

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
Departamento de de Arquitectura de Computadores y Automática



**SISTEMA DE EXPLORACIÓN DE TERRENOS
CON ROBOTS MÓVILES: APLICACIÓN EN
TAREAS DE DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE
MINAS ANTIPERSONAS.**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR**

Roberto Carlo Ponticelli Lima

Bajo la dirección del doctor

Pablo González de Santos

Madrid, 2011

ISBN: 978-84-694-2460-5

© Roberto Carlo Ponticelli Lima, 2010



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA DE COMPUTADORES
Y AUTOMÁTICA
DOCTORADO EN CONTROL AUTOMÁTICO Y SISTEMAS

**Sistema de exploración de terrenos con
robots móviles: aplicación en tareas de
detección y localización de minas
antipersonas**

Tesis Doctoral

Autor: Roberto Carlo Ponticelli Lima
Director: Dr. Pablo González de Santos
Tutor: Dr. Jesús Manuel de la Cruz

2010

“Si hay algo en mí que pueda ser llamado religioso es la ilimitada admiración por la estructura del mundo, hasta donde nuestra ciencia puede revelarla.” Albert Einstein, 1954.

Índice general

Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XXI
Agradecimientos	XXIII
Resumen	XXVII
1. Introducción	1
1.1. Desminado humanitario	1
1.2. Necesidad de esta investigación	4
1.3. Objetivos y estructura de la tesis doctoral	7
2. Estado de la técnica en sistemas de exploración de terrenos para tareas de desminado humanitario	11
2.1. Exploración de terrenos	12
2.1.1. Vehículos y manipuladores para la detección de minas antipersonas	13

2.1.2.	Sistemas de representación del entorno en robots móviles en general	26
2.1.2.1.	Rejilla de ocupación	28
2.1.2.2.	Mapa de elevación	30
2.2.	Detección de obstáculos	32
2.3.	Sistemas de detección de minas antipersonas	33
3.	Sistema de exploración	37
3.1.	Plataforma móvil	39
3.2.	Módulo de control del brazo manipulador	43
3.2.1.	Esquema modificado de control de movimiento	44
3.2.1.1.	El problema en el control estándar de velocidad	47
3.2.1.2.	Control de movimiento PosVel	48
3.2.2.	Control de trayectorias del brazo manipulador	56
3.2.2.1.	Modelo cinemático directo	58
3.2.2.2.	Modelo cinemático inverso	60
3.3.	Cabeza sensora	67
3.3.1.	Prototipo previo de cabeza sensora	69
3.3.2.	Prototipo de sensor de contacto basado en sensores <i>Flex</i>	71
3.3.2.1.	El sensor <i>Flex</i>	72

3.3.2.2.	Configuración y ensamblaje del sensor de contacto	72
3.3.2.3.	Módulo de adquisición de datos analógicos	76
3.3.2.4.	Procesamiento de datos mediante lógica difusa	79
3.3.3.	Prototipo de cabeza sensora basado en sensores de distancia IR	90
3.3.3.1.	Módulo de seguimiento del terreno	91
3.3.3.1.1.	Módulo de sensores laterales	92
3.3.3.1.2.	Módulo de sensores del suelo	95
3.3.3.1.3.	Módulo controlador de la cabeza sensora	97
3.3.3.2.	Configuración y ensamblaje de la cabeza sensora	101
4.	Algoritmos para exploración de terrenos	105
4.1.	Detección del contorno de los obstáculos	106
4.1.1.	Control acomodaticio	108
4.1.1.1.	Medición de fuerzas de contacto	109
4.1.1.2.	Barrido del terreno	119
4.1.2.	Seguimiento de contorno	121
4.1.2.1.	Barrido con contacto acomodaticio	121
4.1.2.2.	Unión de segmentos de contorno	122
4.1.2.2.1.	La rejilla de ocupación	127

4.1.2.2.2.	El modelo del sensor	129
4.1.2.2.3.	Fusión sensorial	137
4.2.	Generación del mapa de elevación de la superficie	140
4.2.1.	Distancia al terreno	141
4.2.2.	Determinación del plano de la superficie	142
5.	Experimentación y validación	151
5.1.	Validación experimental de los prototipos de cabeza sensora	151
5.1.1.	Validación experimental del prototipo de sensor de contacto basado en sensores <i>Flex</i>	152
5.1.2.	Validación experimental del prototipo de cabeza sensora basado en sensores IR	154
5.2.	Validación experimental de los algoritmos de exploración de terrenos	166
5.2.1.	Validación de los algoritmos de detección de contorno de obstáculos	169
5.2.1.1.	Validación del comportamiento acomodaticio del sistema de barrido	169
5.2.1.2.	Validación de la detección parcial del contorno de obstáculos	174
5.2.2.	Validación de los algoritmos de generación del mapa de superficie del terreno	179
6.	Resumen, conclusiones y principales aportaciones	193

6.1. Resumen y conclusiones	193
6.2. Principales aportaciones	199
Referencias	203
Apéndices	217
A. Introducción a la problemática de las minas antipersonas	219
B. Módulos de soporte del sistema de exploración	225
B.1. Interfaz hombre-máquina	225
B.2. Calibración de los sensores de la cabeza sensora	230
C. Descripción del sistema experimental	235
C.1. Introducción	235
C.2. Cabeza sensora	236
C.3. Manipulador	237
C.4. Localizador	239
C.5. Plataforma móvil	241
C.5.1. Estructura del cuerpo	242
C.5.2. Estructura de la pata	244
C.6. Sistema de control	245
C.6.1. Estación de operación	246
C.6.1.1. Interfaz operario/robot	247

C.6.1.2. Gestor de la base de datos	249
C.6.1.3. Comunicación con el robot caminante	249
C.6.2. Controlador del robot	250
C.6.2.1. Arquitectura <i>Hardware</i>	251
C.6.2.2. Arquitectura <i>Software</i>	251
D. Patente de la cabeza sensora	255
E. Sensores para la exploración del entorno	279
E.1. Tipos de sensores y medidores	280
E.2. Sensor de distancia SHARP GP2D120	284
F. Algunas definiciones básicas de conjuntos y probabilidad	289
F.1. Conjuntos	289
F.2. Probabilidad	291
F.2.1. Variable aleatoria	292
F.2.2. Función de distribución	293
F.2.3. Función de densidad de probabilidad	293
F.2.4. Variable aleatoria Gaussiana	294
F.2.5. Probabilidad conjunta y condicional	294
F.2.6. Independencia estadística	295
F.2.7. Distribución de probabilidad conjunta	296
F.2.8. Función de densidad de probabilidad conjunta	297

F.2.9. Función de distribución marginal	299
F.2.10. Distribución y densidad de probabilidad condicional .	299
F.2.11. Probabilidad total	300
F.2.12. Bayes	300
F.2.13. Campos aleatorios	301
F.2.14. Campos aleatorios de Markov	302
G. Introducción a los conceptos básicos de lógica difusa	305
G.1. Conceptos fundamentales	308
G.1.1. Conjuntos difusos	308
G.1.2. Función de pertenencia	310
G.1.3. Operadores lógicos	311
G.1.4. Reglas de tipo si ... entonces	312
G.2. Sistema de inferencia Difusa (FIS)	314
G.3. Pasos para aplicar un FIS	315

Índice de figuras

1.1. Desactivación de minas antipersonas	3
1.2. Algunos robots caminantes y escaladores desarrollados en el IAI-CSIC	6
1.3. Sistema de detección y localización de minas antipersonas (DYLEMA).	7
2.1. Sistemas móviles de detección mediante matriz de detectores Schiebel y vehículos convencionales	14
2.2. Robot MR-2	15
2.3. Robot GRYPHON IV	17
2.4. Robots TRIDEM I y II	18
2.5. Robots con orugas HUNTER y MINE HUNTER	19
2.6. Robot TITAN VIII	21
2.7. Robot caminante AMRU-2	21
2.8. Robots COMET I y IV	23
2.9. Robot submarino ARIEL	23
2.10. Robot TITAN IX	24

2.11. Robot “iguana”	25
2.12. Ejemplo de rejilla de ocupación	29
2.13. Ejemplo de mapa de elevación empleando colores	30
2.14. Ejemplo de mapa de elevación empleando líneas de contornos	31
3.1. Configuración del sistema DYLEMA	38
3.2. Esquema y fotografía del brazo manipulador	40
3.3. Herramienta doble: sistema de corte (desbrozadora) y cabeza sensora	41
3.4. Esquema de la arquitectura del sistema de control del brazo manipulador	42
3.5. Esquema del controlador de movimiento LM629	46
3.6. Seguimiento de trayectoria de posición con comandos de po- sición	49
3.7. Parámetros del movimiento con perfil trapezoidal de velocidad	51
3.8. Trayectoria de velocidad y posición con movimiento unifor- memente acelerado	52
3.9. Seguimiento de trayectoria de posición mediante control <i>PosVel</i>	54
3.10. Detalle de la gráfica de control <i>PosVel</i> sin paradas	55
3.11. Descripción del brazo manipulador según la notación Denavit- Hartenberg	57
3.12. Vector de posición del elemento final del brazo	61
3.13. Vector de posición $p_{1,4}$	62
3.14. Vector de posición $p_{1,4}$ sobre el plano	63

3.15. Detector de minas Schiebel AN-19/2	67
3.16. Prototipo inicial del brazo manipulador y de la cabeza sensora	70
3.17. Sensor <i>Flex</i> . Curva característica	73
3.18. Prototipo de sensor de contacto	74
3.19. Vistas del prototipo de sensor de contacto	75
3.20. Esquema simplificado del módulo electrónico de adquisición y procesamiento de datos del sensor de contacto	77
3.21. Lectura de 350 eventos aleatorios de contacto	78
3.22. Distribución de las diferencias de salidas de los sensores <i>Flex</i>	82
3.23. Ejemplo de salida de los sensores <i>Flex</i>	84
3.24. Diagrama esquemático del FIS	85
3.25. Diferencia de pares de sensores para la condición de no-contacto	88
3.26. Funciones de pertenencia del FIS	89
3.27. Bloques principales de la cabeza sensora	91
3.28. Sensor infrarrojo de distancia GP2D120	92
3.29. Esquema del módulo de sensores laterales en operación . . .	93
3.30. Esquema de la determinación de la posición de los obstáculos	94
3.31. Esquema de los haces infrarrojos de los módulos de sensores laterales y del suelo	96
3.32. Esquema del módulo de adquisición de datos de la cabeza sensora	98
3.33. Curva calibrada de un sensor de distancia	99
3.34. Módulo electrónico controlador de la cabeza sensora	100

3.35. Esquema de la cabeza sensora	102
3.36. Prototipo final de la cabeza sensora	103
4.1. Esquema de la medición de fuerza virtual de contacto	110
4.2. Lazo de control de fuerza-posición	111
4.3. Movimiento compuesto del barrido de la cabeza sensora	119
4.4. Barrido del terreno	120
4.5. Barrido con comportamiento acomodaticio	122
4.6. Esquema del modelo básico del sensor de distancia	131
4.7. Esquema del modelo básico de la estructura de la cabeza sensora	132
4.8. Superficie de la función de <i>likelihood</i> de la lectura del sensor de distancia	136
4.9. Esquema de interpretación de la distancia al terreno bajo la cabeza sensora	141
4.10. Configuración de un experimento de determinación del plano del terreno	143
4.11. Determinación del plano - Paso 1	145
4.12. Determinación del plano - Paso 2	145
4.13. Determinación del plano - Paso 3	146
4.14. Determinación del plano - Paso 4	147
4.15. Determinación del plano - Paso 5	147
4.16. Ejemplo de detección del plano	148

5.1. Salida del FIS en el experimento de 350 eventos aleatorios de contacto	152
5.2. Montaje experimental de la cabeza sensora con guía lineal motorizada	155
5.3. Terreno experimental básico	156
5.4. Mapa de elevación del terreno experimental básico	157
5.5. Composición fotográfica del terreno experimental y del mapa de contornos	158
5.6. Detalle de los terrenos naturales experimentales A y B	160
5.7. Experimento A, sobre terreno natural	161
5.8. Mapa de elevación del terreno A	162
5.9. Mapa de elevación del terreno B	163
5.10. Secuencia de imágenes de un barrido sobre el terreno A	164
5.11. Perfiles de los terrenos A y B	165
5.12. Validación del comportamiento acomodaticio del sistema manipulador. Configuración del experimento	168
5.13. Validación del comportamiento acomodaticio del sistema manipulador. Primer experimento	170
5.14. Validación del comportamiento acomodaticio del sistema de barrido. Experimento 2	171
5.15. Validación del comportamiento acomodaticio del sistema de barrido. Experimento 3	173
5.16. Validación de detección parcial de contornos. Experimento 1	174

5.17. Validación de la detección parcial de contorno. Rejilla de ocupación después del experimento 1	175
5.18. Validación de detección parcial de contorno. Experimento 2 .	177
5.19. Validación del sistema de generación del mapa de superficie del terreno	179
5.20. Validación de la generación del mapa de elevación de la escalinata	180
5.21. Configuración del experimento de validación de parámetros del plano	182
5.22. Trayectoria del centro de la cabeza sensora	183
5.23. Vista ampliada de la trayectoria de la cabeza sensora	184
5.24. Recorrido del vector normal al plano de la cabeza sensora . .	185
5.25. Recorrido de los vectores normales al plano np y al plano nr	187
5.26. Gráfica del ángulo entre el vector normal de la cabeza sensora ns y los vectores normales np y nr	188
5.27. Ángulo entre los vectores normales $ns \cdot np - ns \cdot nr$	189
5.28. Esquema de la diferencia de distancia al terreno debido a la diferencia de ángulo de inclinación estimada del terreno . . .	190
5.29. Planos estimados p y r a lo largo de un barrido	191
A.1. Diferentes tipos de minas antipersonas	220
B.1. Esquema de interfaces del sistema de exploración	226
B.2. IHM de la cabeza sensora. Reporte de valores EEPROM . .	227
B.3. IHM de la cabeza sensora. Reporte de mediciones	228

B.4. IHM gráfica de la cabeza sensora	229
B.5. IHM gráfica del sistema de exploración	230
B.6. Parte mecánica del sistema de calibración de los sensores de la cabeza sensora	232
C.1. Esquema del sistema DYLEMA	236
C.2. Sistema diferencial de las articulaciones 2 y 3	238
C.3. GPS TRIMBLE 5700	240
C.4. Configuraciones de patas del robot SILO6	244
C.5. Detalle del sistema diferencial de las patas	246
C.6. Esquema CAD de una pata	247
C.7. Pie empleado en las patas del robot SILO6	248
C.8. Interfaz hombre-máquina del robot hexápodo SILO6	248
C.9. Vista de la interfaz del gestor de la base de datos	249
C.10. Esquema general de la arquitectura del controlador del robot SILO6	250
C.11. Esquema general del controlador del robot SILO6	252
C.12. Esquema del sistema de control del robot SILO6	254
E.1. Respuesta característica del sensor GP2D120	285
E.2. Respuesta de los 16 sensores GP2D120 de la cabeza sensora	285
E.3. Diagrama de tiempos del sensor GP2D120	286
E.4. Respuesta en función de distancia lateral del sensor GP2D120	287

Índice de tablas

3.1. Parámetros Denavit-Hartenberg de los eslabones del brazo manipulador	58
3.2. Funciones de pertenencia	86
C.1. Principales características del manipulador de barrido	239
C.2. Características del robot caminante SILO6	243

Agradecimientos

Este trabajo se pudo realizar gracias a la colaboración y buena voluntad de muchas personas, que han sido soportes sólidos durante las diferentes etapas evolutivas de éste trabajo y de mi persona.

Creo justo reconocer en primera instancia la importancia que ha tenido, y que continúa teniendo, mi Director de tesis. Quiero agradecer al Dr. Pablo González de Santos, Jefe del Departamento de Control Automático del Instituto de Automática Industrial (IAI-CSIC), su invaluable apoyo profesional, moral y personal durante estos últimos años, quien como mi director de tesis y como Jefe del Departamento, con pragmatismo y humor comedido, con presencia firme y amable, me ha guiado y apoyado, logrando mantenerme centrado en mis objetivos.

La lista de personas a quienes les estoy sinceramente agradecido es larga, y se me hace difícil decidir una secuencia justa de nombres. Intentando aplicar algún criterio, destacan cinco personas por haber sido faros en mi travesía por el doctorado. Agradezco a María Mercedes Torres, mi esposa y amiga, quien con sabias palabras supo sembrar en mí la semilla de la aventura intelectual y romper mis barreras mentales; al Dr. Gerardo Fernández, Profesor de la Universidad Simón Bolívar, quien sin conocerme me tendió su mano incondicional y me abrió las puertas al mundo; al Dr. Manuel Armada (Chicho), entonces Jefe del Departamento y actual Director del

IAI-CSIC, quien conociéndome aún menos que el Dr. Fernández me recibió en el Departamento, me adoptó inmediatamente como uno del grupo y me guió acertadamente hasta el Dr. Jesús Manuel de la Cruz, Profesor de la Universidad Complutense de Madrid, quien además de ser mi tutor en esta casa de estudios, es para mí un icono de la solvencia intelectual en clase como docente, y alguien cercano y accesible como persona en la calle. De manera imprevista pero con importancia capital, agradezco al Dr. Oscar Chang, Profesor de la Universidad Simón Bolívar, quien con su oportuna presencia actuó como catalizador impulsándome a terminar lo que ya hacía tanto tiempo había empezado.

Enfocando la atención ahora en aquellos que han estado compartiendo espacio conmigo estos últimos años, el equipo de personas del Departamento de Control Automático, una vez más me encuentro en la dificultad de poner orden justo a los nombres. Agradezco al Dr. Héctor Montes, Profesor de la Universidad Tecnológica de Panamá, cuya perspicacia técnica y social es única en el grupo, quien me acompañó desde el primer día ayudándome a crecer como persona; al Ing. Manuel Prieto, enciclopedia de la tecnología encarnada en una persona sencilla y con criterios sólidos. Junto con el Dr. Montes, ellos han sido más que una guía profesional y personal que estuvieron siempre dispuestos a escuchar; para mí es un privilegio haber trabajado con ellos. A D. Javier Sarria, cuya alegría y disposición a colaborar es sin duda única y apreciada en nuestro Departamento; a la Dra. Emilia Fernández, quien para mí es un loable ejemplo de dedicación, respeto, amabilidad y simpatía; al Dr. Joaquín Estremera, siempre con un aire intelectual, simpático y misterioso, quien además de ser una referencia de calidad en el trabajo es un buen compañero y amigo que ha sabido compartir necesarios momentos ocio; a la Dra. Elena García, ejemplo de seriedad y espontaneidad en el trabajo, a quien debo especial reconocimiento por su ayuda en los desarrollos de cálculos cinemáticos; a la Ing. Carlota Salinas, quien con alegría,

dedicación al trabajo y buenas maneras es para mí además un ejemplo de fortaleza de espíritu; y al Ing. Jesús Reviejo, último en esta lista pero no menos importante, de quien se dice que sabe más por Reviejo que por Jesús, me ha enseñado que se puede ser profundamente crítico con criterio y cómo se puede mezclar calidad profesional con el buen humor.

En el ámbito familiar, estaré eternamente agradecido, por supuesto, a mis padres, por su incondicional y sincero apoyo en todo momento, por su plasticidad ante la modernidad y la actualidad moral y social, por saber rechazar aquello que creen que deben rechazar, por adelantarse a sus tiempos apoyando a sus hijos en sus proyectos personales, y por tantas cosas que solo los padres son capaces de soportar...

A todos ellos les dedico esta memoria. Gracias por ayudarme a hacerlo posible.

Madrid, diciembre de 2009

Roberto C. Ponticelli Lima.

Resumen

En esta memoria de tesis doctoral se presentan los sistemas y algoritmos obtenidos durante el desarrollo de un sistema automático de exploración de terrenos para tareas de desminado humanitario. El sistema propuesto está embarcado en un robot móvil y tiene como objetivo localizar alarmas de minas y simultáneamente determinar algunas características de la superficie del terreno, como la posición de los obstáculos y el perfil del terreno. Esta información del terreno sirve de base para la operación del propio sistema de exploración y del controlador del sistema del robot móvil con la que determina las trayectorias óptimas de su desplazamiento. Las alarmas de minas se detectan empleando un detector de metales convencional, integrado dentro del sistema de exploración de terrenos. Con los datos capturados durante el barrido se construyen dos mapas, uno con la ubicación del contorno de los obstáculos y otro con la elevación del terreno. Mediante una serie de experimentos específicamente diseñados para este sistema de exploración se verifica el funcionamiento de cada subsistema y algoritmo.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Desminado humanitario

Este trabajo tiene su origen en la necesidad de resolver algunos requerimientos técnicos dentro del proyecto DYLEMA¹ (SILO-6, 2008) que se ha llevado a cabo en el DCA-IAI² desde 2001 con el ánimo de desarrollar máquinas caminantes para nuevas aplicaciones, y que consiste en un sistema robotizado para la detección y localización de minas antipersonas. Una vez que dentro de este proyecto se hubo desarrollado el robot caminante, el brazo manipulador, un sistema básico de sensores y los algoritmos básicos para el posicionamiento del módulo detector de minas, se decidió crear, dada la magnitud de este problema, una línea de investigación dedicada exclusivamente a la exploración de terrenos y de la cual la presente memoria de tesis doctoral expone los principales resultados y aportaciones.

¹Plan Nacional de I+D+i. “Técnicas de sensorización y control para la detección eficiente de minas antipersonas (DYLEMA)”, Dirección General de Investigación. Proyecto (MCYT) DPI2001-1595 (2002-2004) y proyecto (MEC) DPI2004-05824 (2004-2007).

²Departamento de Control Automático del Instituto de Automática Industrial del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

En la exploración automática de terrenos se emplean técnicas y estrategias caracterizadas en función del objetivo de la exploración. En nuestro caso, por tanto, los diseños de las técnicas y algoritmos de exploración de terrenos toman como referencia los procedimientos que actualmente se emplean en todo el mundo en misiones de desminado humanitario.

Resulta al menos preocupante que actualmente en el desminado humanitario se empleen tecnologías, técnicas y procedimientos manuales heredados de la segunda guerra mundial, con las que se obtienen elevadas tasas de falsos-positivos en la detección de minas³ (MacDonald y Lockwood, 2003). Tanto la desactivación humanitaria como militar se realizan habitualmente por operarios que portan equipos de detección manuales o conducen vehículos acorazados pesados que explotan las minas mecánicamente (véase la Fig. 1.1). La primera solución es lenta y muy peligrosa para el operario, aunque efectiva para algunos tipos de minas que no requieren equipos pesados (un operario sólo puede portar sistemas ligeros). La segunda es mucho más segura para el operario y rápida sobre el terreno, pero muy limitado con respecto a los tipos de superficies en los que resulta efectivo; en terrenos irregulares puede alcanzar porcentajes de limpieza en torno solamente al 70%, produce daños en la superficie cultivable del terreno (alteración de las propiedades de la tierra superficial, contaminación química, etc.), y con frecuencia no solo dejan sin explotar algunas minas sino que las reubican en la zonas “limpias” como consecuencia de la acción de la herramienta mecánica que remueve la tierra. Además, estos vehículos suelen ser muy pesados y voluminosos, no pudiendo acceder a los campos minados a través de puentes frágiles y/o estrechos, desplazarse entre escombros de edificios, u operar sobre terrenos húmedos o pantanosos, por ejemplo. Por último, estos

³Existen estadísticas del *Cambodian Mine Action Centre* (CMAC) donde la probabilidad de falsos positivos alcanzó el 99.7% contra un 0.3% de verdaderos materiales peligrosos; véase Apéndice A.

vehículos suelen ser vulnerables a las minas anti-tanque que con frecuencia se intercalan entre las minas antipersonas, y aquellos que no lo son resultan aún más pesados y voluminosos.



(a)



(b)

Figura 1.1: Desactivación de minas antipersonas. (a) Desactivación manual y (b) mediante vehículos blindados.

1.2. Necesidad de esta investigación

La seguridad de los operarios es siempre un asunto fundamental fuera de toda duda y, por tanto, se tiene la necesidad de desarrollar sistemas robóticos que permitan alejar al operador del riesgo que suponen estas tareas de desminado, y que permitan también el aumento de la velocidad efectiva de detección en esta peligrosa tarea (Nicoud, 1997). La automatización completa representa una solución idónea en términos de seguridad y eficiencia, pero tiende a producir sistemas complejos, a veces ineficientes cuando se trata de cubrir todo el espectro de casos posibles. Una solución intermedia consiste en utilizar al operario en el lazo de control utilizando técnicas de teleoperación y control “colaborativo” que ayude a resolver aquellos problemas para los que el subsistema automático no está preparado (Fong et al., 1999; Estremera et al., 2002).

Los vehículos autónomos o semi-autónomos basados en ruedas u orugas pueden portar sensores sobre campos infestados y realizar tareas de desminado con eficiencia. Los vehículos con ruedas pueden ser muy simples y baratos, y los vehículos con orugas pueden funcionar en una variedad amplísima de terrenos (Baudoin et al., 1999; Habib, 2000; Mori et al., 2005; Rizo et al., 2003); sin embargo, su movilidad está muy restringida y no son adecuados, por sí solos, para posicionar sensores. Los robots con mecanismo de locomoción por medio de patas (robots caminantes) disponen de ciertas propiedades intrínsecas para posicionar sensores (6 grados de libertad), pero en un espacio de trabajo realmente limitado. Debe señalarse, no obstante, que este espacio puede ser ampliado por medio de manipuladores que unidos a los robots caminantes realizan la tarea de barrido con los sensores.

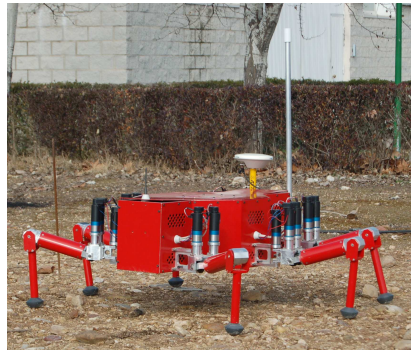
El manipulador deberá estar convenientemente sensorizado con el fin de posicionar el detector de minas a la altura necesaria y con la orientación requerida sobre el punto del terreno que se desea inspeccionar. Esto lleva

al diseño de cabezas sensoras que incorporen el detector de minas así como los sensores de apoyo para facilitar al manipulador las tareas de adaptarse a la superficie del terreno y de evitar contacto con los obstáculos en la trayectoria de la cabeza sensora durante el barrido de la superficie.

El DCA-IAI acredita una dilatada experiencia en el diseño, construcción y puesta a punto de vehículos con patas tanto en su versión de robots caminantes como en robots escaladores. Entre estos desarrollos pueden encontrarse máquinas diseñadas para investigación básica y docencia (RIMHO, RIMHO2, SILO4) y máquinas para aplicaciones industriales (REST, ROBOCLIMBER); algunos de estos robots pueden verse en la Fig. 1.2. Esta experiencia se ha reflejado en el proyecto DYLEMA, donde se ha desarrollado una plataforma móvil de seis patas, un manipulador de barrido y una cabeza sensora que incorpora un detector de minas. El sistema de localización global diferencial y la estación de operación completa el conjunto de módulos básicos del sistema. Dentro de la línea de investigación nacida de este proyecto y desarrollada de manera independiente, se persiguen los diseños del controlador del manipulador, de la cabeza sensora, de los sistemas sensores y de los algoritmos asociados. Estos diseños forman parte de los objetivos de la presente tesis doctoral, recogidos en la sección 1.3.

La innovación del presente trabajo se centra fundamentalmente en el diseño de la cabeza sensora⁴ y en general en los algoritmos del sistema de exploración de terreno, recogido en los capítulos 3 y 4.

⁴Protegido con la patente de invención: "DISPOSITIVO ÚTIL PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE CONTORNO Y SUS APLICACIONES", año 2007, solicitud P200773102, Oficina Española de Patentes y Marcas. Puede verse en el apéndice D.



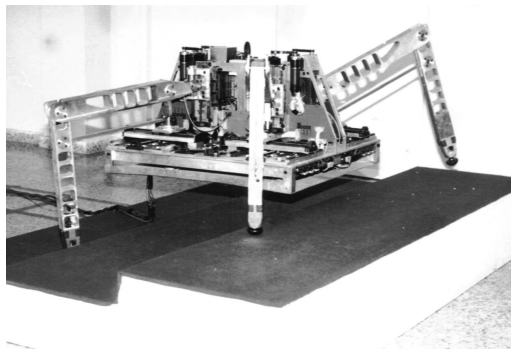
(a) SILO6



(b) ROBOCLIMBER



(c) REST



(d) RIMHO



(e) SILO4



(f) RIMHO2

Figura 1.2: Algunos robots caminantes y escaladores desarrollados en el IAI-CSIC.

1.3. Objetivos y estructura de la tesis doctoral

El objetivo central de este trabajo de tesis doctoral es el desarrollo del sistema automático de exploración de terrenos y el diseño de sus algoritmos asociados para tareas de detección y localización de minas antipersonas.

Se parte de un detector de minas comercial capaz de detectar componentes con muy bajo contenido metálico. Este detector debe recorrer toda la superficie del terreno que se quiere inspeccionar mediante el movimiento de la plataforma móvil y del brazo manipulador, cuyo diseño del controlador forma parte del trabajo de esta tesis. El sistema debe obtener información del entorno del detector, por lo que se ha diseñado e instalado una cabeza



Figura 1.3: Sistema de detección y localización de minas antipersonas (DYLEMA).

sensora alrededor del detector de minas que permite medir algunas características del terreno durante el barrido. Esta información constituye la base para la operación de las estrategias de exploración diseñadas en esta tesis.

Como objetivos globales se establecen los siguientes:

1. Diseño de estrategias de exploración de terrenos orientadas a tareas de desminado humanitario.
2. Diseño del sistema sensorial de apoyo al sistema de exploración de terrenos.
3. Diseño del controlador del sistema de exploración de terrenos.

Para alcanzar estos objetivos se han planteado 4 tareas fundamentales:

1. Diseño de la cabeza sensora para tareas de exploración de terrenos.
2. Diseño del controlador del brazo manipulador.
3. Diseño de estrategias de movimientos del sistema manipulador-cabeza sensora.
4. Experimentación y validación.

Esta tesis doctoral está estructurada de la siguiente manera. Este primer capítulo define el problema, justifica la necesidad de la investigación y fija los objetivos globales. El capítulo 2 se centra en el estudio de los sistemas de exploración de terrenos en general y de los sistemas de detección de minas en particular, fijándose en este capítulo las bases y los criterios para los desarrollos definidos en los siguientes capítulos. El capítulo 3 presenta el diseño del sistema de exploración donde se exponen las diferentes tecnologías de sensores elementales estudiados, los principales prototipos de cabeza sensora implementados, con sus ventajas e inconvenientes y se describe en detalle el desarrollo del prototipo final de la cabeza con la que se realizó la parte experimental de este trabajo. El capítulo 4 desarrolla los

procedimientos para el estudio de los datos recogidos por el sistema de exploración utilizando el sistema presentado en el capítulo 3. La definición de experimentos, la experimentación y la validación del sistema se describen en el capítulo 5. Finalmente, el capítulo 6 discute las conclusiones y enumera las aportaciones más significativas.

Capítulo 2

Estado de la técnica en sistemas de exploración de terrenos para tareas de desminado humanitario

Dentro de la amplia área de las técnicas de exploración del entorno, es de especial interés para este trabajo la exploración de entornos naturales no estructurados, característicos de los escenarios donde se encuentran las minas antipersonas.

Es común que los sistemas de exploración generen o construyan mapas, representaciones cartográficas o cualquier otro tipo de modelo del entorno a partir de los datos adquiridos por el sensor de terreno. Estos mapas tienen diversas finalidades, entre las que se pueden encontrar la autolocalización del robot móvil, la localización de características importantes del entorno, SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) o simplemente la propia

obtención de un mapa del entorno. A lo largo de la evolución de la tecnología en robots móviles se puede observar un constante interés en el desarrollo de paradigmas y algoritmos de representación del entorno, siendo aún un tema abierto y sin aparente solución óptima o definitiva. Dependiendo de las características específicas de la tarea a realizar por el robot móvil, el algoritmo de construcción cartográfico presentará un esquema particular que no siempre es útil o portable a otros sistemas móviles u otras aplicaciones. Lo mismo ocurre con los sistemas mecatrónicos y el *hardware* empleados en la detección del entorno. En función de la aplicación final específica se desarrollan sistemas cartográficos que no suelen ser compatibles con otras aplicaciones.

A continuación se presentan algunos de los sistemas de exploración de terrenos en tareas de detección y localización de minas antipersonas más destacados hasta la fecha.

2.1. Exploración de terrenos

Para el estudio del estado de la técnica en exploración de terrenos en el marco de la línea de investigación de este trabajo, se estudian dos subsistemas fundamentales:

1. Vehículos y manipuladores para la detección de minas. Se presentan algunos ejemplos relevantes de plataformas móviles, sus características en relación a aplicaciones de desminado humanitario y se comenta brevemente acerca del sistema detector de minas empleado.
2. Representación del entorno en sistemas robóticos móviles en general.

2.1.1. Vehículos y manipuladores para la detección de minas antipersonas

Entre los vehículos que se emplean en tareas de detección de minas se encuentran: automóviles tradicionales (coches y furgonetas), vehículos militares (tanques blindados), robots con ruedas u orugas desarrollados para propósito general e incluso robots desarrollados específicamente para esta aplicación, robots con patas, y últimamente se están incorporando a esta lista los sistemas *quads*¹ (Fukushima et al., 2005).

La locomoción mediante ruedas permite el diseño de vehículos con estructura mecánica relativamente simple, donde cada rueda consiste básicamente en un disco acoplado a una articulación rotatoria. La configuración de las ruedas (número de ruedas, sus diámetros, anchos y patrones de la superficie de rodadura, ruedas en configuración “oruga”, etc.) influye directamente en la maniobrabilidad que ofrece el vehículo y que afecta su capacidad de evadir obstáculos durante el desplazamiento.

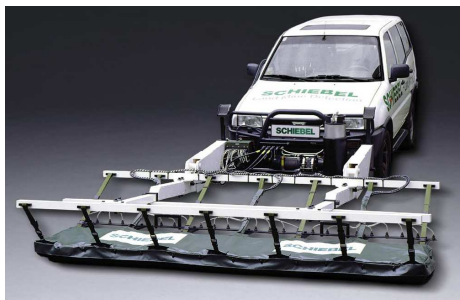
En principio, cualquier vehículo que proporcione cierta movilidad se puede utilizar para disponer sobre él un detector o grupo de detectores de minas. Resulta una opción obvia, dada su alta disponibilidad en el mercado, emplear automóviles, vehículos para obra civil, militar, e incluso vehículos agrícolas, como los primeros en portar sistemas de detección de minas antipersonas sobre terrenos minados.

Un ejemplo de integración de las tecnologías de vehículos comunes y sistemas de detección de minas es la ofrecida por la empresa austriaca Schiebel (véase la Fig 2.1), que ha configurado una matriz de sus detectores elementales para ser dispuesta sobre vehículos comerciales (Schiebel, 2007). Esta

¹Vehículo todo terreno de cuatro ruedas (en Inglés: *Quad* o *ATV*) similar a una motocicleta. Potencia, agilidad, ligereza y resistencia son algunas de las principales cualidades de estas máquinas.

figura muestra la disposición de la matriz de detectores sobre un coche (a) y una pequeña excavadora (b). Estos vehículos comunes, aunque convenientes por su relativo bajo coste y fácil mantenimiento, presentan importantes restricciones de maniobrabilidad y no son fácilmente automatizables; están diseñados para ser conducidos por un operario dentro del habitáculo del vehículo, situación que en general es indeseable en tareas de desminado humanitario.

El sistema de exploración de terrenos esta compuesto, entonces, por el vehículo y la matriz de detectores de metal. Estos detectores están dispuestos de manera regular sobre una manta plástica resistente a la abrasión, y ésta a su vez está fijada a un bastidor que se acopla al vehículo. La manta no se tensa sino que cuelga del bastidor, y mediante un mecanismo de elevación se controla el arrastre de la manta sobre el terreno sin hacer presión sobre su superficie y adaptándose a pequeñas irregularidades que puedan existir. Este procedimiento permite explorar terrenos en busca de minas con mayor rapidez que con sistemas de detección puntuales; sin embargo, requiere que la superficie sea poco irregular y que esté despejada de vegetación mediana-



(a)



(b)

Figura 2.1: Sistemas móviles de detección mediante matriz de detectores Schiebel y vehículos convencionales: (a) vehículo urbano, (b) maquinaria de construcción.

mente alta u otros obstáculos, tanto por las limitaciones del sistema detector como por las limitaciones de movilidad del vehículo. Una vez detectada una alarma de mina debe detenerse el proceso de exploración y proceder con la examinación minuciosa (mediante procedimientos manuales, generalmente) en la zona de alarma.

Un paso adelante en la escala de complejidad del sistema móvil se puede apreciar en proyectos como el acometido en Canadá por el *Engineering Service Incorporation* (ESI) y el *Defense Research Establishment Suffield* (DRES), que aunando sus experiencias en robótica de exteriores y desactivación de minas, respectivamente, han desarrollado un robot con ruedas denominado MR-2 (véase la Fig. 2.2) para tareas de detección de minas antipersonas. Este robot móvil emplea un sistema diferencial de seis ruedas (permitiendo girar todo el vehículo sobre su eje vertical), siendo capaz de detectar minas con contenidos metálicos ínfimos (ESI, 2008). El MR-2 es un sistema modular que comprende un vehículo operado remotamente, una



Figura 2.2: Robot MR-2.

unidad de control, un brazo manipulador para la detección de metales, y un sistema móvil láser (reubicable localmente) de medición de distancias. Ofrece la opción de instalar un brazo manipulador adicional para ser utilizado como herramienta en la neutralización de minas, y el sistema completo puede operar en terrenos con pequeñas irregularidades y vegetación relativamente densa. Aunque este sistema consigue efectivamente alejar al operario del terreno minado y ofrece una maniobrabilidad del vehículo mejorada, sigue siendo un sistema de acciones "manuales" donde el operario se encarga de toda la estrategia de barrido del terreno y localización de minas. El resto del sistema explorador permite obtener medidas de distancia de la superficie del terreno relativa al robot y detectar posibles alarmas de minas.

Este sistema resulta mucho más versátil que el anterior basado en vehículos comerciales, ofreciendo mayor seguridad para el operario y mejorando las características de la exploración sobre el terreno, pero no deja de presentar los tres inconvenientes básicos asociados a los vehículos con ruedas: limitación en el tamaño de los obstáculos que puede sobrepasar, limitación en los tipos de terrenos sobre los que puede operar, y limitación en el rango de movimientos que es capaz de realizar, tanto para ubicar el sistema sensor del terreno como para evitar obstáculos y/o minas detectadas.

Un sistema similar de exploración de terrenos para tareas de desminado humanitario se ha desarrollado en el proyecto GRYPHON (véase la Fig. 2.3), que consiste en una plataforma móvil con ruedas capaz de portar cargas relativamente pesadas de equipos y sensores para tareas de detección, verificación y neutralización de minas. Se emplea un *quad* automatizado al que se le ha instalado un sistema manipulador especialmente diseñado para manipular cargas relativamente pesadas de manera equilibrada mediante un contrapeso. Este brazo robótico consta de 5 grados de libertad y porta un conjunto de herramientas que incluye un sensor de metales, un radar penetrante en tierra y un sistema de visión artificial. Cuando las condiciones de

iluminación y del terreno lo permiten, el controlador automático del brazo manipulador y el complejo sistema de visión son capaces de obtener representaciones muy precisas del perfil del terreno con respecto a la posición del vehículo. Pero, con respecto a la movilidad, presenta las limitaciones de un vehículo con ruedas, y, con respecto a la exploración de terrenos, no deja de tener las restricciones de los sistemas actuales de visión.

Con un enfoque diferente, los prototipos TRIDEM desarrollados dentro del proyecto HUDEM² en Bélgica, consisten en un robot móvil teleoperado de estructura mecánica muy sencilla, desarrollado específicamente para tareas de localización de minas, con un sistema de locomoción de tres ruedas independientes y con dos grados de movilidad cada una: avance y dirección.

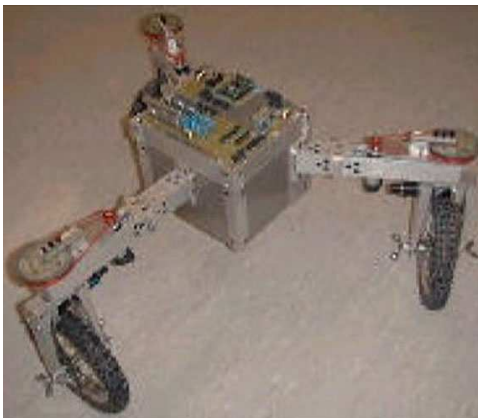


Figura 2.3: GRYPHON IV: Vehículo *quad* teleoperado y brazo equilibrado en peso para automatización de tareas de detección de minas.

²*HU(manitarian)DEM(ining)*, proyecto iniciado en Bélgica en 1997 para aportar soluciones al problema mundial del desminado humanitario, desarrollando las áreas de la detección de minas mediante radar y su destrucción mediante microondas, desarrollo de sensores y técnicas de fusión sensorial, sistemas robóticos, interfaces hombre-máquina, y la logística y soporte asociada.

Este sistema ofrece buena movilidad y adaptabilidad a terrenos irregulares y puede portar cargas de 20 kg a una velocidad de 0.1 m/s. Sus diseñadores defienden como característica fundamental el bajo precio total dada la sencillez y rapidez de las reparaciones (véase la Fig. 2.4). Este sistema de exploración se ha diseñado para ser empleado específicamente en tareas de verificación de terrenos desminados. El vehículo es teleoperado por el operario para desplazarlo sobre el terreno a verificar, y mediante un brazo manipulador sencillo se posa un detector de metales sobre el terreno. Las estrategias de movimiento, exploración de terrenos y localización de minas están a cargo del operario.

Cuando la superficie del terreno es “blanda”, movediza o incluso pedregosa, resulta conveniente emplear vehículos con sistemas de locomoción de tipo oruga, ya que distribuyen el peso del vehículo de manera más uniforme sobre la superficie de contacto evitando que las ruedas se incrusten en el terreno y mejoran notablemente el agarre.



