto se

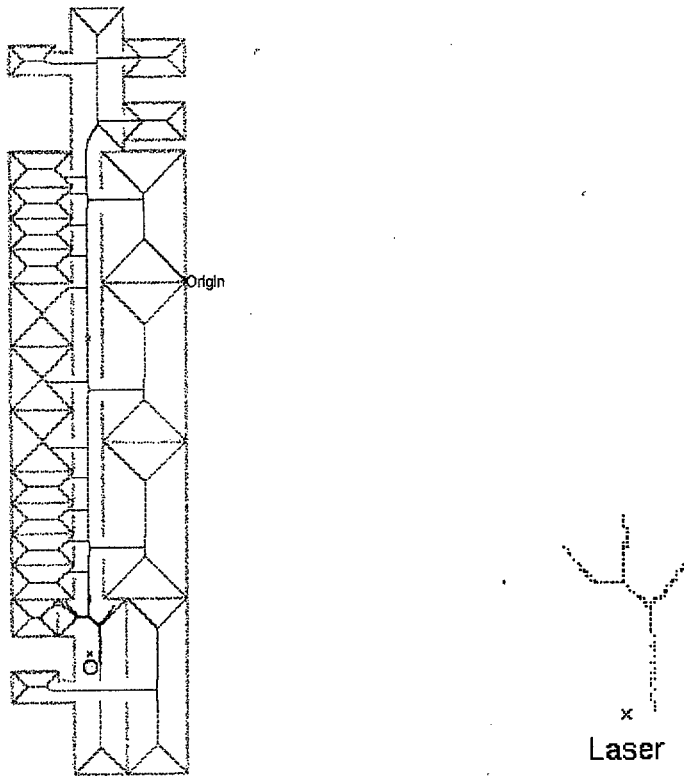


Fig. 5.7: Entorno 2 - Prueba 1, Tiempo: 5166 ms

debe a que el DVL obtenido de los datos tomados por el láser es muy similar al que podría obtenerse desde otras posiciones.

En la figura 5.10 se han señalado los puntos que presentan mayores índices de coincidencia según el algoritmo empleado. Como puede verse el DVL obtenido podría adaptarse a diferentes posiciones del robot en el entorno. Aunque no presente el mayor índice de coincidencia, el algoritmo proporciona

Tab. 5.2: Resultados de localización para entorno 2

Entorno 2	Posición Real	Posición Calculada	Índice	Tiempo
Prueba 1	(-7.55, -29.7)	(-7.60, -29.70)	0.49	5166 ms
Prueba 2	(-7.00, 4.20)	(-6.90, 3.90)	0.31	5161 ms
Prueba 3	(-7.55, 4.95)	(-7.60, 5.00)	0.44	5249 ms
Prueba 4	(-7.50, -12.00)	(-7.60, 7.30)	0.40	5320 ms

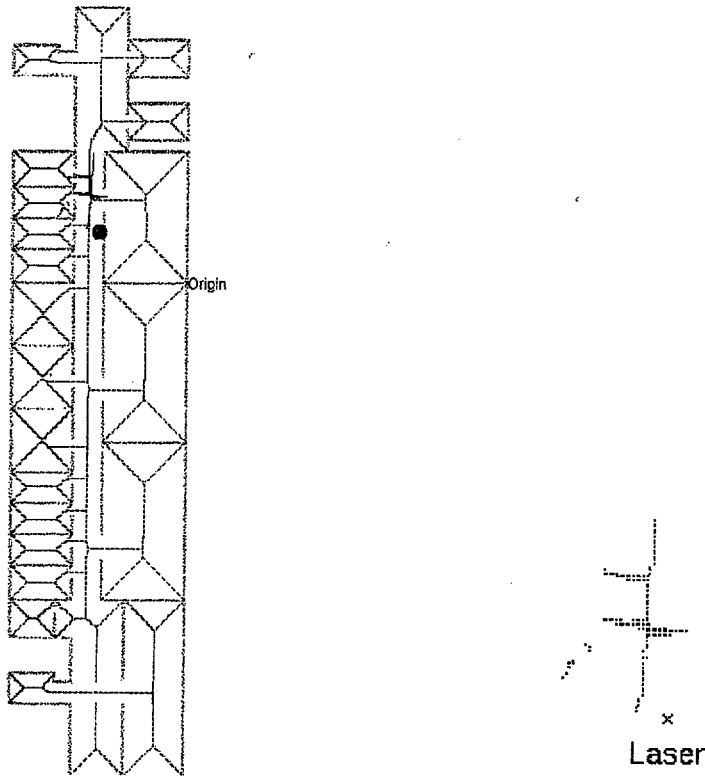


Fig. 5.8: Entorno 2 - Prueba 2. Tiempo: 5161 ms

la posición real del robot entre la serie de posiciones más probables. Si se restringe el espacio de búsqueda aportando información adicional sobre la localización del robot, se obtiene el resultado correcto. Esta información adicional proviene de los datos odométricos.