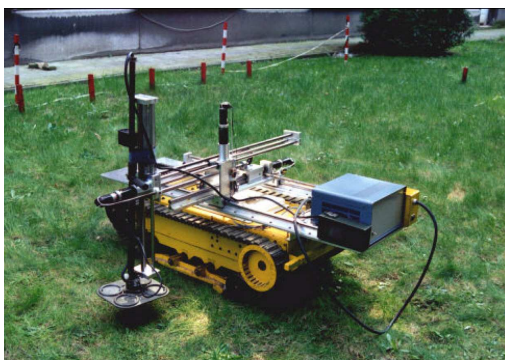
(a)



(b)

Figura 2.4: Robots (a) TRIDEM I y (b) TRIDEM II

Como ejemplos de este tipo de locomoción se tiene a los sistemas *HUNTER* y *MINE HUNTER* (MHV), mostrados en las Fig. 2.5(a) y (b), respectivamente. *HUNTER* es un pequeño prototipo de robot con orugas característico de este tipo de sistemas de locomoción. Ha sido desarrollado por el *Belgium Demining Service* a partir de una plataforma móvil comercial transformada para configurar un sistema automático, enmarcado también dentro del proyecto belga HUDEM, buscando la mejora de la eficiencia en la detección de minas. La transformación de la plataforma incluyó la instalación de un dispositivo articulado de exploración, configurable para permitir la exploración frontal o lateral. Este sistema explora el terreno automáticamente hasta que detecta una alarma de mina, en cuyo caso se detiene e informa del evento al operario. El vehículo *MINE HUNTER* es un robot desarrollado en la Universidad de Chiba, Japón. El vehículo está basado en un dispositivo formado por cuatro orugas que pueden girar ± 25 grados alrededor de un eje perpendicular al plano principal de la oruga, lo que confiere buena adaptabilidad a terrenos irregulares. El vehículo tiene unas dimensiones de $2.8 \times 1.5 \times 1.9$ metros y pesa 1650 kg, aproximadamente. Dispone de un poderoso manipulador hidráulico de tipo SCARA de cuatro grados de



(a)



(b)

Figura 2.5: Robots con orugas: (a) HUNTER (Bélgica) y (b) MINE HUNTER (Japón).

libertad que porta un pesado detector de minas (véase la Fig. 2.5b) basado en un radar penetrante en tierra (*GPR*). El sistema dispone de un motor diesel que proporciona potencia mecánica a la plataforma móvil e incluye un generador eléctrico a bordo para la alimentación del resto del sistema. En ambos robots la tarea de exploración del terreno presenta un esquema muy simple, donde la detección de alarmas de minas o la presencia de obstáculos detiene el proceso automático y el operario debe tomar el control del sistema.

Ambos sistemas móviles, basados en orugas aunque con dimensiones muy diferentes, permiten portar sistemas detectores pesados y/o voluminosos. Sin embargo, adolecen de los ya mencionados problemas de maniobrabilidad de los vehículos con ruedas u orugas, y de los sistemas móviles de gran peso (difíciles de transportar hasta el lugar de trabajo, requieren de más de dos operarios para transportarlos, etc.).

En contraste con los sistemas móviles mediante ruedas u orugas, los sistemas con patas pueden mover y orientar todo el cuerpo mientras mantienen constante los puntos de soporte sobre el suelo, mediante la modificación de la extensión de sus patas, otorgando al sistema móvil 6 grados de libertad, entre otras importantes ventajas. Entre los primeros ejemplos que se pueden mencionar está el TITAN VIII, robot caminante cuadrúpedo desarrollado en el *Tokyo Institute of Technology* de Japón (Hirose y Kato, 1998), fue uno de los primeros robots adaptados para esta tarea (véase la Fig. 2.6). Otros ejemplos relevantes lo conforman el AMRU-2, robot electro-pneumático desarrollado en la *Royal Military Academy* de Bruselas, Bélgica (Baudoin et al., 1999) y el RIMHO-2 (véase la Fig. 1.2(f)), cuadrúpedo construido en el Instituto de Automática Industrial - CSIC (RIMHO, 1992), ambos utilizados como plataformas experimentales para detección de minas (véanse las Fig. 2.7 y 1.2(f), respectivamente).

El robot TITAN VIII utilizaba detectores en sus pies; esto es una buena solución para cruzar un campo minado, pero resulta ineficiente en la exploración de todo un campo minado. AMRU-2 y RIMHO-2 utilizaban un detector fijo situado en su parte delantera. Por ejemplo, RIMHO-2 simulaba

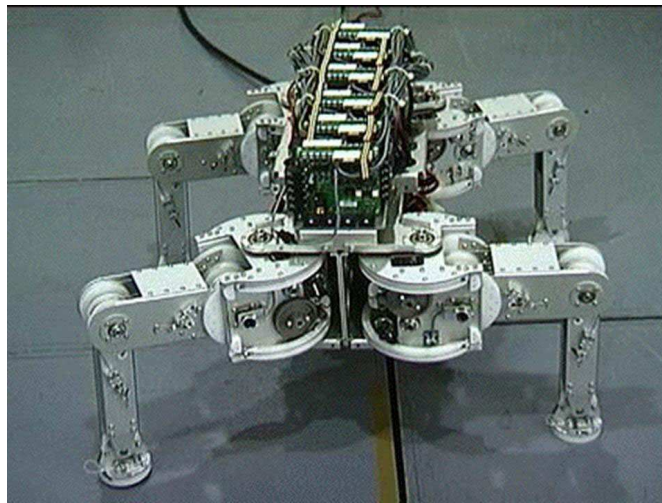


Figura 2.6: Robot TITAN VIII.

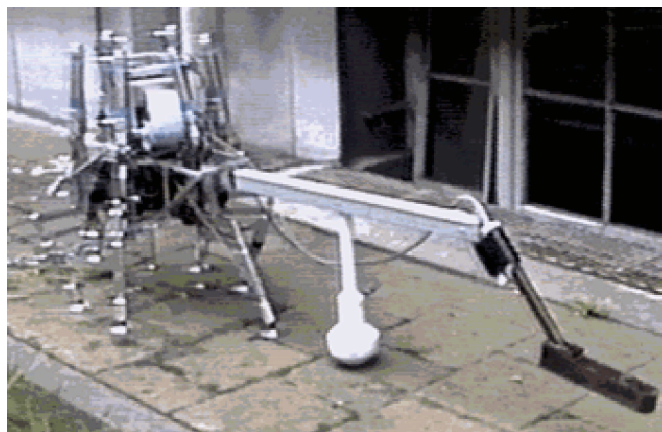


Figura 2.7: Robot caminante AMRU-2.

una matriz de detectores que abarcaba toda su envergadura, y la orientación y altura al suelo de los detectores se controlaba con los 6 grados de libertad del cuerpo del robot caminante. Como ya se ha adelantado, el posicionamiento y orientación de los sensores fijos en robots caminantes, aunque con 6 grados de libertad, están muy limitados en rango. Estas observaciones dan origen a los diseños de manipuladores acoplados al robot para otorgar mayor movilidad al detector.

Quizás el primer robot diseñado específicamente para tareas de desactivación humanitaria sea el COMET-I (véase la Fig. 2.8(a)). Se trata de un hexápodo desarrollado en la Universidad de Chiba (Japón) que incorpora diferentes sensores y sistemas de localización (Nonami et al., 2000; Huang y Nonami, 2003). Este robot alcanza los 120 kg y resulta muy pesado para misiones reales teniendo en cuenta las directrices del *International Test and Evaluation Program for Humanitarian Demining* (ITEP) que aconseja que las plataformas para desminado sean “... suficientemente pequeñas y ligeras para ser manejables (manualmente por operarios en las accesos a los campos minados o para que puedan retirarse fácilmente en caso de fallos en su funcionamiento), fáciles de transportar e instalar...” (Baudoin, 2005). La Universidad de Chiba sigue, no obstante, desarrollando grandes máquinas y recientemente ha puesto en marcha el COMET-IV, con un peso cercano a la tonelada (véase la Fig. 2.8(b)).

El robot ARIEL es otro hexápodo desarrollado por la compañía iRobot para operaciones de recogida de minas financiado por la *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) y la *US Office of Naval Research* (ONR) (Estados Unidos), quienes están explorando métodos para utilizar estos robots en misiones submarinas (Voth, 2002). Este robot emplea patas de 2 grados de libertad, lo cual representa un problema para los movimientos omnidireccionales (véase la Fig. 2.9). Otro ejemplo similar es el robot caminante basado en la estructura de la langosta americana (Ayers et al.,

1998) que se ha construido en la *Northeastern University's Marine Science Center*. Este proyecto también está financiado por DARPA y ONR, lo que demuestra el interés de importantes agencias de investigación en la problemática de las minas antipersonas.



(a)



(b)

Figura 2.8: Robots COMET para detección de minas antipersonas: (a) COMET-I y (b) COMET-IV.



Figura 2.9: Robot submarino ARIEL.

Más recientemente el *Tokyo Institute of Technology* ha desarrollado el TITAN IX (véase la Fig. 2.10), un cuadrúpedo que utiliza sus patas y pies como manipuladores para la detección y desactivación de minas (Hirose et al., 2005). Sin embargo, la experiencia también les ha enseñado que se requiere un manipulador específico para algunas tareas delicadas (Hirose, 2006).

En ocasiones es conveniente que los robots con patas sean más bien sencillos, con el objetivo de reducir dimensiones, peso, necesidades energéticas e incluso costos. En particular, el trabajo de Nanayakkara et al. (2005) presenta un robot caminante muy sencillo en su estructura mecánica (véase la Fig. 2.11), que porta un detector de metales, y emplea el barrido que realiza un pequeño sensor de rango para la detección de obstáculos. La misión de dicho proyecto es desarrollar un sistema de muy bajo costo capaz de desplazarse de manera semiautomática por zonas muy densas de vegetación, donde su principal aportación se encuentra en el algoritmo de planificación

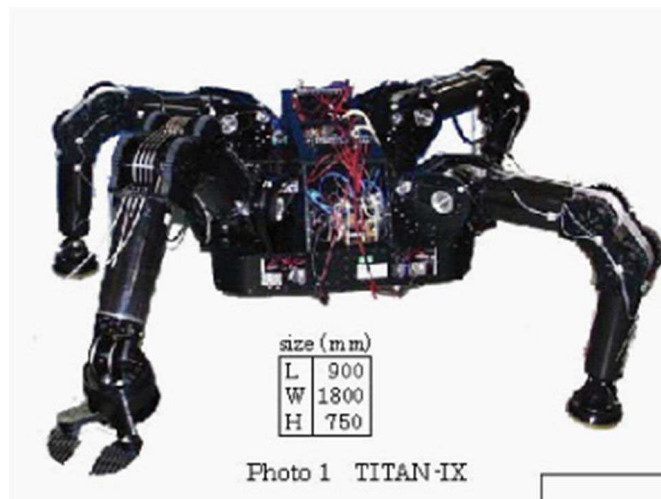


Figura 2.10: Robot TITAN IX.

de trayectorias, capaz de guiar al robot entre la maleza (incluso tocándola y/o pasando sobre ella) coexistiendo con gran cantidad de obstáculos en el entorno.

Los robots caminantes mencionados están basados en estructuras de tipo insecto; sin embargo, existen otras configuraciones tales como las estructuras deslizantes, que se están utilizando en el desarrollo de robots para desminado humanitario (Habumuremyi, 1998; Marques et al., 2002). Este tipo de robot tiene dos estructuras que pueden deslizarse y rotar entre sí. Todos los pies asociados a cada estructura están siempre en la misma posición relativa, por tanto la capacidad para seleccionar los puntos de apoyo de los pies y adaptarse a terrenos con zonas prohibidas (minas u obstáculos) está muy limitada.

Estos pocos ejemplos demuestran que existe gran interés mundial en el desarrollo de robots caminantes y brazos manipuladores para la detección de minas en tareas humanitarias, pero que sin embargo aún están muy

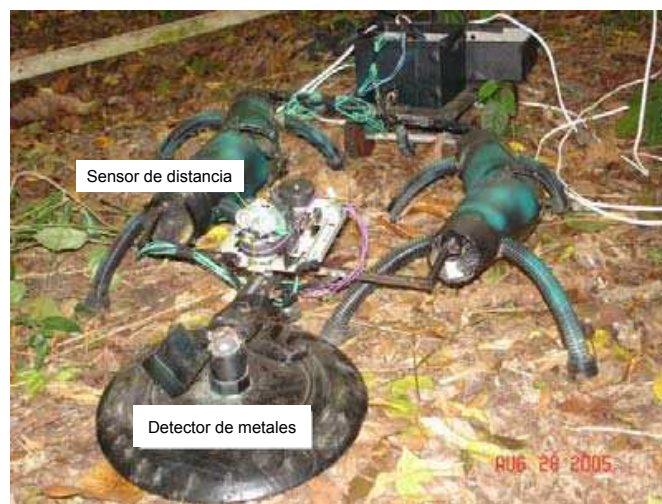


Figura 2.11: Robot “iguana” (Sri Lanka).

limitadas sus capacidades de operación automática.

2.1.2. Sistemas de representación del entorno en robots móviles en general

En la detección y localización de minas antipersonas empleando sistemas automáticos se encuentran, al menos, los mismos retos tecnológicos fundamentales que existen en la navegación automática de vehículos, puesto que se trata de una plataforma móvil que debe desplazarse sobre el terreno. Las tareas de representar el entorno del móvil y de ubicarlo dentro de ese entorno son temas ampliamente estudiados y siguen siendo hoy día temas abiertos. La solución ideal no existe aún, y por lo general debe escogerse alguna que ofrezca una relación conveniente de requerimientos tecnológicos, calidad de representación del entorno, y complejidad de implementación.

Algunos de los paradigmas más conocidos actualmente se están desarrollando desde mediados de la década de los 80. Despiertan un particular interés trabajos como el de Moravec y Elfes (1985), en el que se presenta un sistema de generación de mapas 2D del entorno donde se mueve un robot móvil, empleando procesamientos estadísticos de la información de distancia de sonares ultrasónicos para generar “matrices de ocupación” (*Occupancy grid*). También se proponen procedimientos para generar mapas 3D a partir de datos de sensores de distancia, como en el trabajo de Hebert (1986), en el que se usa un sensor de distancia basado en la fase de un láser modulado; o en un trabajo posterior del mismo autor (Hebert, 1989) donde se emplea, además de la fase, la información de intensidad de luz. Otros trabajos, como el de Asada (1988), se orientan más bien al procesamiento de imágenes para determinar distancias. Un trabajo reciente, el de Nanayakkara et al. (2005), muestra una interesante propuesta que emplea análisis de imágenes pero

en sentido inverso: dadas unas lecturas de distancia se asocian éstas a un tipo de imagen (por medio de lógica difusa). Otros trabajos del autor Asada et al. (1989 y posteriores), establecen las bases del conocido paradigma de “Mapa de Alturas” (*Height Maps*), en el que la información de distancia se obtiene a partir de una secuencia de imágenes, procedimiento que después se convertiría en un tema de investigación en sí y que ahora forma parte de la investigación en el área de visión artificial.

Con los trabajos de Elfes (1986 y 1987), se aumenta el modelo anterior de matriz de ocupación agregando capas de información de diferente naturaleza al mapa espacial, obteniendo matrices multidimensionales descriptivas del entorno, y con el trabajo conjunto de Matthies y Elfes (1988) se da a conocer lo que se convertiría en uno de los paradigmas más empleados en la representación del entorno de robots móviles: la rejilla de ocupación (del inglés *Occupancy Grid*) también conocido como *Gridmap* o *Certainty Grid*, cuyos detalles se encuentran expuestos en Elfes (1989).

En este método de la rejilla de ocupación, el área de trabajo del robot se representa con una matriz bidimensional de cuadros denominados *cells* o celdas, donde cada celda contiene un valor denominado *Certainty Value (CV)* o valor de certidumbre, que indica la confianza que se tiene (o la probabilidad que existe) de que esa celda esté ocupada por un obstáculo. Estos valores almacenados en las celdas se revisan o actualizan mediante un modelo probabilístico que toma en consideración las características de los sensores empleados para “medir” el entorno del robot; este modelo probabilístico permite integrar en una misma rejilla de ocupación la información procedente de múltiples sensores, sean estos de igual o diferente naturaleza, y estén o no estas medidas tomadas en diferentes instantes de tiempo.

Estos modelos generalmente asumen que el entorno es estático, donde los elementos del entorno permanecen en su posición durante todo el tiempo

que el robot navega entre ellos. Sin embargo, existen estudios que intentan ampliar el modelo básico (Konolige, 1997; Duckett y Saffiotti, 2000) o incluso adaptar los modelos estáticos a entornos dinámicos (Schiele y Crowley, 1994; Arbuckle et al., 2002), o un paso intermedio asumiendo entornos ligeramente dinámicos (Fabrizi y Saffiotti, 2000; Fabrizi y Saffiotti, 2002; Biswas et al., 2002). Otros trabajos plantean modelos que intentan substituir la representación discreta del espacio (celdas) por una representación vectorial o mediante segmentos de líneas (*Line Segments*), detectando el contorno de los obstáculos y asignándoles segmentos de líneas (Zhang y Ghosh, 2000).

En el sistema objeto de esta tesis se ha empleado una representación del entorno próximo frente al robot basado en los paradigmas de la rejilla de ocupación, principalmente por su robustez, versatilidad y facilidad de uso, y para la representación del perfil de la superficie se emplea un mapa de elevación.

2.1.2.1. Rejilla de ocupación

La detección de obstáculos es una tarea primordial para la planificación de trayectorias en la robótica móvil. Permite identificar características tales como la ubicación y la forma del contorno de los obstáculos, el nivel del terreno, y demás características relevantes para la planificación de trayectoria. En el caso que nos ocupa, se necesita conocer la forma y la posición de los obstáculos dentro del área de terreno a explorar en busca de minas antipersonas.

Se elige emplear para la representación del contorno de los obstáculos una rejilla de ocupación que modele el plano horizontal (XY) del área inmediatamente delante de la plataforma móvil. Como se muestra en el ejemplo de la Fig. 2.12, el mapa consiste en una rejilla que cubre toda el área a explorar, y el contorno del obstáculo se representa en la rejilla asignando

a las celdas correspondientes un valor que indica su estado de ocupación. En la implementación que hemos realizado, la rejilla es una representación local (representación con respecto al sistema de coordenadas del brazo manipulador) de la ubicación de obstáculos.

De manera general, con la construcción de mapas mediante rejilla de ocupación se intenta resolver el problema de la generación de mapas congruentes a partir de mediciones con redundancia, incertidumbre y ruido (Thrun et al., 2005). Más adelante, en la sección 4.1.2.2.1, se trata con mayor detalle el tema de las rejillas de ocupación y de la implementación específica realizada en este trabajo.

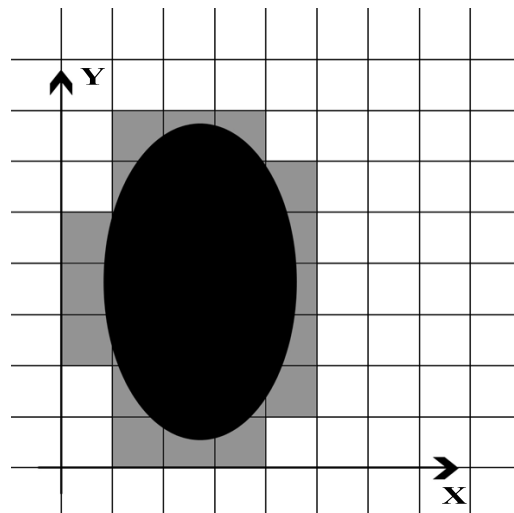


Figura 2.12: Ejemplo de rejilla de ocupación. El obstáculo (en negro) se representa en el mapa o rejilla mediante el estado de las celdas que ocupa: blanco = desocupado, gris = ocupado.

2.1.2.2. Mapa de elevación

Un mapa de elevación es, en general, la representación bidimensional o plana de la elevación de un área o región. Suelen emplearse colores para representar la altura, de manera que zonas con el mismo color indican zonas con la misma altura, como se muestra en el ejemplo de la Fig. 2.13. Es común también encontrar representaciones de elevación empleando líneas de contorno que indican cotas de alturas (curvas de nivel); es decir, todos los puntos de una misma línea presentan la misma altura, como se observa en el ejemplo de la Fig. 2.14.

Este tipo de representación es útil en el estudio de superficies en general. En el caso de robots móviles, estos mapas pueden emplearse en la determinación de trayectorias. En trabajos como el de Asada et al. (1989) y Asada (1990) se desarrollan métodos para la interpretación de mapas de

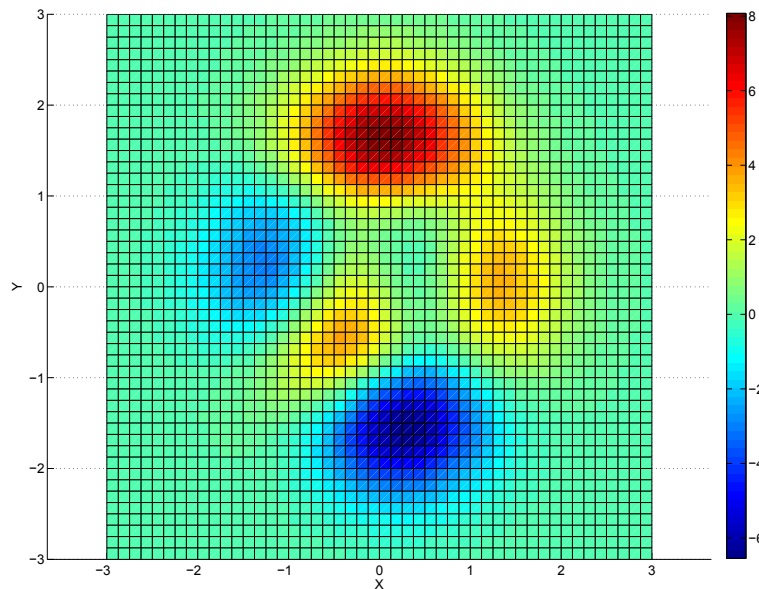


Figura 2.13: Ejemplo de mapa de elevación empleando colores.

elevación obtenidos a partir de imágenes de rango. Trabajos más recientes (Gutmann et al., 2005) demuestran las aplicaciones que sigue teniendo este paradigma, empleado para la navegación de un robot bípedo que mide su entorno mediante un sistema de visión artificial.

En la planificación de trayectorias de robots móviles suelen evitarse los recorridos que impliquen mayor consumo energético o los que comprometan la estabilidad del robot. En la exploración de terrenos para tareas de desmi-nado humanitario, además, es fundamental la planificación de trayectorias que cubran el mayor porcentaje posible del área a explorar. Una de las misiones del sistema de exploración de terrenos consiste en capturar datos para la determinación del contorno de los obstáculos y el perfil (de elevación) del terreno. En la sección 4.2 se expone con mayor detalle la implementación específica de los mapas de elevación realizada en este trabajo.

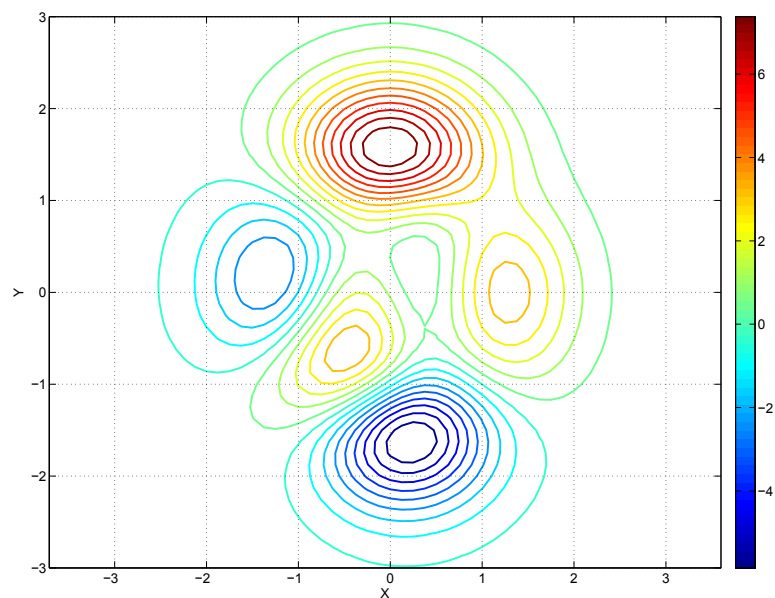


Figura 2.14: Ejemplo de mapa de elevación empleando líneas de contornos.

2.2. Detección de obstáculos

En la planificación de trayectorias de robots móviles y de brazos manipuladores, la detección de obstáculos es un problema fundamental que aún no tiene una solución definitiva. El estudio de la planificación de trayectorias tanto de robots móviles como de brazos manipuladores resulta de interés para nuestra investigación, dado que el sistema de exploración de terrenos está basado en un brazo de este tipo, y dado que la cabeza sensora puede ser considerada como un dispositivo móvil que se desplaza sobre la superficie del terreno.

En las últimas dos décadas, entre los principales paradigmas desarrollados para el estudio de este problema se encuentra el “control de impedancia” (Hogan, 1985) propuesto inicialmente para el control de brazos manipuladores. Un concepto relacionado al control de impedancia es el planteado por Khatib (1986), donde por medio de “campos de fuerza” virtuales se logra definir una trayectoria óptima para todos los eslabones de un brazo manipulador que se mueve dentro de un entorno con obstáculos. Este paradigma ha sido ampliado (Borenstein y Koren, 1989) incorporando conceptos como el de la “rejilla de incertidumbre” planteado por Moravec y Elfes (1985), obteniendo una implementación de la planificación de trayectorias usando campos de fuerzas asociados a obstáculos definidos sobre una rejilla de incertidumbre.

El concepto de fuerzas virtuales de interacción entre el móvil y el entorno (obstáculos) ha sido descrito mediante campos de fuerzas, pero también mediante otras formas más simples como muelles virtuales. Un trabajo relacionado con este concepto es el de Ferreira et al. (2008), donde un robot móvil se desplaza guiado por una fuerza atractiva definida en una posición objetivo, y desviándose cuando algún obstáculo interfiere con la trayectoria ejerciendo una fuerza de repulsión determinada por medio de un muelle

virtual que regula la interacción con el obstáculo.

El uso del control de fuerzas tiene una larga trascendencia en la literatura de la robótica, siendo común encontrar implementaciones de lazos de control híbrido de fuerza. Es común encontrar implementaciones de lazos de fuerza-posición, como los empleados en máquinas herramienta (Gorinevsky et al., 1997), ajustando la posición de la herramienta mediante un control de posición, y regulando la presión que ejerce sobre el material mediante un lazo de control de fuerza.

Resulta especialmente importante para nuestro trabajo el concepto de conmutación de comportamientos, mediante el que se puede modificar la respuesta del móvil en función de ciertas condiciones particulares del robot y/o del entorno. En Palejiya y Tanner (2006) se presenta una implementación de un lazo de control híbrido de fuerza-velocidad (en vez del tradicional fuerza-posición), donde el modelo del sistema empleado en el lazo cambia en función de las condiciones de interacción entre el móvil y el entorno.

En el sistema objeto de esta tesis se ha diseñado un modelo de interacción con obstáculos basado en el símil de un anillo “parachoques” móvil que rodea la cabeza sensora, conectada a ésta a través de sistemas muelle-amortiguador.

2.3. Sistemas de detección de minas antipersonas

Aunque el diseño del sistema detector de minas no forma parte de los objetivos de esta tesis doctoral, conocer y comprender el estado de la técnica en esta área sirve de referencia en el diseño de procedimientos de localización de minas.

Las herramientas y procedimientos disponibles actualmente para las tareas de detección de minas antipersonas se asemejan a aquellas empleadas en la Segunda Guerra Mundial: un equipo de operarios provistos con un detector de metales y una herramienta para “pinchar” el terreno (varilla, destornillador, etc.). Primero se limpia el terreno de vegetación densa y después se divide en celdas de 1×1 m aproximadamente. Un operario procede entonces avanzando lentamente por cada celda, moviendo el detector de metal cerca de la superficie. Cuando se detecta una alarma, un segundo operario procede a determinar con la varilla, pinchando el terreno, si la alarma corresponde a una mina enterrada (MacDonald y Lockwood, 2003).

Este método es el más empleado aún cuando el detector señala cualquier tipo de pieza metálica sin discriminar si se trata de una mina o simple basura. Se tienen datos que reflejan que de los aproximadamente 200 millones de objetos extraídos durante el desminado humanitario en Camboya entre 1992 y 1998, solamente 500.000 eran verdaderamente dispositivos explosivos (menos del 0.3 %). Cada detección debe ser verificada manualmente, con las precauciones que “pinchar” el terreno con demasiada fuerza, o fallar al determinar la presencia de una mina, son problemas típicos de este proceso. Se sabe que ajustar la sensibilidad del detector para reducir la detección de falsos positivos reduce también la probabilidad de encontrar minas (verdaderos positivos), dejando en consecuencia mayor cantidad de minas en el terreno después de completada la operación de desminado. Esta cantidad de falsos positivos convierte el proceso en una actividad altamente peligrosa, lenta y costosa, pero es inaceptable un porcentaje menor de detección de verdaderos positivos.

Actualmente, ninguna tecnología de detección puede operar efectivamente contra todo tipo de minas o en todo tipo de condiciones ambientales. Por ejemplo, sensores por resonancia de cuadrupolo nuclear (*Nuclear Quadrupole Resonance*) pueden encontrar rápidamente minas que contienen explosivo

de tipo cyclotrimethylenenitramine (conocido como *Royal Demolition Explosive* RDX), pero resultan lentos confirmando la presencia de explosivo de tipo trinitrotolueno (TNT). Los sistemas de detección acústica demuestran tener una relación baja de falsos positivos, pero no pueden detectar minas enterradas a mayor profundidad que unos pocos centímetros. Los sensores de vapores químicos son capaces de detectar minas plásticas en terrenos húmedos, pero tienen dificultades en ambientes secos, y en general cada tipo de sensor, como el Radar Penetrante en Tierra (GPR) (Gader et al., 2000), sensores químicos (Albert et al., 1999), narices artificiales (Rouhi, 1997), presentan cada uno ventajas muy específicas. Dadas las limitaciones individuales de cada sistema sensor y cada tecnología actual, se hace necesario desarrollar sistemas multisensoriales que combinen las propiedades de distintas tecnologías.

Capítulo 3

Sistema de exploración

El capítulo anterior presentó las dos configuraciones más comunes empleadas actualmente en tareas de desminado humanitario mediante sensores puntuales:

- Conjunto de estos sensores individuales dispuestos sobre una matriz.
- Mecanismo de movimiento de un sensor individual recorriendo (o “barriendo”) el área de terreno a inspeccionar empleando estrategias de barridos determinadas.

El sistema de exploración de terrenos presentado en esta tesis doctoral pertenece a este segundo grupo: detector puntual de minas instalado en una plataforma móvil que recorre todo el terreno (o el mayor porcentaje posible de éste) siguiendo estrategias de barrido que buscan optimizar la operación del sistema de exploración en función de las características del terreno.

Tanto el sistema de exploración como su estrategia de barrido se han basado en el esquema tradicional de un detector de metales con el que se barre manualmente el terreno, y consta de una cabeza sensora, un brazo manipu-

lador y una plataforma móvil formada por un robot caminante hexápodo (véase la Figura 3.1).

De manera general, el procedimiento de exploración de terrenos diseñado consiste en explorar o barrer la superficie moviendo el detector de un lado al otro del robot caminante mientras éste se desplaza sobre el terreno, adaptando la postura (altura y orientación) del detector a las irregularidades de la superficie, y registrando los datos del terreno y de detección de metales reportados durante el proceso.

Este capítulo presenta el sistema de exploración como base para los siguientes capítulos. Específicamente se describen diferentes prototipos de cabezas sensoras y se esbozan los fundamentos de los algoritmos, incluyendo los de movimiento del manipulador.

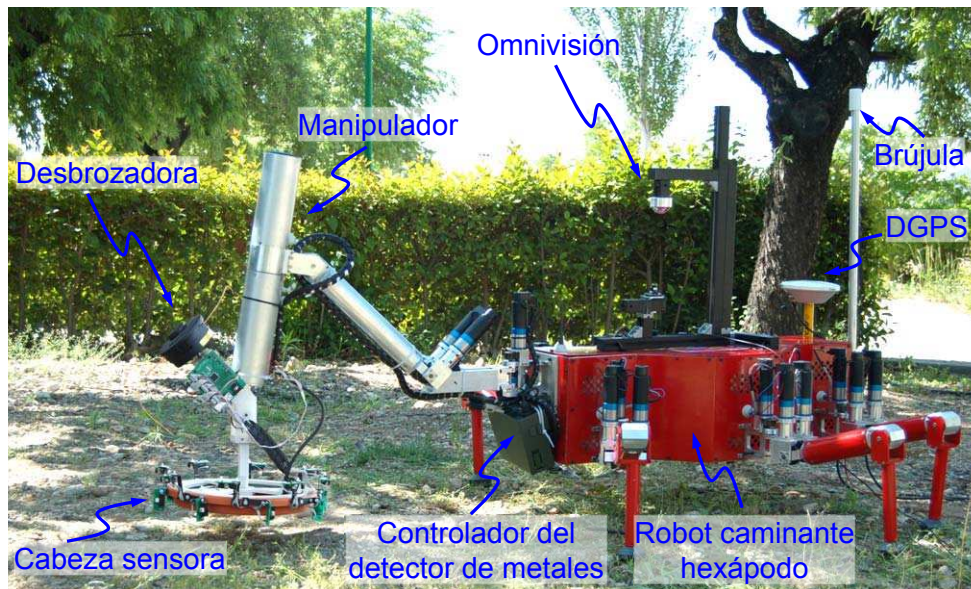


Figura 3.1: Configuración del sistema DYLEMA.

3.1. Plataforma móvil

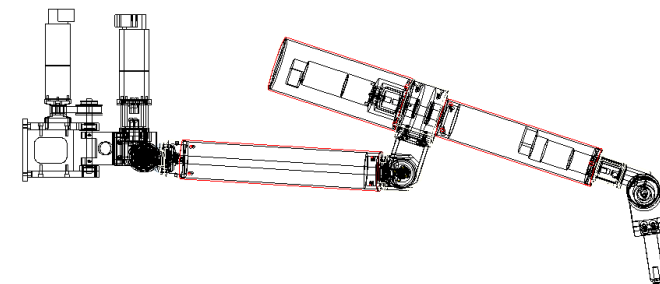
La plataforma móvil consta de dos sistemas: un robot caminante y un brazo manipulador. El robot caminante consiste en el hexápodo SILO6 (González de Santos et al., 2004 y 2007) que porta el brazo manipulador, que lleva acoplado en su extremo la cabeza sensora (Ponticelli et al., 2008). Mediante la coordinación conjunta de ambos sistemas se logra posicionar al detector de minas con precisión sobre el terreno a analizar, siendo el sistema del robot caminante el responsable del traslado y la localización precisa en el terreno (Cobano et al., 2008), mientras que el sistema manipulador es responsable de posicionar con precisión al detector de minas sobre la superficie del terreno.

Los diseños mecánicos de ambos robots no forman parte de los objetivos de esta tesis doctoral, que se centra en el diseño de los algoritmos (*software*) de control del brazo manipulador y el diseño del sistema electrónico (*hardware* y *firmware*) de la cabeza sensora. De manera general, el manipulador consta de 5 articulaciones (5 grados de libertad) rotacionales en configuración “codo arriba”¹, proveyendo movilidad suficiente y con reducidas posibilidades de contactos indeseados con otras partes del robot o con objetos en el entorno, y permitiendo en conjunto orientar hacia el suelo la herramienta acoplada en su extremo. La Fig. 3.2 muestra un esquema de diseño del manipulador completo y una fotografía de la construcción mecánica. Tanto el robot caminante como el brazo manipulador son accionados por actuadores eléctricos de corriente continua (CC), que han sido seleccio-

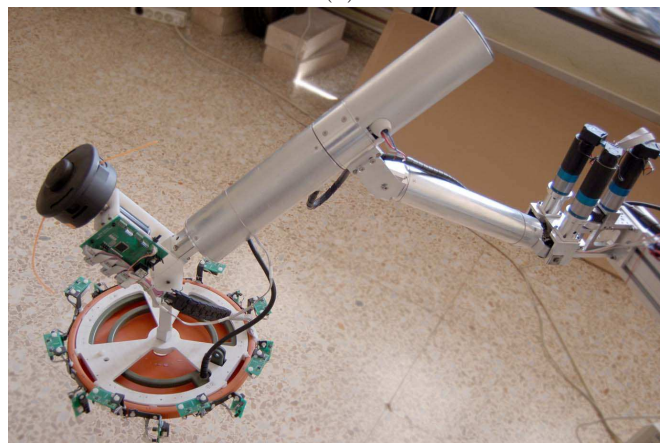
¹Los eslabones del brazo robótico se mueven en un mismo plano vertical, donde la articulación del “codo” se ubica por encima de la herramienta y no por debajo. En el cálculo cinemático inverso que permite obtener las coordenadas angulares del robot que posicionan la herramienta en las coordenadas volumétricas deseadas, existen generalmente varias soluciones posibles (conjuntos de coordenadas angulares) y debe escogerse cuál de éstas es más conveniente para la aplicación, o en ocasiones aquella que sea mecánicamente posible.

nados de manera que proporcionen el par mínimo necesario con las menores dimensiones y peso posibles (Espinoza, 2007). La Tabla C.1 (apéndice C) muestra los parámetros generales del manipulador, calculados a partir de los requerimientos y características en el proyecto DYLEMA, como la altura del robot móvil SILO6 y la envergadura de sus patas.

En las tareas de detección de minas suele ser necesario despejar el terreno de vegetación antes de proceder con el barrido del sensor de minas. Por tal motivo, se ha dotado al sistema de exploración de terrenos con la capacidad de realizar esta tarea, como una actividad preliminar de la tarea



(a)



(b)

Figura 3.2: Esquema (a) y fotografía (b) del brazo manipulador.

de detección de minas; para ello se ha instalado en el extremo del brazo manipulador una herramienta de corte (desbrozadora) compartiendo espacio con la cabeza sensora, como se puede observar en la Fig. 3.3. Con esta configuración, según el giro que presente el último eslabón (articulación 4) del brazo se selecciona la herramienta operativa. El procedimiento para desbrozar el terreno empleando esta herramienta de corte está supervisado por



Figura 3.3: Herramienta doble: sistema de corte (desbrozadora) y cabeza sensora. A) Herramienta doble girando (desbrozadora a la izquierda, cabeza sensora a la derecha), B) Posición de operación de la desbrozadora, C) Posición de operación de la cabeza sensora. D) Vista lateral de la herramienta doble (desbrozadora arriba, cabeza sensora abajo) sobre un área de terreno recién desbrozada.

el operario del sistema DYLEMA; la implementación de los algoritmos de control de esta herramienta de corte no forman parte de los objetivos de la presente tesis doctoral.

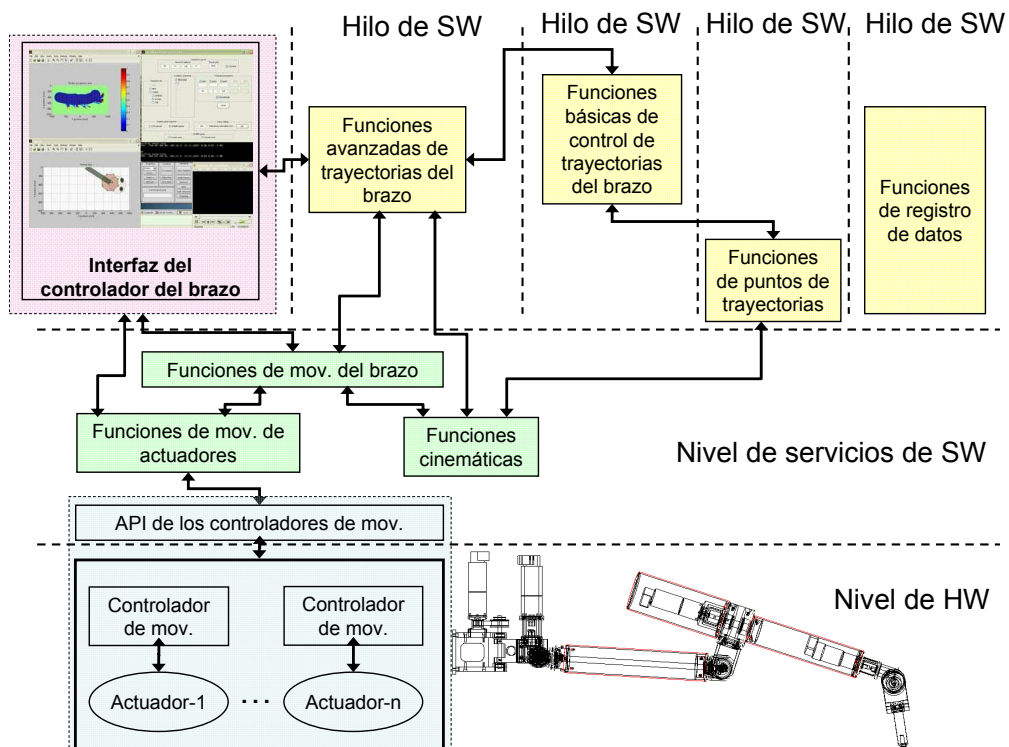


Figura 3.4: Esquema de los niveles de la arquitectura del sistema de control del brazo manipulador.

3.2. Módulo de control del brazo manipulador

El módulo de control del brazo manipulador es un sistema jerárquico de niveles operacionales. La Fig. 3.4 muestra un esquema simplificado de esta arquitectura de control, que consta de los siguientes niveles:

Lazo de control de movimiento de bajo nivel: Perteneciente al nivel de *hardware*, se encuentra en lo más bajo de la jerarquía, donde se encuentra el lazo cerrado de control de posición/velocidad de los motores eléctricos, implementado electrónicamente en el circuito integrado (CI) LM629. Una descripción más detallada se da en la sección de control de movimiento (3.2.1).

Módulo de control de movimiento: Perteneciente al nivel de *hardware*, consiste en un conjunto de dispositivos electrónicos que implementa el lazo de control de movimiento de un motor eléctrico, que incluye el CI de control de movimiento LM629, el amplificador de potencia, y el sensor de posición. Este *hardware* contiene todo lo necesario para controlar el movimiento del motor según las instrucciones provenientes de los algoritmos de control implementados en el *software*.

Librería del módulo de control de movimiento: Perteneciente al nivel de servicios de *software*, contiene la Interfaz de Programación de la Aplicación (API) para operar sobre los módulos de control de movimiento, estableciendo la interfaz entre el *hardware* de movimiento y el *software* que lo controla. Contiene funciones para configurar y operar el módulo de control de movimiento, y para realizar lecturas y escrituras de parámetros del lazo de control de movimiento de bajo nivel: variables de posición deseada y real, de velocidad deseada y real, aceleración, constantes PID, error de posición y velocidad, etc.

Librería de funciones de movimientos: Perteneciente al nivel de servicios de *software*, contiene una API de funciones avanzadas para el manejo y operación de los actuadores desde el punto de vista del control de robots: mover a un punto, mover con una velocidad, leer posición, leer velocidad, establecer aceleración, establecer límites de posición y velocidad, establecer posición inicial, realizar conversión de unidades, etc.

Librería de control de trayectorias: Perteneciente al nivel superior de la jerarquía, contiene funciones de generación y control de trayectorias de los miembros de un robot. Permite la coordinación de movimientos siguiendo trayectorias especiales (líneas rectas dentro del volumen de trabajo del robot, etc.), trabajando en conjunto con otras librerías matemáticas de cálculos cinemáticos directos e inversos de las estructuras del robot. El diseño de esta librería forma parte del trabajo realizado en esta tesis.

Librería de cálculo cinemático: Perteneciente al nivel superior de la jerarquía, contiene funciones de cálculo de la cinemática directa e inversa de la estructura mecánica del brazo manipulador. El diseño de esta librería forma parte del trabajo realizado en esta tesis.

A continuación se describirán los aspectos más relevantes del sistema de control del brazo manipulador desarrollados como parte de esta tesis.

3.2.1. Esquema modificado de control de movimiento

Dentro del nivel de servicios de *software* ha sido necesario diseñar e implementar un esquema modificado de control de movimiento para solucionar un problema específico de la plataforma de *hardware* empleada en el manipulador.

El brazo manipulador está accionado por servomotores eléctricos, cuyos elementos básicos son los siguientes:

- Un controlador de movimiento², sistema que cierra el lazo de control de velocidad y/o posición.
- Un amplificador, que transforma la señal de salida del controlador de movimiento en una señal con potencia eléctrica adecuada para manejar el actuador.
- Un motor de corriente continua (CC).
- Un sensor de posición o codificador (*encoder*) óptico de posición.

Este esquema de controlador de movimiento es bastante conocido y de uso común en los sistemas robóticos. Sin embargo, en nuestro caso ha sido necesario diseñar un esquema modificado con la finalidad de aumentar la seguridad del sistema (del operario y de la máquina) durante su funcionamiento. Como mecanismo de seguridad se ha diseñado un esquema de control (de nivel superior al lazo de control de movimiento de bajo nivel) que permite la detención del movimiento de los actuadores en caso de fallo en los niveles superiores del sistema. Este esquema, que denominamos “Pos-Vel”, consiste en seguir una trayectoria de velocidad mediante consignas de posición exclusivamente; de esta manera se establece un límite implícito de posición en cada punto de la trayectoria que el actuador debe seguir. La implementación de estos servomotores se ha realizado empleando un módulo electrónico de control de movimiento desarrollado en el DCA-IAI, cuyo procesador central es el CI de control de movimiento LM629. El origen del problema se encuentra precisamente en la forma en la que opera este

²El control de movimiento en los sistemas automáticos, conocido también por su nombre en inglés *motion control* (Kok Kiong et al., 2008), es una rama de la automatización que estudia el control de la posición/velocidad de una máquina, y consiste básicamente en el control de la posición/velocidad de la salida del propio actuador (motor eléctrico, cilindro hidráulico, etc.) o de algún otro elemento accionado (movido) por éste.

dispositivo.

Como ya se ha mencionado, de manera general el controlador LM629 implementa un lazo cerrado de control de posición/velocidad que incluye un bloque de compensación PID (Proporcional - Integral - Derivativo) y un generador de trayectoria de velocidad. En la Fig. 3.5 se muestra un diagrama de bloques general de la configuración interna de este controlador de movimiento que ofrece dos modos de operación:

- Control de velocidad: a partir de la información de posición del motor recogida por el *encoder* y mediante métodos diferenciales discretos calcula la velocidad del motor y establece un lazo cerrado de control de velocidad. No existen límites en la posición que el motor puede alcanzar bajo este esquema.
- Control de posición: a partir de la información de posición del motor recogida por el *encoder* se establece directamente un lazo cerrado de control de posición. Es posible establecer posiciones límites que activan alarmas internas dentro del CI.

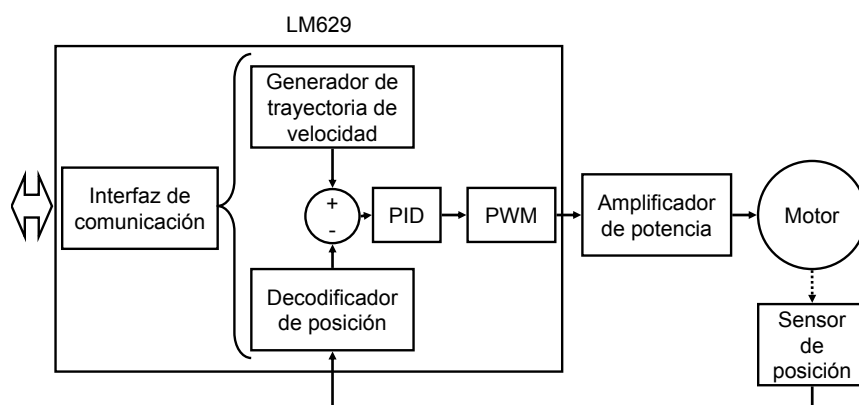


Figura 3.5: Esquema interno del controlador de movimiento LM629.

El problema surge cuando el controlador es operado en modo de control de velocidad y los niveles superiores de la jerarquía de control del manipulador dejan de funcionar correctamente. En esta situación cada actuador continúa su movimiento a la velocidad programada y sin límite de posición, ocasionando que el robot alcance posturas fuera de su espacio de trabajo que ponen en peligro la integridad del robot y de su entorno.

3.2.1.1. El problema en el control estándar de velocidad

En un esquema tradicional de control de un manipulador para el seguimiento de una trayectoria de posición de la herramienta, se emplea control de velocidad de los actuadores. Para ello, se calculan las consignas de velocidad a partir de la diferencia de posición entre dos puntos consecutivos de la trayectoria ($D_{segmento}$) y el período de tiempo entre estos puntos (T); es decir $V = \frac{D_{segmento}}{T}$. El período de tiempo suele estar determinado por lo que se denomina “base de tiempo”, y el controlador superior se suele implementar mediante un ordenador industrial de arquitectura PC (*Personal Computer*) que ejecuta un sistema operativo de tipo tiempo real estricto (*Hard Real-time*)³, como QNX. Esta configuración ofrece un contexto apro-

³En el área de las ciencias de computación, la computación en tiempo real (RTC) es el estudio de los sistemas *hardware* y *software* que están sujetos a restricciones de “tiempo real”; es decir, donde existen tiempos específicos de respuesta del sistema en presencia de eventos. Un sistema no-tiempo-real no tiene restricciones en el tiempo de respuesta ante eventos, sin importar si estas restricciones son deseables por el operador. Se dice que un sistema es de tipo tiempo-real si su naturaleza es tal que la validez de su operación no depende sólo de la validez de las operaciones lógicas que ejecuta sino también del tiempo en el que es ejecutado. Se asume, generalmente, que un sistema de tipo *hard real-time* (tiempo real estricto) es aquel donde la finalización de una operación después del límite de tiempo esperado se considera inservible, pudiendo ocasionar un fallo total del sistema. Por otro lado, un sistema de tipo *soft real-time* (tiempo real) es aquel que puede tolerar pequeñas desviaciones en el tiempo de respuesta de las operaciones, pudiendo ocasionar la disminución en la calidad del servicio que presta el sistema pero sin llevarlo necesariamente al fallo total.

piado para implementar bases de tiempo con variaciones acotadas sobre las cuales ejecutar aplicaciones de tiempo real, como los cálculos de trayectorias de los actuadores del robot.

Como ya se ha adelantado en la sección anterior, en caso de fallo general del controlador del robot, y dado que el control de bajo nivel está implementado con un *hardware* embebido e independiente del controlador superior, los actuadores pueden mantener la última consigna de velocidad recibida de manera indefinida, alcanzando posiciones fuera del espacio de trabajo seguro.

Existen en el mercado módulos de control de bajo nivel comerciales que llevan implementados sistemas de seguridad que minimizan los daños en estos casos de fallos, como sensores de límite de movimiento, programación de posiciones límite, etc. Sin embargo, en el módulo controlador empleado en nuestro sistema de exploración de terrenos solamente se encuentran disponibles las siguientes opciones:

- Parada del actuador en caso de incremento del error de posición por encima de un límite programado.
- Generación de señal de interrupción cuando la posición sea mayor que un punto (*breakpoint*) programado.

Ninguna de estas opciones detienen el movimiento del actuador de manera automática si la consigna es de velocidad y el sistema de control superior falla o deja de funcionar.

3.2.1.2. Control de movimiento PosVel

Como mecanismo de seguridad se ha diseñado un esquema de control (de nivel superior al lazo de control de actuadores) que permite la detención

del movimiento de los actuadores en caso de fallo en el controlador superior. Este esquema de control de movimiento de actuadores, denominado “Pos-Vel”, consiste básicamente en operar el módulo de control de movimiento de bajo nivel siempre mediante consignas de posición; de esta manera se establece un límite implícito de posición en cada punto de la trayectoria que el actuador debe seguir.

La Fig. 3.6 muestra el resultado de una simulación del seguimiento de trayectoria de posición mediante consignas de posición estándar. La posición del actuador al final de cada período alcanza la trayectoria de posición (véase la gráfica de posición al final de cada período de 5 segundos). En cada segmento de trayectoria se realiza una secuencia de arranque-parada (véase la gráfica de velocidad, al comenzar cada período el actuador presenta velocidad nula).

Bajo el esquema PosVel es necesario calcular, para cada segmento de la

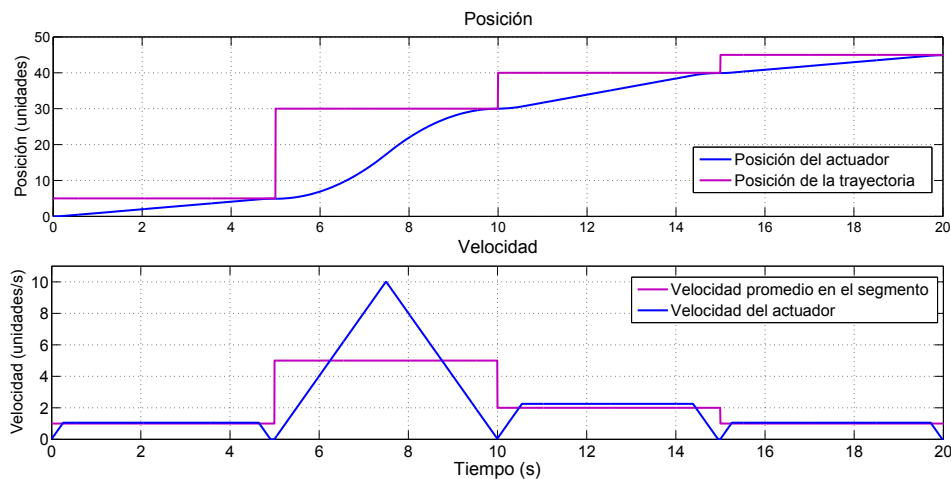


Figura 3.6: Seguimiento de trayectoria de posición con comandos de posición. Se muestran los perfiles de posición y velocidad del actuador.

trayectoria general, los parámetros del movimiento (posición final deseada, posición de parada, tiempo y velocidad de trayectoria) de manera que mediante consignas de posición el actuador alcance la posición de la trayectoria justo al final del período y con la velocidad deseada, de forma equivalente a como sucedería mediante control de velocidad estándar, pero además garantizando que el actuador se detenga en un tiempo finito si no se actualiza el comando recibido por el controlador del actuador.

Dada la posición actual del actuador, P_1 , la posición P_2 que debe alcanzar al final de período de tiempo T , y la aceleración constante a programada en el generador de trayectorias de velocidad, se obtienen las siguientes ecuaciones básicas (véase la Fig. 3.7):

$$\begin{aligned}
T &= t_F - t_0 = (t_1 - t_0) + (t_2 - t_1) + (t_F - t_2) \\
V_{SEGMENTO} &= \frac{P_2 - P_1}{T} \\
V_{MAX} &= at_1 \\
V_F = 0 &= V_{MAX} - a(t_F - t_2) \\
t_F - t_2 &= \frac{V_{MAX}}{a} = t_1 \\
P' - P_1 &= \frac{1}{2}at_1^2 = \frac{1}{2} \frac{V_{MAX}^2}{a} \\
P_2 - P'' &= \frac{1}{2}a(t_F - t_2)^2 = \frac{1}{2} \frac{V_{MAX}^2}{a} \\
P'' - P' &= V_{MAX}(t_2 - t_1)^2 = V_{MAX}(t_F - 2\frac{V_{MAX}}{a})
\end{aligned} \tag{3.1}$$

donde el desplazamiento total está dado por:

$$\begin{aligned}
P_2 - P_1 &= 2\left(\frac{1}{2} \frac{V_{MAX}^2}{a}\right) + V_{MAX}(t_F - 2\frac{V_{MAX}}{a}) \\
&= V_{MAX} t_F - \frac{V_{MAX}^2}{a}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Empleando (3.3) para hallar las raíces de un polinomio cuadrático en

V_{MAX} :

$$AV_{MAX}^2 + BV_{MAX} + C = 0$$

$$V_{MAX} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (3.3)$$

y reescribiendo (3.2), se tiene:

$$\left(\frac{1}{a}\right)V_{MAX}^2 - (t_F)V_{MAX} + (P_2 - P_1) = 0$$

$$\rightarrow V_{MAX} = \frac{t_F \pm \sqrt{t_F^2 - \frac{4}{a}(P_2 - P_1)}}{\frac{2}{a}} \quad (3.4)$$

De la ecuación (3.4) se obtienen dos valores de V_{MAX} . La solución correcta se selecciona según los siguientes criterios:

1. La solución debe ser real. Si se obtiene un resultado complejo (cuando

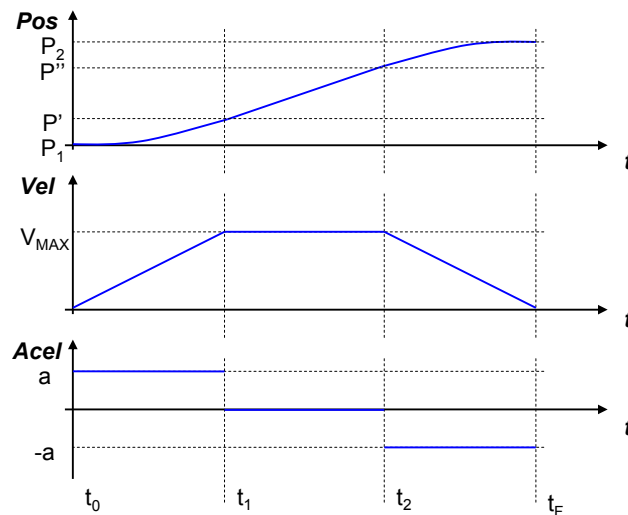


Figura 3.7: Parámetros del movimiento con perfil trapezoidal de velocidad.

$t_F^2 - \frac{4}{a}(P_2 - P_1) < 0$) entonces no existe solución real para V_{MAX} que permita al actuador alcanzar la posición deseada en el tiempo deseado dentro de un perfil trapezoidal de velocidad. Esta situación puede evitarse aumentando la aceleración permitida durante la trayectoria de velocidad.

2. La solución debe presentar el mismo signo que el del movimiento deseado. Por ejemplo, si $(P_2 - P_1) > 0$ entonces V_{MAX} debe ser > 0 .
3. Entre dos soluciones que cumplan las condiciones anteriores, la solución definitiva será la de menor magnitud.

En el esquema PosVel se implementa el perfil de velocidad similar al que ejecuta el CI de control de movimiento en modo de velocidad: la trayectoria de posición consta de un movimiento uniformemente acelerado seguido de un movimiento a velocidad constante (véase la Fig. 3.8) hasta alcanzar la posición final del segmento.

La novedad que aporta este procedimiento es que se configura el con-

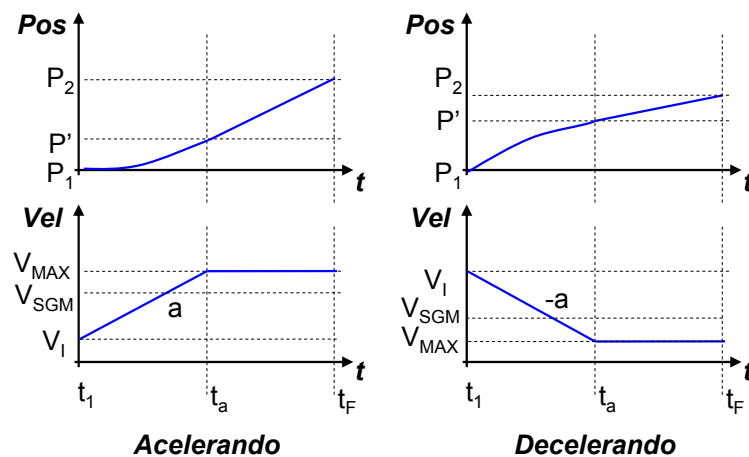


Figura 3.8: Trayectoria de velocidad y posición con movimiento uniformemente acelerado.

trolador con el modo de posición, y se programa una consigna de posición calculada a partir de la suma de la posición del segmento (posición de la trayectoria) más una distancia de parada $P_{PARADA} = P_F + D_{PARADA}$. De esta manera, si no se recibe una nueva consigna al comenzar el nuevo período, el controlador comenzará a decelerar el movimiento del actuador hasta detenerlo, alcanzando la posición de parada programada. Dado que la base de tiempo siempre presenta pequeñas variaciones de período, es conveniente programar un margen de error antes de que el controlador comience la parada del actuador. Esto se ha implementado asignando como consigna de posición la suma de la posición final del segmento más un múltiplo de la distancia de parada: $P_{PARADA} = P_F + nD_{PARADA}$.

El cálculo de la velocidad máxima V_{MAX} dentro de un segmento depende de los parámetros de este segmento a recorrer y no de la posición de parada. Para su cálculo, en la Fig. 3.8 se distinguen dos casos: la velocidad promedio del segmento es mayor que la velocidad inicial (requiriéndose una aceleración positiva); y el caso contrario, con la velocidad promedio del segmento menor que la velocidad inicial (requiriéndose una aceleración negativa o deceleración).

Para el primer caso, $V_{SGM} > V_I$, se tiene:

$$\begin{aligned}
 P_2 &= P_1 + V_{MAX}T - \frac{1}{2}a(t_a - t_1)^2 \\
 P_2 - P_1 &= D_S = V_{MAX}T - \frac{1}{2}a\left(\frac{V_{MAX} - V_I}{a}\right)^2 \\
 0 &= \left(-D_S - \frac{V_I^2}{2a}\right) + \left(T + \frac{V_I}{a}\right)V_{MAX} - \frac{1}{2a}V_{MAX}^2 \\
 A &= -\frac{1}{2a}; B = T + \frac{V_I}{a}; C = -D_S - \frac{V_I^2}{2a}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Para el segundo caso, $V_{SGM} < V_I$, se tiene:

$$\begin{aligned}
 P_2 - P_1 &= D_S = V_{MAX}T + \frac{1}{2}a\left(\frac{V_{MAX} - V_I}{a}\right)^2 \\
 0 &= \left(\frac{V_I^2}{2a} - D_S\right) + \left(T - \frac{V_I}{a}\right)V_{MAX} + \frac{1}{2a}V_{MAX}^2 \\
 A &= \frac{1}{2a}; \quad B = T - \frac{V_I}{a}; \quad C = \frac{V_I^2}{2a} - D_S
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Nuevamente, para obtener el valor de V_{MAX} , se emplea la ecuación (3.3), donde se aplica el mismo criterio empleado en (3.4) para determinar el resultado adecuado.

La Distancia de parada para un movimiento uniformemente decelerado está dada por:

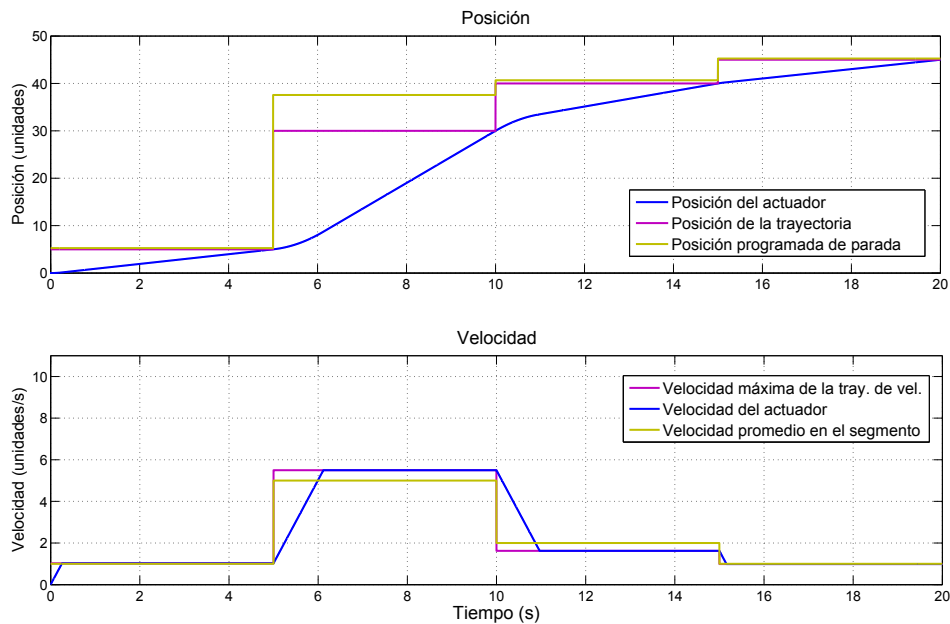


Figura 3.9: Seguimiento de trayectoria de posición con comandos de posición que imitan comandos de velocidad (control *PosVel*).

$$D_{PARADA} = \text{signo}(V) \frac{V^2}{2|a|} \quad (3.7)$$

Según (3.7), cuanto mayor sea la velocidad, mayor será la distancia de parada, como puede observarse en la gráfica de posiciones de la Fig. 3.9. Esta figura muestra cómo la posición programada de parada en cada segmento está más alejada que la posición de la trayectoria, y cuanto mayor sea la distancia a recorrer en el segmento, mayor es la diferencia entre la posición de la trayectoria y la posición programada de parada. En la gráfica de velocidad se observa cómo se “enlaza” la trayectoria de velocidad de un segmento con la trayectoria de velocidad del siguiente de manera simi-

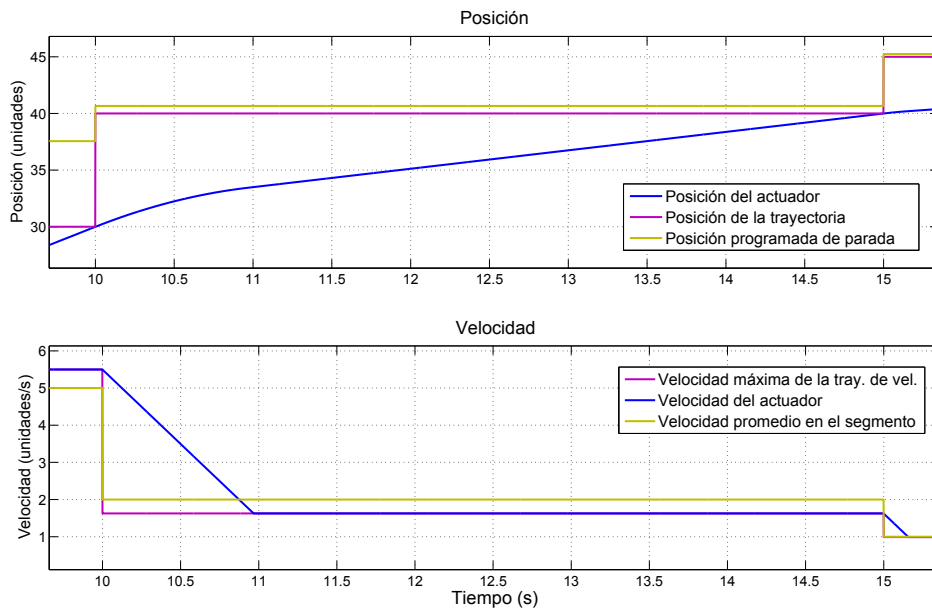


Figura 3.10: Detalle de la gráfica de control PosVel sin paradas. Se observa cómo en la trayectoria de posición del actuador pasa por los puntos deseados de la trayectoria nominal.

lar a como ocurre mediante control estándar por velocidad. La Fig. 3.10 presenta una ampliación de la gráfica anterior, en el segmento con tiempos $t \in [10 \dots 15]s$. Se observa como la posición final del actuador (línea azul) al final del segmento anterior y al final del segmento mostrado coincide con la posición deseada (línea morada).

3.2.2. Control de trayectorias del brazo manipulador

Los algoritmos de control de la trayectoria de la herramienta del brazo manipulador implementan las siguientes funciones generales:

- Modelos cinemático directo e inverso del brazo manipulador.
- Algoritmos de posicionamiento y rotación de la herramienta del brazo manipulador en el sistema de coordenadas cartesiano del brazo.
- Algoritmos de generación de puntos de trayectorias rectas cartesianas de la herramienta del brazo manipulador.
- Algoritmos de movimiento de la herramienta con perfil de velocidad trapezoidal en 3D.

Empleando el método de Denavit-Hartenberg⁴ (D-H) (Spong y Vidyasagar, 1989; Sciavicco y Siciliano, 2000) para la descripción cinemática del brazo manipulador, se establece una asignación de sistemas de referencia (S_i) a cada uno de los eslabones que conforman la cadena cinemática mostrada en la Fig. 3.11 que permite construir unas matrices de transformación homogénea dependientes de los 4 parámetros que definen la estructura de los eslabones del brazo articulado:

⁴Denavit-Hartenberg propusieron en 1955 un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas (S_i) ligado a cada eslabón i de una cadena articulada, pudiéndose determinar de manera sistemática las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa.

- a_i Longitud del eslabón; distancia entre O_i y $O_{i'}$.
- α_i Giro del eslabón; ángulo que forman Z_{i-1} y Z_i alrededor de X_i en sentido antihorario.
- d_i Distancia entre cuerpos contiguos; coordenada de $O_{i'}$ a lo largo de Z_{i-1} .
- θ_i Ángulo entre cuerpos contiguos; ángulo que forman X_{i-1} y X_i alrededor de Z_{i-1} en sentido antihorario.

La Tabla 3.1 muestra los parámetros D-H del brazo manipulador.

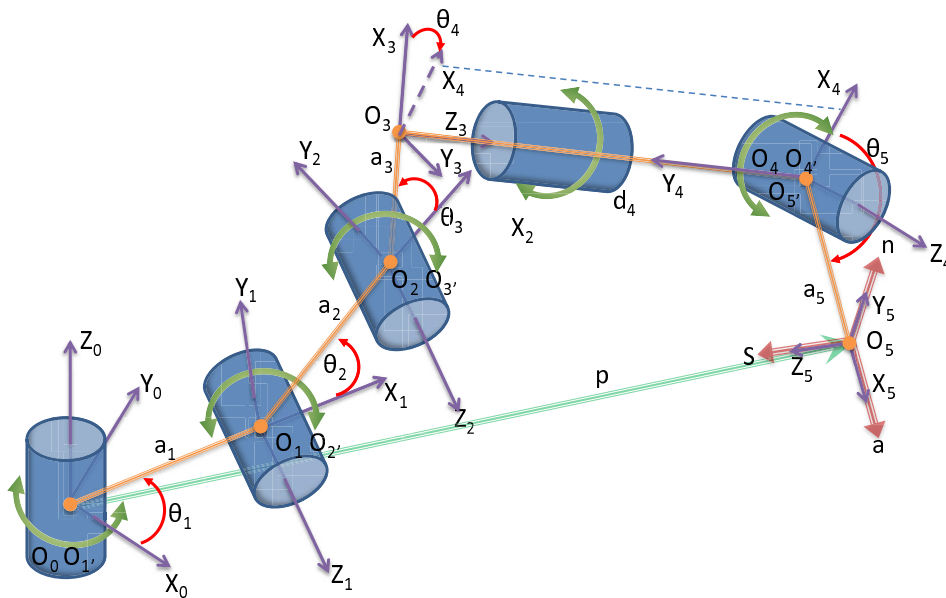


Figura 3.11: Descripción de la estructura del brazo manipulador según la notación Denavit-Hartenberg.

Tabla 3.1: Parámetros de los eslabones del brazo manipulador, según el criterio de Denavit-Hartenberg.

Eslabón (i)	a_i (mm)	α_i (rad)	d_i (mm)	θ_i (rad)
1	206	$\pi/2$	0	θ_1
2	375	0	0	θ_2
3	100	$\pi/2$	0	θ_3
4	0	$-\pi/2$	361	θ_4
5	135	0	0	θ_5

3.2.2.1. Modelo cinemático directo

El cálculo de la cinemática directa permite hallar los vectores de posición y orientación del extremo libre del brazo manipulador, en coordenadas cartesianas con respecto a la base del brazo, dados los ángulos de las articulaciones. La matriz de transformación homogénea D-H presenta la forma mostrada en la ecuación (3.8),

$${}^{i-1}A_i = \begin{pmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

siendo $C\theta$ y $S\theta$ abreviaturas de $\cos(\theta)$ y $\sin(\theta)$, respectivamente.

Para obtener las matriz de transformación homogénea de cada articulación basta con sustituir en (3.8) los valores del eslabón i correspondientes presentados en la Tabla 3.1.

La transformación desde el extremo del brazo hasta su base está dada por la multiplicación matricial de las matrices individuales de cada articulación. Esto es:

$$T = {}^0A_5 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 \quad (3.9)$$

De la matriz de transformación T se puede extraer directamente la información de posición y rotación del extremo del brazo, como se muestra en la ecuación (3.10),

$$T = \begin{pmatrix} n'_x & s'_x & a'_x & p_x \\ n'_y & s'_y & a'_y & p_y \\ n'_z & s'_z & a'_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

siendo $P = (p_x, p_y, p_z)^T$ el vector posición del extremo del brazo, y $N' = (n'_x, n'_y, n'_z)^T$, $S' = (s'_x, s'_y, s'_z)^T$ y $A' = (a'_x, a'_y, a'_z)^T$ los vectores normal, deslizamiento y aproximación, respectivamente, que definen la orientación.

El sistema de referencia S_5 no coincide con el sistema de referencia convencional del elemento terminal, siendo necesario establecer una transformación adicional, donde la tríada (N', S', A') que se obtiene de la matriz T equivale a (a, n, s) , dando como resultado la representación típica de la orientación del elemento terminal de un manipulador.

Las ecuaciones de la posición del elemento final del brazo manipulador quedan descritas por

$$\begin{aligned} p_x &= C_1[a_1 + a_2C_2 + a_3C_{23} + d_4S_{23} + a_5(C_{23}C_4C_5 - S_{23}S_5)] + a_5S_1S_4C_5 \\ p_y &= S_1[a_1 + a_2C_2 + a_3C_{23} + d_4S_{23} + a_5(C_{23}C_4C_5 - S_{23}S_5)] - a_5C_1C_4C_5 \\ p_z &= a_2S_2 + a_3S_{23} - d_4C_{23} + a_5(S_{23}C_4C_5 + C_{23}S_5) \end{aligned} \quad (3.11)$$

y las de rotación por

$$\begin{cases}
a_x = C_1(C_{23}C_4C_5 - S_{23}S_5) + S_1S_4C_5 \\
a_y = S_1(C_{23}C_4C_5 - S_{23}S_5) - C_1S_4C_5 \\
a_z = S_{23}C_4C_5 + C_{23}C_5 \\
n_x = -C_1(C_{23}C_4C_5 - S_{23}S_5) - S_1S_4C_5 \\
n_y = -S_1(C_{23}C_4C_5 - S_{23}S_5) + C_1S_4C_5 \\
n_z = -S_{23}C_4C_5 + C_{23}C_5 \\
s_x = -C_1C_{23}S_4 + S_1C_4 \\
s_y = -S_1C_{23}S_4 - C_1C_4 \\
s_z = -S_{23}S_4
\end{cases} \quad (3.12)$$

donde $C_n = \cos(\theta_n)$, $S_n = \sin(\theta_n)$, $C_{mn} = \cos(\theta_m + \theta_n)$, y $S_{mn} = \sin(\theta_m + \theta_n)$.

3.2.2.2. Modelo cinemático inverso

Determinar las coordenadas articulares a partir de una posición y rotación del elemento final del brazo se denomina cálculo cinemático inverso. Como ya se ha mencionado, mediante este cálculo es posible determinar los valores de los ángulos de las articulaciones del brazo dados los puntos de la trayectoria del extremo, obteniéndose así una trayectoria de posición para cada articulación. A diferencia del cálculo cinemático directo, el inverso no siempre presenta solución única; es decir, pueden existir múltiples soluciones en coordenadas articulares para un mismo punto del extremo del brazo.

En el caso del brazo manipulador que nos ocupa, existen ciertas condiciones del diseño mecánico que facilitan la labor del desarrollo del cálculo inverso. La subcadena de eslabones del 1 al 4 configuran un brazo articulado que se mueve sobre un mismo plano vertical que gira en torno al eje Z_0 con ángulo θ_1 . Empleando cálculos geométricos se puede determinar las relaciones entre un vector posición con origen en O_0 (que coincide con $O_{1'}$) y

extremo en O_4 con los parámetros de la subcadena del brazo. Para obtener la solución final \vec{p} hay que sumar el vector posición $\overrightarrow{p_{(1,4)}}$ con el de origen en el extremo del vector anterior hasta el extremo del brazo $\overrightarrow{p_{(4,5)}}$, como se muestra en la Fig. 3.12.

$$\begin{aligned} \vec{p} &= \overrightarrow{p_{(1,4)}} + \overrightarrow{p_{(4,5)}} \\ &= \overrightarrow{p_{(1,4)}} + a_5 \vec{a} \\ \rightarrow \begin{pmatrix} p_{(1,4)x} \\ p_{(1,4)y} \\ p_{(1,4)z} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} p_x - a_5 a_x \\ p_y - a_5 a_y \\ p_z - a_5 a_z \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.13)$$

La posición $\overrightarrow{p_{(1,4)}}$ depende solamente de las variables articulares θ_1 , θ_2 y θ_3 , donde:

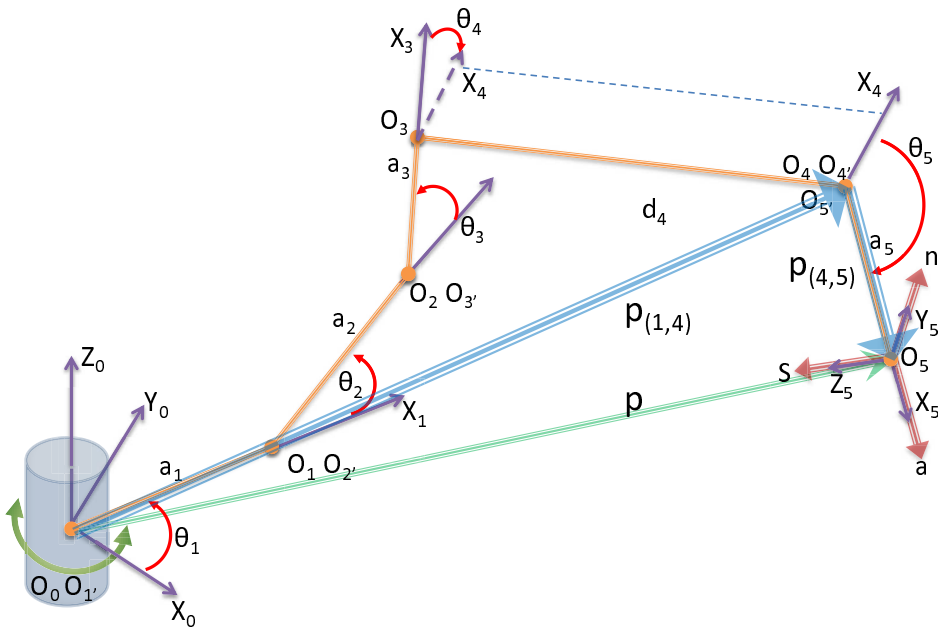


Figura 3.12: Descomposición del vector de posición del elemento final del brazo.

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_{(1,4)y}}{p_{(1,4)x}}\right) \quad (3.14)$$

Para todos los cálculos de $\arctan(Y/X)$ en esta sección, se emplea la función $\text{atan2}(Y, X)$, que toma en cuenta el signo individual de las variables X e Y (cuadrante de entrada) para determinar el signo del ángulo de salida, por lo que la solución obtenida mediante ésta función es única.

La Fig. 3.13 muestra al vector $p_{1,4}$ dentro del volumen de trabajo del brazo y la Fig. 3.14 muestra el detalle de este vector y las relaciones de ángulos que lo describen.

Mediante teorema del coseno aplicado al triángulo ABC de la Fig. 3.14 se obtiene:

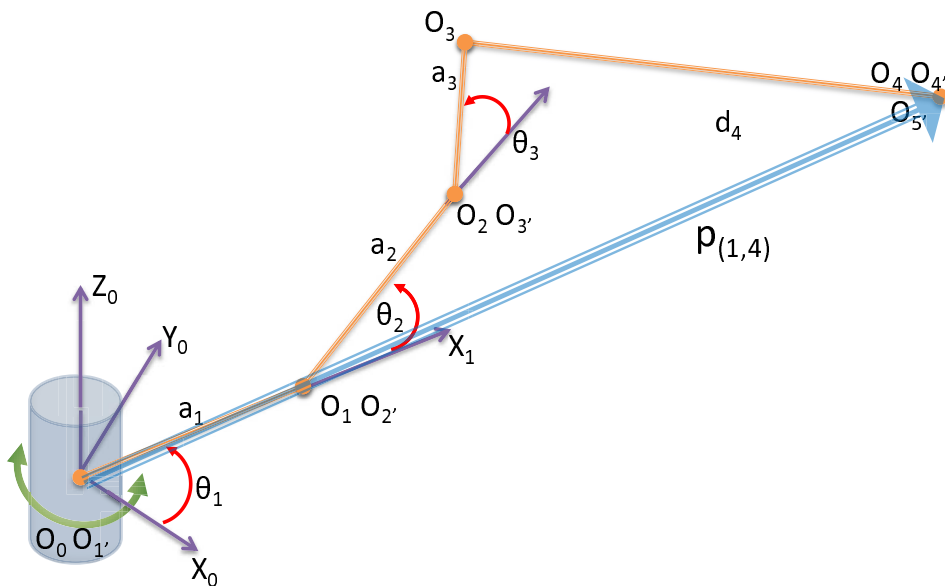


Figura 3.13: Vista 3D del vector de posición $p_{1,4}$.

$$p_{(1,4)x}^2 + p_{(1,4)y}^2 + p_{(1,4)z}^2 + a_1^2 - 2a_1\sqrt{p_{(1,4)x}^2 + p_{(1,4)y}^2} = a_2^2 + L_4^2 + 2a_2L_4\cos(\beta_2) \quad (3.15)$$

Substituyendo la relación $L_4^2 = a_3^2 + d_4^2$ en (3.15) se tiene:

$$\cos(\beta_2) = \frac{p_{(1,4)x}^2 + p_{(1,4)y}^2 + p_{(1,4)z}^2 - 2a_1\sqrt{p_{(1,4)x}^2 + p_{(1,4)y}^2} + a_1^2 - a_2^2 - a_3^2 - d_4^2}{2a_1\sqrt{a_3^2 + d_4^2}} \quad (3.16)$$

Dado que $\sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha) = 1$, se tiene:

$$\beta_2 = \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2(\beta_2)}}{\cos^2(\beta_2)}\right) \quad (3.17)$$

De la figura Fig. 3.14 se deduce que $\theta_3 + \beta_2 = \pi/2 - \arctan(a_3/d_4)$, obteniéndose la siguiente relación para θ_3 :

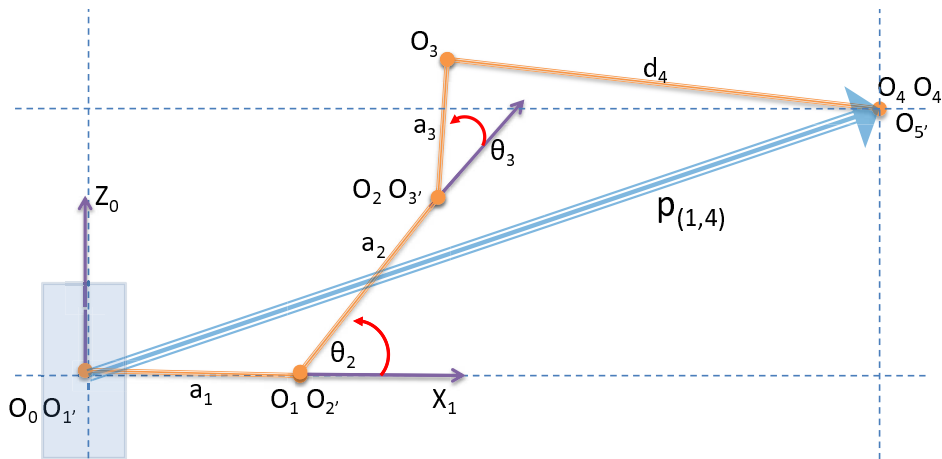


Figura 3.14: Vista del vector de posición $p_{1,4}$ sobre el plano.

$$\theta_3 = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{a_3}{d_4}\right) - \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2(\beta_2)}}{\cos^2(\beta_2)}\right) \quad (3.18)$$

De la Fig. 3.14 también se deduce que $\theta_2 = \alpha_1 + \alpha_2$, donde los ángulos α_k están dados por:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \arctan\left(\frac{(\overline{DC})}{(\overline{AD})}\right) = \arctan\left(\frac{\text{sen}(\beta_2)\sqrt{a_3^2 + d_4^2}}{a_2 + \cos(\beta_2)\sqrt{a_3^2 + d_4^2}}\right) \\ \alpha_2 &= \arctan\left(\frac{(\overline{EC})}{(\overline{AE})}\right) = \arctan\left(\frac{P_{(1,4)z}}{\sqrt{P_{(1,4)x}^2 + P_{(1,4)y}^2} - a_1}\right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Para obtener las variables θ_4 y θ_5 se empleará un método algebraico, igualando elementos de matrices equivalentes. De las relaciones de matrices homogéneas se obtiene:

$${}^1T_5 = {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 = ({}^0A_1)^{-1} T \quad (3.20)$$

y de las ecuaciones (3.8) y (3.9) se obtiene:

$${}^1T_5 = \begin{pmatrix} C_{23}C_4C_5 - S_{23}S_5 & -C_{23}C_4S_5 - S_{23}C_5 & -C_{23}S_4 & a_5(C_{23}C_4C_5 - S_{23}S_5) + S_{23}d_4 + a_3C_{23} + a_2C_2 \\ S_{23}C_4C_5 + C_{23}S_5 & -S_{23}C_4S_5 + S_{23}C_5 & -S_{23}S_4 & a_5(S_{23}C_4C_5 + C_{23}S_5) - C_{23}d_4 + a_3S_{23} + a_2S_2 \\ S_4C_5 & -S_4C_5 & C_4 & a_5S_4C_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

De nuevo, $C_n = \cos(\theta_n)$, $S_n = \text{sen}(\theta_n)$, $C_{mn} = \cos(\theta_m + \theta_n)$, y $S_{mn} = \text{sen}(\theta_m + \theta_n)$.

El miembro derecho de la ecuación (3.20) está dado por:

$$({}^0A_1)^{-1}T = \begin{pmatrix} C_1a_x + S_1a_y & C_1n_x + S_1n_y & C_1s_x + S_1s_y & C_1p_x + S_1p_y - a_1 \\ a_z & n_z & s_z & p_z \\ S_1a_x + C_1a_y & S_1n_x - C_1n_y & S_1s_x - C_1s_y & S_1p_x - C_1p_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

Es posible igualar cualquier par de elementos equivalentes a ambos lados de la ecuación, pero es conveniente seleccionar pares que involucren a las variables que nos interesa. Igualando entre sí los elementos en la posición (1, 4) de las matrices a ambos extremos de la igualdad en (3.20) y también los elementos (1, 3) (elementos que contienen información de la posición final \vec{p} y de la orientación dada por el vector \vec{a}), se tiene:

$$a_5(C_{23}C_4C_5 - S_{23}S_5) + \quad (3.23)$$

$$S_{23}d_4 + a_3C_{23} + a_2C_2 = C_1p_x + S_1p_y - a_1$$

$$S_1a_x + C_1a_y = S_4C_5 \quad (3.24)$$

Reescribiendo (3.23, 3.24) se tiene:

$$C_4 = \frac{(C_1p_x + S_1p_y - a_1 - S_{23}d_4 - a_3C_{23} - a_2C_2) \frac{1}{a_5} + S_{23}S_5}{C_{23}C_5} \quad (3.25)$$

$$S_4 = \frac{S_1a_x + C_1a_y}{C_5} \quad (3.26)$$

de donde se obtiene θ_4 :

$$\theta_4 = \arctan\left(\frac{S_4}{C_4}\right) \quad (3.27)$$

siempre que C_{23} y C_5 sean no nulos.