5.6.2 Correlación con odometría

Como se ha comentado en el punto anterior una búsqueda global origina, además de un excesivo tiempo de cómputo, la presencia de varios lugares con índices de probabilidad de correlación similares. Esto es debido al gran número de simetrías que presentan ciertos entornos de trabajo. En casos como el de la figura 5.7, donde el robot se encuentra en una posición fácilmente diferenciable de cualquier otra del entorno, el algoritmo de correlación actúa de forma eficaz y no da lugar a ambigüedades en cuanto a la posible localización. Sin embargo, en el caso de la figura 5.10, un DVL de las mismas características se presenta en varias posiciones posibles del mapa global. Si

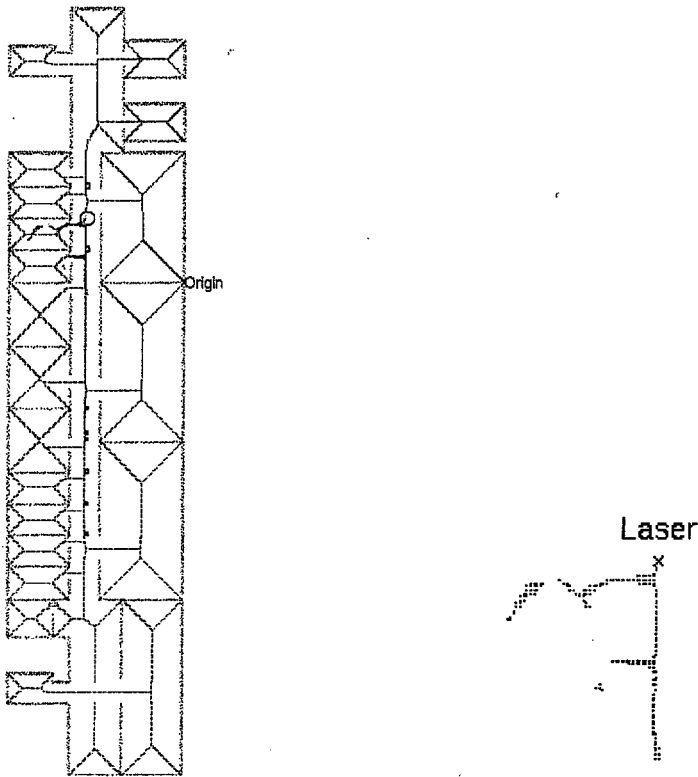


Fig. 5.9: Entorno 2 - Prueba 3. Tiempo: 5249 ms

en lugar de una búsqueda general en todo el mapa, se efectúa una búsqueda restringida en un entorno de la posición estimada por la odometría, la precisión del algoritmo de localización aumenta y obteniendo una solución aceptable en un periodo de tiempo muy corto, como puede verse en la figura 5.11.

Para este ejemplo concreto se parte de una estimación de la posición proporcionada por la odometría de:

$$(x, y) = (-7 \text{ m}, -11.5 \text{ m})$$

La posición estimada por el algoritmo de localización, con un área de búsqueda de $\pm 2 \text{ m}$ en cada eje es:

$$(x, y) = (-7.6 \text{ m}, -12.1 \text{ m})$$

empleando 395 ms. Siendo la posición real, como puede verse en la tabla 5.2,

$$(x, y) = (-7.5 \text{ m}, -12.0 \text{ m})$$

Los tiempos empleados por el algoritmo cuando se restringe y dirige la búsqueda proporcionando la posición estimada por la odometría se reducen a