Nuevamente igualando términos, ahora los de las posiciones (1, 1) y (2, 1) respectivamente, que contienen información de los ángulos θ_2 y θ_3 y de la orientación final (vector \vec{a}), se tiene:

$$C_{23}C_4C_5 - S_{23}S_5 = C_1a_x + S_1a_y \quad (3.28)$$

$$S_{23}C_4C_5 + C_{23}S_5 = a_z \quad (3.29)$$

y reescribiendo se tiene:

$$S_5 = \frac{C_{23}C_4C_5 - C_1a_x - S_1a_y}{S_{23}} \quad (3.30)$$

$$C_4 = \frac{a_z - C_{23}S_5}{S_{23}C_5} \quad (3.31)$$

Substituyendo (3.31) en (3.30) se tiene:

$$S_5 = \left(\frac{C_{23}(a_z - C_{23}S_5)C_5}{S_{23}C_5} - C_1a_x - S_1a_y \right) \frac{1}{S_{23}} \quad (3.32)$$

y desarrollando (3.32) se obtiene:

$$S_5 = C_{23}a_z - S_{23}(C_1a_x + S_1a_y) \quad (3.33)$$

Finalmente, dado que $C_5 = \sqrt{1 - S_5^2}$, θ_5 se halla de la siguiente manera:

$$\theta_5 = \arctan \left(\frac{S_5}{\text{signo}(a_z)C_5} \right) \quad (3.34)$$

para valores de S_5 no nulos. El factor $\text{signo}(a_z)$ dado que en la relación empleada para hallar C_5 se pierde el signo del coseno del ángulo, necesario para la correcta determinación del $\arctan(S_5/C_5)$. De la observación de la

estructura cinemática del brazo, se obtiene que el signo de C_5 coincide con la componente z del vector \vec{a} del extremo del brazo; es decir, cuando el extremo apunta en dirección del hemisferio inferior del volumen de trabajo de la última articulación ($a_z < 0$), el $\cos(\theta_5)$ es negativo.

3.3. Cabeza sensora

Como ya se mencionó en la introducción, la cabeza sensora consiste en un detector de minas y un conjunto de sensores de medición del terreno que sirven de apoyo en la tarea de posar la cabeza sobre la superficie del terreno y de evitar contacto con los obstáculos en su trayectoria durante el barrido.

Como detector de minas se emplea el sistema Schiebel AN-19/2 (véase la Fig. 3.15), utilizado por el ejército de EE.UU. y varios países de la OTAN en tareas de localización de minas superficiales con bajo contenido metálico (Schiebel, 2006). Este detector ha sido diseñado para que un operario lo mueva sobre el terreno a inspeccionar mientras escucha el sonido emitido por un altavoz conectado al detector. En presencia de metales, el detector

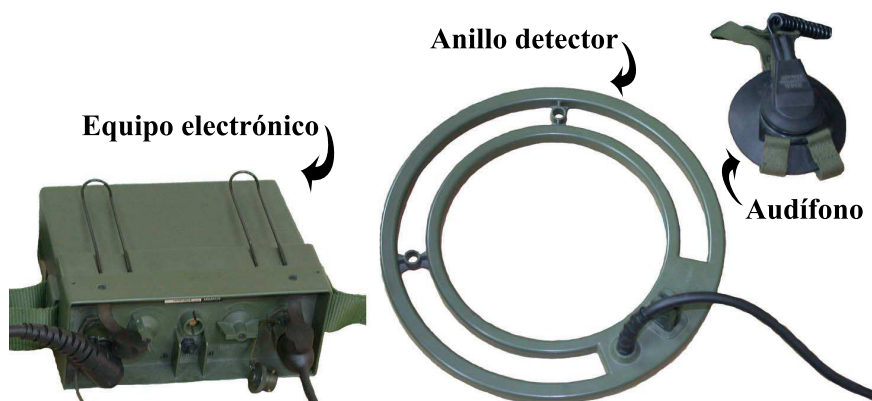


Figura 3.15: Módulos del detector de minas Schiebel AN-19/2.

genera una frecuencia audible que cambia de tono e intensidad en función de la cantidad y proximidad del metal detectado.

Para la integración de este detector con el sistema de exploración se ha empleado un módulo electrónico de acondicionamiento de señal conectado a la salida de audio del detector, actuando como interfaz entre el detector y el controlador del sistema de exploración. Este módulo ha sido diseñado como parte de un trabajo previo (Alonso, 2005) de caracterización del comportamiento del detector de metales. En ese trabajo se propone un diseño electrónico de conversión de la señal auditiva de la salida del detector a una señal digital. A partir de las características de éste módulo (que hemos determinado experimentalmente) se han establecido algunos parámetros del controlador de barrido en el sistema explorador de terrenos; entre ellos, la velocidad de desplazamiento máxima de la cabeza sensora (20 mm/s) y el algoritmo de registro de datos de detección de minas.

Como ya se mencionó anteriormente, es tendencia actual la fusión de tecnologías de sensores de minas para aumentar la capacidad y velocidad de detección, disminuir la cantidad de falsos positivos, y en definitiva aumentar la eficiencia en la detección de minas. Sin embargo, el presente trabajo se enfoca específicamente en el diseño de las técnicas de exploración de terrenos y no en los sensores de minas.

Puesto que la cabeza sensora debe instalarse en el extremo del brazo manipulador, es conveniente que sea ligera y que requiera pocos cables de interconexión con el robot móvil. Esto implica minimizar el número de sensores requerido. Con estos requerimientos básicos se plantearon y estudiaron diferentes diseños de cabeza sensora, dos de los cuales se estudian con detenimiento en las siguientes secciones.

Los primeros prototipos de cabeza sensora (previos a este trabajo de tesis) sirvieron como base para el diseño de los prototipos presentados en

este trabajo. Estos prototipos previos entregaban información simple de la distancia al terreno y del contacto con obstáculos empleando sensores de tipo puntuales.

3.3.1. Prototipo previo de cabeza sensora

Este prototipo consistía en un conjunto de sensores infrarrojos puntuales de proximidad con salida binaria que activaban su salida cuando el obstáculo se encontraba dentro del umbral de distancia programada en el sensor. Combinando dos sensores de este tipo, configurados para detectar rangos distintos y apuntando en la misma dirección, se obtiene un conjunto sensor que entrega un código binario indicando la zona del rango de detección en la que se encuentra el obstáculo. Dado un conjunto con los sensores A y B, y programados con distancias de detección $A < B$, se tiene:

A=0, B=0 Obstáculo no detectado.

A=0, B=1 Obstáculo detectado a una distancia entre los rangos de los sensores A y B.

A=1, B=1 Obstáculo detectado a una distancia menor que ambos rangos de sensores.

Tres pares de estos sensores se dispusieron alrededor de la cabeza sensora formando un triángulo (véase la Fig. 3.16), siendo posible determinar una estimación de los parámetros del plano bajo la cabeza sensora.

Para la detección de obstáculos se empleó un conjunto de sensores *Flex* (véase sección 3.3.2.1), dispuestos a modo de “bigote de gato” alrededor de la cabeza sensora, como se muestra en la Fig. 3.16, que actuaban como sensor de contacto mediante la flexión debido al contacto con un obstáculo.

A partir de este prototipo se establecieron tres requerimientos básicos de la cabeza sensora para la exploración de terrenos:

Detección de obstáculos Detección de obstáculos a lo largo de un perímetro continuo, dado que la detección mediante sensores discretos y puntuales requiere una cantidad elevada de estos sensores para cubrir el perímetro con la resolución espacial deseada.

Resolución de medición de distancia Medición de distancia con resolución suficiente para poder emplear esta información en la construcción de mapas de elevación del terreno más precisos.

Cantidad de puntos medidos del terreno Medición de la mayor cantidad posible de puntos de la superficie del terreno, para poder mejorar la estimación de los parámetros de la superficie.

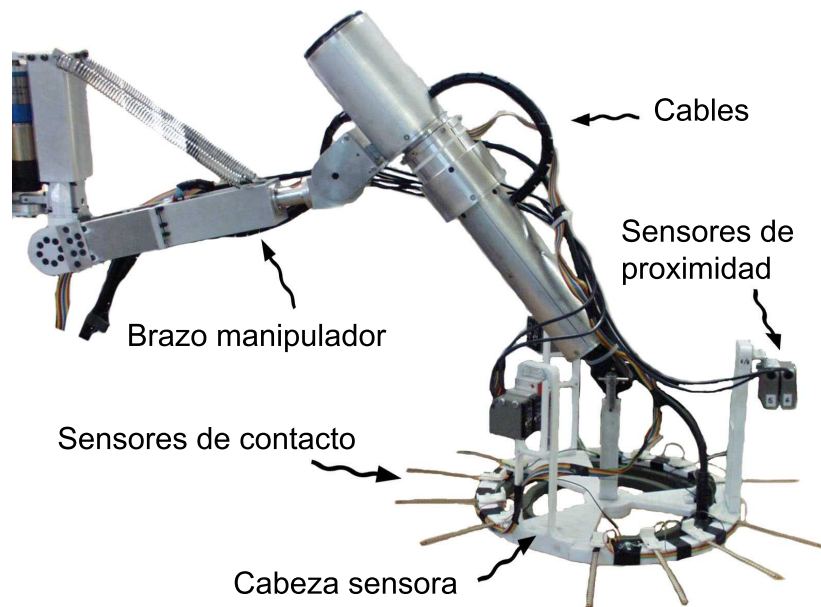


Figura 3.16: Prototipo inicial del brazo manipulador y de la cabeza sensora.

3.3.2. Prototipo de sensor de contacto con perímetro continuo basado en sensores *Flex*

Con base en los resultados del prototipo anterior de cabeza sensora, y dado que era prioritario mejorar la capacidad de detección de obstáculos, se diseñó un sistema sensor capaz de detectar el contacto contra un obstáculo en todo el perímetro de la cabeza y la dirección del movimiento sobre el plano de desplazamiento del móvil cuando este evento de contacto ocurre.

Este sistema de detección de contacto consiste en un “anillo” que rodea la cabeza sensora y que se acopla mecánicamente a ésta mediante muelles (Ponticelli y González de Santos, 2008). Cuando ocurre un contacto con algún obstáculo, se mide el desplazamiento del anillo mediante un conjunto de sensores *Flex*, de los cuales se extrae una estimación de:

- Desplazamiento relativo del anillo.
- Zona del anillo donde ocurrió el contacto.

Existen otras soluciones que emplean conjuntos de interruptores mecánicos o *pushbuttons* (Borenstein y Koren, 1988) o medidores de distancia (infrarrojos, láser, ultrasonidos, etc.) (Benet et al., 2002), pero la cantidad de sensores requeridos para cubrir el perímetro de detección puede ser elevada, puesto que se trata de sensores puntuales (que miden un punto y no una zona amplia). Esto trae como consecuencia el requerimiento de un mayor número de sensores y sus respectivas conexiones al sistema controlador.

Con el esquema de detección diseñado para este prototipo, se emplean únicamente 4 sensores *Flex* para lograr la detección de contacto en todo el perímetro de la cabeza sensora y la determinación del sentido del movimiento. Mediante un sistema de adquisición y procesamiento electrónico de señal embebido en la cabeza sensora se procesan las mediciones de los sen-

sores con un bloque de inferencia de lógica difusa (*Fuzzy Logic*), entregando como resultado un valor que indica la presencia de un evento de contacto y la zona del anillo donde ocurrió.

La estructura del sensor de contacto consta de un anillo móvil que rodea la cabeza sensora, conectado a ésta mediante un conjunto de muelles, y 4 sensores *Flex* que miden el desplazamiento relativo del anillo móvil con respecto a la cabeza. A partir de éste desplazamiento relativo medido por cada sensor se calcula la dirección del movimiento del anillo.

3.3.2.1. El sensor *Flex*

Es una resistencia eléctrica variable construida sobre una cinta plástica alargada y flexible, que aumenta su resistencia eléctrica cuando se flexiona en un sentido, no presentando variaciones importantes en la resistencia nominal cuando se flexiona en el otro sentido.

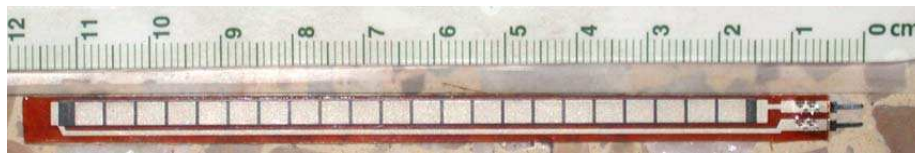
La curva característica de resistencia en función de la flexión se muestra en la Fig. 3.17(b), y en la Fig. 3.17(c) se muestra al sensor flexionado con diferentes ángulos. El ángulo de flexión se mide entre las rectas tangentes a los extremos de la cinta.

3.3.2.2. Configuración y ensamblaje del sensor de contacto

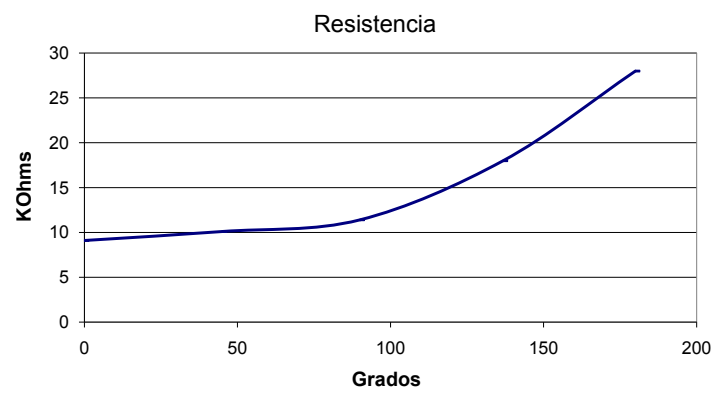
La estructura del prototipo experimental consiste en una plataforma móvil plástica, circular, delgada, plana y hueca, que se desliza sobre otra plataforma de similares características y fijada a la cabeza sensora, como se muestra en la Fig. 3.18.

Cuatro sensores *Flex*, marcados con la letra 'A' en la Fig. 3.18, se fijan entre las dos plataformas, con una separación angular de 45 grados. Sola-

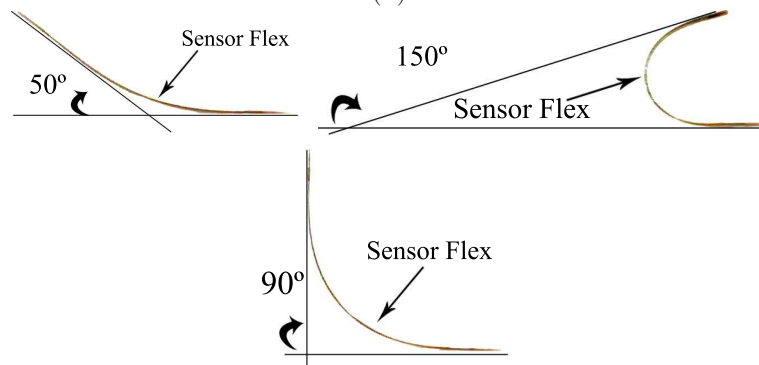
mente los extremos de los sensores *Flex* están fijos a las plataformas. Con la plataforma deslizante en reposo, la flexión de los sensores *Flex* es de apro-



(a)



(b)



(c)

Figura 3.17: (a) Foto de un sensor *Flex*. (b) Característica de resistencia típica de un sensor *Flex* (Resistencia eléctrica en función de Grados de flexión). (c) Sensor *Flex* con diferentes grados de flexión.

ximadamente 150 grados⁵. La Fig. 3.19 muestra una vista superior y lateral del prototipo de sensor de contacto ensamblado. Con esta configuración se logra medir el desplazamiento relativo (y con signo), de una plataforma con respecto a la otra.

Esta implementación simple del sensor de contacto, con sus plataformas deslizantes y conectadas mediante muelles, muestra ciertas no-linealidades como la histéresis mecánica debida a la fricción entre plataformas, y el acoplamiento entre las mediciones de los sensores debido a la libertad de rotación relativa de las plataformas.

La histéresis mecánica se debe en este caso a la relación entre la fricción

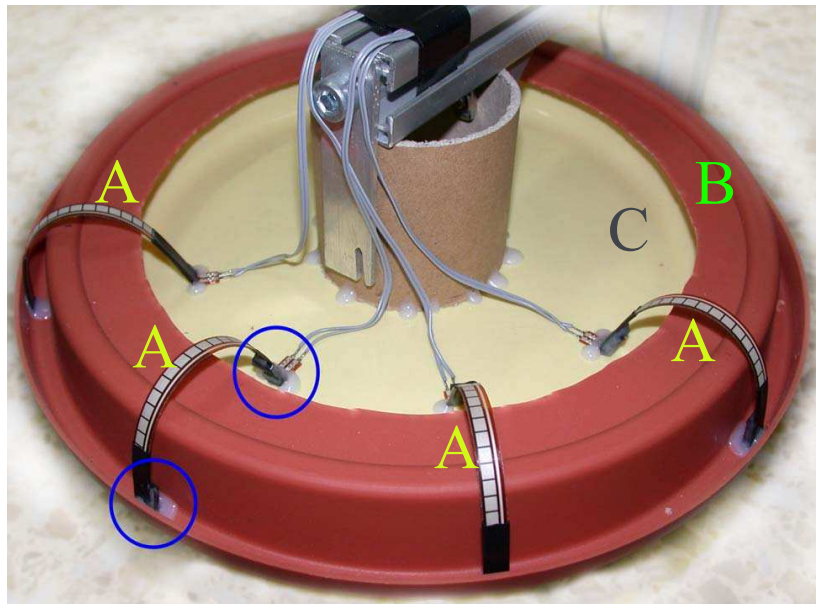
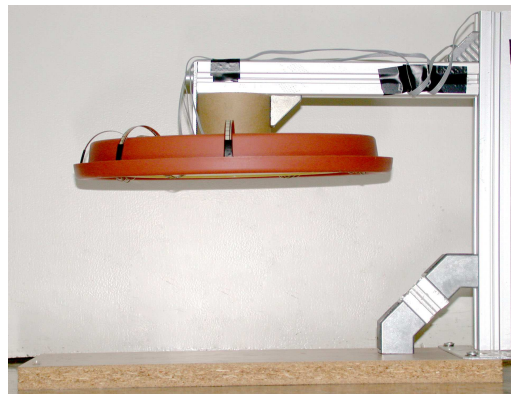


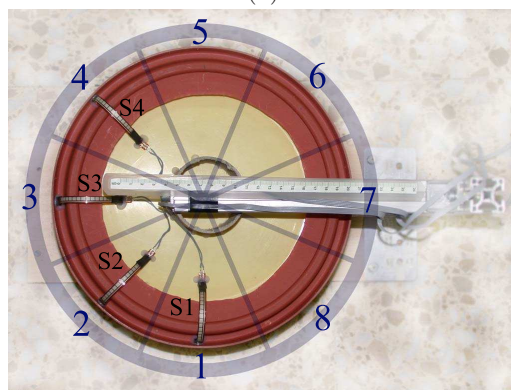
Figura 3.18: Prototipo de sensor de contacto. A) Sensores *Flex*, B) Plataforma deslizante, C) Plataforma fija. Los puntos de anclaje de los sensores *Flex* están denotados en la imagen por círculos azules.

⁵Ángulo que forman las dos rectas tangentes a los extremos del sensor *Flex*, como se muestra en la Fig. 3.17(c).

de las superficies deslizantes y la constante relativamente baja de los muelles que restituyen la plataforma móvil a su posición central después de un contacto. Emplear muelles más rígidos implica reducir la histéresis pero también implica mayor fuerza de reacción durante el contacto, y por lo tanto mayor fuerza de reacción al impacto transmitida a la cabeza sensora y al brazo manipulador.



(a)



(b)

Figura 3.19: Vistas del prototipo de sensor de contacto. (a) Vista lateral, (b) Vista superior. Se observa en esta vista la plataforma móvil (marrón), la plataforma fija (amarillo), los 4 sensores Flex (S1, S2, S3 y S4) y las 8 zonas de detección de contacto (números 1 a 8), donde los límites entre zonas están denotadas con líneas radiales.

La diferencia entre los radios de las superficies (la fija y la deslizante) debe permitir un desplazamiento relativo tal que se mantenga bajo el acoplamiento entre sensores y al mismo tiempo se obtenga el mayor rango de lectura posible de éstos. El acoplamiento ocurre cuando se da un desplazamiento en la dirección de un sensor *Flex*, ocasionando que se flexione normalmente, y que el sensor *Flex* ubicado ortogonalmente se torsione. Si esta torsión es pequeña, la medición del sensor experimenta un cambio relativamente pequeño. Un movimiento de torsión sobre un sensor *Flex* puede ocasionar una variación de salida difícil de diferenciar de una variación ocasionada por una flexión normal.

Después de varias pruebas preliminares con este ensamblaje se observó que los datos de los sensores podían ser clasificados de forma empírica en 8 zonas de contacto, dado que los datos de cada sensor *Flex* permitían identificar fácilmente dos tipos de eventos: compresión del sensor *Flex* y elongación del sensor *Flex*, según el sentido en el que había ocurrido el desplazamiento por contacto.

3.3.2.3. Módulo de adquisición de datos analógicos

Se ha diseñado un módulo electrónico de adquisición de datos analógicos basado en un microcontrolador de bajo costo⁶ con capacidad interna de conversión analógico a digital (ADC). Este ADC ofrece una resolución de 10 bits y un multiplexor analógico de 8 canales, de los cuales se emplean 4 para adquirir los voltajes de salida de los sensores *Flex*. Cada sensor está conectado en una configuración simple de división de voltaje, cuya salida se conecta a una entrada del multiplexor analógico.

La Fig. 3.20 muestra un diagrama de bloques simplificado del módulo

⁶Microcontrolador Microchip de 8-bits PIC18f452.

electrónico. Los 4 sensores *Flex* se conectan a las entradas analógicas del microcontrolador. Los datos adquiridos se inyectan a un filtro digital pasabajos de primer orden, reduciendo el ruido de cuantización introducido por el ADC y permitiendo obtener un valor “promedio” o de baja frecuencia de cada señal de entrada. Sobre los datos filtrados se calculan las diferencias entre cada par de señales (obteniéndose un total de 6 valores), que se emplean como entradas para un sistema de inferencia de lógica difusa (*Fuzzy Inference System*, FIS). El ciclo completo de adquisición y procesamiento

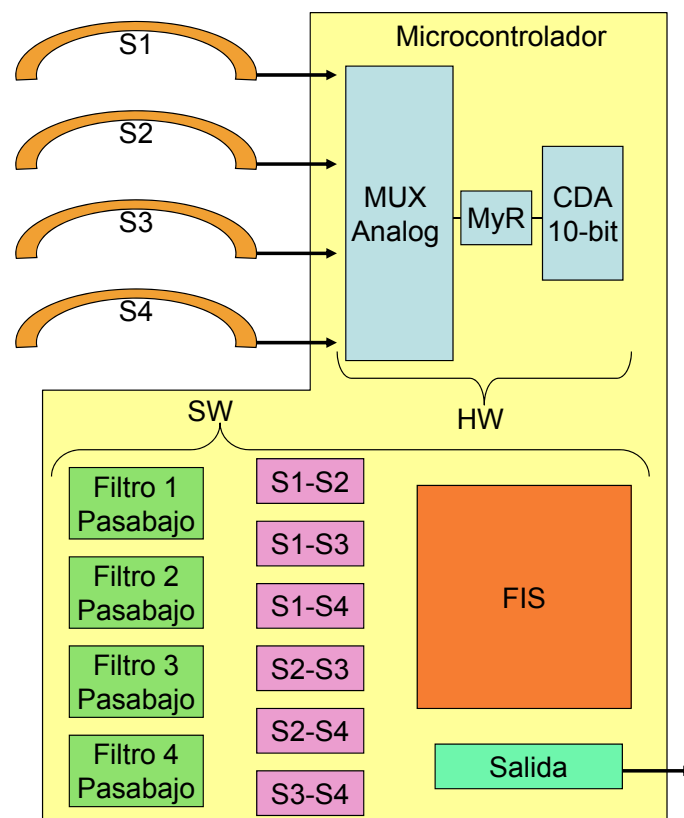


Figura 3.20: Esquema de bloques simplificado del módulo electrónico de adquisición y procesamiento de datos del sensor de contacto.

de las señales toma aproximadamente unos 50 ms, de manera que la salida se actualiza con una frecuencia de unos 20 Hz. Para la prueba, ajuste y validación del prototipo, se registraron (empleando el módulo de adquisi-

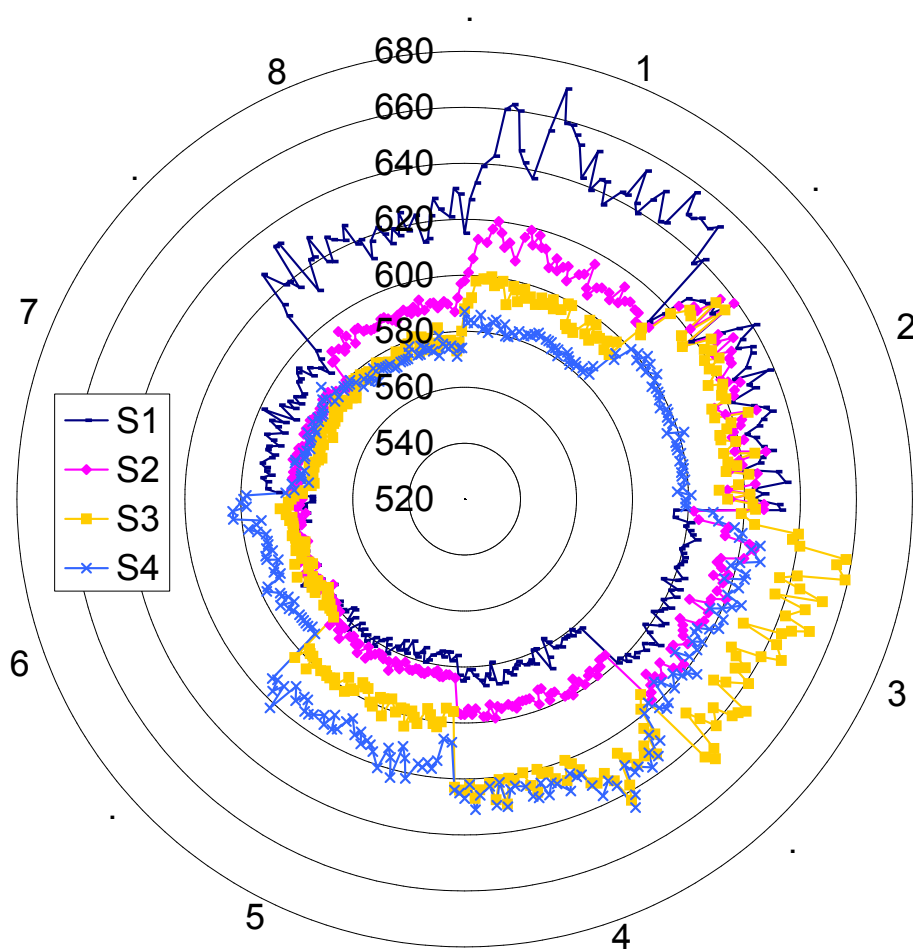


Figura 3.21: Lectura de 350 eventos aleatorios de contacto. $S1$, $S2$, $S3$ y $S4$ son los sensores *Flex*. Los números en el perímetro representan las zonas de contacto en las que se puede clasificar un evento y el eje radial representa el nivel de salida de los sensores. Los datos han sido ordenados de manera que todos los contactos en una zona se encuentren consecutivos.

ción de datos) las mediciones de los sensores *Flex* durante una secuencia de contactos aleatoriamente distribuidos alrededor de la plataforma móvil del prototipo, con el centro de la plataforma fijada a una base sólida (véase la Fig. 3.19(a)). Los contactos se realizaron tocando el perímetro de la plataforma móvil con una posición, presión y ángulo de incidencia aleatorios. Para cada evento se registró la zona y las características del contacto. Un total de 350 eventos fueron registrados, incluyendo los contactos alrededor de la plataforma y los eventos de no-contacto (plataforma en reposo). La Fig. 3.21 muestra la distribución de estos valores brutos ordenados por zona de contacto.

En el perímetro de la gráfica se muestra un número que representa la zona del contacto. Los círculos concéntricos representan isolíneas para los niveles de salida de los sensores; un radio mayor indica un valor más alto de lectura de sensor. Los datos de cada sensor ($S1$, $S2$, $S3$ y $S4$) están representados con diferentes colores, y han sido ordenados de manera que todos los contactos en una misma zona se encuentren consecutivos en la gráfica. Se observa que, por ejemplo, para la zona de contacto 1, el sensor $S1$ entregó los valores absolutos más altos y con mayores variaciones dentro de una misma zona de contacto, al contrario que el sensor $S4$, que entregó los valores más bajos y con menores variaciones entre diferentes eventos de contacto dentro de la misma zona. Estas observaciones preliminares permiten establecer las características básicas del diseño del sistema de procesamiento y clasificación de datos, que será explicado a continuación.

3.3.2.4. Procesamiento de datos mediante lógica difusa

Como se ha mencionado anteriormente, para interpretar los datos de los sensores *Flex* se ha diseñado un sistema de inferencia de lógica difusa (*Fuzzy Inference System*, FIS).

Se decide emplear un FIS como sistema de clasificación⁷ principalmente por la relación directa que existe entre las reglas lingüísticas de clasificación (que se pueden diseñar eurísticamente a partir de la observación del conjunto de datos), y su fácil implementación en un sistema clasificador FIS. Éste pertenece al grupo de los clasificadores directos, puesto que se efectúa una partición del conjunto de datos de entrada en un número determinado de clases (zonas de contacto, en este caso). Los algoritmos de clasificación binaria de datos, redes neuronales, máquina de vectores de soporte o incluso análisis matemático exhaustivo, son opciones igualmente válidas para clasificar los datos obtenidos desde los sensores *Flex*; sin embargo, la naturaleza del sistema sensor y de los datos que se obtienen justifican el uso de un sistema sencillo de diseñar y rápido de implementar como el FIS⁸.

Se ha dividido virtualmente la plataforma en 8 zonas, y el sistema de inferencia *fuzzy* clasifica los datos recibidos del evento de contacto como pertenecientes a uno de las 8 posibles zonas de contacto (véase la Fig. 3.19(b)) más la condición de no-contacto (estado de reposo), denominada zona 0. A partir de la observación de los datos mostrados en la Fig. 3.21 se puede adelantar la conclusión de que no es conveniente emplear detectores de umbrales (comparadores de nivel) para determinar los rangos de valores que debe entregar cada sensor según la zona de contacto. Los datos mostrados no son fácilmente separables empleando simples comparadores de nivel. Por ejemplo, los puntos en la zona de contacto 1 están claramente separados en

⁷La clasificación de datos consiste, básicamente, en la asignación de los datos de los individuos bajo estudio a grupos determinados (nubes) más o menos separados en el espacio de características, siendo posible construir una función discriminante que permita separar los datos pertenecientes a un grupo de los demás grupos. Los problemas de clasificación pueden involucrar la presencia de dos o más clases. En otras palabras, los métodos de clasificación buscan dividir el conjunto de los objetos estudiados en clases homogéneas respecto a las variables escogidas.

⁸El apéndice G presenta una breve introducción a la lógica difusa donde se exponen estos sistemas y sus principales parámetros con más detalle.

diferentes grupos: los valores del sensor $S1$ son siempre mayores que todos los demás; los valores del sensor $S2$ son menores que $S1$; los valores de $S3$ son menores que $S2$; y todos los valores de $S4$ son menores que los de $S3$. Sin embargo, en la zona 2, todos los puntos de todos los sensores parecen presentar valores similares, no observándose una relación clara entre los datos de un sensor y los de otro. Además, puede resultar difícil (o imposible) determinar estos valores umbrales debido a que el Coeficiente Térmico de Resistividad (TCR) de los sensores *Flex* modifica los valores absolutos de salida de los sensores en función de la temperatura ambiente.

Una forma sencilla y eficiente de reducir los efectos del TCR, que facilitaría posteriormente la tarea de clasificar los datos para determinar la zona de contacto, consiste en expandir la entrada de 4 a 6 señales de entrada por medio del cálculo de las diferencias entre pares de sensores:

$$Entrada = \{s_1 - s_2; s_1 - s_3; s_1 - s_4; s_2 - s_3; s_2 - s_4; s_3 - s_4\}. \quad (3.35)$$

donde s_1, \dots, s_4 representan las medidas individuales de cada sensor *Flex*.

La Fig. 3.22 muestra el nuevo conjunto de datos obtenido por medio de estas diferencias de pares de sensores según la ecuación (3.35). Se consiguen de esta manera dos propósitos:

- Producir un valor que indique directamente el comportamiento relativo entre dos sensores (A es mayor que B , A es aproximadamente igual a B , etc.).
- Reducir el nivel medio de las señales (nivel de corriente continua) de los sensores, que es donde se encuentra el error introducido por el TCR.

Si se asume que la temperatura ambiente afecta de igual manera a los 4 sensores *Flex* y que estos presentan el mismo TCR, entonces el cálculo

lo de diferencias cancelaría el efecto térmico en las medidas. La principal información ofrecida por la Fig. 3.22 es la “posición relativa” de cada entrada con respecto al cero dentro de cada zona de contacto. A partir de esta gráfica se construyen fácil e intuitivamente las reglas lingüísticas del FIS

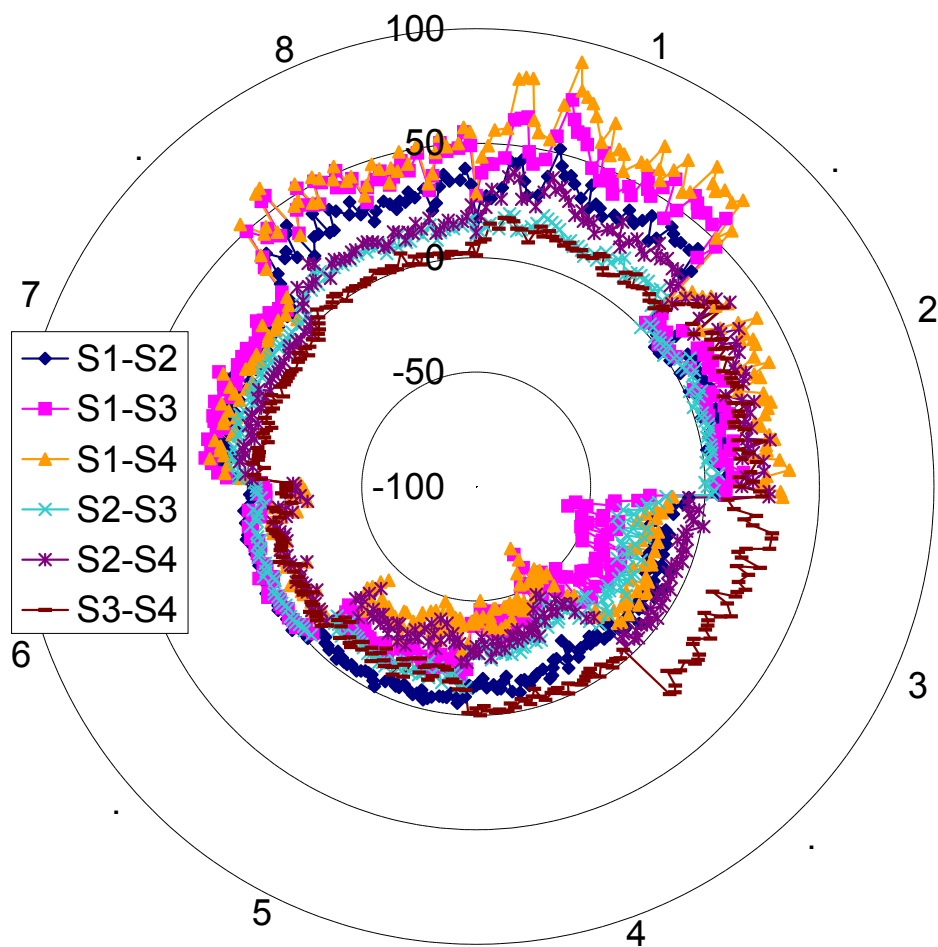


Figura 3.22: Distribución de las diferencias de salidas de los sensores *Flex*. S1, S2, S3 y S4 son los sensores *Flex*. Los números en el perímetro representan las zonas de contacto y el eje radial representa el nivel de diferencia entre sensores. Los datos han sido ordenados de manera que todos los contactos en una zona se encuentren consecutivos.

implementado.

La implementación del FIS es de tipo *Mamdani*, cuya salida es un conjunto difuso que debe ser posteriormente defusificado. Existen sistemas de inferencia *fuzzy* (Ross, 2004; Nguyen y Walker, 2000) computacionalmente más eficientes, como el de tipo *Sugeno* (Sugeno, 1992; The MathWorks, Inc., 2006), que aunque ofrecen una salida directamente defusificada, sus parámetros de implementación suelen no ser tan intuitivos de definir e interpretar como los del esquema *Mamdani*.

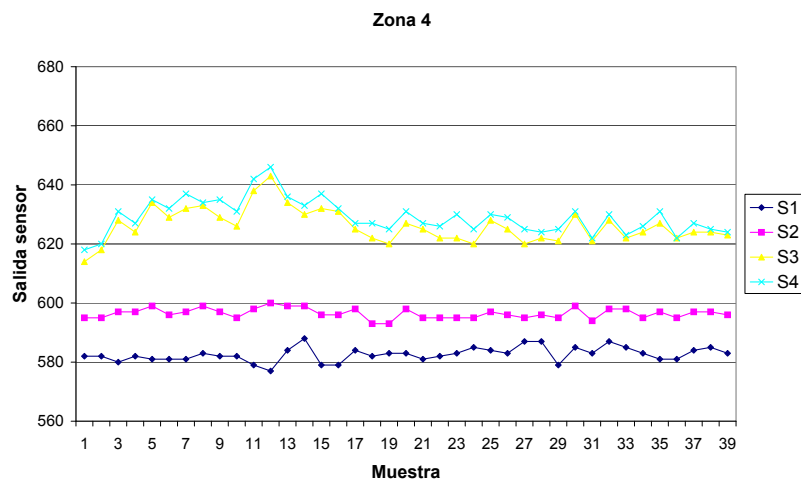
Los sensores *Flex* presentan un comportamiento no lineal de variación de su resistencia eléctrica (véase la Fig. 3.17(b)). Esta no linealidad se ve aumentada por el efecto antes mencionado de torsión que el ensamblaje mecánico produce en los sensores durante los eventos de contacto, introduciendo errores en las mediciones. El FIS debe clasificar estos datos, que a priori parecen ambiguos e imposibles de separar mediante observación directa de niveles de señal. Para ilustrar este punto, la Fig. 3.23 muestra dos conjuntos de datos pertenecientes a los contactos en las zonas 4 y 6. Puede observarse como en la zona 6, por ejemplo, los valores s_1 , s_2 y s_3 son similares entre sí, resultando difícil de establecer una relación entre estos niveles que permita diferenciar este evento de contacto de otros eventos en otras zonas. Ocurre una situación similar con los datos de la zona 4, con valores de sensores s_3 y s_4 similares entre sí.

El FIS fue diseñado empleando la *Toolbox* de lógica difusa de Matlab (The MathWorks, Inc., 2006) con las siguientes características generales (véase la Fig. 3.24):

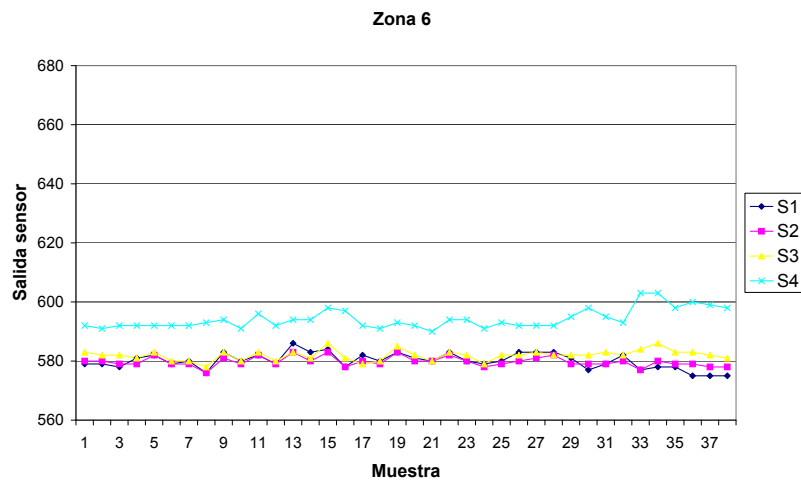
- FIS de tipo Mamdani.
- 6 entradas y 1 salida.
- Emplea los métodos estándares *MIN* para las funciones de *AND* y de

implicación.

- Emplea el método *MAX* para la función de acumulación.



(a)



(b)

Figura 3.23: Ejemplo de salida de los sensores *Flex*: secuencia de valores de salida de los sensores *Flex* para los eventos de contacto en las zonas 4 (a) y 6 (b). *S1*, *S2*, *S3* y *S4* son los sensores *Flex*. El eje horizontal representa el número del evento, y el eje vertical representa la lectura del sensor *Flex*.

- Utiliza el método *MEAN-OF-MAXIMUM* para la función de desfusificación.
- Las funciones de pertenencia son de tipo triangular o trapezoidal.

Todas las reglas se han formulado a partir de la gráfica en la Fig. 3.22 y de la pregunta:

¿Qué relaciones se observan entre las señales de entrada representadas en la gráfica de las diferencias de pares de sensores cuando ocurre un evento de contacto?.

Con base en la respuesta cualitativa a esta pregunta, aplicada a las nueve condiciones posibles de salida (8 zonas de contacto más la condición de no-contacto), se ha construido el conjunto de reglas difusas. Los siguientes criterios rigen la construcción de estas reglas:

- El nombre que define la diferencia entre dos señales de sensores *Flex* será "*SaSb*", que significa "la diferencia $Sa - Sb$ ".
- Un valor *SaSb* muy cercano a cero significa que las dos medidas de

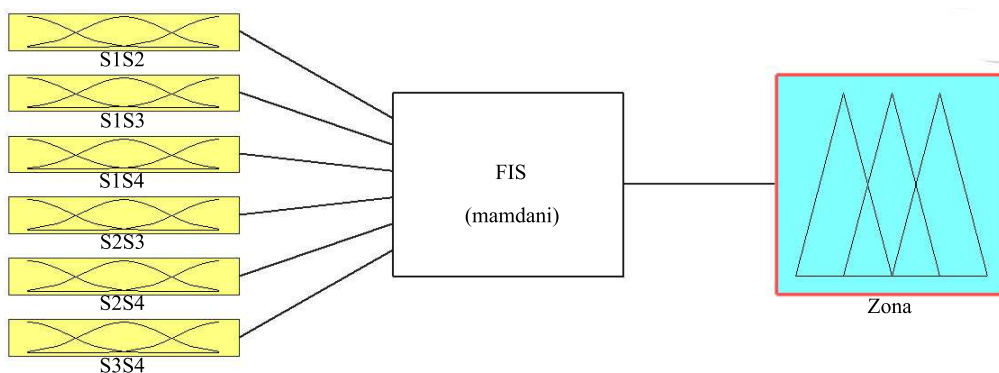


Figura 3.24: Diagrama esquemático del FIS. Se emplean 6 entradas (obtenidas de la diferencia entre pares de sensores) y una sola variable de salida, el número que representa la zona de contacto.

Tabla 3.2: Funciones de pertenencia. Cada columna contiene una regla asociada a cada entrada diferencial. La última columna contiene la salida de la regla.

REGLA	S1S2	S1S3	S1S4	S2S3	S2S4	S3S4	ZONA
1	=	=	=	=	=	=	0
2	≫	≫	≫	>	≫	>	1
3	≈	≈	≫	=	≫	>	2
4	<	≪	<	≪	=	>	3
5	<	≪	≪	≪	≪	=	4
6	<	≪	≪	<	≪	<	5
7	≈	≈	<	≈	<	<	6
8	>	>	>	>	=	<	7
9	≫	≫	≫	>	≫	=	8

sensores son “iguales (=)”.

- Un valor $SaSb$ cercano a cero significa que las dos medidas de sensores son “aproximadamente iguales (\approx)”.
- Un valor $SaSb$ mayor que cero y no cercano a cero significa que la medida ‘ a ’ es “mayor que ($>$)” la medida ‘ b ’.
- Un valor $SaSb$ mucho mayor que cero significa que la medida ‘ a ’ es “mucho mayor que (\gg)” la medida ‘ b ’.
- Un valor $SaSb$ menor que cero y no cercano a cero significa que la medida ‘ a ’ es “menor que ($<$)” la medida ‘ b ’.
- Un valor $SaSb$ mucho menor que cero significa que la medida ‘ a ’ es “mucho menor que (\ll)” la medida ‘ b ’.
- Las fronteras entre estos criterios se ajustarán empíricamente.

Un total de 9 reglas (véase la Tabla 3.2) se han implementado para la clasificación de la zona de contacto. Por ejemplo, empleando la Fig. 3.22, observando los datos de la zona 1 y aplicando los criterios, se construye la regla 2 de la Tabla 3.2:

Aplicación de criterios:	Regla 2:
▪ $S1S2 : S1 \gg S2$	<i>If</i> ($S1S2 : S1 \gg S2$) ...
▪ $S1S3 : S1 \gg S3$	<i>AND</i> ($S1S3 : S1 \gg S3$) ...
▪ $S1S4 : S1 \gg S4$	<i>AND</i> ($S1S4 : S1 \gg S4$) ...
▪ $S2S3 : S2 > S3$	<i>AND</i> ($S2S3 : S2 > S3$) ...
▪ $S2S4 : S2 \gg S4$	<i>AND</i> ($S2S4 : S2 \gg S4$) ...
▪ $S3S4 : S3 > S4$	<i>AND</i> ($S3S4 : S3 > S4$) ...
	<i>Then</i> ($ZONE : 1$)

Para la zona 2 (regla 3 de la Tabla 3.2), los resultados de los criterios son:

Aplicación de criterios:	Regla 3:
▪ $S1S2 : S1 \approx S2$	<i>If</i> ($S1S2 : S1 \approx S2$) ...
▪ $S1S3 : S1 \approx S3$	<i>AND</i> ($S1S3 : S1 \approx S3$) ...
▪ $S1S4 : S1 \gg S4$	<i>AND</i> ($S1S4 : S1 \gg S4$) ...
▪ $S2S3 : S2 = S3$	<i>AND</i> ($S2S3 : S2 = S3$) ...
▪ $S2S4 : S2 \gg S4$	<i>AND</i> ($S2S4 : S2 \gg S4$) ...
▪ $S3S4 : S3 > S4$	<i>AND</i> ($S3S4 : S3 > S4$) ...
	<i>Then</i> ($ZONE : 2$)

Una regla particularmente intuitiva de construir es la que describe la condición de no-contacto (zona 0), cuyos datos se presentan en la Fig. 3.25. Entonces, para la zona 0 (regla 1 de la Tabla 3.2), estos son los resultados de los criterios:

Aplicación de criterios:	Regla 1:
<ul style="list-style-type: none"> ■ $S1S2 : S1 = S2$ ■ $S1S3 : S1 = S3$ ■ $S1S4 : S1 = S4$ ■ $S2S3 : S2 = S3$ ■ $S2S4 : S2 = S4$ ■ $S3S4 : S3 = S4$ 	<p><i>If</i> ($S1S2 : S1 = S2$) ...</p> <p><i>AND</i> ($S1S3 : S1 = S3$) ...</p> <p><i>AND</i> ($S1S4 : S1 = S4$) ...</p> <p><i>AND</i> ($S2S3 : S2 = S3$) ...</p> <p><i>AND</i> ($S2S4 : S2 = S4$) ...</p> <p><i>AND</i> ($S3S4 : S3 = S4$) ...</p> <p><i>Then</i> ($ZONE : 0$)</p>

Con respecto a las funciones de pertenencia (MFs), se desea que entreguen un valor alto cuando se cumpla la condición de entrada, y un valor bajo en otro caso, con una transición “suave” entre un estado y otro; esto permite que con valores que no cumplan la condición de entrada pero que están cerca de cumplirla, se entreguen valores entre 0 y 1.

Las funciones de pertenencia diseñadas presentan una forma trapezoidal,

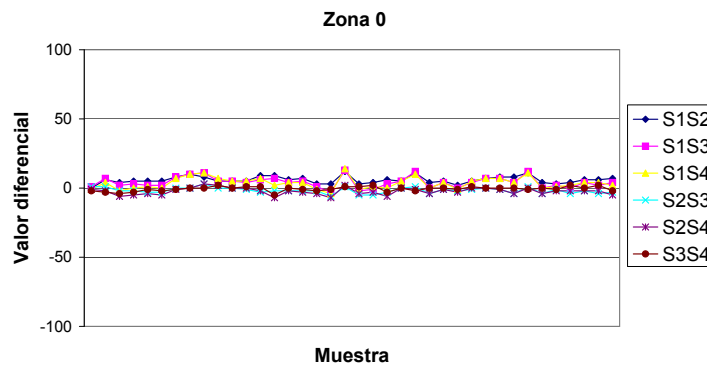


Figura 3.25: Valores de la diferencia de pares de sensores para la condición de no-contacto (zona 0). El eje horizontal representa el número del evento de contacto y el eje vertical representa el valor de la diferencia del par de sensores *Flex*. Se observa como todos los valores permanecen cercanos a cero pero no exactamente iguales a cero a lo largo del tiempo.

construidas a partir de una función con forma de pulso, pero con flancos o transiciones suaves. En la literatura acerca de lógica difusa se puede encontrar un gran repertorio de funciones que cumplen con estas condiciones

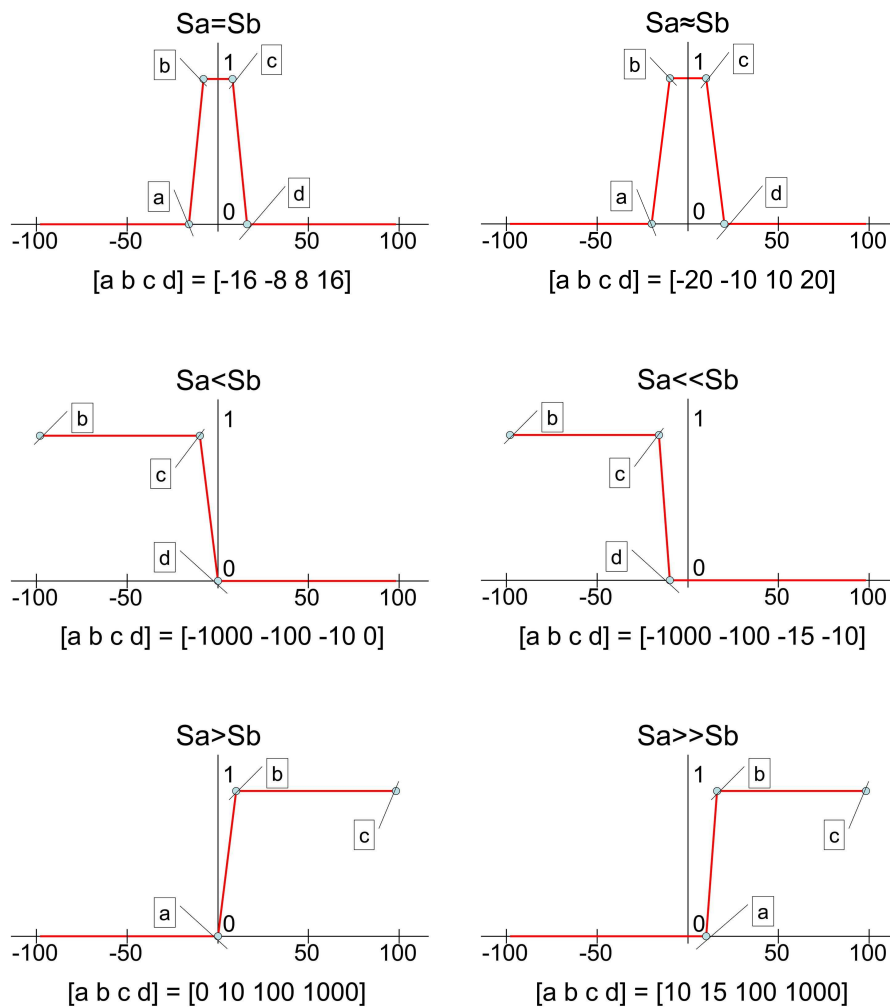


Figura 3.26: Funciones de pertenencia del FIS. Los puntos a, b, c y d definen cada una de estas funciones. Los puntos que no aparecen indicados en las gráficas corresponden a valores “infinitos”; i.e., fuera del rango de estas gráficas.

simples, como Gaussianas y Sigmoideas, pero se requiere una capacidad computacional mayor en el procesador que ejecuta el FIS.

La Fig. 3.26 muestra las MFs implementadas. Su forma trapezoidal queda definida por los valores de sus 4 puntos de inflexión [a,b,c,d]. Con base en los gráficos de los datos, se puede asumir que el rango es de $[-100\ 100]$. Valores fuera de este rango se consideran como “infinito”. El valor exacto de cada vértice ha sido ajustado empíricamente.

El paso final dentro del proceso del FIS tipo Mamdani consiste en la defusificación del conjunto difuso de salida, obteniendo un valor único de salida. Este procedimiento opera sobre el área del conjunto difuso de salida; para ello la divide en un número finito de puntos y aplica después la función defusificadora. Después de una serie de ensayos, se determinó que la cantidad adecuada de puntos (la resolución) para el proceso de defusificación es de 40; con otras resoluciones se modifica el comportamiento del FIS, como se verá a continuación.

3.3.3. Prototipo de cabeza sensora basado en sensores de distancia IR

Este nuevo diseño de cabeza sensora mantiene el concepto de integrar un conjunto de sensores alrededor de un módulo detector comercial de minas (Schiebel AN-19/2), pero en este caso el conjunto de sensores conforma un módulo de seguimiento del terreno y no sólo un módulo de detección de contacto. El módulo de seguimiento del terreno consiste en una red de medidores individuales de distancia divididos en dos grupos (grupo de sensores laterales y grupo de sensores del suelo) y un módulo electrónico controlador de la cabeza sensora, al cual se conectan los sensores individuales de distancia.

En la Fig. 3.27 se presenta un esquema con los principales bloques constitutivos de la cabeza sensora, entre ellos: la estructura mecánica de la cabeza sensora que da soporte a los sensores (laterales, del suelo y al anillo detector de metales), el módulo controlador de la cabeza sensora, el módulo controlador del detector de minas, y el sistema controlador central con el cual se comunica la cabeza sensora. Puede verse también que las conexiones eléctricas entre el controlador de la cabeza sensora y el controlador central del robot consisten solamente en las dos líneas de alimentación y en las tres líneas de un enlace serial RS-232.

3.3.3.1. Módulo de seguimiento del terreno

Los módulos de sensores laterales y del suelo consisten en una serie de medidores individuales de distancia dispuestos estratégicamente. Cada uno de estos medidores entrega como salida una señal de voltaje en función de la distancia al objeto frente al sensor.

El prototipo experimental emplea el sensor de distancia SHARP GP2D120

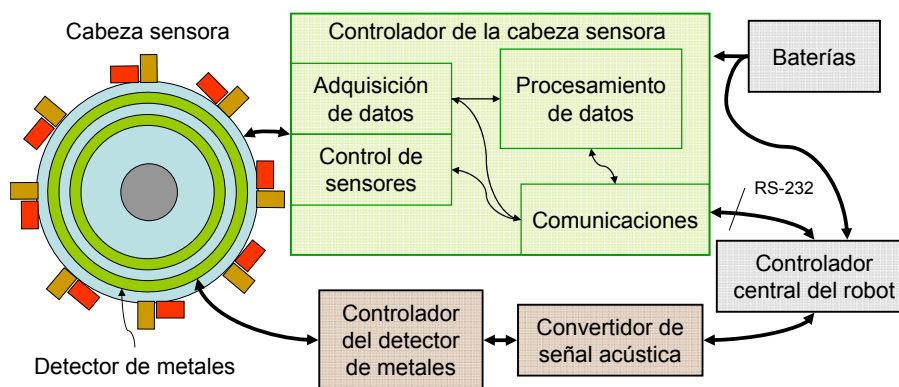


Figura 3.27: Bloques principales de la cabeza sensora.

(Sharp, 2006), como el mostrado en la Fig. 3.28 y detallado en el Apéndice E.2.

Este sensor de distancia se ha seleccionado entre otros porque ofrece suficiente precisión en la medición, es ligero (unos 8.4 g incluyendo el circuito impreso de soporte), es de reducidas dimensiones, es de fácil uso y de bajo costo. Cabe destacar que aunque se use específicamente este sensor en el prototipo de cabeza sensora, el concepto del diseño de la cabeza sensora permanece válido mientras se empleen sensores de distancia frontal con área de detección reducida (sensor direccional), como un medidor láser, ultrasónico, por microondas, etc.

3.3.3.1.1. Módulo de sensores laterales La detección de potenciales obstáculos en el recorrido de la cabeza sensora sobre el terreno se realiza mediante un conjunto de sensores de distancia dispuestos alrededor de la estructura de la cabeza sensora (Ponticelli et al., 2006). Al tratarse de un prototipo basado en sensores de tipo infrarrojos, se consigue detectar obstáculos sin contacto.

Cada sensor de distancia se instala a intervalos regulares en el borde exterior de la estructura de la cabeza sensora, apuntando en dirección apro-

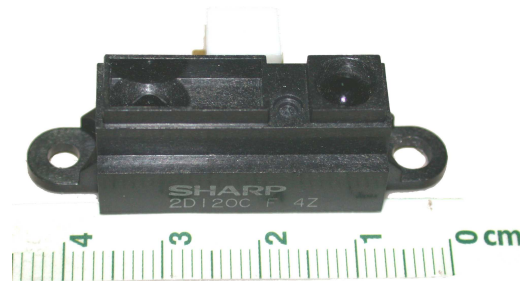


Figura 3.28: Sensor infrarrojo de distancia GP2D120.

ximadamente tangencial a este borde y con los haces apuntando sobre el plano de la estructura de la cabeza. Desde el centro de la estructura y en dirección radial, se observa que un haz se solapa con el haz del sensor contiguo (véase la Fig. 3.29, caso F). Con esta configuración se logra cubrir el perímetro completo de la estructura con un número reducido de sensores, detectándose con uno o más sensores un objeto que se aproxime en dirección radial a la cabeza sensora. Esta configuración difiere de la tradicional, donde se suelen orientar los haces con dirección radial.

Existe la posibilidad de que un objeto alcance la estructura de la cabeza sensora sin ser detectado (véase la Fig. 3.29, caso A). Para ello, el objeto debe presentar reducidas dimensiones y debe aproximarse a la cabeza en una dirección tal que ningún haz de sensor lo detecte. A este espacio entre dos haces de sensores contiguos se le denomina “zona ciega”, y las dimensiones de esta zona se pueden modificar variando la cantidad de sensores

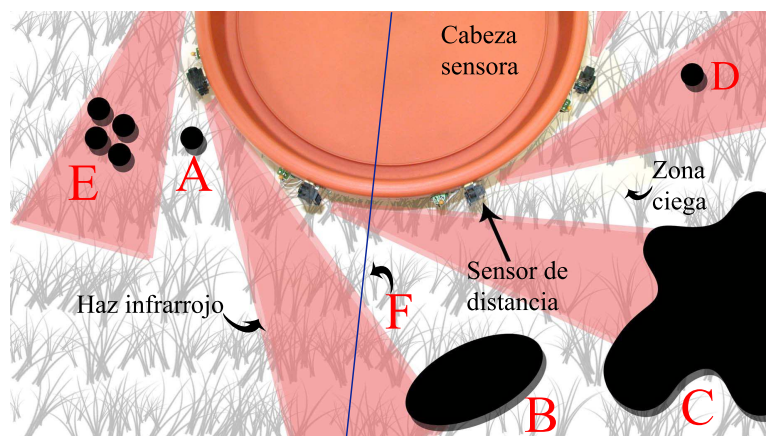


Figura 3.29: Esquema del módulo de sensores laterales en operación. Casos de detección: (A) No-detección de un objeto pequeño dentro de una zona ciega, (B) Detección de un objeto de mayor tamaño que la zona ciega, (C) Detección de un objeto de grandes dimensiones, (D) Detección de un objeto pequeño, (E) Detección de un conjunto de objetos pequeños, (F) Línea radial desde el centro de la cabeza que muestra el solapamiento en esta dirección de una zona con la siguiente.

individuales instalados y el ángulo de orientación de los haces. Es posible evitar completamente la existencia de estas zonas ciegas empleando un esquema de pares de sensores con direcciones cruzadas de haces; sin embargo, no adoptamos esta solución dado que:

- Aumenta del número de sensores.
- Aumenta el consumo de potencia eléctrica.
- Aumenta el número de entradas de control para procesar los sensores adicionales.
- Aumenta las interferencias entre haces de sensores.

La entrada de un objetos en las zonas ciegas también pueden evitarse con una estrategia adecuada de movimiento de la cabeza sensora, de ma-

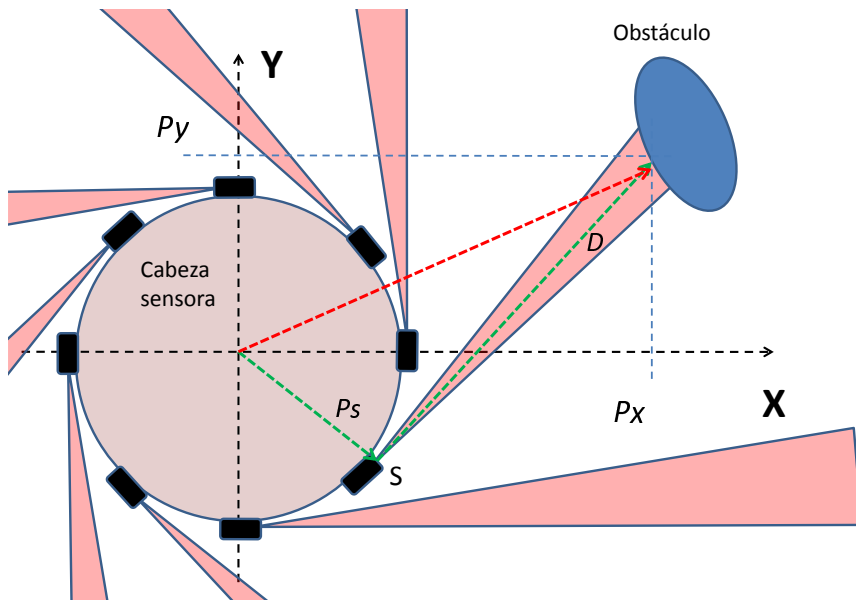


Figura 3.30: Esquema de la determinación de la posición (vector rojo) de los obstáculos usando del módulo de sensores laterales. A partir de la distancia al obstáculo D y de la posición P_s del sensor S que lo ha detectado, se obtiene la posición P_x, P_y del obstáculo.

nera que la dirección de la trayectoria de la cabeza hacia un obstáculo no coincida con la dirección de alguna zona ciega. Una forma de satisfacer esta condición consiste en mover constantemente la cabeza sensora con una oscilación rotacional; i.e., que la cabeza sensora realice pequeños movimientos de rotación en ambos sentidos sobre su eje central. De esta manera se imita la operación de barrido que realiza un sonar ultrasónico típico, y que en nuestro caso amplía la zona de detección de cada sensor de distancia al mismo tiempo que reduce el área de las zonas ciegas.

La principal función de este módulo de sensores laterales es la detección de la presencia de obstáculos en la trayectoria de la cabeza sensora, proporcionando además información de la distancia al obstáculo. Esta información es empleada posteriormente en la construcción de un mapa de obstáculos.

Este prototipo de cabeza sensora incorpora 8 sensores de distancia lateral. Con los 8 datos de distancia y los parámetros geométricos de la cabeza sensora se determinan las coordenadas de los obstáculos detectados por medio de un algoritmo de procesamiento de datos y cálculo geométrico (véase la Fig. 3.30) implementado en el módulo controlador de la cabeza sensora.

3.3.3.1.2. Módulo de sensores del suelo El módulo de sensores del suelo mide la distancia entre la estructura de la cabeza sensora y la superficie del terreno. Se emplea un conjunto de sensores individuales de distancia como el descrito en el apartado anterior, dispuestos a intervalos regulares en el perímetro de la estructura de la cabeza sensora y apuntando hacia abajo, como se muestra en la Fig. 3.31.

El propósito de este módulo es proveer información de distancia al terreno que permita calcular la altura y orientación de la cabeza sensora sobre la superficie.

La dirección de los haces de estos sensores se ha dispuesto perpendicular

y hacia abajo del plano de la estructura de la cabeza sensora (que es el mismo plano del detector de minas), por lo que la lectura de distancia al terreno es directa, sin necesidad de transformación geométrica adicional.

Al igual que en el caso del módulo de sensores laterales, esta configuración crea una serie de zonas ciegas entre los sensores contiguos y una gran zona ciega en el centro del área bajo la cabeza sensora. Estas características se toman en cuenta en el diseño del algoritmo de control de barrido de la cabeza sensora.

Con el conjunto de distancias medidas se calculan algunos parámetros del plano teórico de la superficie bajo la cabeza sensora, como ángulos de inclinación del plano y distancias al plano. Esta información se emplea en el control de la posición y orientación de la cabeza sensora (mediante el control del brazo manipulador) con el objetivo de mantener la cabeza a una altura de entre 10 cm y 20 cm sobre el terreno y paralelo a éste. Además, con esta información se elabora un mapa de elevación del terreno, combinándola con

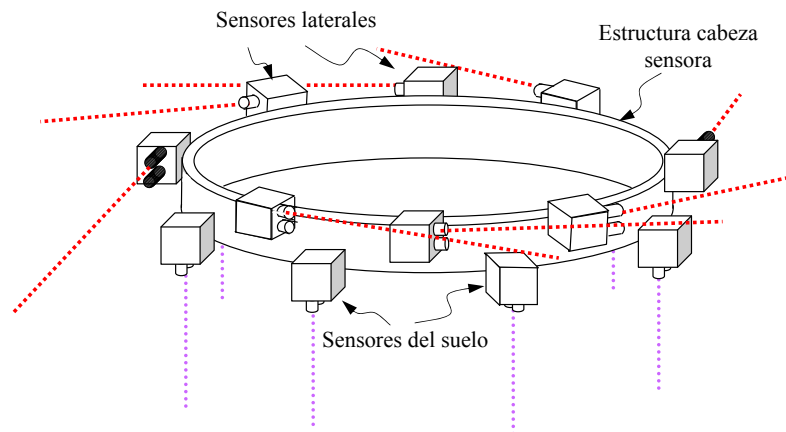


Figura 3.31: Esquema de los haces infrarrojos de los módulos de sensores laterales y del suelo.

la información de posición (cinemática) del brazo manipulador y localización (DGPS⁹) del robot móvil.

Este prototipo de cabeza sensora incorpora 8 sensores de distancia al suelo. Con los 8 datos de distancia se determinan los parámetros del plano del terreno por medio de un algoritmo de procesamiento implementado dentro del módulo controlador de la cabeza sensora. Este algoritmo será explicado con todo detalle en el capítulo 4.

3.3.3.1.3. Módulo controlador de la cabeza sensora Ya se ha mencionado que una característica deseable de la cabeza sensora es que requiera un número mínimo de cables de interconexión con el sistema explorador, puesto que éstos deberán ser conducidos a lo largo del brazo manipulador hasta el cuerpo del robot móvil. Con este propósito se ha diseñado un módulo electrónico para el control de los sensores de la cabeza sensora, que establece además una interfaz entre éstos y el sistema central. En la Fig. 3.32 se presenta un esquema de la etapa de adquisición de datos de la cabeza sensora. De manera general, este módulo electrónico consta de:

Bloque de adquisición de datos: adquiere las 16 señales analógicas de voltaje (de los sensores de distancia lateral y del terreno) empleando un convertidor analógico-digital (ADC) de 12 bits.

Bloque de procesamiento de señales: contiene un filtro digital pasabajos para cada canal de entrada, que disminuye las fluctuaciones causadas por el ruido en las señales analógicas y el ruido de cuantización introducido por el proceso de conversión ADC, y una función matemática de regresión numérica (curva de calibración) para convertir las lecturas de los sensores (valores en el rango [0 .. 4096]) a unidades de distancia (en centímetros).

⁹Sistema de posicionamiento global diferencial.

Bloque de control de sensores: controla la activación y desactivación sincronizada de cada sensor de distancia. Este bloque es especialmente útil para la implementación de estrategias de reducción de interferencias entre sensores y disminución de consumo de potencia.

Bloque de comunicación: establece la interfaz entre la cabeza sensora y el controlador central del robot. Permite transmitir datos de diferente naturaleza: datos directos desde los sensores, datos filtrados, datos procesados, parámetros de configuración del módulo controlador, etc.

A la salida del bloque de procesamiento de señal se obtiene un valor decimal en el rango $[4,0 \dots 30,0]$ cm para cada sensor individual. La curva matemática empleada en la regresión numérica es una función de tipo

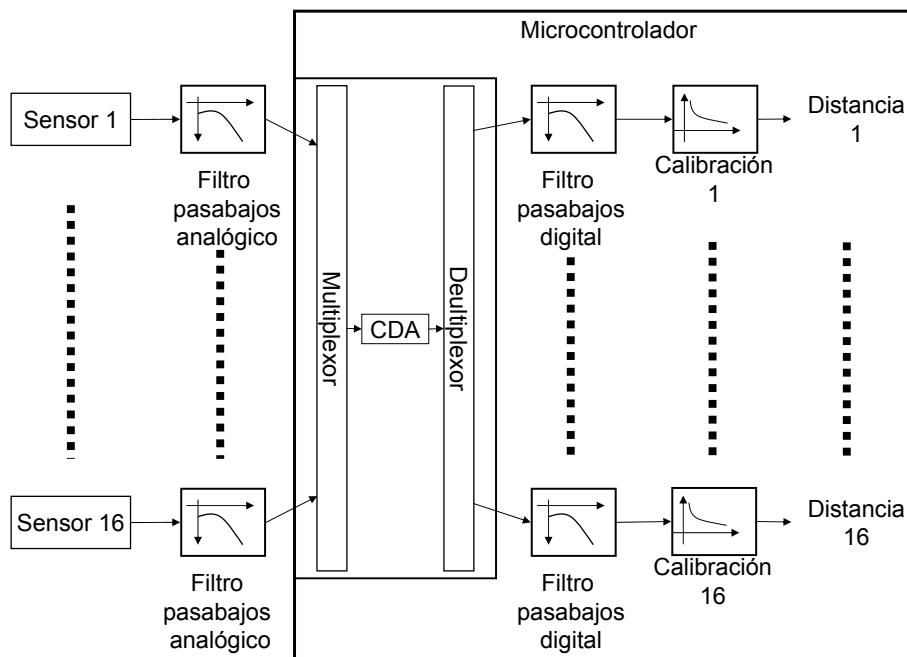


Figura 3.32: Esquema del módulo de adquisición de datos de la cabeza sensora.

potencia y calibrada individualmente para cada sensor:

$$f(x) = ax^b + c \quad (3.36)$$

La variable x contiene el valor a la salida del bloque de conversión, y las constantes a , b y c se ajustan mediante técnicas de regresión numérica minimizando el error entre la función de regresión y los datos experimentales obtenidos de cada sensor. Para este propósito se empleó la *toolbox Curve Fitting* de Matlab.

En la Fig. 3.33 se muestran los datos experimentales de medición de uno de los sensores de distancia y los valores numéricos obtenidos con la función

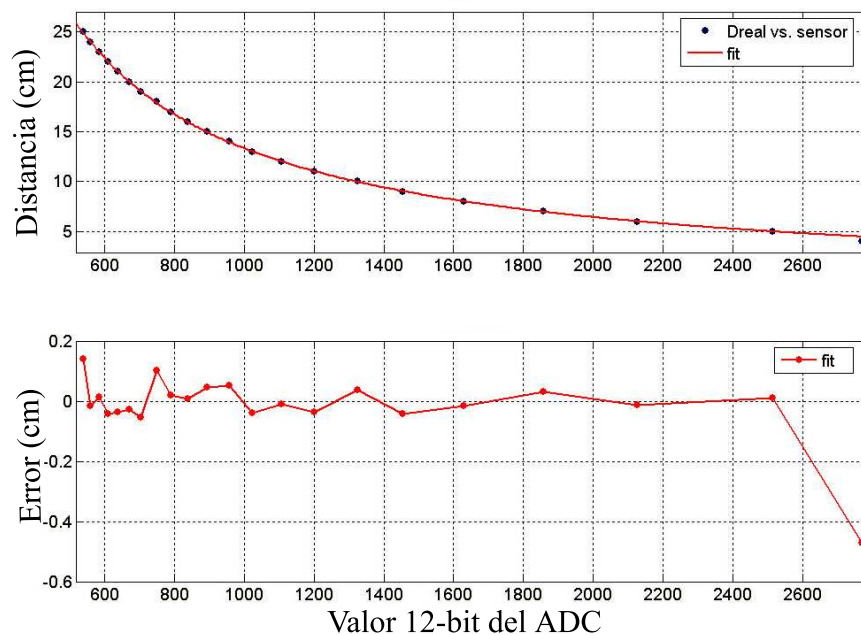


Figura 3.33: Curva calibrada de un sensor de distancia. En la gráfica superior se muestran los datos reales y los datos obtenidos mediante la curva de estimación. La gráfica inferior muestra el error entre el dato real y el estimado.

matemática (3.36), junto con la gráfica del error entre ambos valores. El error de estimación de la distancia empleando esta función matemática cae en el rango de ± 2 mm para distancias al sensor iguales o mayores que 5 cm. La precisión real de la distancia medida depende no sólo del sensor en cuestión, sino también de otros parámetros como el tipo de superficie del objeto medido, el ángulo de incidencia, la temperatura ambiental, etc. Como se verá posteriormente en la parte experimental, la precisión de la medición alcanzada con este sistema cae en el rango ± 1 cm.

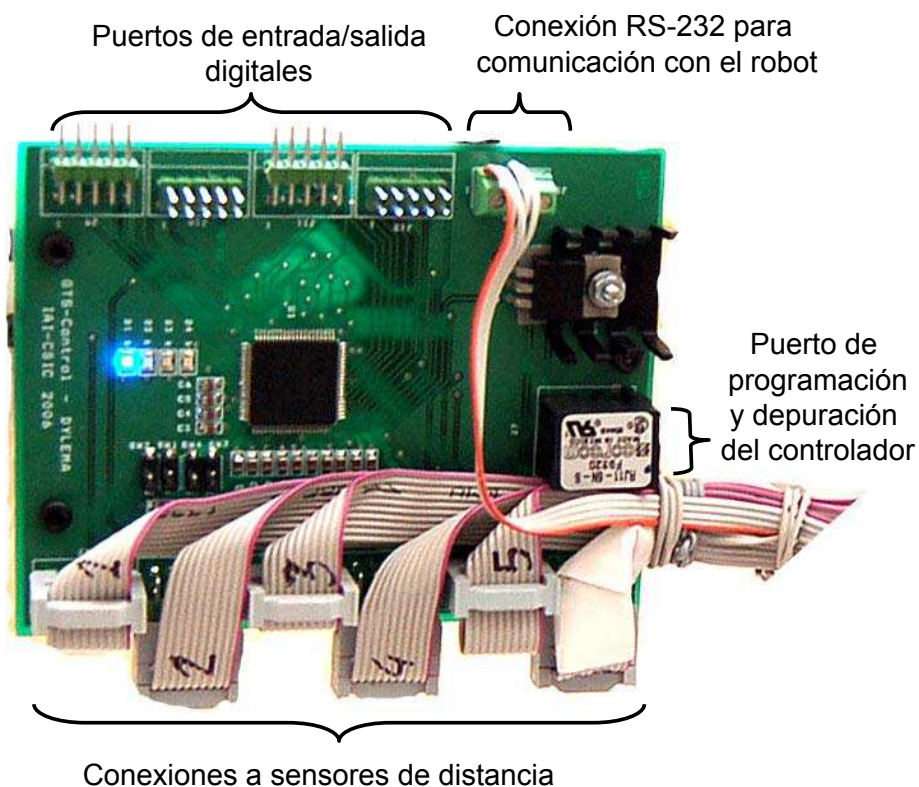


Figura 3.34: Módulo electrónico controlador de la cabeza sensora.

En la Fig. 3.34 se muestra una imagen de la placa electrónica del módulo controlador de la cabeza sensora y se indican sus principales puertos de conexiones. Se puede observar la diferencia en la cantidad de cables de interconexión entre el controlador, los sensores (unas 60 líneas) y el robot (3 líneas). Con este módulo controlador de la cabeza sensora se minimiza la carga computacional del controlador central del sistema de exploración de terrenos requerida para el manejo de las operaciones sensoriales de la cabeza, y se minimiza el número de conexiones eléctricas entre la cabeza y el robot.

3.3.3.2. Configuración y ensamblaje de la cabeza sensora

Como base estructural de la cabeza, se emplea un soporte realizado en *polyethylene terephthalate* (Arnite), que es un plástico mecanizable de altas prestaciones, que combina fuerza y rigidez en un material no metálico, necesario para evitar interferencias en la operación del módulo detector de minas. En la figura 3.35 se muestra un esquema general de la cabeza sensora y la disposición de sus componentes.

Los sensores de distancia suelen tener un rango mínimo de operación, que en el caso de los sensores empleados es aproximadamente de 4 cm. Se ha tomado en cuenta esta distancia en la instalación de los medidores de distancia al terreno (véase la Fig. 3.31).

El ensamblaje final del prototipo se muestra en la Fig. 3.36. Cada sensor de los módulos de sensores laterales y del terreno se conectan al módulo electrónico de control de la cabeza sensora, y ésta se conecta al sistema central por medio del cable principal, con solamente 4 conductores.

Como se observa en estas figuras, el detector de metales está ubicado relativamente cerca de la estructura metálica del brazo manipulador y de

los sensores IR de la cabeza sensora. Con el detector operando en su modo estándar, éste indicara la presencia de metales en todo momento, por lo que se ha empleado un modo de funcionamiento en nuestro sistema de exploración basado en el estudio del comportamiento de la saturación de la señal de la detección y no en la simple detección. El convertidor de señal acústica y el algoritmo asociado de procesamiento de señal interpretan los cambios en la señal saturada ocasionados por los cambios en la densidad

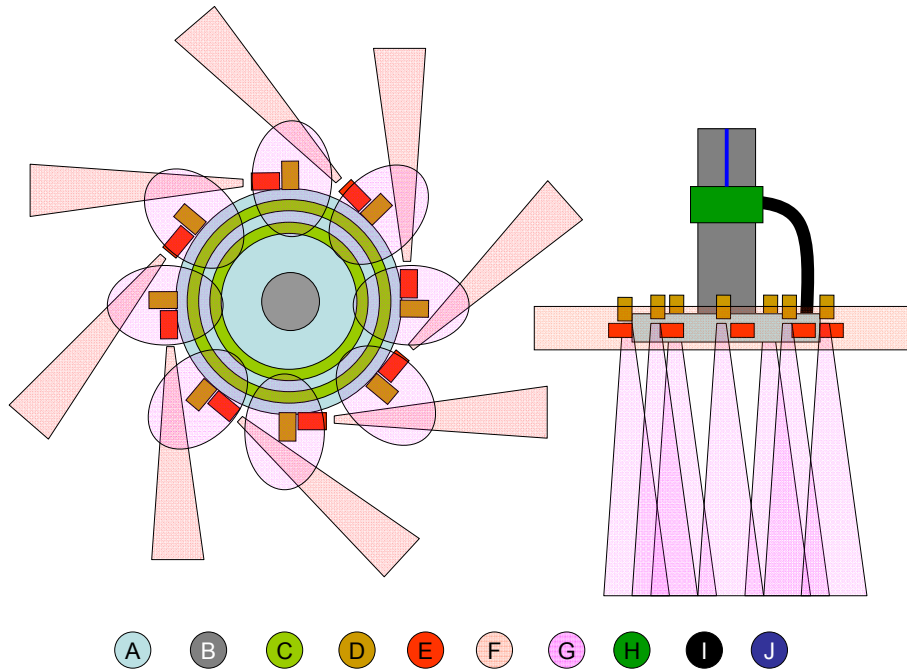


Figura 3.35: Esquema de la cabeza sensora. Se muestra la ubicación de los sensores de distancia de suelo, distancia lateral y la dirección de los haces de luz infrarroja de los sensores. A) Soporte de la cabeza sensora, B) Centro de la cabeza y punto de anclaje al manipulador, C) Anillos del detector de metales, D) Sensores de distancia del grupo de sensores de suelo, E) Sensores de distancia del grupo de sensores laterales, F) Haces infrarrojos de los sensores laterales, G) Haces infrarrojos de los sensores de suelo, H) Módulo electrónico de control de la cabeza sensora, I) Conducto de cables de los sensores de distancia hacia el controlador de la cabeza sensora, J) Cable para comunicación serial con el robot.

de metal dentro del volumen de detección, siendo posible detectar a un elemento metálico que se aproxima al detector o se aleja de éste. Con este modo de operación, el sistema de detección de metales no es tan sensible como en su modo estándar; sin embargo, permite al sistema de exploración detectar una tuerca metálica (métrica 10 mm) enterrado a unos 3 cm bajo la superficie. Como ya se ha mencionado antes, el diseño de este sistema de detección no forma parte del trabajo de esta tesis doctoral.

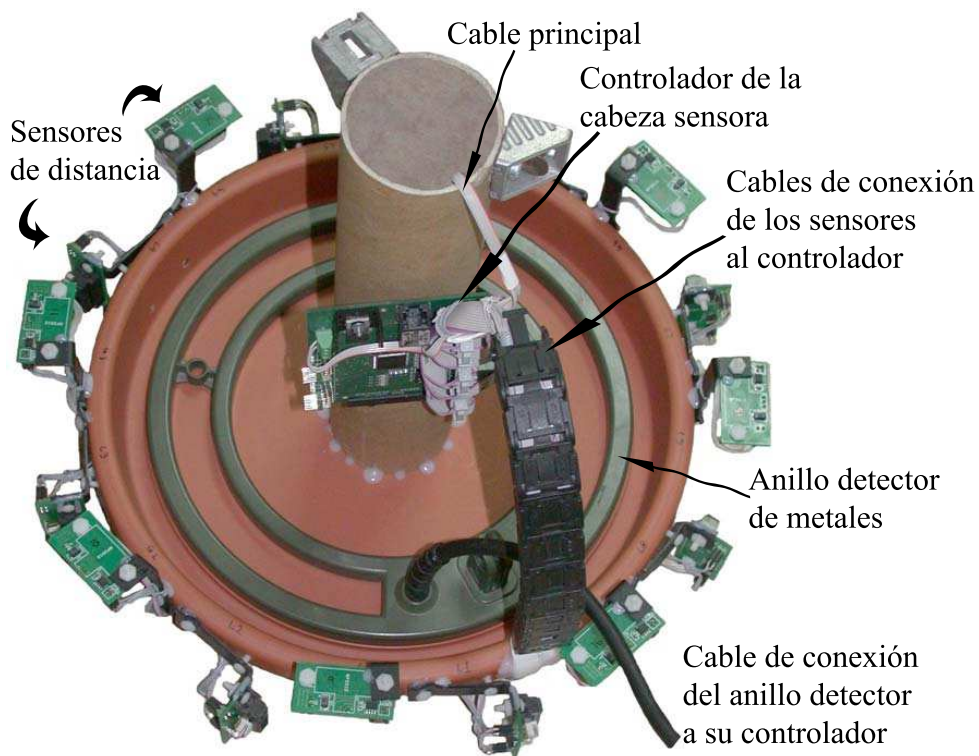


Figura 3.36: Prototipo final de la cabeza sensora.

Capítulo 4

Algoritmos para exploración de terrenos

En los capítulos anteriores se ha introducido la problemática del desminado humanitario, y se han presentado algunos de los sistemas y procedimientos más representativos empleados en estas tareas de desminado, así como los módulos de los que está compuesto el sistema de exploración de terrenos que nos ocupa y en especial los prototipos de cabeza sensora desarrollados en esta tesis doctoral. En el presente capítulo se describirá con más detalle el conjunto de algoritmos diseñados para el sistema de exploración de terrenos.

Estos algoritmos permiten la detección de obstáculos y su contorno, y la construcción de mapas de obstáculos y de elevación. Como se ha descrito en el capítulo anterior, la principal tarea de la cabeza sensora es permitir al sistema de exploración adaptar la posición y orientación del detector de minas a las irregularidades del terreno, por lo que estas tareas de detección de obstáculos y de generación de mapas constituyen funciones adicionales a las básicas requeridas del sistema de exploración, y que proporcionan datos

procesados al controlador central. Con estos datos es posible implementar, por ejemplo, algoritmos de optimización energética en el robot caminante empleando el conocimiento previo que tiene el robot acerca del terreno (González de Santos et al., 2009).

4.1. Detección del contorno de los obstáculos

El algoritmo de seguimiento de contorno de obstáculos diseñado en este trabajo está inspirado en el procedimiento tradicional empleado en máquinas herramientas para el seguimiento de contornos durante el proceso de mecanizado de piezas. Estos algoritmos usan generalmente lazos de control de fuerza-posición para ajustar la posición de la herramienta de acuerdo a la fuerza aplicada sobre el material en el que trabaja la máquina (Gorinevsky et al., 1997). Este esquema permite que la consigna de posición final de la herramienta (controlada por un lazo de cerrado de posición) sea ajustada de manera muy precisa en función de la fuerza aplicada por la herramienta sobre el material (lazo cerrado de control de fuerza).