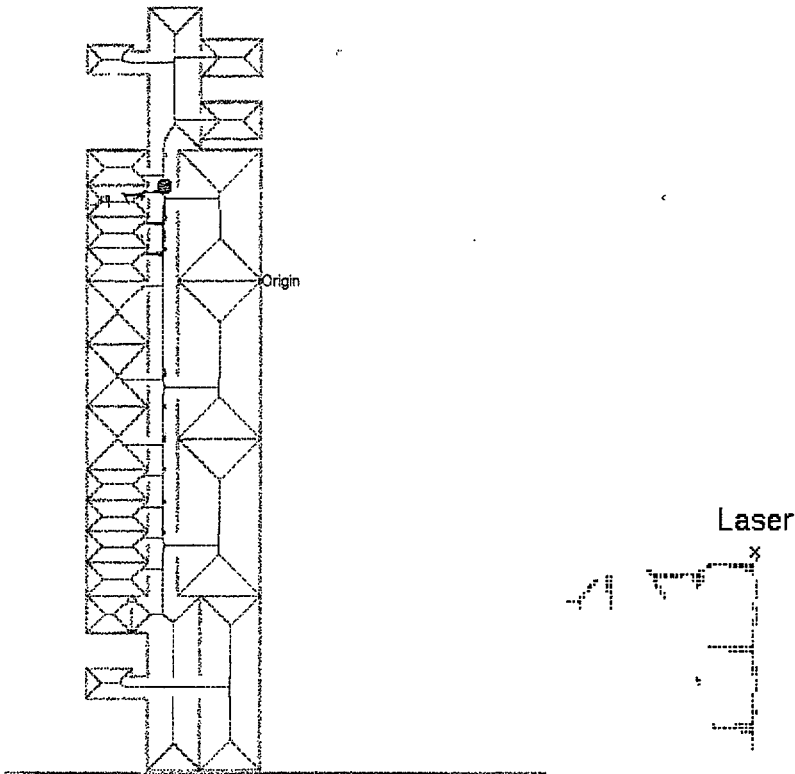


Fig. 5.10: Entorno 2 - Prueba 4. Tiempo: 5320 ms

alrededor de 550 *ms* para un área de búsqueda de ± 3 *m* en cada eje entorno a la posición de referencia. La extensión del área en la que se comprueba la coincidencia debe establecerse como un parámetro ajustable en base a la incertidumbre estimada para los datos.

En la tabla 5.3, se comparan los tiempos de cómputo empleados en el proceso de localización sobre el entorno 2 con diferentes áreas de búsqueda. Como puede verse el tiempo empleado es proporcional al tamaño de dicho área.

Tab. 5.3: Comparación: Correlación sin odometría - con odometría

Entorno 2	Tiempo (en <i>ms</i>)
Sin odometría	5320
Con odometría, ± 3 <i>m</i>	550
Con odometría, ± 2 <i>m</i>	395

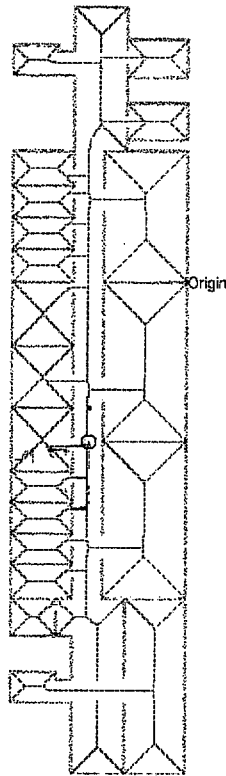


Fig. 5.11: Entorno 2 - Prueba 5. Tiempo: 395 ms

5.6.3 Influencia de la orientación

Hasta el momento, las pruebas presentadas se han realizado bajo la suposición de que ambos mapas están alineados, es decir, que el robot tiene una orientación de 0° respecto al sistema de referencia fijo en el espacio de trabajo; o en todo caso, que la orientación se conoce con absoluta precisión y puede realizarse la correspondiente transformación antes de llevar a cabo el proceso de correlación de los mapas. Sin embargo, el error en la estimación de la orientación es inevitable, por lo que se hace necesario que el proceso de localización evalúe también el ángulo de giro del robot respecto al sistema de referencia global.

Para cada posible posición del mapa local sobre el mapa de referencia es necesario evaluar el índice de correlación para todos los posibles ángulos de giro. Esto implica aplicar una rotación del mapa local previa al proceso de correlación para cada posible ángulo, utilizando después el mapa local rotado. El coste computacional derivado de este proceso es muy elevado,

pues se multiplica el tiempo de estimación del índice de correlación para cada posición por el número de posibles rotaciones que se contemplen. Los tiempos de procesamiento requeridos para una búsqueda angular global, en todos los ángulos posibles, son absolutamente inadmisibles en este caso.