En las tareas de detección automática de minas dentro de misiones de desminado humanitario, la detección de contornos de obstáculos sirve de ayuda en la determinación del área perteneciente a ciertos objetos en el terreno, como rocas y troncos, y de ciertas características de la superficie como huecos y desniveles, que podrían ser considerados como obstáculos en la trayectoria del robot móvil. Para determinar estos contornos se han diseñado dos algoritmos específicos:

- Control acomodaticio de la cabeza sensora.
- Seguimiento de contorno de obstáculos.

El objetivo es detectar obstáculos en la trayectoria de la cabeza senso-

ra “tocándolos suavemente” (comportamiento acomodaticio), para después “deslizar” la cabeza sensora alrededor de estos contornos de obstáculos. De manera general, este procedimiento es similar al empleado por las personas ciegas que usando un bastón determinan la posición y forma general de los obstáculos, o también al empleado por los animales que mediante antenas o bigotes detectan obstáculos (Jung y Zelinsky, 1996).

El comportamiento acomodaticio de la cabeza sensora se genera mediante el control de posición de las articulaciones del brazo manipulador y de la “fuerza de contacto” entre la cabeza sensora y los obstáculos en el entorno. En este caso, el comportamiento acomodaticio no se implementa en cada articulación del brazo sino en la cabeza sensora, puesto que es allí donde se miden las fuerzas que serán controladas. De esta manera se simplifica la tarea del controlador de fuerza, no requiriéndose un sistema de control para cada articulación sino un único sistema de control para el elemento final del brazo, la cabeza sensora. El movimiento final de la cabeza sensora es uno compuesto por el movimiento de barrido del terreno (control de posición) con el movimiento acomodaticio (control de fuerza) en función de los obstáculos encontrados en la trayectoria de barrido. En contraparte, una desventaja importante de este esquema es la incapacidad del brazo manipulador para detectar y corregir situaciones de contacto de algún elemento del brazo con obstáculos en el entorno. Esta situación es potencialmente peligrosa para la integridad del brazo y de los objetos que éste pueda tocar, pudiendo ocasionar daños tanto en los objetos como en el mismo brazo. Sin embargo, el diseño del brazo manipulador tanto en su estructura mecánica como en su modo de operación, permite asegurar que el brazo nunca estará expuesto al contacto con obstáculos en el entorno; solo lo estará la cabeza sensora.

Las siguientes condiciones de diseño y operación del brazo permiten realizar la simplificación planteada:

- El robot (y el sistema de exploración), cuando inicia la operación, parte siempre de una zona conocida libre de obstáculos.
- Durante la operación del robot, éste siempre se desplaza por zonas previamente exploradas por la cabeza sensora.
- El brazo manipulador adopta siempre una postura codo arriba, donde sus eslabones se encuentran en la posición más elevada posible con respecto al terreno, y con la que todos sus eslabones se encuentran siempre entre el robot y la cabeza sensora.
- La cabeza sensora detecta la presencia de obstáculos antes de tocarlos.

4.1.1. Control acomodaticio

De manera general, en los robots articulados, el comportamiento acomodaticio se implementa en cada articulación mediante control activo de la posición en función de las fuerzas/pares medidos en la estructura, imitando un comportamiento flexible. Mediante este procedimiento se modifica la impedancia mecánica¹ de las articulaciones.

En nuestro sistema de exploración, el comportamiento acomodaticio lo hemos implementado por medio de un lazo cerrado de control de fuerza-posición de la cabeza sensora, empleando la fuerza virtual de contacto de la cabeza contra un obstáculo. Por medio de este esquema se logra:

- Evitar el contacto real de la cabeza sensora con los obstáculos (y, por

¹La impedancia mecánica Z_m se puede definir como la relación entre la fuerza que actúa sobre un área de un dispositivo mecánico y la velocidad lineal resultante a través de tal área. Sus unidades son los Ohmios mecánicos $(N\text{seg})/m$: $Z_m = \frac{F}{v} \frac{N\text{seg}}{m}$. Comúnmente se hace la analogía de este concepto con los sistemas eléctricos, donde en las ecuaciones eléctricas de impedancia se sustituye L (inducción) por M (masa), R (resistencia) por Rm (resistencia mecánica), $1/C$ (capacidad) por k (constante de elasticidad), E (voltaje) por F (fuerza), e I (corriente) por V (velocidad).

lo tanto, también del brazo y del robot).

- Construir un mapa con la ubicación de los puntos del espacio donde se ha detectado la presencia de un obstáculo.

y para ello, se han diseñado dos algoritmos principales:

- Medición de fuerzas virtuales de contacto.
- Barrido del terreno.

Mediante este control acomodaticio se pretende, finalmente, imitar un comportamiento de contacto inelástico² entre la cabeza sensora y los obstáculos. Se pretende imitar el comportamiento que tendría la cabeza sensora si estuviera rodeada de un material deformable y con bajo coeficiente de restitución; i.e., como si la cabeza sensora estuviera rodeada por un parachoques de gomaespuma o viscoelástico. De esta manera, a partir del instante del contacto virtual de la cabeza con un obstáculo, la cabeza reducirá su velocidad de aproximación, pudiendo llegar a detenerse, pero sin rebotar.

4.1.1.1. Medición de fuerzas de contacto

Generalmente los sensores de fuerza determinan indirectamente esta magnitud por medio de la medición de la deformación de un material rígido de características conocidas. Este tipo de sensores realiza mediciones de micro-desplazamientos, puesto que el material sobre el que se mide la deformación suele ser rígido (para evitar introducir flexibilidad en la estruc-

²En un choque inelástico la energía cinética no se conserva. Como consecuencia, los cuerpos que colisionan disipan energía mediante deformaciones y aumento de su temperatura. En el caso ideal, en un choque perfectamente inelástico de objetos macroscópicos, éstos permanecen unidos entre sí tras la colisión. Tanto el trabajo realizado durante la deformación de los cuerpos como el aumento de su energía interna se obtiene a partir de la energía cinética de los mismos antes del choque. En cualquier caso, aunque no se conserve la energía cinética, sí se conserva el momento lineal total del sistema.

tura mecánica de la que forman parte). Otros tipos de sensores de fuerza emplean materiales más flexibles, como muelles, ofreciendo un rango de desplazamiento por deformación mucho mayor.

El sensor de fuerza implementado en la cabeza sensora emplea la medición de la deformación de un muelle virtual ocasionada por el contacto virtual con un obstáculo. La fuerza de contacto se determina a partir de las variables de estado de un conjunto de 4 módulos muelle-amortiguador virtuales, actuados por un anillo virtual sin fricción que rodea el perímetro de la cabeza sensora (véase Fig. 4.1). Este anillo es el elemento que tendrá contacto virtual con los obstáculos.

La distancia medida entre la cabeza sensora y un potencial obstáculo en la trayectoria de la cabeza es convertida a una fuerza virtual de contacto,

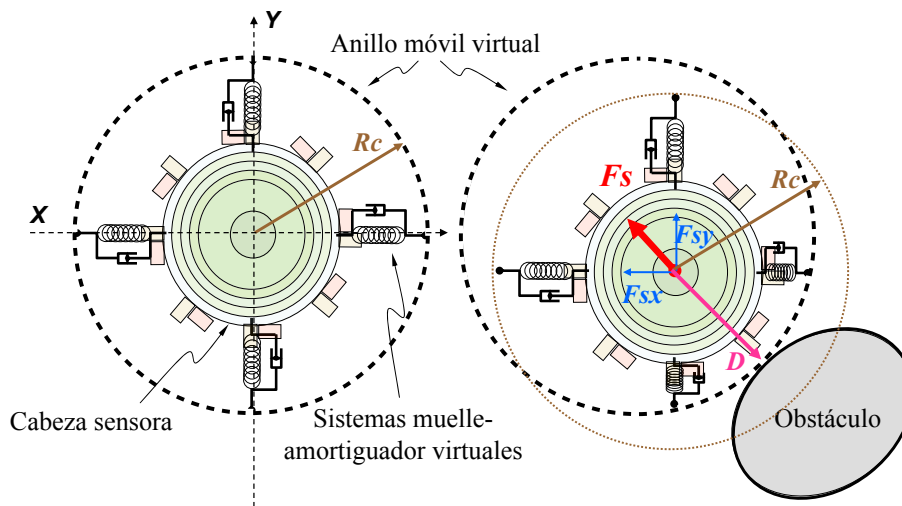


Figura 4.1: Esquema de la medición de fuerza virtual de contacto. Ejes coordenados X e Y de la cabeza sensora, radio de contacto R_c , anillo virtual (línea discontinua gruesa), distancia al obstáculo D , módulos muelle-amortiguador virtuales, componentes en ejes X e Y de la fuerza de contacto virtual F_{sx} y F_{sy} , fuerza de contacto virtual resultante F_s .

empleada posteriormente en el lazo de control de fuerza-posición que regula la interacción entre la cabeza y el obstáculo (véase Fig. 4.2).

Cada sistema muelle-amortiguador consiste en un muelle en paralelo con un amortiguador viscoso no-lineal. El muelle se modela sencillamente siguiendo la ley de Hook:

$$F_s = -K_S X_S \quad (4.1)$$

donde la F_S es la fuerza de restitución del muelle, K_S representa su constante de restitución y X_S es el desplazamiento del muelle, que se obtiene a partir de la información de distancia a los obstáculos D , y del parámetro preestablecido del radio de contacto virtual R_C , de la siguiente manera:

$$X_S = \begin{cases} R_C - D; & \text{si el obstáculo está más cerca que } R_C \\ 0; & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4.2)$$

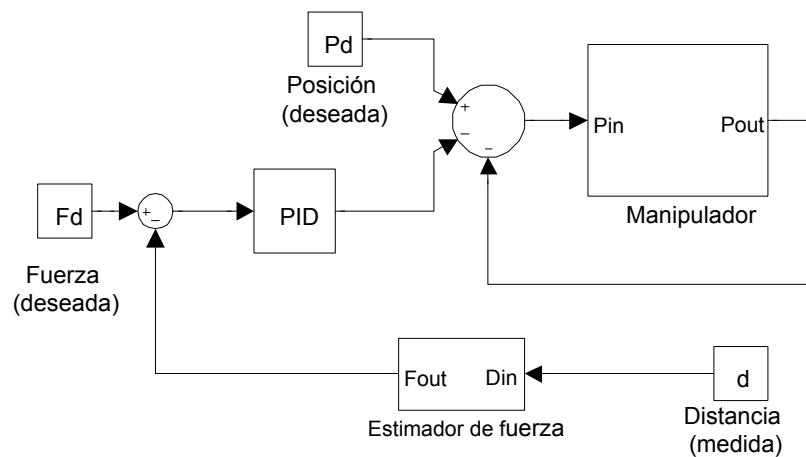


Figura 4.2: Lazo de control de fuerza-posición.

El radio de contacto virtual R_C es un valor dado a priori, medido desde el centro de la cabeza sensora, que da lugar al anillo virtual. Este anillo se comporta como un elemento rígido (no deformable), que transmite la acción de contacto a aquellos muelles que se comprimirían como consecuencia del contacto, y dejando libres (no actuando) los otros muelles que se elongarían. Esto se logra “apoyando” el anillo a los extremos de los muelles pero no fijándolo a ellos (en la imagen de la derecha de la Fig. 4.1, nótese cómo el anillo virtual comprime los muelles derecho e inferior y deja sin actuar los muelles izquierdo y superior).

El modelo básico del amortiguador implementado es el siguiente:

$$F_D = -K_D V_D \quad (4.3)$$

donde F_D es la fuerza de reacción del amortiguador viscoso ideal, K_D representa el factor de viscosidad, y V_D es la velocidad de desplazamiento, que coincide con la velocidad del muelle V_S , puesto que están conectados en paralelo. El comportamiento no-lineal del amortiguador se modela de la siguiente manera:

$$F_D = \begin{cases} -K_D V_D; & \text{si } D < R_C - X_S \\ 0; & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4.4)$$

causando que el amortiguador no ofrezca resistencia al movimiento durante la compresión del muelle, sino solo durante la restitución.

Para determinar los parámetros de este sistema, se divide la acción de contacto con obstáculos en las dos fases de la ecuación (4.4):

- Compresión del muelle ($D < (R_C - X_S)$).
- Restitución del muelle ($D \geq (R_C - X_S)$).

En la primera fase, se asume que la cabeza sensora posee una masa equivalente M , que se desplaza con una velocidad V , y en el tiempo $t = 0$ colisiona con un muelle ideal, con constante de restitución K_S , sobre su eje de compresión, con el otro extremo fijado al obstáculo (considerado rígido e inmóvil). El modelo matemático, empleando notación de ecuaciones diferenciales ordinarias EDO (Lebl, 2009), queda expresado de la siguiente manera:

Según la segunda ley de Newton:

$$Ma = -K_S X_S \quad (4.5)$$

Reescribiendo en notación de EDO:

$$M \frac{d^2 X_S(t)}{dt^2} = -K_S X_S(t)$$

Se puede demostrar que una EDO de tipo

$$\frac{d^2 X(y)}{dy^2} = -C^2 X(y) \quad (4.6)$$

tiene una solución general dada por

$$X(y) = A \operatorname{sen}(Cy) + B \operatorname{cos}(Cy) \quad (4.7)$$

por lo que la solución general del modelo para la fase de compresión viene dada por

$$X_S(t) = C_1 \operatorname{sen} \left(\sqrt{\frac{K_S}{M}} t \right) + C_2 \operatorname{cos} \left(\sqrt{\frac{K_S}{M}} t \right) \quad (4.8)$$

siendo C_1 y C_2 constantes aún por determinar en función de las condiciones iniciales.

Se puede demostrar por medio de las identidades trigonométricas

$$\begin{cases} \operatorname{sen}^2(\alpha) + \operatorname{cos}^2(\alpha) = 1 \\ \operatorname{sen}(\alpha + \beta) = \operatorname{sen}(\alpha)\operatorname{cos}(\beta) + \operatorname{cos}(\alpha)\operatorname{sen}(\beta) \end{cases} \quad (4.9)$$

que

$$A\operatorname{sen}(\alpha) + B\operatorname{cos}(\alpha) = \sqrt{A^2 + B^2} \operatorname{sen}\left(\alpha + \operatorname{atan}\left(\frac{A}{B}\right)\right) \quad (4.10)$$

Empleando (4.10), reescribimos (4.8)

$$X_S(t) = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \operatorname{sen}\left(\sqrt{\frac{K_S}{M}} t + \operatorname{atan}\left(\frac{C_1}{C_2}\right)\right) \quad (4.11)$$

donde el término $\sqrt{C_1^2 + C_2^2}$ representa la amplitud de la oscilación de la masa conectada al muelle, y el término $\operatorname{atan}\left(\frac{C_1}{C_2}\right)$ indica el desfase (el ángulo inicial en $t = 0$) de dicho movimiento oscilatorio.

Dadas las condiciones iniciales

$$\begin{cases} X_S(t = 0) = 0 \\ \frac{dX_S(t)}{dt}\bigg|_{t=0} = V \end{cases} \quad (4.12)$$

y sustituyendo en (4.11), se tiene

$$\begin{aligned}
X_S(t=0) = 0 &= \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \operatorname{sen} \left(\sqrt{\frac{K_S}{M}} t + \operatorname{atan} \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \right) \\
\Rightarrow \operatorname{sen} \left(\operatorname{atan} \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \right) &= 0 \\
\Rightarrow \operatorname{atan} \left(\frac{C_1}{C_2} \right) &= 0, \pi, \dots \\
\Rightarrow \frac{C_1}{C_2} = \tan(0) &\Rightarrow C_1 = 0
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Con $C_1 = 0$, el término de desfase desaparece. Esto resulta evidente, puesto que para el instante inicial de la compresión ($t = 0$), el muelle no presenta compresión inicial ($X_S = 0$). La solución (4.11) queda reducida a

$$X_S(t) = C_2 \operatorname{sen} \left(\sqrt{\frac{K_S}{M}} t \right) \tag{4.14}$$

Derivando el resultado (4.14) con respecto al tiempo y evaluando la segunda condición inicial de (4.12), se obtiene

$$\begin{aligned}
\frac{dX_S(t)}{dt} \Big|_{t=0} = V &= C_2 \sqrt{\frac{K_S}{M}} \cos \left(\sqrt{\frac{K_S}{M}} t \right) \Big|_{t=0} \\
\Rightarrow C_2 &= \frac{V}{\sqrt{\frac{K_S}{M}}}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

El valor C_2 obtenido en (4.15) indica la amplitud de la oscilación de la masa conectada al muelle; i.e. la máxima compresión del muelle cuando la cabeza sensora colisiona virtualmente contra un obstáculo.

Esta máxima compresión se alcanzaría en el instante de tiempo en el que la velocidad de la masa M se hace cero. Igualando a 0 la derivada de la posición calculada en (4.15), se obtiene el tiempo:

$$\begin{aligned}
\frac{dX_S(t)}{dt} = 0 &= C_2 \sqrt{\frac{K_S}{M}} \cos \left(\sqrt{\frac{K_S}{M}} t \right) \\
\Rightarrow \sqrt{\frac{K_S}{M}} t &= n \frac{\pi}{2}, \quad n = \{1, 3, 5 \dots\} \\
\Rightarrow t &= \frac{\pi}{2 \sqrt{\frac{K_S}{M}}}
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Dado el radio de contacto virtual R_C de la cabeza sensora y fijando también la máxima compresión C_2 permisible de los muelles virtuales, la ecuación (4.15) permite relacionar esta compresión máxima del muelle (i.e. qué tan cerca de la cabeza sensora llega realmente el obstáculo) con la velocidad de desplazamiento de la cabeza sensora en el instante de la colisión.

En la segunda fase del contacto virtual, que ocurre durante la restitución del muelle virtual, se emplea un modelo que incluye el término de resistencia viscosa:

Según la segunda ley de Newton:

$$Ma = -K_S X_S - K_D V_S$$

Reescribiendo en notación de EDO:

$$\frac{d^2 X_S(t)}{dt^2} + \frac{K_D}{M} \frac{dX_S(t)}{dt} + \frac{K_S}{M} X_S(t) = 0$$
(4.17)

La ecuación característica de esta EDO viene dada por

$$s^2 + \frac{K_D}{M} s + \frac{K_S}{M} = 0$$

cuyas raíces están dadas por:

$$s_1, s_2 = \frac{1}{2} \left(-\frac{K_D}{M} \pm \sqrt{\left(\frac{K_D}{M}\right)^2 - 4 \frac{K_S}{M}} \right)$$
(4.18)

Se desea que este sistema de segundo orden presente una respuesta críticamente amortiguada, con una restitución del muelle relativamente rápida pero sin oscilaciones (imitando un comportamiento inelástico). Para ello, las raíces s_1 y s_2 deben ser reales e iguales:

$$\begin{aligned} s_1 = s_2 &\Rightarrow \left(\frac{K_D}{M}\right)^2 - 4\frac{K_S}{M} = 0 \\ &\Rightarrow K_D = 2\sqrt{K_S M} \\ &\Rightarrow S = s_1 = s_2 = -\sqrt{\frac{K_S}{M}} \end{aligned} \tag{4.19}$$

Se puede demostrar que para una EDO de segundo orden del tipo mostrado en (4.17), la solución general críticamente amortiguada esta dada por

$$X_S(t) = C_3 e^{St} + C_4 t e^{St} \tag{4.20}$$

Las condiciones iniciales para esta segunda fase serían (midiendo el tiempo a partir del instante de tiempo calculado en (4.16)):

$$\begin{cases} X_S(t=0) = C_2 \\ \left. \frac{dX_S(t)}{dt} \right|_{t=0} = 0 \end{cases} \tag{4.21}$$

que al sustituir en (4.20), se obtiene

$$X_S(t=0) = C_2 \Rightarrow C_3 = C_2 \tag{4.22}$$

Derivando (4.20) con respecto al tiempo y evaluando la segunda condición inicial de (4.21), se obtiene

$$\begin{aligned} \frac{dX_S(t)}{dt} \Big|_{t=0} = 0 &= (C_3 S e^{St} + C_4 e^{St} + C_4 S t e^{St}) \Big|_{t=0} \\ &\Rightarrow C_3 S + C_4 = 0 \Rightarrow C_4 = -C_3 S \end{aligned} \quad (4.23)$$

Substituyendo (4.15), (4.19), (4.22) y (4.23) en (4.20), se tiene la solución particular

$$X_S(t) = V \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{K_S}{M}}} + t \right) e^{-\sqrt{\frac{K_S}{M}} t} \quad (4.24)$$

Por medio de (4.24), y conocidos los parámetros de masa de la cabeza M , velocidad de impacto V , la constante de elasticidad del muelle K_S , y la relación de la constante de viscosidad del amortiguador K_D establecida en (4.19), el controlador de barrido calcula la posición de cada muelle durante su restitución después del contacto con un obstáculo.

Cuando en estado de reposo la cabeza sensora no detecta obstáculos cercanos (i.e., $D > R_C$), el anillo virtual se encuentra centrado en el eje de la cabeza sensora, los muelles no presentan compresión, y no existen fuerzas de compresión ni de restitución. Si un obstáculo se aproxima a la cabeza sensora, las fuerzas seguirán siendo cero hasta que $D < R_C$, condición en la que el anillo virtual comienza a desplazarse, actuando sobre algunos muelles.

Cada uno de los módulos virtuales actuados contribuye con un vector de fuerza (F_{SX} y F_{SY} en la Fig. 4.1), y de la suma vectorial de estas fuerzas se obtiene el vector resultante empleado en el lazo de control de fuerza-posición de la cabeza sensora.

La cabeza sensora se mueve en función solamente de la consigna de posición hasta que colisione virtualmente contra un obstáculo, situación que generará fuerzas en los muelles que serán realimentadas en el lazo de

control, ocasionando la modificación de la posición de la cabeza persiguiendo un equilibrio entre las consignas de fuerza y posición.

Una descripción más completa del movimiento de la cabeza sensora será dada en las siguientes secciones.

4.1.1.2. Barrido del terreno

El robot móvil emplea un algoritmo de *Complete Coverage* (cobertura completa), con el que se lleva a cabo una descomposición del área de terreno en celdas libres de obstáculos y celdas con obstáculos (García y González de Santos, 2004) y se traza un recorrido por las celdas tal que se garantiza la exploración de un porcentaje alto del área total de las celdas sin obstáculos.

La secuencia básica del barrido del terreno se asemeja al procedimiento manual realizado por los operarios humanos cuando desplazan el detector de metal sobre la superficie de un lado al otro de la celda que están explorando.

En nuestro caso, el brazo manipulador mueve la cabeza sensora de un

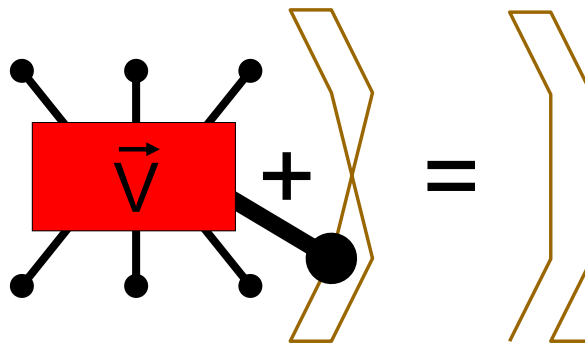


Figura 4.3: Movimiento compuesto del barrido de la cabeza sensora. El movimiento de barrido trapezoidal en el sistema de referencia absoluto (terreno) se obtiene como resultado del desplazamiento a velocidad constante del robot móvil sumado al movimiento de barrido trapezoidal cruzado de la cabeza sensora.

lado al otro del robot móvil siguiendo una trayectoria trapezoidal, barriendo siempre el terreno próximo delante del robot móvil y cubriendo sus 1.5 m de envergadura, capturando información del terreno relativa a las alarmas de minas, obstáculos, y relieve de la superficie. Esta información se comunica en tiempo real al robot móvil para que pueda determinar la configuración adecuada de puntos de soporte de las patas y evitar pisar sobre una mina, tropezar contra un obstáculo, etc.

En el caso más general, el robot móvil se desplazará en línea recta hacia adelante y con velocidad constante. Como consecuencia, el movimiento real de barrido de la cabeza sensora sobre el terreno es una composición de dos movimientos: desplazamiento del robot más el movimiento del manipulador

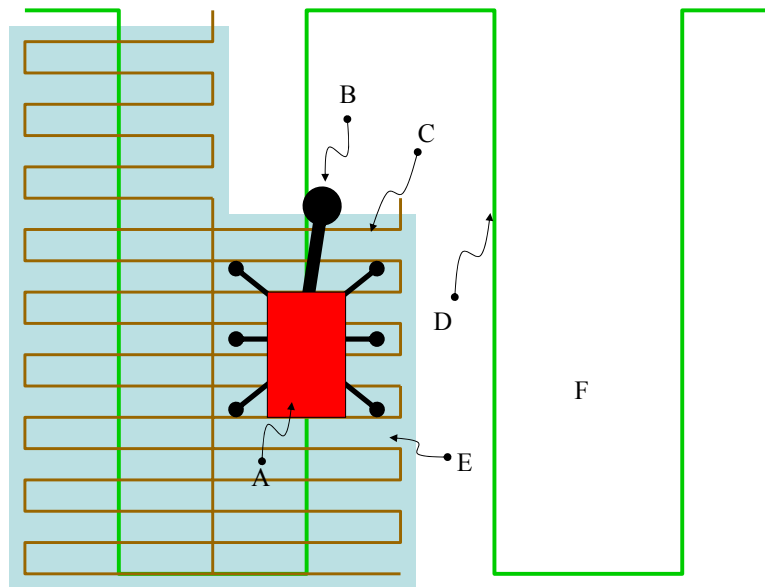


Figura 4.4: Barrido del terreno. (A) Robot móvil, (B) Cabeza sensora, (C) Trayectoria nominal de barrido realizado por el brazo manipulador, (D) Trayectoria nominal del robot móvil, (E) Terreno barrido, (F) Terreno aún no barrido.

(véase Fig. 4.3). Como se puede observar en esta figura, el movimiento de barrido realizado por el manipulador consiste realmente en un lazo trapezoidal cruzado; es decir, la cabeza sensora describiría un movimiento con forma de lazo cerrado trapezoidal si el robot se encuentra inmóvil (velocidad nula).

El robot móvil debe recorrer todas las celdas sin obstáculos (generadas mediante el procedimiento del *Complete Coverage*) en las que se ha dividido la superficie, por lo que en general los movimientos del robot y la cabeza sensora sobre el terreno presentan un comportamiento similar al mostrado en la Fig. 4.4.

4.1.2. Seguimiento de contorno

El seguimiento de contorno de un obstáculo consiste, de manera general, en la modificación de la trayectoria nominal del barrido cuando la cabeza sensora se aproxima a un obstáculo, deslizándose por el segmento del contorno (o perímetro del obstáculo) dentro del área de barrido. El contorno completo del obstáculo puede obtenerse posteriormente una vez que se haya completado una serie de barridos alrededor de todo el obstáculo.

El algoritmo de detección del contorno de los obstáculos consta de dos fases generales:

- Barrido con contacto acomodaticio.
- Unión de los segmentos de contornos obtenidos en barridos anteriores.

4.1.2.1. Barrido con contacto acomodaticio

El comportamiento acomodaticio de la cabeza sensora permite seguir el trazo del contorno de un obstáculo que se encuentra dentro del área nominal

que la cabeza sensora debe explorar durante el barrido (véase Fig. 4.5).

Como ya se ha mencionado, la distancia al obstáculo se convierte a fuerza virtual de contacto y se inyecta al lazo de control de fuerza-posición de la cabeza sensora (siguiendo el esquema explicado en la sección 4.1.1.1)). Esto permite modificar la posición nominal de la cabeza durante el barrido y adaptarla a la forma del contorno del obstáculo, capturándose durante este procedimiento las coordenadas de los puntos del contorno detectado.

Se persigue con este procedimiento imitar el comportamiento que tendría una varilla flexible si se empleara como “bigote de gato”, de manera que a pesar de moverlo por el extremo superior siguiendo una trayectoria dada, el extremo inferior, en contacto con un obstáculo, se flexionaría modificando la trayectoria siguiendo el contorno.

4.1.2.2. Unión de segmentos de contorno

Un procedimiento para determinar el contorno completo de un obstáculo consiste en conectar aquellos segmentos de contorno que se encuentren

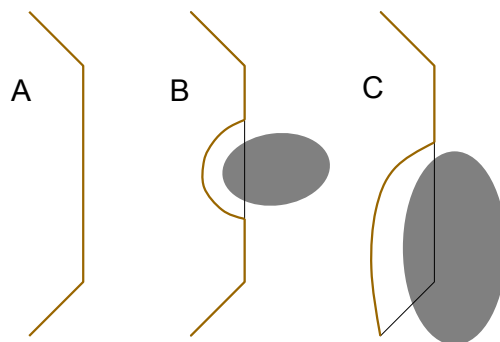


Figura 4.5: Barrido con comportamiento acomodaticio. (A) Trayectoria nominal del barrido, (B) Trayectoria del barrido modificada por la presencia de un obstáculo pequeño, (C) Trayectoria del barrido modificada por un obstáculo de gran tamaño.

próximos entre sí. Sin embargo, este procedimiento debe afrontar la dificultad de reconocer dentro de un conjunto relativamente grande y disperso de puntos (debido al ruido en los sensores y otras fuentes de error), cuáles pertenecen al contorno real del obstáculo.

En la literatura relativa a los sistemas de representación de mapas se encuentran diversos métodos que ofrecen procedimientos para el análisis de grandes cantidades de datos (puntos) y permiten representarlos en un plano para su posterior interpretación. Uno de los métodos más populares para la construcción de mapas a partir de datos del entorno capturado por robots es la denominada rejilla de ocupación (*Occupancy Grid*) (Elfes, 1989).

La popularidad de este método radica en su versatilidad y facilidad de implementación. La utilidad de implementar éste (o cualquier otro método) en nuestro trabajo se limita a proveer una plataforma de construcción de mapas que permita representar a los obstáculos detectados por nuestro sistema de exploración, sirviendo como base para la evaluación de los sistemas sensores y de los algoritmos diseñados.

Continuando con la introducción dada en la sección 2.1.2.1, la idea básica detrás de la rejilla de ocupación consiste en emplear una representación probabilística de la información espacial, construyendo un mapa de la distribución de probabilidad del estado de ocupación de cada punto del mapa. Dos propiedades fundamentales de éste método lo convierten en una buena opción:

Actualización incremental del mapa a medida que la información del entorno se va capturando.

Fusión sensorial fácil de implementar a partir de la información proveniente de diferentes sensores o incluso de los mismos sensores pero en instantes de tiempo diferentes.

La rejilla de ocupación es una representación multidimensional que contiene información estocástica del estado de ocupación de las celdas que componen un espacio de tipo discreto. La información contenida en esta representación se obtiene a partir de la interpretación de los datos de los sensores que miden el entorno, donde estos sensores son modelados con funciones probabilísticas. Empleando procedimientos bayesianos³ se puede lograr la actualización incremental del mapa (rejilla) a medida que se obtienen nuevas lecturas de sensores.

En su forma más simple, el plano se divide en pequeñas celdas, con la variable de estado $s(C)$ asociada a la celda C de la rejilla, y definida como una variable aleatoria discreta con dos estados: ocupado y vacío. Modelos más complejos pueden emplear vectores, codificando múltiples propiedades en el estado de la celda. Este tipo de representación compleja es denominada también Rejilla de Inferencia (*Inference Grid*).

En el caso de celdas representadas por una variable binaria con valores OCU y VAC (ocupada y vacía, respectivamente), donde estos estados son excluyentes, se tiene que

$$P[s(C) = OCU] + P[s(C) = VAC] = 1 \quad (4.25)$$

donde $P[A]$ indica la probabilidad del evento A .

Puesto que el mapa del entorno, representado por la rejilla de ocupación,

³Thomas Bayes, matemático (Londres, Inglaterra, 1702 - Tunbridge Wells, 1761). Autor del teorema que lleva su nombre y que determina la probabilidad de un suceso condicionado por la ocurrencia de otro suceso. Con su teorema se resuelve el problema conocido como “problema de la probabilidad inversa”, estimando probabilísticamente las posibles condiciones que existen dado que se ha observado un suceso. Se trata de probabilidad “inversa” en el sentido de que la “directa” sería la probabilidad de observar el suceso dado que existen ciertas condiciones (Bayes y Price; publicado por Price en 1763).

suele ser modificado o “actualizado” en función de la información recogida por los sensores del robot, es conveniente estudiar este problema mediante teorías de estimación debido a la aleatoriedad intrínseca en toda lectura de sensor. En su forma más general, se puede modelar la rejilla como un campo aleatorio de Markov⁴ (Adler y Taylor, 2007; Meyn y Tweedie, 1993; Kindermann y Snell, 1980) de orden 0, puesto que se asume que el estado de cada celda de la rejilla es espacialmente independiente del resto de celdas.

Esto quiere decir que se asume que cada celda se modela como una variable aleatoria espacialmente independiente, condición que reduce en gran medida el costo matemático y computacional del cálculo de probabilidad de ocupación de cada celda, permitiendo emplear funciones de densidad de probabilidad marginal conjunta⁵, donde dado un mapa con N celdas estadísticamente independientes, el cálculo de probabilidades de ocupación se puede llevar a cabo empleando modelos probabilísticos basados en distribuciones o densidades de probabilidad marginal⁶.

La formulación bayesiana, como se dijo anteriormente, se emplea para la actualización incremental de la rejilla dada la información procedente de los sensores. El teorema de Bayes (Bayes y Price, 1763) puede presentarse con la siguiente formulación: dadas dos variables aleatorias A y B , se tiene:

⁴Andrei Andreevich Markov nació en Ryazan, Rusia, el 14 de junio de 1856 y murió en San Petersburgo en 1914. Fue creador de las *cadena de Markov*, como un modelo para el estudio de variables dependientes, el cual dio lugar a una gran cantidad de investigación posterior en la teoría de los procesos estocásticos, convirtiéndose en uno de los conceptos más importantes en la construcción de modelos en gran cantidad de campos que abarcan desde la sociología a la física teórica. Perteneció a la escuela matemática de San Petersburgo fundada por Chebychev, y junto a Liapunov llegó a ser una de las figuras más eminentes en el campo de la probabilidad (Basharin et al., 2004).

⁵*Densidad de probabilidad marginal conjunta* (Peebles, 1987): referirse al apartado F.2.8, página 298.

⁶Ver apartado F.2.9, página 299, donde se muestra la simplificación de las funciones probabilísticas cuando cesan las dependencias entre variables aleatorias (Peebles, 1987).

$$P(A|B) = P(B|A) \frac{P(A)}{P(B)} \quad (4.26)$$

donde $P(A|B)$ es la probabilidad condicional de A dado B ; $P(A)$ es el “conocimiento previo” que se tiene de esta variable, frecuentemente llamado *prior knowledge* o simplemente *prior*⁷ de A ; $P(B)$ es el *prior* de B ; y el valor $P(B|A)$ representa la probabilidad de obtener el valor B dada la condición del valor A (Konolige, 1997).

De manera general, desde un punto de vista práctico de este teorema en el caso mapas y sensores, se tiene que dado el estado actual de la estimación de ocupación de una celda C_i , $P[s(C_i) = OCU|r_i]$, basada en las observaciones anteriores $r_t = r_1, \dots, r_t$ y dada la nueva observación r_{t+1} , la nueva estimación del estado se obtiene aplicando el teorema de Bayes de la siguiente manera:

$$P[s(C_i) = OCU | \{r\}_{t+1}] = \frac{p[r_{t+1} | s(C_i) = OCU] P[s(C_i) = OCU | \{r\}_t]}{\sum_{s(C_i)} p[r_{t+1} | s(C_i)] P[s(C_i) | \{r\}_t]} \quad (4.27)$$

En este caso $p[r_{t+1} | s(C_i) = OCU]$ se conoce como el “modelo del sensor”, ya que representa la probabilidad de obtener la lectura del sensor r_{t+1} dado el estado $s(C_i) = OCU$ del entorno. $P[s(C_i) = OCU | \{r\}_t]$ representa el conocimiento previo que se tiene del estado de la celda y se obtiene directamente de dicha celda. El nuevo valor obtenido, $P[s(C_i) = OCU | \{r\}_{t+1}]$, es almacenado subsecuentemente en la celda.

Retomando la formulación en (4.26), se puede leer esta ecuación de la siguiente manera: la probabilidad A de estar ocupada la celda dada la lectura actual del sensor B es igual a la probabilidad de que el sensor reporte una

⁷Ver nota del apartado F.2.12 en la página 301.

lectura B dada una ocupación A hipotética de la celda multiplicada por la probabilidad conocida (almacenada actualmente en la celda) de ocupación de la celda y dividida por la probabilidad de la lectura B del sensor.

Esta formulación recursiva requiere una condición inicial, puesto que el estado actual de cada celda depende del estado anterior. En el caso más general, se puede inicializar todas las celdas del mapa con un valor de probabilidad de ocupación de 0.5, puesto que al no existir información previa, existe la misma probabilidad de que una celda esté o no ocupada. Sin embargo, si existe información previa de ocupación, e.g., se conoce la ubicación de ciertos obstáculos en el área, se puede asignar a las celdas respectivas una probabilidad de ocupación de 1.

4.1.2.2.1. La rejilla de ocupación En una implementación básica, se crea una representación 2D o 3D del entorno dividiendo el espacio en celdas, donde cada celda almacena una estimación probabilística de su estado de ocupación.

En nuestro caso se utiliza una rejilla 2D asociada a celdas de $1 \times 1 \text{ cm}$ representando el plano XY del entorno inmediato frente al robot caminante y bajo el brazo manipulador. La actualización de los valores de cada celda de la rejilla se lleva a cabo siguiendo un procedimiento iterativo bayesiano basado en la ecuación (4.26).

Se puede emplear una representación más intuitiva de las cantidades involucradas en el teorema de Bayes, empleando los “cambios en las posibilidades”, que en inglés se conoce como *change in odds ratio* o simplemente *odds* (término que será así empleado en este trabajo)⁸ (Konolige, 1997):

⁸Según el Diccionario de dudas inglés-español de Fernando Navarro, la traducción de esta expresión inglesa ha sido fuente permanente de desacuerdos. Se plantea incluso la conveniencia de no traducirla aunque el autor se decanta por “cociente de posibilidades”. Es un término poco usado fuera del juego (en Inglaterra) y la estadística. Se define como

$$O(A) \doteq \frac{P(A)}{P(\bar{A})} \quad (4.28)$$

$$O(A|B) \doteq \frac{P(A|B)}{P(\bar{A}|B)} \quad (4.29)$$

$$O(A|B) = \frac{P(B|A)}{P(B|\bar{A})} O(A) \doteq \lambda(B|A) O(A) \quad (4.30)$$

donde $O(A)$ son los *odds* del evento A ; $\lambda(B|A)$ es el *likelihood ratio*, o simplemente *likelihood*⁹, de B dado A .

Usando estas definiciones de *odds* y *likelihood*, el teorema de Bayes en su forma de (4.30) se puede leer como: los odds de una ocupación A de la celda dada la lectura actual B del sensor es igual al likelihood de la lectura B del sensor dada la hipotética ocupación A de la celda multiplicado por los odds de la ocupación A de la celda. Dado que el *likelihood* es el cociente de las probabilidades de las dos hipótesis (probabilidad de obtener la lectura del sensor dada la ocupación y la no ocupación de la celda), un valor igual a 1 indicaría que ambas hipótesis son igualmente probables, lo que no aportaría nueva información acerca del entorno y la rejilla no podría ser actualizada; i.e., sus valores actuales no cambiarían.

Una representación más conveniente se consigue empleando logaritmos, dado que las multiplicaciones y divisiones se convierten en sumas y restas:

$$\log O(A|B) = \log \lambda(B|A) + \log O(A) \quad (4.31)$$

el cociente entre la probabilidad de que un evento ocurra y la de que no ocurra. Se puede decir que es una medida del “riesgo”.

⁹El *likelihood ratio*, traducido al español como cociente de verosimilitud, y comúnmente denotado con la letra λ , es la razón de la máxima probabilidad de un resultado bajo dos hipótesis diferentes (típicamente es el cociente entre la probabilidad de ocurrencia y la probabilidad de no ocurrencia de un evento). Una prueba de *likelihood* es una prueba estadística que permite tomar una decisión entre dos hipótesis dado el valor de su razón.

De esta manera, el logaritmo de los *odds* de una ocupación A de la celda dada la lectura actual B del sensor es igual al logaritmo del *likelihood* de la lectura B del sensor dada la hipotética ocupación A de la celda sumado al logaritmo de los *odds* de la ocupación A de la celda. Es decir, mediante esta representación del teorema, la contribución del *prior* (el valor actualmente presente en la celda) se suma a la contribución obtenida a partir de la observación de los sensores (contribución que depende de la “confianza” que se tiene en la medición del sensor), resultando en un procedimiento convenientemente sencillo para actualizar el mapa cuando se adquieren nuevos datos.

4.1.2.2.2. El modelo del sensor En el contexto de las rejillas de ocupación, el modelo del sensor es una distribución espacial de la probabilidad de ocupación de las celdas dada la lectura del sensor (representa el valor $P(B|A)$ en la ecuación del teorema de Bayes presentado en (4.26)).

El modelo del sensor suele determinarse de manera experimental. Uno de los métodos más generales consiste en:

- Fijar el sensor a una base, colocar un obstáculo a una distancia $D1$ conocida frente al sensor, en su eje central, y registrar su lectura $L1$.
- Mover el obstáculo por cada una de las celdas $C_{i,j}$ alrededor del sensor, registrándose las coordenadas $\{i, j\}$ en las que se obtiene una lectura $L = D$.
- Repetir para diferentes distancias Dn , con $n = \{1, 2, ..\}$.
- Para cada posición $\{i, j\}$, calcular la probabilidad de que el sensor entregue la lectura registrada dado que el obstáculo esté en dicha posición.
- Finalmente, a partir de los resultados de la distribución de proba-

bilidad en la rejilla, se determina (mediante regresión numérica, por ejemplo) la función que modela dicho comportamiento probabilístico en el espacio¹⁰.

Otro método bastante popular y más sencillo que el anterior, consiste en establecer un modelo matemático inicial del comportamiento teórico del sensor y posteriormente ajustar sus parámetros por medio de datos experimentales. Este método es el empleado en nuestro trabajo.

El modelo para el sensor de distancia que proponemos consiste en un “cono” 2D sobre el plano XY de la cabeza sensora (véase Fig. 4.6), similar al de los modelos simples de sonares ultrasónicos (Thrun et al., 2005). Este modelo asume que el sensor entregará un mismo valor de distancia para cualquier objeto que se encuentre a ese radio frente al sensor y sobre el arco de apertura angular igual a la del cono. Además de la distancia del obstáculo frente al sensor, también indica la no existencia de otro obstáculo entre el primero y el sensor, porque de lo contrario la medición sería distinta.