Por ejemplo, en el entorno 1 el proceso de localización global con un barrido en todas las posibles posiciones (x, y) y una búsqueda angular restringida a $\pm 10^\circ$ entorno a la orientación estimada por la odometría conduce a tiempos de procesamiento de más de 60 s. De ahí que en ningún caso se haya aplicado la búsqueda angular en el proceso de localización global, se limita el área de búsqueda tanto en los ejes x e y como en θ , en torno a las estimaciones proporcionadas por la odometría.

En la tabla 5.4 se presentan algunos resultados experimentales que muestran las relaciones de tiempos obtenidas según el tamaño del área de búsqueda.

Tab. 5.4: Resultados de localización con búsqueda de orientación

	Global $\pm 10^\circ$	Global $\pm 5^\circ$	Local $\pm 3 m$ y $\pm 5^\circ$	Local $\pm 2 m$ y $\pm 5^\circ$
Entorno 1	67 s	35 s	14.5 s	10 s

En la figura 5.12 se muestra el resultado de aplicar el proceso de localización guiado por la odometría con búsqueda angular en el entorno 1. La orientación estimada utilizando la odometría es 10° y la estimada por el algoritmo de localización es de 13° . El tiempo total de procesamiento es de aproximadamente 10 s, restringiendo el área de búsqueda a $\pm 2 m$ en los ejes x e y y $\pm 5^\circ$ en rotación.

5.7 Conclusiones

Cuando se quiere que un robot móvil sea capaz de moverse de forma autónoma o semiautónoma en un entorno de grandes dimensiones, como los que se han utilizado en las pruebas experimentales, es necesario que sea capaz de conocer su posición y, como ya se ha comentado, corregir los errores en la estimación de su posición por algún método de relocalización. Nuestro sistema utiliza una aproximación basada en técnicas de correlación para buscar la coincidencia entre el Diagrama de Voronoi Local, obtenido de los datos

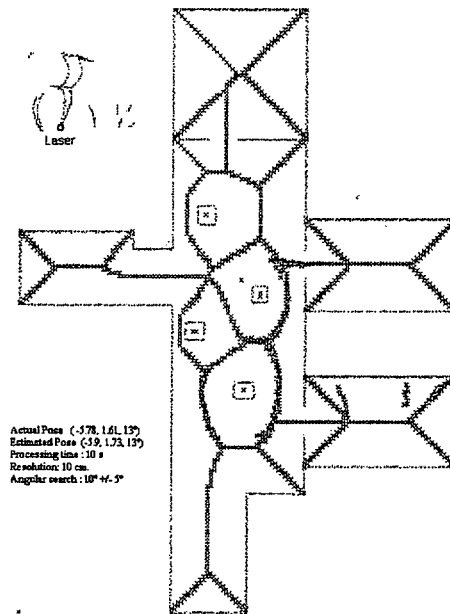


Fig. 5.12: Localización con búsqueda angular. Tiempo: 10 s

sensoriales, y un diagrama de Voronoi del entorno de trabajo construido y almacenado en memoria previamente como modelo del entorno.

Como se desprende de los resultados presentados, el tiempo necesario para localizar el robot en el entorno sin ningún conocimiento previo de su posición - correlación sin odometría - es excesivo. Sin embargo, hemos de tener en cuenta que sólo sería necesario realizar este proceso en el instante inicial de la ejecución de la tarea, en caso de no disponer de ninguna otra información sobre la posición del manipulador móvil en el entorno de trabajo. En el transcurso de la ejecución de la tarea, el proceso de localización sólo se ejecutará a intervalos de tiempo fijados y siempre, con la información adicional proporcionada por la odometría. De esta forma, salvo en el instante inicial, el módulo de localización actuará como apoyo para corregir los errores de posición utilizando el proceso de correlación con odometría, para el que se han conseguido unos tiempos de cómputo razonables.

El algoritmo presentado realiza una estimación de la posición que permite corregir los errores acumulativos cometidos por la odometría. Actualizando la posición del robot periódicamente se consigue mantener los errores dentro de unos límites adecuados.