En la Fig. 4.6 se muestran las diferentes zonas que componen el modelo general del sensor de distancia:

- Zona hipotética de espacio ocupado: indicado con el color rosa, es la banda en la que un obstáculo debe ubicarse para que el sensor entregue la medición actual. El modelo general de actualización del mapa asignará a las celdas de la rejilla que pertenezcan a esta zona una mayor probabilidad de ocupación.
- Zona hipotética de espacio libre: indicado con el color morado, es el área frente al sensor que debe estar libre de obstáculos para que el sensor entregue la medición actual. El modelo general de actualización del mapa asignará a las celdas de la rejilla que pertenezcan a esta zona

¹⁰Cuando la lectura del sensor es de tipo continua, es posible obtener una función matemática similar a la “función de densidad de probabilidad condicional”.

una menor probabilidad de ocupación.

- Zona de no-información: es el resto del área acerca de la que no se tiene información de ocupación dada la medición actual del sensor. El modelo general de actualización del mapa no modificará el valor actual de las celdas de la rejilla que pertenezcan a esta zona.

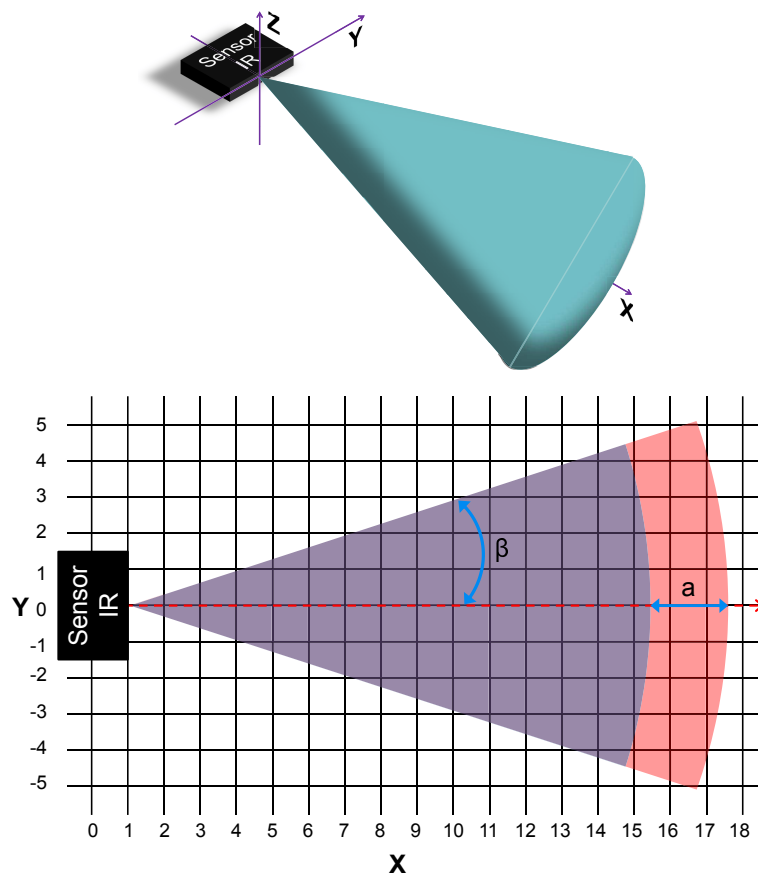


Figura 4.6: Esquema del modelo básico del sensor de distancia. Esquema del “cono” 3D de detección (arriba) y proyección 2D (abajo) sobre el plano XY de la rejilla de ocupación. Se muestran las 3 zonas: hipótesis de espacio ocupado (rosa) de ancho a , hipótesis de espacio libre (morado) de apertura angular β con respecto al eje central, y no-información (blanco).

Cualquier elemento del robot que aporte información acerca de los obstáculos puede ser utilizado para actualizar la rejilla de ocupación. Dado que la cabeza sensora se desplaza solamente sobre áreas despejadas de obstáculos, es posible asignarle también un modelo de sensor. El modelo consiste básicamente en un área circular que representa una zona hipotética de espacio libre, con dimensiones similares a la de la plataforma de la cabeza (véase Fig. 4.7). Empleando este modelo en conjunto con los sensores de distancia

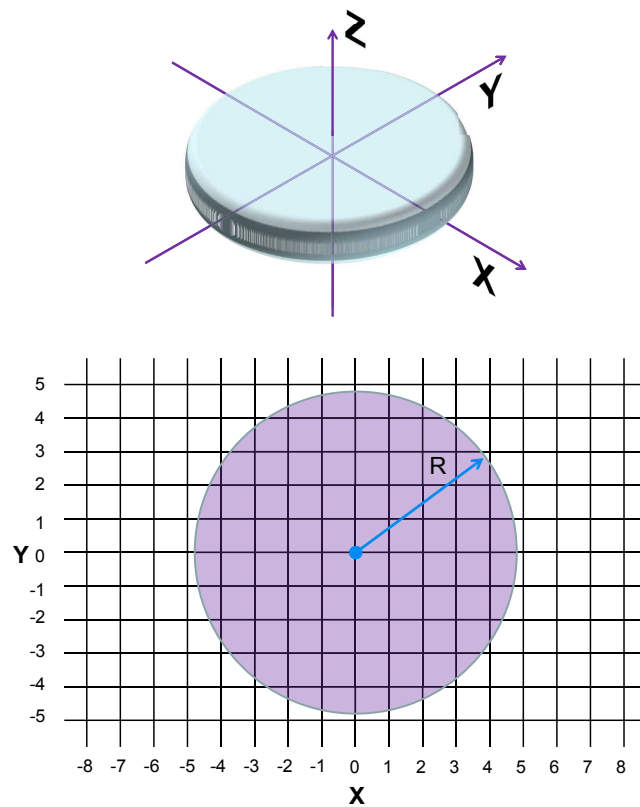


Figura 4.7: Esquema del modelo básico de la estructura de la cabeza sensora. Esquema 3D de la estructura de la cabeza sensora (arriba) y proyección 2D (abajo) sobre el plano XY de la rejilla de ocupación. Se muestran las 2 zonas principales: hipótesis de espacio libre (morado) de radio R , y no-información (blanco).

se logra actualizar un mayor número de celdas de la rejilla que si se empleara sólo los sensores de distancia.

En general, las zonas hipotéticas de espacio ocupado representan las áreas donde se supone que se encuentra el obstáculo que ha causado el estado actual del sensor. La zona hipotética de espacio libre representa el área en la que se supone que no hay obstáculos dado el estado actual del sensor, puesto que de lo contrario el sensor presentaría un estado diferente. Finalmente, la zona de no-información comprende el resto de la superficie no involucrada en el estado actual del sensor.

Dado que para la actualización de la rejilla se emplea la formulación del teorema de Bayes presentada en la ecuación (4.31), los modelos de los sensores deben entregar como salida valores de tipo $\log(\lambda(B|A))$; es decir, el *log-likelihood* de la medición del sensor dada la ocupación actual de las celdas.

Siguiendo el esquema mostrado en la Fig. 4.6, la función matemática del modelo del sensor de distancia consta de los ya mencionados trozos: zona de detección, zona de espacio libre y zona de no-información.

Para la zona de detección se ha diseñado una función del *likelihood* empleando una distribución bidimensional gaussiana que incluye factores variables de atenuación de la detección α (tomado de Konolige, 1997), y de la desviación estándar del rango medido δ , dependientes de la distancia entre la celda a evaluar y el sensor R_c . Con estos factores variables aplicados a la distribución gaussiana se obtiene un modelo más ajustado a la realidad del sensor que con una función gaussiana estándar (ya que toma en cuenta la variación de la detección del sensor en función de la distancia), dado por:

$$\lambda = \frac{1}{P_{void}} \left(P_{void} + \frac{\alpha}{2\pi\delta\sigma_\theta} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta^2}{\sigma_\theta^2} + \frac{(D_{sens} - R_c)^2}{\delta^2} \right)} \right) \quad (4.32)$$

Este modelo consiste básicamente en una distribución gaussiana en dos dimensiones (ángulo θ y radio R_c) con factores dependientes de la distancia de detección, que recibe como entradas:

- La distancia D_{sens} medida por el sensor.
- La distancia R_c entre sensor y la celda sobre la que se quiere calcular el *likelihood* de la lectura.
- Ángulo θ entre el eje del sensor y la celda sobre la que se quiere calcular el *likelihood* de la lectura.
- Los parámetros del sensor, ajustados de manera empírica. Entre los más relevantes se encuentran:
 - a : factor del ancho de la zona de detección del sensor. De manera general, las funciones $max, min[(1 \pm a)D_{sens}]$ definen los radios de la zona con forma de arco donde se supone que está el obstáculo.
 - a_{min} : ancho mínimo de esta zona de detección.
 - β : apertura angular del haz del sensor. El haz infrarrojo del sensor se abre $\pm\beta$ rad con respecto a su eje central.
 - σ_θ : desviación estándar angular de la lectura del sensor.
 - δ : desviación estándar lineal de la lectura del sensor; i.e., del rango medido.
 - σ_r : factor de error general de la lectura de distancia.
 - $error_r$: factor de error de la lectura de distancia debido a la distancia.

- α_r : factor de atenuación de la detección (a mayor distancia, menor probabilidad de que el sensor detecte el obstáculo).
- max_r : máxima rango operativo del sensor.
- P_{void} : probabilidad de que el sensor entregue la medición actual dado que no exista obstáculo (falso positivo).

donde α y δ están definidos como

$$\alpha = \alpha_r(1 - \min(1, (max_r, R_c))) \quad (4.33)$$

$$\delta = \sigma_r + error_r R_c \quad (4.34)$$

Este modelo de la zona de detección indica que a medida que las celdas se encuentran más alejadas (en ángulo) del eje central y más alejadas del radio central (medición) reportado por el sensor, éste tendrá menor *likelihood* de aportar información nueva acerca de la ocupación de dichas celdas.

Para la zona de espacio libre (área entre la zona de detección y el sensor de distancia), se ha diseñado una función del *likelihood* de la lectura con la siguiente forma:

$$\lambda = 1 - e^{\left(\frac{-\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right)} e^{\left(\frac{-1}{D_{sens} - H - R_c}\right)} \quad (4.35)$$

donde H es un valor que permite ajustar la alineación de las funciones en la frontera de las zonas de detección y de espacio libre. Está definido como la mitad del ancho de la zona de detección:

$$H = \frac{a D_{sens} + a_{min}}{2} \quad (4.36)$$

El modelo de la zona libre consiste básicamente en una función de tipo gaussiana multiplicada por una exponencial. La gaussiana es dependiente

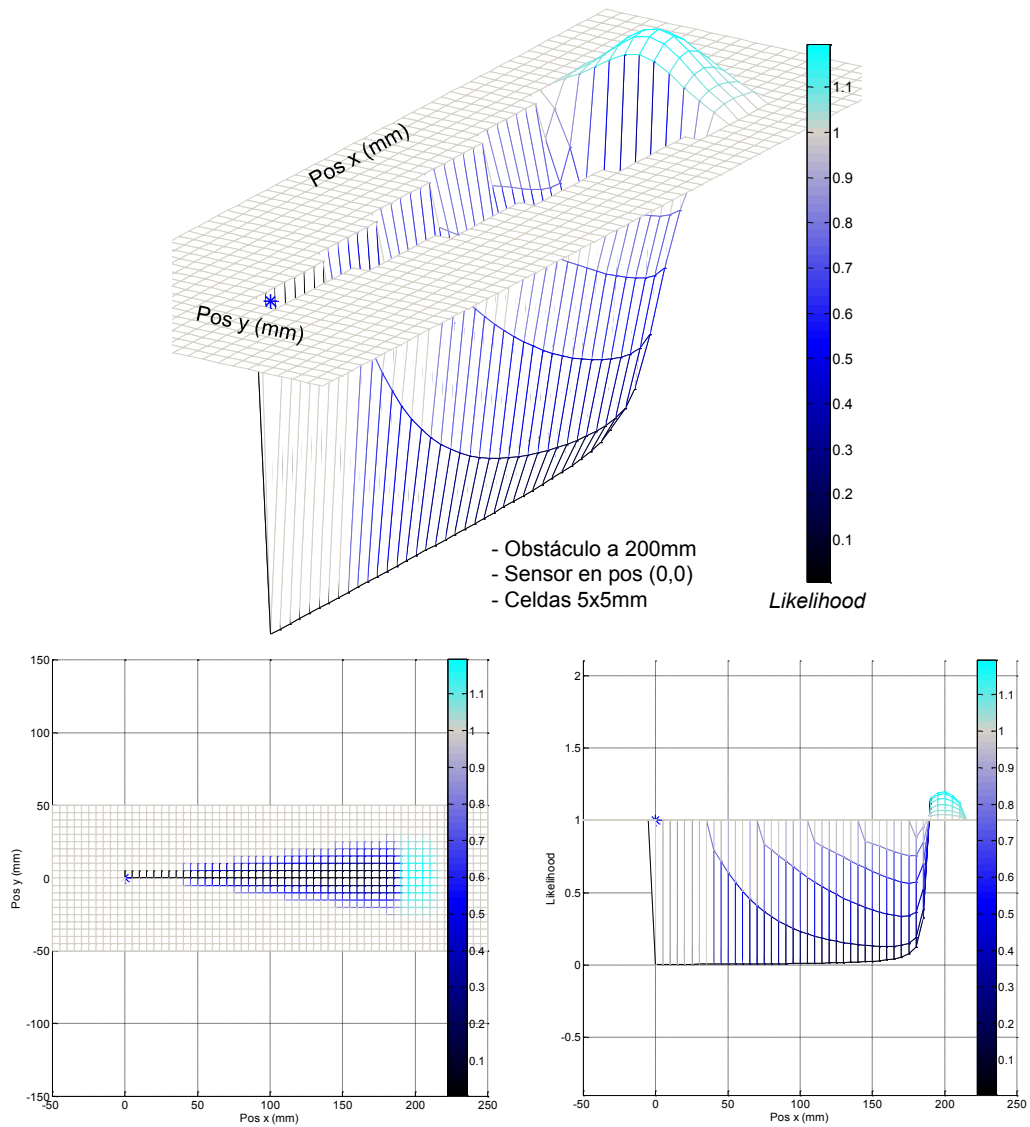


Figura 4.8: Superficie de la función de *likelihood* de la lectura del sensor de distancia. El sensor se encuentra en el símbolo ‘*’. Las celdas en la zona de detección presentan un *likelihood* > 1 . Las celdas en el cono activo presentan $0 < \textit{likelihood} < 1$. El resto de celdas presentan un valor de 1.

del ángulo entre el radio de la celda y el radio central del sensor, e indica que a medida que las celdas se encuentran más alejadas del eje central del sensor, éste tendrá menor *likelihood* de aportar información nueva acerca de la desocupación de dichas celdas. La segunda exponencial “modula” a la gaussiana con respecto al radio de la celda, de manera que a medida que las celdas están más cerca del sensor, éste tendrá mayor *likelihood* de aportar información nueva acerca de la desocupación de dichas celdas.

Con respecto a la zona de no-información, el modelo es fácil de diseñar: si la celda a actualizar no se encuentra dentro de alguna zona activa del sensor, no se entrega información nueva acerca de dicha celda; es decir, es igualmente probable que la celda esté ocupada o no dada la lectura actual del sensor, i.e., $\lambda = 1$.

Para ilustrar la forma de la función del modelo, la Fig. 4.8 muestra la superficie de la función del *likelihood* de la lectura del sensor de distancia. El sensor se encuentra ubicado en la posición $(0, 0)$ e indicado con un asterisco, y el obstáculo que causa la medición actual del sensor se encuentra a 200 mm. Las celdas en la zona de detección del sensor presentan un *likelihood* > 1 , significando que la probabilidad de que estas celdas estén ocupadas, dada la lectura actual del sensor, es alta. Las celdas dentro del cono activo presentan $0 < \textit{likelihood} < 1$, indicando que la probabilidad de que estas celdas estén ocupadas, dada la lectura actual del sensor, es baja. Todas las demás celdas presentan un valor de 1, lo que implica que no se tiene información adicional acerca de estas celdas.

4.1.2.2.3. Fusión sensorial Es frecuente que exista redundancia en el proceso de actualización de la rejilla; es decir, una misma celda puede ser actualizada más de una vez durante la operación del robot. Esto ocurre en los siguientes casos generales:

- Un sensor reporta datos acerca de una misma celda en instantes diferentes de tiempo.
- Diferentes sensores de igual naturaleza reportan datos acerca de una misma celda.
- Diferentes sensores de distinta naturaleza reportan datos acerca de una misma celda.

También es frecuente que la redundancia sea contradictoria, lo que ocurre cuando se actualiza una celda con valores contrarios; e.g., acerca de una misma celda, un sensor indica que está ocupada mientras que otro sensor indica lo contrario.

Es posible, no obstante, establecer reglas o modelos de fusión sensorial que definen el comportamiento del proceso de actualización de una celda en presencia de datos redundantes. En un esquema simple, se asignaría a la celda el valor de actualización más reciente; sin embargo, se correría el riesgo de obtener un mapa con valores erróneos en el caso de que existiera un sensor defectuoso. Un esquema más robusto realizaría el cálculo de la media de los valores asignados a una celda. De esta manera, si existiera algún sensor defectuoso, su efecto se atenuaría dada las aportaciones de los demás sensores. Sin embargo, el problema persiste si algún sensor actualiza la celda con una frecuencia mayor que la del resto de sensores, forzando el valor de la celda hacia el valor de dicho sensor.

En nuestro diseño de fusión sensorial se toma en cuenta el tipo y funcionamiento de los sensores involucrados en la actualización del mapa. Es necesario asociar dos variables adicionales a cada celda, una $T(C_i)$ para almacenar el tipo del sensor que ha causado la última actualización de la celda i , y la distancia $S(C_i)$ que reportaba dicho sensor cuando la celda i fue actualizada. Por medio de sumas ponderadas, como se muestra en (4.37), durante la actualización de las celdas del mapa se establece un orden de

prioridad entre las lecturas de un mismo sensor, las lecturas de diferentes sensores de igual naturaleza, y las lecturas de sensores de diferente naturaleza. Ordenados de mayor a menor precedencia, tenemos:

- Lectura S del sensor constituido por la estructura de la cabeza sensora.
- Lectura S de un sensor de distancia que reporta un rango corto.
- Lectura S de un sensor de distancia que reporta un rango largo.

$$\log O(C_i|S) = w_s \log \lambda(S|C_i) + w_p \log O(C_i) \quad (4.37)$$

De esta manera, dada la condición actual (*prior*) de la celda $C_i = \log O(C_i)$, el tipo del último sensor $T(C_i)$ que la actualizó y la distancia reportada por éste $S(C_i)$, se determinan los pesos del valor previo de la celda y del sensor actual. Por ejemplo, si la celda C_{50} almacena un estado de ocupación dado por $Odds = O(C_{50})$, determinado en alguna iteración anterior por el sensor $S(C_{50}) = S3$ que reportaba una distancia al obstáculo $S(S3) = 20 \text{ cm}$. Si en la iteración actual el sensor $S7$ reporta una distancia $S(S7) = 10 \text{ cm} < S(S3) = 20 \text{ cm}$, entonces en la actualización de la celda C_{50} se emplearán pesos $w_s = 0,7 > w_p = 0,3$ y se obtendrá el nuevo valor de la celda $\log O(C_{50}|S(S7)=10 \text{ cm}) = 0,7 \log \lambda(S(S7)=10 \text{ cm}|C_{50}) + 0,3 \log O(C_{50})$, teniendo mayor importancia el dato actual (proveniente del modelo del sensor) que el valor previamente almacenado en la celda. Si el sensor $S7$ reportara una distancia $S(S7) = 22 \text{ cm} > S(S3) = 20 \text{ cm}$, entonces en la actualización de la celda C_{50} se emplearán pesos $w_s = 0,3 < w_p = 0,7$ y se obtendría el nuevo valor de la celda mediante $\log O(C_{50}|S(S7)=22 \text{ cm}) = 0,3 \log \lambda(S(S7)=22 \text{ cm}|C_{50}) + 0,7 \log O(C_{50})$, teniendo mayor importancia el valor previamente almacenado en la celda que el nuevo dato proveniente del modelo del sensor.

Este criterio toma en cuenta la baja probabilidad de existencia de obstáculos en el área ocupada por la cabeza sensora mientras que la probabilidad de

error de un sensor individual depende de la distancia al obstáculo (a mayor distancia reportada por un sensor, mayor probabilidad de que la medición sea errónea).

4.2. Generación del mapa de elevación de la superficie

Los terrenos naturales presentan generalmente una superficie con irregularidades que, según sus dimensiones, pueden representar obstáculos para el robot móvil, tanto por encima como por debajo del nivel de la superficie. En nuestro sistema, la detección de obstáculos por encima de la superficie está a cargo del sensor lateral de la cabeza sensora, siendo responsabilidad del sensor del suelo detectar otras características tales como el perfil (inclinación del terreno) y los obstáculos por debajo de la superficie, como huecos, desniveles, etc., (Ponticelli y González de Santos, 2009).

El grupo de sensores del terreno entrega mediciones de distancia con respecto a 8 puntos sobre un círculo de la superficie del terreno bajo la cabeza sensora. Estos datos son procesados en la cabeza sensora, obteniéndose una estimación de la altura de la cabeza sobre el terreno y una estimación del vector normal al plano estimado de la superficie, expresado en coordenadas del sistema de referencia de la cabeza sensora. Para determinar los parámetros del plano del terreno a partir de las 8 mediciones de distancia, se emplean dos algoritmos generales:

- Determinación de distancia al terreno.
- Determinación del vector normal del plano del terreno.

4.2.1. Distancia al terreno

La distancia de un punto a un plano es un cálculo sencillo, con resultado unívoco. Sin embargo, determinar la distancia de una superficie a un plano, o de una superficie a otra superficie, puede carecer de sentido si las superficies no son planas y paralelas entre sí. Por esta razón debe establecerse un criterio para definir la distancia entre la cabeza sensora y el terreno.

Dado que entre las funciones del conjunto de sensores de la cabeza durante la exploración del terreno se encuentra la de mantener la cabeza por encima y cerca de la superficie, evitando cualquier contacto, la cabeza sensora deberá ubicarse por encima del elemento más elevado de la superficie. Con los sensores $S_i \mid i = \{1, \dots, 8\}$ dispuestos alrededor de la estructura cir-

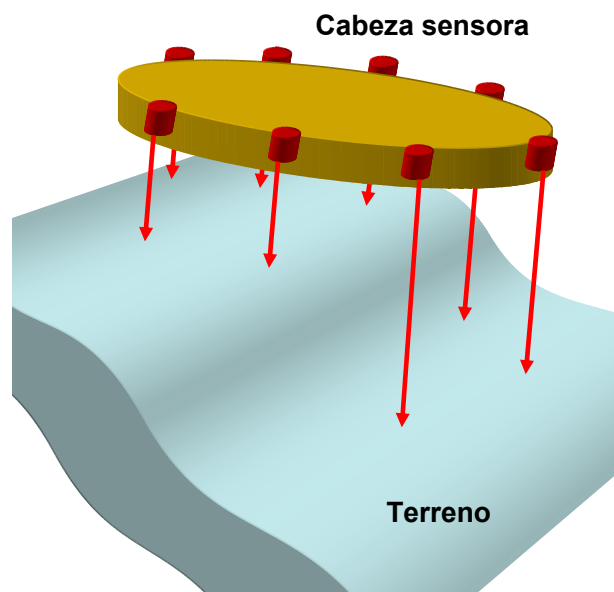


Figura 4.9: Esquema de interpretación de la distancia al terreno bajo la cabeza sensora. La distancia más corta reportada en un instante dado de tiempo es considerada como la distancia al terreno. Esta distancia cambia en función de las irregularidades de la superficie y de la posición de la cabeza sensora durante la exploración del terreno.

cular de la cabeza y apuntando hacia abajo, se mide la distancia a 8 puntos de la superficie en cada instante de tiempo. Se define, en consecuencia, como distancia de la cabeza sensora al terreno, aquella entre el punto más elevado detectado y el plano de la cabeza, que viene dada por la distancia más corta $D_{pln} = \min\{S_i\}$ reportada por los sensores. En la Fig. 4.9 se muestra un esquema de la cabeza sensora sobre un terreno irregular. Esta distancia al terreno cambia en función de las irregularidades de la superficie y de la posición de la cabeza sensora a medida que se desplaza.

4.2.2. Determinación del plano de la superficie

La cabeza sensora debe ubicarse sobre el terreno y lo más cerca posible de éste, para que el detector de minas pueda operar de manera óptima. Esto hace necesario orientar la cabeza sensora paralela a la superficie durante el barrido, luego debe conocerse el plano de la superficie bajo la cabeza.

Un plano puede describirse a partir de tres puntos pertenecientes a ese plano. Existen diferentes métodos para obtener un plano a partir de un conjunto de puntos, siendo la matriz pseudoinversa de Moore-Penrose¹¹ $A^+ = [A^T A]^{-1} A^T$ uno de los más populares, particularmente en el área de la visión artificial (Cherian et al., 2009). Sin embargo, la solución de esta pseudoinversa es sensible al método numérico empleado, y la implementación computacionalmente eficiente es un tema de investigación en sí mismo en el área del cálculo numérico y la programación. Existen librerías de *software*, como *LAPACK*¹² (LAPACK, 2009) disponibles para el cálculo de esta

¹¹En álgebra lineal, la pseudoinversa A^+ de una matriz no cuadrada A $m \times n$ es una generalización de la matriz inversa. La matriz pseudoinversa de Moore-Penrose fue descrita de manera independiente por E. H. Moore en 1920 y Roger Penrose en 1955. Es común emplear la expresión “inversa generalizada” como sinónimo de pseudoinversa. Un uso común de este concepto es el cálculo de la “mejor solución” (mínimos cuadrados) de un sistema lineal de ecuaciones que carece de solución única.

¹²LAPACK - *Linear Algebra Package*.

matriz y otras operaciones de álgebra lineal.

Nuestro diseño de cabeza sensora requiere que ésta entregue a la salida los parámetros del plano de la superficie del terreno, y no solo las mediciones de los sensores. Para esto se ha desarrollado un algoritmo que permite determinar un plano a partir de las mediciones de los sensores del terreno; algoritmo que resulta computacionalmente más eficiente (en términos de recursos de memoria y tiempo de ejecución dentro de un entorno computacional embebido) que el cálculo de una pseudoinversa, permitiendo

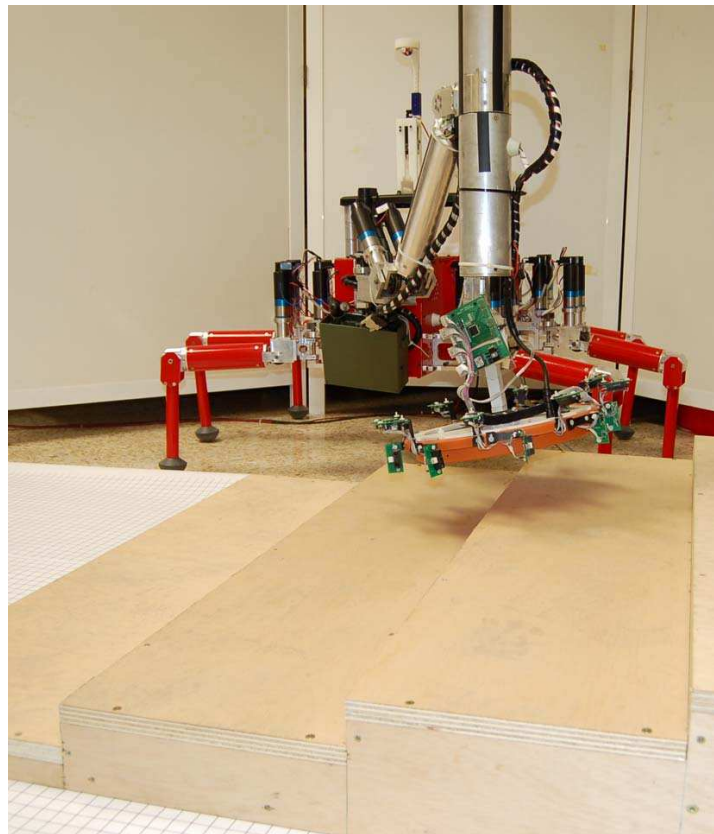


Figura 4.10: Configuración de un experimento de determinación del plano del terreno.

coexistir con el resto de cálculos y procedimientos que realiza el procesador del controlador de la cabeza sensora. Este algoritmo resulta de uso específico para la determinación de un plano dada una configuración conocida de sensores de distancia, mientras que las librerías de álgebra lineal suelen tener aplicaciones más amplias aunque a un costo computacional mayor.

El algoritmo consiste, básicamente, en determinar las coordenadas de los dos puntos medidos más cercanos a la cabeza sensora y calcular un tercer punto a partir del promedio de distancias reportadas por los otros sensores no involucrados en los dos puntos anteriores. Con estos tres puntos se procede a calcular el vector normal a un plano teórico que los contendría. Con este vector normal y con la distancia al plano determinada anteriormente, se disponen de todos los datos necesarios para posicionar la cabeza sensora adecuadamente.

En la Fig. 4.10 se muestra una imagen capturada durante una secuencia de barrido de un terreno experimental, y las Fig. 4.11 a la 4.15 ilustran los 5 pasos generales para obtener los parámetros del plano del terreno:

- 1- Medición:** Medición de distancias al terreno. El controlador de la cabeza sensora adquiere las lecturas de los sensores de distancia.
- 2- Ordenamiento y selección de puntos:** Ordenamiento de lecturas de distancia y selección de los 3 puntos de soporte del plano. El conjunto de las 8 mediciones de sensores se ordena de manera ascendente; desde la distancia más cercana a la más lejana. Con las dos primeras distancias (i.e., las dos más cercanas al plano de la cabeza sensora, Dist(4) y Dist(7) en el ejemplo) se obtienen dos puntos en coordenadas cartesianas de la cabeza sensora. El tercer punto se obtiene a partir del promedio de la lectura de distancia del resto de los sensores, donde las coordenadas XY corresponden a las de aquel sensor que se encuentre diametralmente opuesto a los dos primeros sensores (sensor

2 en el ejemplo).

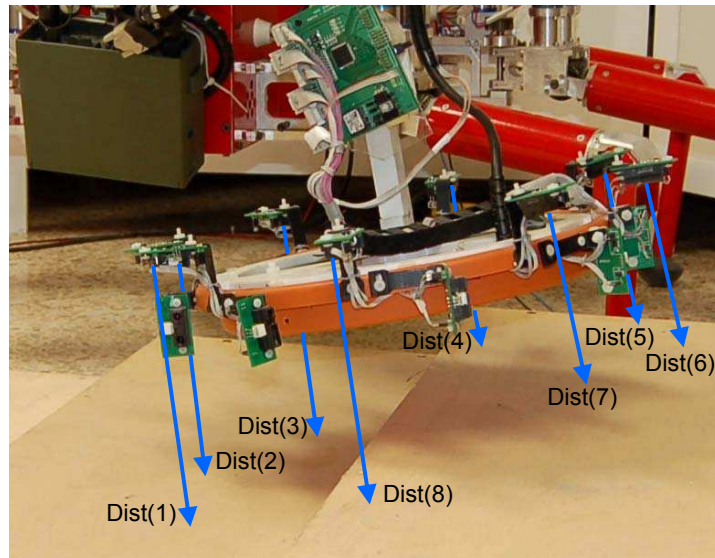


Figura 4.11: Determinación del plano - Paso 1: Detalle de los sensores de distancia del terreno.

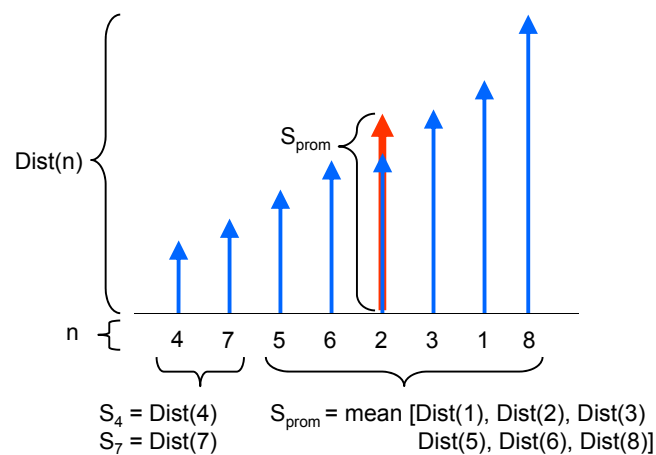


Figura 4.12: Determinación del plano - Paso 2: Ordenamiento de las lecturas de distancia del terreno y selección de 3 puntos del plano.

3- Determinación de vectores: Determinación de los vectores directrices del plano del terreno; para ello se definen dos vectores, ambos con origen en uno de los 3 puntos (punto A), y cada uno apuntando hacia uno de los otros 2 puntos (B y C). El punto A corresponde al más cercano al plano de la cabeza sensora. El punto B corresponde a aquel que se encuentre angularmente más próximo al punto A en sentido anti-horario. Finalmente, el punto C es el que queda por asignar de los 3.

4- Multiplicación vectorial: Se obtiene el vector normal al plano $\vec{N}_{pln.H} = \vec{AB} \times \vec{AC}$.

5- Parámetros del vector normal: Determinación de los ángulos de azimuth y de inclinación.

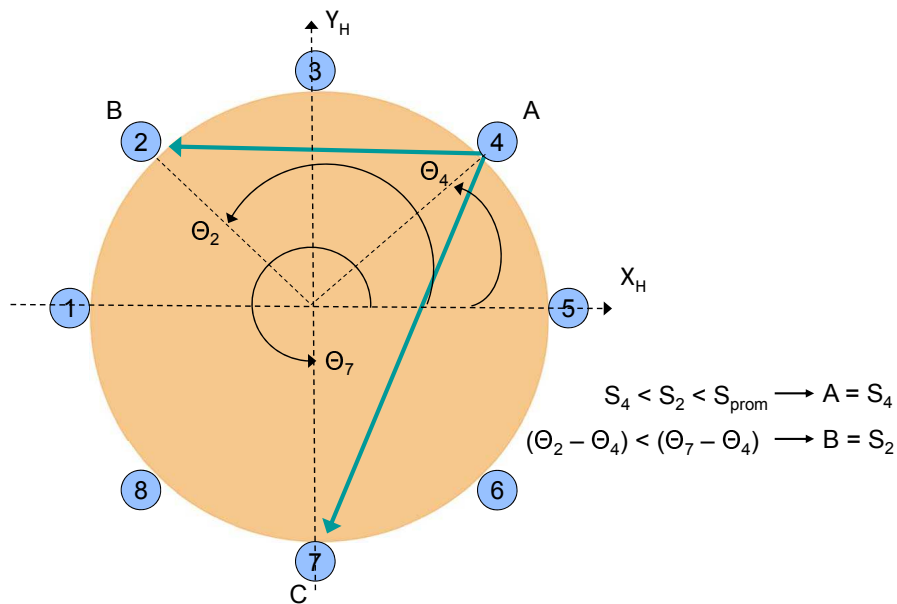


Figura 4.13: Determinación del plano - Paso 3: Determinación de los vectores directrices del plano del terreno.

Estos dos ángulos, junto con la distancia al plano, conforman el conjunto de datos que representan el plano de la superficie que se emplea para ajustar la postura de la cabeza sensora.

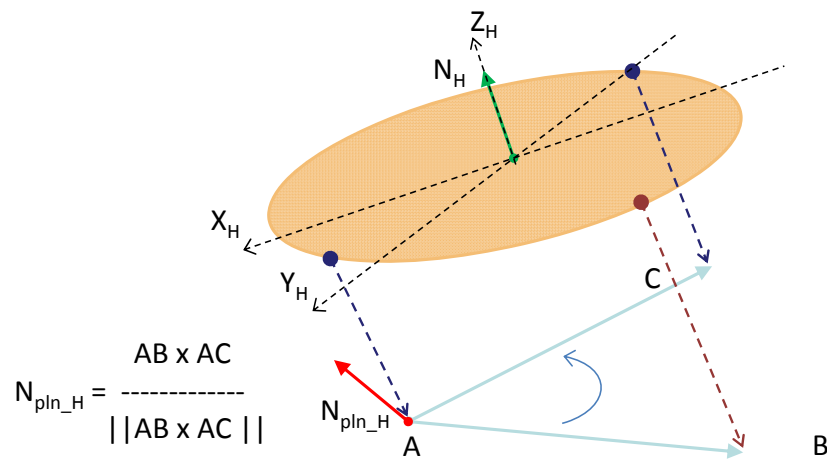


Figura 4.14: Determinación del plano - Paso 4: Multiplicación vectorial para obtener el vector normal al plano.

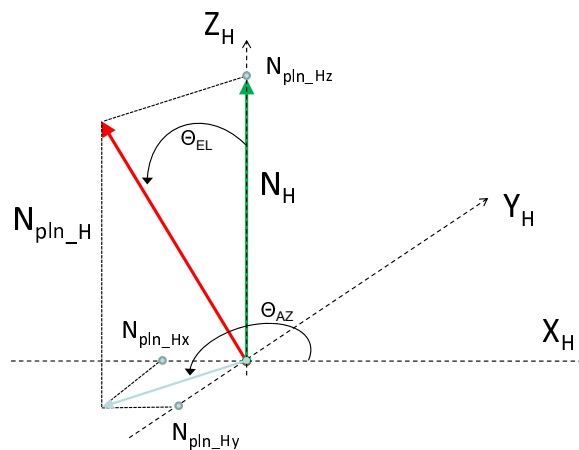


Figura 4.15: Determinación del plano - Paso 5: Determinación de los parámetros del vector normal al plano.

A manera de ejemplo, la Fig. 4.16 muestra una imagen de la representación gráfica 3D de los datos entregados por la cabeza sensora: 8 mediciones de distancia laterales y 8 mediciones de distancia al terreno. Para el instante de tiempo mostrado en esta figura, las dos mediciones más cortas de distancia al terreno son reportadas por el sensor 5 (punto *A* del plano) y 4 (punto *B*), el sensor 8 es empleado para determinar las coordenadas *XY* del tercer punto (*C*), y la coordenada *Z* se obtiene a partir del valor promedio de distancia de las mediciones de los sensores 1, 2, 3, 6, 7 y 8. En esta figura puede observarse el triángulo formado por los puntos de soporte del plano, donde la coordenada *Z* del tercer punto difiere del valor de distancia reportado por el sensor 8; i.e., el vértice del triángulo y la barra de distancia

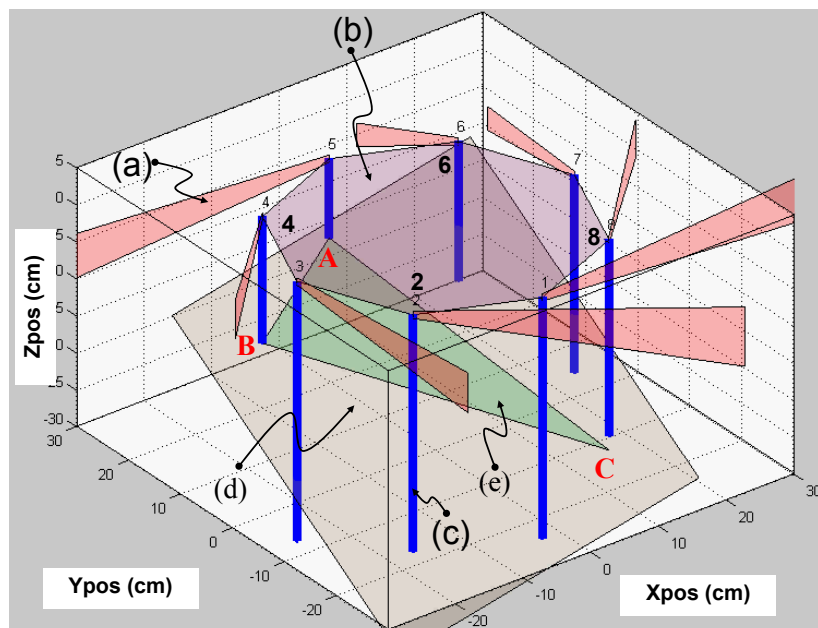


Figura 4.16: Ejemplo de detección del plano. Determinación de las distancias a obstáculos, al terreno y al plano del terreno. (a) Haces infrarrojos laterales, (b) Plano de la cabeza sensora, (c) Medición de distancia al terreno, (d) Plano del terreno, (e) Triángulo de puntos de soporte del plano. A, B y C - Puntos de soporte del plano.

vertical no coinciden.

Capítulo 5

Experimentación y validación

En el presente capítulo se describen los experimentos realizados para la validación de los principales algoritmos del sistema de exploración de terrenos, y se discuten sus resultados. Se ha dividido este capítulo en dos secciones:

- Validación experimental de los prototipos de cabeza sensora.
- Validación experimental de los algoritmos de exploración de terrenos.

5.1. Validación experimental de los prototipos de cabeza sensora

Se presentan, en las dos secciones siguientes, los experimentos realizados para la validación de los prototipos de cabeza sensora. Específicamente, estos experimentos han sido diseñados para verificar el funcionamiento individual de cada módulo en los prototipos.

5.1.1. Validación experimental del prototipo de sensor de contacto basado en sensores *Flex*

Como ya se ha mencionado en la sección 3.3.2.3, se ha empleado un conjunto de 350 eventos aleatorios de contactos, alrededor del perímetro del sensor de contacto, registrándose el ángulo aproximado de incidencia del contacto y la zona del perímetro en la que ocurrió, junto con la salida del sistema del sensor de contacto.

La Fig. 5.1 muestra la salida del sensor para este experimento. En esta figura las muestras (los eventos de contactos) han sido ordenadas de manera que todos los eventos asociados a una misma zona de contacto se encuentren consecutivos en el eje horizontal. Se tiene que 13 muestras de las 350 (3.7%) parecen no haber sido clasificadas correctamente (contacto en una zona con

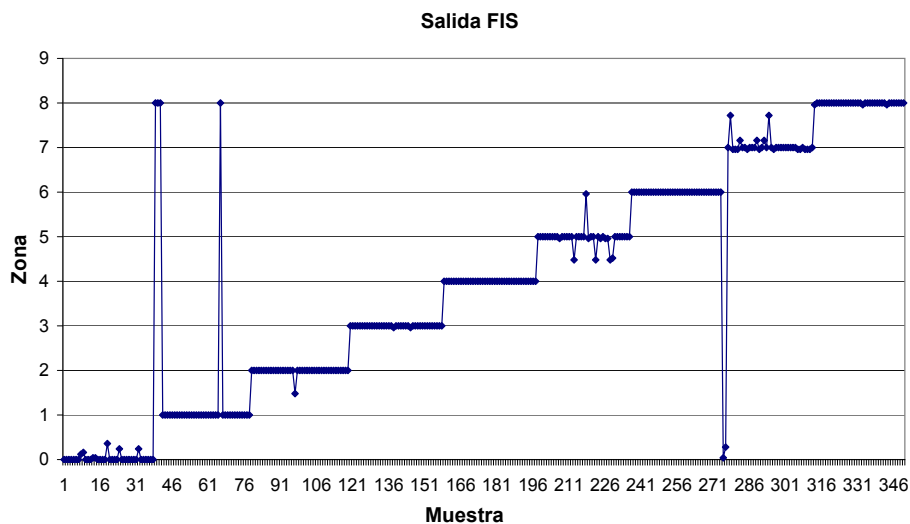


Figura 5.1: Salida del FIS en el experimento de 350 eventos aleatorios de contacto. Las muestras han sido ordenadas de manera que todos los eventos asociados a una zona de contacto se encuentren consecutivos en el eje horizontal. El eje vertical corresponde a la salida del FIS indicando la zona en la que el evento ha sido clasificado.

5.1 Validación experimental de los prototipos de cabeza sensora 153

una salida indicando otra zona). En la clasificación de la zona de contacto se han observado dos fuentes importantes de errores:

- La histéresis mecánica.
- La rotación de la plataforma móvil del sensor.

Si se deseara mayor robustez en la clasificación, sería necesario realizar las siguientes modificaciones:

- Reducir la histéresis mecánica disminuyendo el coeficiente de fricción entre las plataformas.
- Reducir la histéresis mecánica aumentando la rigidez de los muelles de soporte de la plataforma móvil.
- Implementar funciones de pertenencia (MFs) más complejas.
- Implementar reglas difusas más complejas.
- Aumentar el número de sensores *Flex*.

No obstante, el FIS implementado ha demostrado soportar efectivamente valores moderados de esta histéresis y rotación.

Como ya se mencionó anteriormente, se empleó una resolución de 40 puntos en la etapa de defusificación para hallar el centroide del conjunto de salida del FIS. Con una cantidad mayor de puntos, el FIS se comporta como un clasificador nítido, entregando un valor entero a la salida. Cuando la cantidad de puntos es baja, el clasificador se comporta de forma más “relajada”, entregando a la salida valores intermedios, como por ejemplo el valor 4.5 mostrado en la Fig. 5.1 alrededor de la muestra 220. Este tipo de salida se puede interpretar como una clasificación en una zona entre la 4 y la 5. Con este comportamiento del FIS se consigue incrementar la resolución de clasificación. Comparando los resultados de la clasificación con los registros del experimento se comprueba que este 3.7 % de los puntos que caen en una

zona distinta de la esperada pertenecen a alguno de los siguientes casos:

- La fuerza del contacto ha sido aplicada en una dirección casi tangencial al borde de la plataforma ocasionando su rotación.
- El contacto ha ocurrido cerca de la frontera entre dos zonas.

Los valores menores que 1 representan condiciones de no-contacto, ocurridas cuando la plataforma móvil del sensor regresaba a la posición de reposo después de algún contacto. Se observa también que ciertos valores en la zona 1 parecen saltar a la zona 8. Esto es debido a que las zonas 1 y 8 son contiguas en el perímetro del sensor de contacto, y el evento de contacto asociado a estos puntos había ocurrido cerca de la frontera entre zonas o con ángulo de incidencia tal que se forzaba la rotación de la plataforma móvil. Finalmente, los puntos que dentro de la zona 6 de la gráfica parecen caer hasta la zona cero (no-contacto) pertenecen a eventos de contacto con dirección de incidencia casi tangencial con respecto al borde de la plataforma móvil, induciendo un movimiento de rotación con muy poco movimiento de traslación.

Estos resultados muestran que este prototipo de sensor de contacto es viable, relativamente rápido de implementar y de bajo costo. Sin embargo, es necesario mejorar ciertos detalles técnicos, como la sensibilidad a la histéresis y la rotación de la plataforma móvil, ya sea a nivel electrónico o implementado una estructura mecánica más robusta.

5.1.2. Validación experimental del prototipo de cabeza sensora basado en sensores IR

En esta sección del capítulo se presentan los experimentos que permitieron validar la operación básica del prototipo final de cabeza sensora descrito

5.1 Validación experimental de los prototipos de cabeza sensora 155

en la sección 3.3.3:

- Módulos de sensores.
- Algoritmos de cálculos.
- Módulo de comunicaciones.

Para ello se empleó la interfaz hombre-máquina básica (IHM, véase sección B.1) encargada de establecer un enlace directo de comunicaciones con la cabeza sensora, configurarla, recibir y registrar los datos solicitados, y mostrarlos de manera gráfica en pantalla, y se ha instalado la cabeza sensora en una guía lineal motorizada (véase la Fig. 5.2) con el objetivo de desplazarle controladamente sobre el terreno experimental.

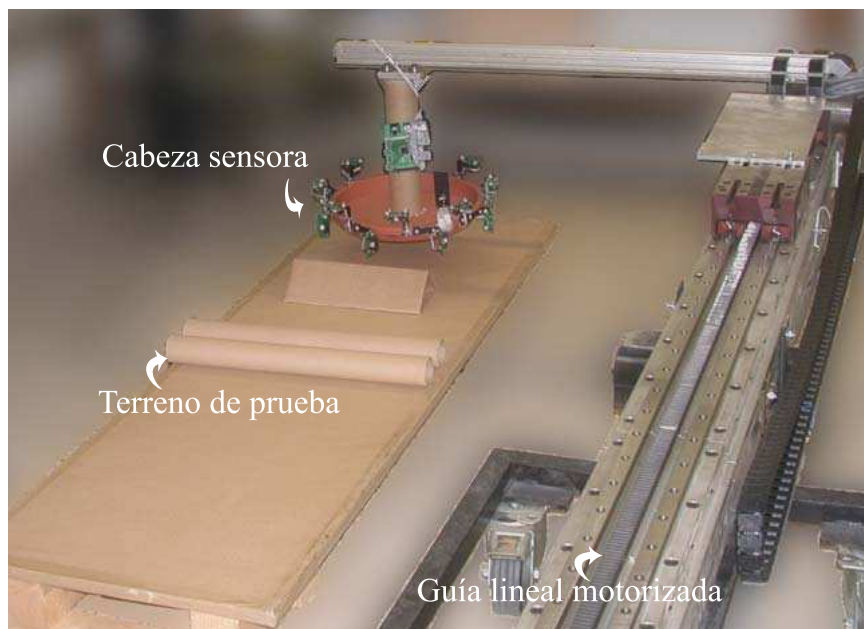


Figura 5.2: Montaje experimental de la cabeza sensora con guía lineal motorizada.

Para la validación de los sensores del suelo se dispuso un terreno de prueba bajo la cabeza sensora. Este terreno consiste en un conjunto de objetos con formas (cilindros, prismas, poliedros) y dimensiones conocidas dispuestos sobre una plataforma plana, siendo el objetivo del experimento la construcción de un mapa de elevación del terreno. En la Fig. 5.3 se muestra el montaje experimental. Con la información de posición (obtenida desde la guía lineal), de la geometría de la cabeza sensora y la disposición de sus sensores y de las distancias reportadas por el módulo de sensores del terreno, se construyó un mapa de elevación como el mostrado en la Fig. 5.4. Puede observarse cómo esta superficie se asemeja a la superficie real del terreno de prueba, coincidiendo el mapa de curvas de nivel (generado a partir de los datos obtenidos con la cabeza sensora) con la imagen real del experimento (véase la Fig. 5.5).

Durante la realización de estos experimentos se observó una fluctuación periódica en la lectura de distancias cuando la separación entre el terreno y

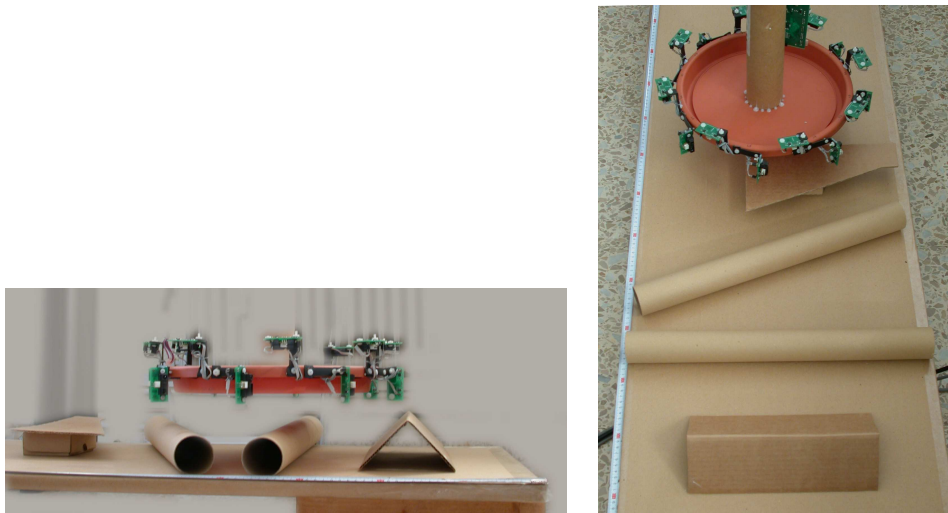


Figura 5.3: Terreno experimental básico.

la cabeza sensora era mayor que 15 cm. A esta distancia, las salidas de los sensores del suelo se tornaban oscilatorias, con una frecuencia aproximada de 1 Hz. Este comportamiento desaparecía al acercar la cabeza sensora al terreno, o cuando se desconectaba el sensor adyacente que le precedía en orden. Este fenómeno se debe a la forma del haz de luz emitida (aproximadamente de forma cónica con sección elíptica) y a la acción del muestreo periódico interno del sensor de distancia. A medida que la distancia aumenta, el haz va aumentando su sección transversal, cubriendo más área frente a él. Con la existencia de varios sensores cercanos entre sí y apuntando en una misma dirección, a partir de cierta distancia el área de un haz de luz proyectado sobre la superficie solapa el área de otros sensores, interfiriéndose las medidas mutuamente. La naturaleza oscilatoria de la interferencia observada se debe al hecho de que los sensores emiten su haz de luz de manera periódica con una frecuencia ligeramente diferente entre cada sen-

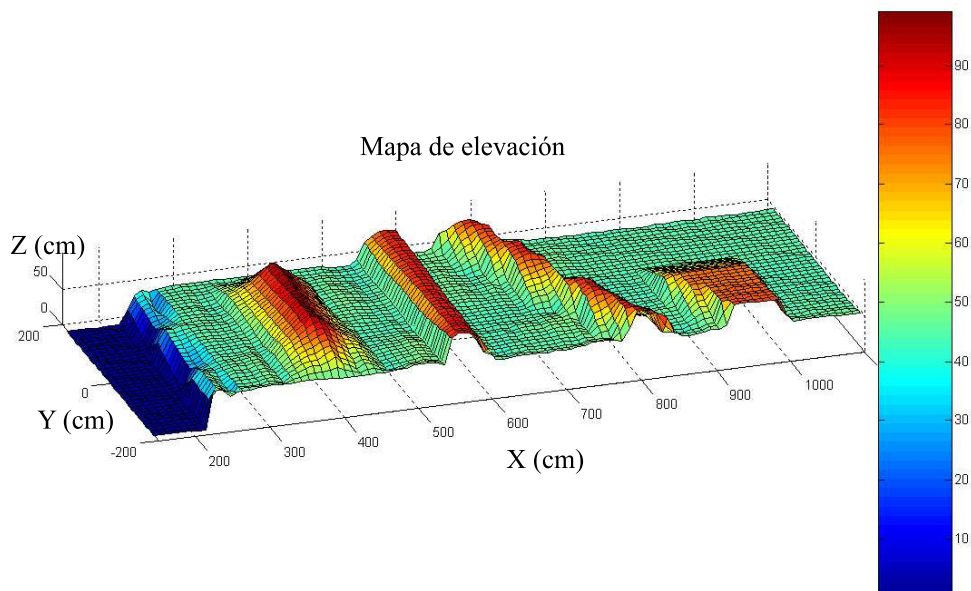


Figura 5.4: Mapa de elevación del terreno experimental básico.

sor, produciéndose entonces una modulación de las señales luminosas que recibe cada sensor. Este fenómeno de interferencia se produciría igualmente empleando sensores de otro tipo (ultrasonido, láser, etc.) que no presenten protecciones contra este tipo de interferencias.

Para evitar esta interferencia, hemos estudiado dos soluciones básicas:

- Disposición diferente de los sensores de manera que se reduzca o elimine el solapamiento de haces.
- Implementación de un mecanismo de activación de los sensores que alterne el encendido de los sensores adyacentes.

La interferencia se eliminó satisfactoriamente rotando 90 grados cada sensor del suelo sobre su eje vertical. Sin embargo, con el objetivo secundario de reducir el consumo de potencia de la cabeza sensora, se diseñó un algoritmo que activa de forma alternada dos subgrupos de sensores del suelo

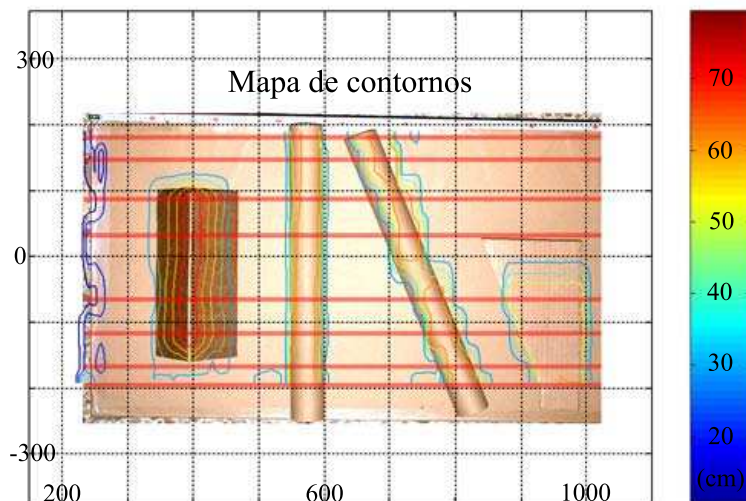


Figura 5.5: Composición de fotografía del terreno experimental básico, el mapa de contornos generado empleando datos capturados por la cabeza sensora y las trayectorias de los sensores de distancia.

5.1 Validación experimental de los prototipos de cabeza sensora 159

de manera que un grupo se encuentra desactivado (no emiten luz) mientras el otro está activo. Un subgrupo está constituido por los sensores de suelo con numeración par, y el otro subgrupo consta de los sensores impares. Este procedimiento de activación alternada de subgrupos de sensores demostró ser efectivo para reducir las interferencias, además de disminuir el consumo de potencia eléctrica de la cabeza sensora puesto que solo la mitad de los sensores de suelo se encuentran activos en un momento dado (el grupo de sensores del suelo pasa de consumir 320 ma a consumir 160 ma), pero también ocasiona la disminución de la velocidad de respuesta del sistema sensor del suelo.

Los sensores de distancia requieren generalmente de un período inicial de estabilización para poder entregar mediciones confiables, después de ser conectados a la alimentación eléctrica; en el caso de los sensores empleados en este prototipo, el período de estabilización oscila entre 100 y 300 ms (determinados experimentalmente). Cuando se activa un subgrupo y se desactiva el otro, es necesario esperar el período de tiempo de estabilización de todos los sensores activos antes de comenzar la captura de datos, lo que implica esperar al menos 200 ms después de cada ciclo de activación/desactivación de los subgrupos. Sumando este período de estabilización (300 ms) al período de muestreo interno del propio sensor de distancia (40 ms) (véase la Fig. E.3) y a los tiempos requeridos por el controlador de la cabeza sensora para capturar y filtrar las mediciones de los sensores (100 ms), se tiene que la máxima frecuencia de actualización de mediciones de distancia al terreno es de aproximadamente 1 Hz, frecuencia que resulta relativamente baja para las necesidades del sistema de exploración. Por esta razón, se ha descartado el uso de este algoritmo de activación alterna de sensores para el resto de experimentos.

Para la validación de los sensores laterales, se diseñó un experimento simple que invierte el sentido del movimiento de la cabeza cuando los sensores

laterales detectan un objeto dentro de un determinado rango de distancia. Para este experimento se empleó la guía lineal antes mencionada, y con ella sólo es posible mover la cabeza en dos sentidos. La secuencia de movimientos consiste en mover la cabeza de un lado al otro, cambiando de sentido cuando se alcanza la posición límite de cada lado, o cuando se detecta un obstáculo en la zona a la que se dirige la cabeza. De esta manera se comprobó la detección de obstáculos y la capacidad de la cabeza de discernir la zona en la que se detectó el obstáculo. Como obstáculos se emplearon tanto objetos delgados (lápiz, pequeñas ramas, etc.) como de gran volumen (troncos, personas, etc.), detectándose efectivamente los objetos en todos los casos.



Figura 5.6: Detalle de los terrenos naturales experimentales A y B. El terreno A consiste en una superficie plana de arenilla con un montículo de arenilla en un extremo. El terreno B contiene materiales extras como piedras, y hojas de diferentes tamaños y colores.

5.1 Validación experimental de los prototipos de cabeza sensora 161

Después de comprobar el funcionamiento de cada módulo por separado, se procedió con la validación del sistema de la cabeza sensora integrada en el sistema de exploración de terrenos, por medio de una serie de experi-



Figura 5.7: Experimento A, sobre terreno natural. En la imagen de abajo se presenta una composición del terreno natural y la superficie 3D generada a partir de datos de dos barridos completos de la cabeza sensora. Las zonas azules indican una depresión en el terreno, las rojas indican elevación, los puntos rojos pequeños indican el recorrido del centro de la cabeza sensora y los puntos rojos grandes indican detección de metal.

mentos. Los dos primeros experimentos (denominados A y B) se realizaron para validar la integración entre los sistemas de la cabeza sensora, el brazo manipulador y el robot hexápodo SILO6, y el comportamiento del sistema de exploración operando sobre una superficie natural (con el robot móvil en posición estática). En la Fig. 5.6 se muestra una imagen detallada de los dos terrenos naturales, y el montaje de estos experimentos se puede observar en la Fig. 5.7. El experimento A consiste en barrer la superficie A y generar un mapa de elevación con los datos capturados durante el experimento. El experimento B repite el A, con el perfil de la superficie modificado añadiendo diferentes materiales naturales. Con estos experimentos, se pretende demostrar la capacidad del sistema de exploración para:

- Operar sobre superficies naturales.
- Adaptar la posición y postura de la cabeza sensora según el perfil del terreno.

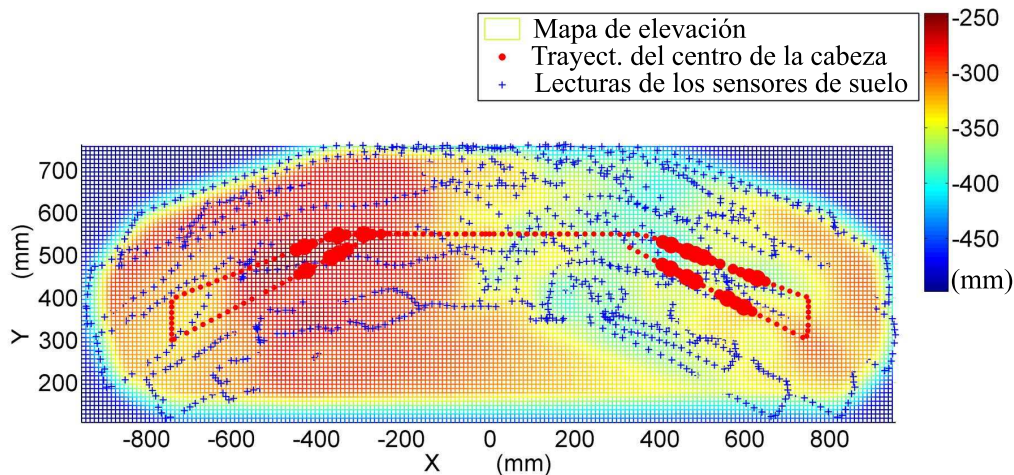


Figura 5.8: Mapa de elevación del terreno A. Las zonas azules indican una depresión en el terreno, las rojas indican elevación, los puntos rojos pequeños indican el recorrido del centro de la cabeza sensora y los puntos rojos grandes indican detección de metal.

5.1 Validación experimental de los prototipos de cabeza sensora 163

- Mantener la cabeza sensora a la altura programada sobre el terreno.
- Señalar las alarmas de metal detectadas.

Puede observarse en la Fig. 5.8 el mapa de elevación generado en el experimento A, y en la imagen inferior de la Fig. 5.7 se muestra un montaje de este mapa sobre el terreno experimental. Los puntos rojos indican la trayectoria del centro de la cabeza sensora, y con su tamaño se indica cualitativamente la cantidad de metal detectado.

En la Fig. 5.8 se observa también cómo la trayectoria que describen los sensores del suelo (indicado mediante puntos azules) no describen una trayectoria similar a la del centro de la cabeza sensora (secuencia de puntos rojos). Esto se debe al movimiento de rotación que el brazo manipulador

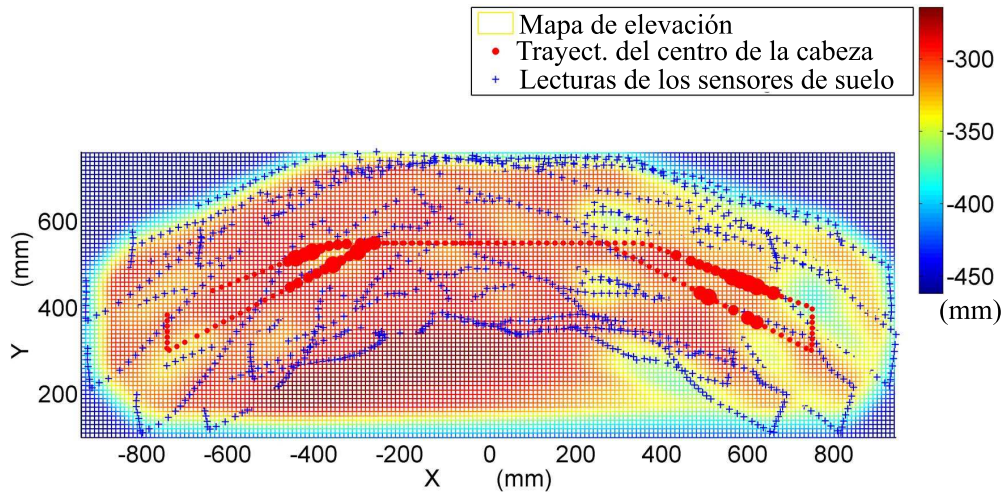


Figura 5.9: Mapa de elevación del terreno B. Las zonas azules indican una depresión en el terreno, las rojas indican elevación, los puntos rojos pequeños indican el recorrido del centro de la cabeza sensora y los puntos rojos grandes indican detección de metal. Puede observarse la diferencia de alturas entre los dos perfiles: en el perfil A existe una zona elevada en la mitad izquierda, que corresponde al montículo de arena presente en este terreno; en el perfil B esta elevación se extiende hasta la mitad derecha, dada la presencia en el terreno B de los materiales extras.

requiere para que el centro de la cabeza sensora se mantenga sobre la trayectoria nominal de barrido mientras se ajusta la orientación (inclinación)



Figura 5.10: Secuencia de imágenes (A, B, C, D, y E) de un barrido completo sobre el terreno A. Se observa que la cabeza sensora se mantiene próximo a la superficie y se adapta (se orienta) en función de su perfil.

5.1 Validación experimental de los prototipos de cabeza sensora 165

de la cabeza para adaptarla al perfil de la superficie. Con un brazo manipulador de 5 grados de libertad en vez de 6 (el mínimo necesario para lograr teóricamente cualquier posición y orientación de la herramienta) se

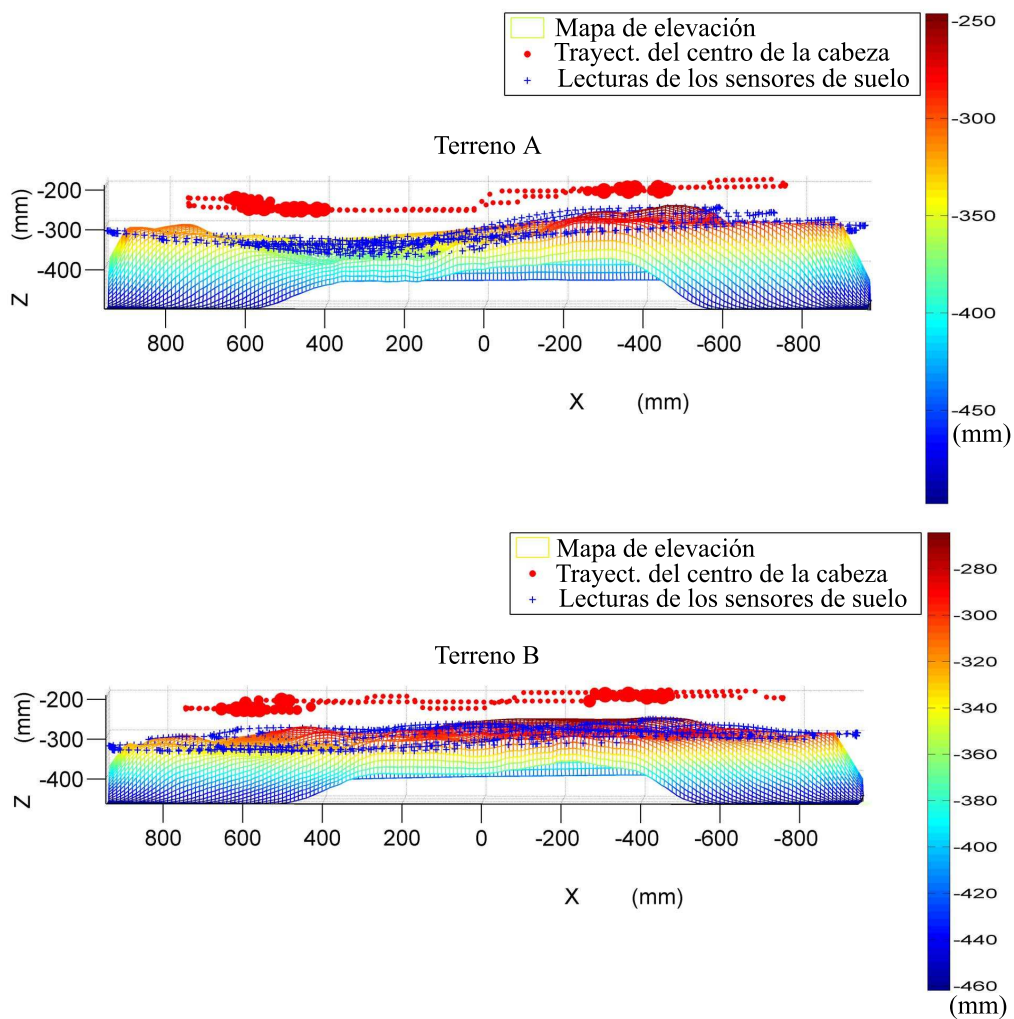


Figura 5.11: Perfiles de los terrenos A y B. La adición de materiales naturales de diferentes características sobre el terreno B no afecta la operación de la cabeza sensora, determinándose el nuevo perfil de la superficie normalmente.

consigue controlar el vector normal del plano de la cabeza sensora, pero no es posible controlar la orientación de los otros dos vectores ortogonales. Dicha restricción ocasiona que la cabeza sensora deba girar sobre su eje para que el vector normal alcance la orientación deseada. Esta situación es especialmente conveniente para la operación efectiva de la cabeza sensora: este movimiento reduce el área de las zonas ciegas del grupo de sensores en la detección lateral de obstáculos.

El experimento B se valida la operación de la cabeza sensora sobre un terreno con diferentes materiales naturales, como piedras de diferentes tamaños, arena, tierra y hojas de diferentes colores (véase la Fig. 5.6B). En la Fig. 5.9 se muestra un mapa de elevación construido con los datos del experimento sobre este terreno. Se observa que la diferencia entre los dos mapas de elevación es básicamente el área de la zona elevada. En la Fig. 5.10 se muestra una secuencia de imágenes de un barrido de la cabeza sensora sobre el terreno A, y en la Fig. 5.11 se muestra un perfil del mapa de elevación de los terrenos A y B. Puede observarse en esta figura la diferencia de alturas entre los dos perfiles: en el perfil del terreno A existe una zona elevada en la mitad derecha, que corresponde al montículo de arenilla presente en este terreno; en el perfil B esta elevación se extiende hasta la mitad izquierda, dada la presencia en el terreno B de los nuevos materiales.

5.2. Validación experimental de los algoritmos de exploración de terrenos

A continuación se describen los experimentos realizados para la validación de los principales algoritmos del sistema de exploración terrenos. Estos experimentos realizan ensayos sobre:

- El contacto virtual acomodaticio de la cabeza sensora.
- La detección del contorno de los obstáculos.
- La obtención de datos descriptivos de la superficie del terreno.

agrupándose los experimentos en dos secciones:

- Validación de los algoritmos de detección de contorno de obstáculos.
- Validación de los algoritmos de generación de mapas de contornos de los obstáculos.

Con el robot móvil SILO6 en una posición fija, todos los experimentos se realizaron con el brazo manipulador ejecutando el movimiento de barrido de la cabeza sensora sobre el terreno próximo y frente al robot (véase la Fig. 5.12).

La imagen superior en esta figura muestra una captura de pantalla de la interfaz hombre-máquina (IHM, véase la sección B.1). Esta IHM ofrece al operador una representación de la vista superior del área de barrido, observándose la posición, rotación actual y posición nominal de la cabeza sensora durante el barrido, y los puntos donde se ha detectado algún obstáculo.

La cabeza sensora barre un área frente al robot caminante en un rango aproximado de $[-1000 \dots 1000] \text{ mm}$ de manera transversal (eje X), y $[150 \dots 650] \text{ mm}$ de manera longitudinal (eje Y). El octágono sólido en la IHM representa la cabeza sensora, y los números en el borde indican la posición de cada uno de los pares de sensores de distancia (lateral y de superficie). Este polígono rota en función de los datos recibidos en la IHM en tiempo real. El octágono vacío representa la posición nominal de la cabeza sensora en el barrido que el controlador del barrido ha comandado al brazo manipulador; la posición nominal y la real diferirán cuando exista contacto virtual entre la cabeza sensora y algún obstáculo dentro del área de barrido.

La fuerza virtual de contacto instantánea se representa en la IHM por medio de un vector con origen en el centro de la figura de la cabeza sensora, con dirección igual a la de la fuerza de contacto.

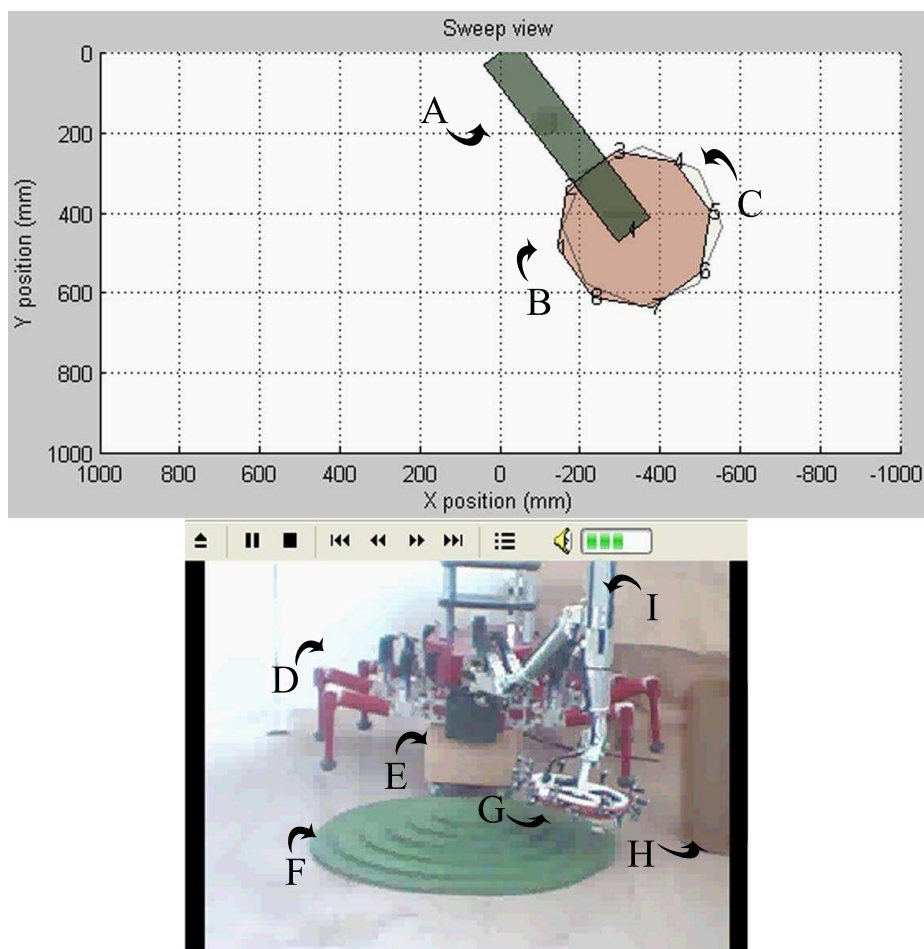


Figura 5.12: Validación del comportamiento acomodaticio del sistema manipulador. Configuración del experimento. A) Interfaz hombre-máquina del brazo manipulador, B) Polígono sólido que representa la posición y rotación real de la cabeza sensora, C) Polígono vacío que representa la posición nominal de la cabeza sensora, D) Robot caminante, E) Soporte del robot durante los experimentos, F) Superficie de prueba, G) Cabeza sensora, H) Obstáculo.

5.2.1. Validación de los algoritmos de detección de contorno de obstáculos

Se han desarrollado dos conjuntos de experimentos para verificar el comportamiento acomodaticio de la cabeza sensora durante el barrido y la detección del contorno de los obstáculos dentro del área de barrido. Para el estudio de la detección del contorno de obstáculos, se ha implementado una rejilla de ocupación que muestra el valor de probabilidad de ocupación y no el valor binario de ocupación (ocupado o libre).

La determinación del estado de ocupación a partir de la probabilidad de ocupación un tema de estudio en sí mismo, y que no forma parte de los objetivos del presente trabajo de tesis. Con el propósito de evaluar de manera general los resultados de los experimentos, se empleó un valor umbral como criterio de asignación de probabilidad de ocupación de las celdas; de esta manera, una celda con probabilidad de ocupación mayor que el umbral se considera ocupada. Este valor se determinó empíricamente por medio de una serie de experimentos preliminares, comparando la rejilla binaria resultante con la imagen de la ocupación real de los obstáculos.

5.2.1.1. Validación del comportamiento acomodaticio del sistema de barrido

Para este experimento, se ha colocado un cilindro de 300 mm de diámetro como obstáculo dentro del área de barrido interfiriendo completamente con la trayectoria de barrido de la cabeza sensora, impidiéndole completar la secuencia del barrido. El objetivo de este experimento es comprobar que la cabeza sensora “toca” suavemente el obstáculo y permanece en contacto con él hasta que la secuencia nominal de barrido cambia de sentido.

La Fig. 5.13 muestra una secuencia de cuadros de la vista del barrido

en la IHM cuando la cabeza se aproxima al obstáculo. En esta vista los círculos oscuros muestran las posiciones donde se ha detectado un evento de contacto virtual. Una vez ocurrida la condición de contacto, se observa cómo la posición real de la cabeza (octágono sólido) es distinta de la posición nominal (octágono vacío). Esto se debe a que la fuerza de contacto con el obstáculo impide el movimiento de la cabeza sensora aunque la consigna (trayectoria nominal del barrido) continúe su secuencia. Por esta razón, se observa también que la posición nominal de la cabeza difiere de la real,

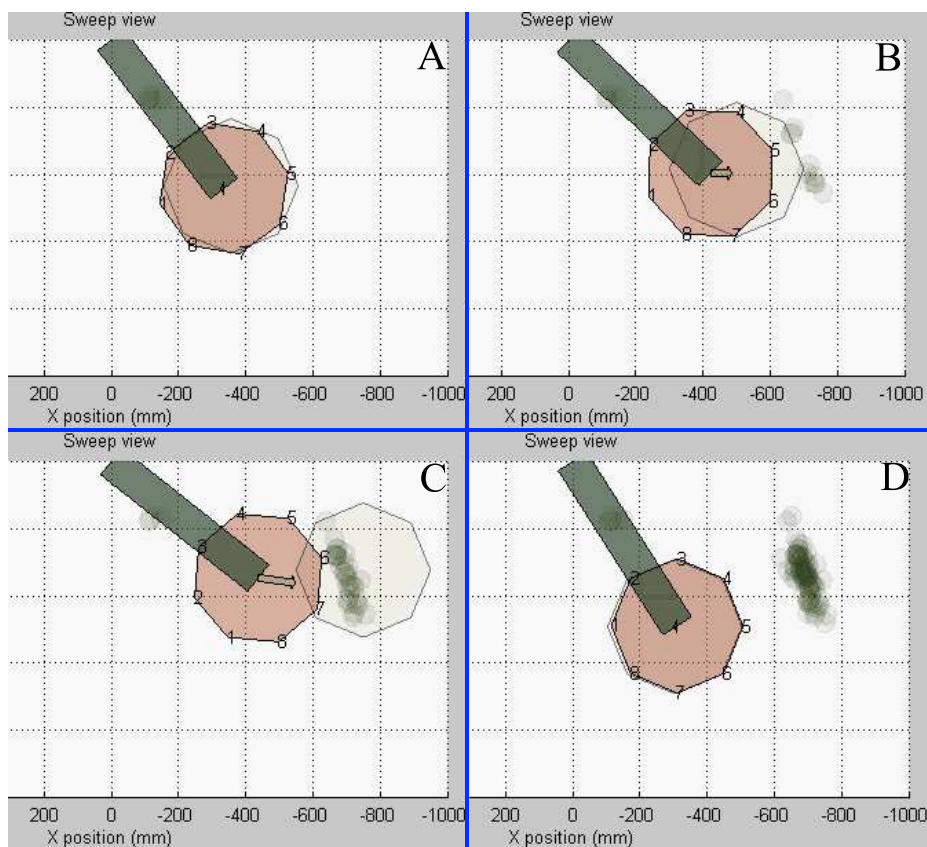


Figura 5.13: Validación del comportamiento acomodaticio del sistema manipulador. Secuencia de cuadros de un contacto acomodaticio. Primer experimento.

con el polígono vacío pasando sobre la posición detectada del obstáculo e indicada con círculos oscuros mientras la posición real permanece a una

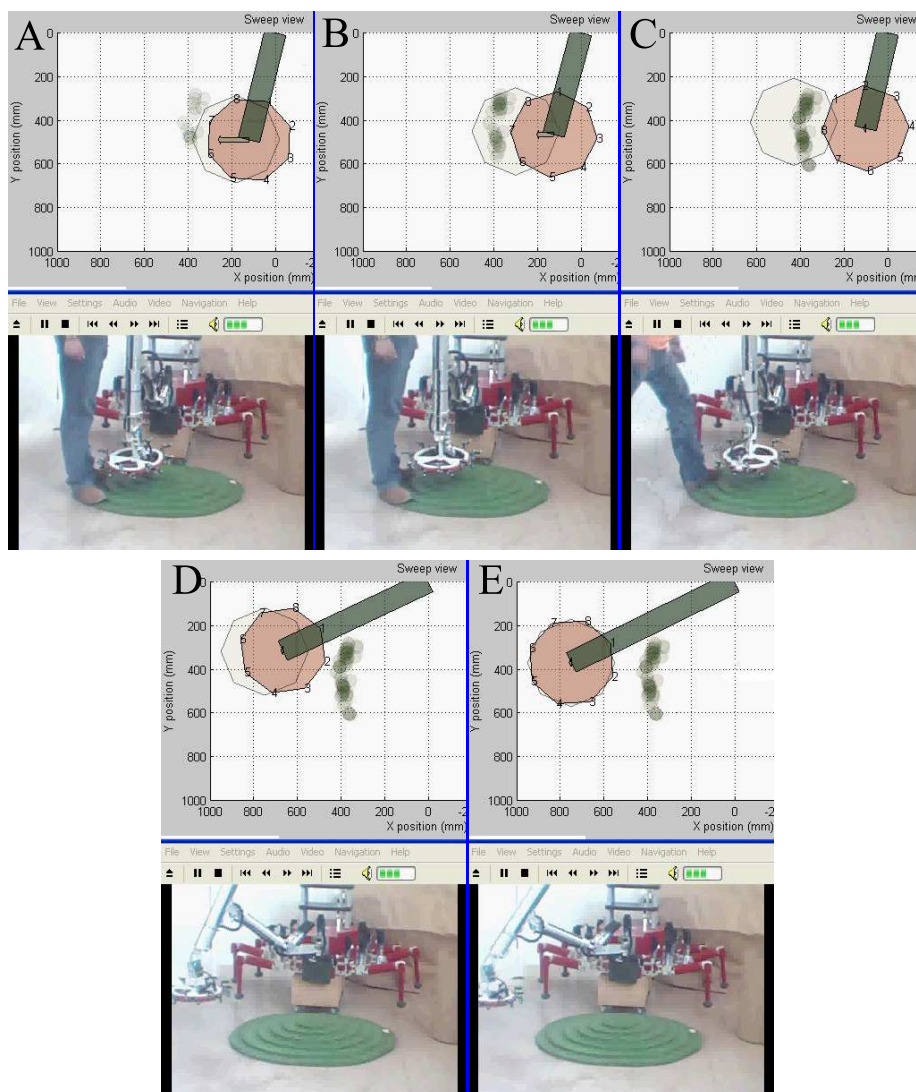


Figura 5.14: Validación del comportamiento acomodaticio del sistema de barrido. Experimento 2. Secuencia de cuadros de un contacto acomodaticio con un obstáculo que durante el contacto es retirado del área de barrido.

cierta distancia del obstáculo.

En el experimento siguiente la configuración inicial permanece igual, pero una vez que la cabeza sensora se haya detenido por el contacto virtual con el obstáculo, éste es retirado del área de barrido. Con este experimento se desea verificar que al desaparecer la fuente de fuerzas de contacto que se oponen al movimiento de la cabeza, ésta continúa su movimiento, intentando alcanzar la posición nominal.

Una persona de pie en el área de barrido sirve como obstáculo, obstruyendo la trayectoria nominal del barrido (véase la Fig. 5.14). Se observa en la IHM cómo los puntos oscuros que señalan el contacto se acumulan en la zona donde la persona se encuentra. De nuevo se observa que la posición real y la nominal de la cabeza difieren durante el contacto. Se observa también cómo al retirarse la persona del área de barrido, la posición real alcanza a la nominal un tiempo después.

Para el último experimento de este conjunto se situó al obstáculo obstruyendo parcialmente la trayectoria nominal de barrido. Con este experimento se quiere observar cómo la cabeza sensora modifica su vector de velocidad de desplazamiento al aproximarse al obstáculo, desviándose de su trayectoria nominal.

La energía acumulada en los muelles virtuales debido al contacto crea una fuerza de reacción que desvía la cabeza de su trayectoria, y la acción conjunta de esta fuerza de reacción con el movimiento nominal de barrido ocasionan que la cabeza se deslice siguiendo el contorno del obstáculo hasta pasarlo por completo, retomando luego la trayectoria nominal. La Fig. 5.15 muestra una secuencia de cuadros tomados de la IHM, describiendo la secuencia de movimientos de la cabeza sensora rodeando al obstáculo que obstruye parcialmente la trayectoria nominal. Se puede observar que el conjunto de puntos de contacto (círculos oscuros en la Fig. 5.15B, C y D)

describen una forma similar al segmento del contorno del obstáculo que se encuentra dentro del área de barrido. De nuevo se observa que la posición nominal de la cabeza y la posición real difieren durante el contacto.

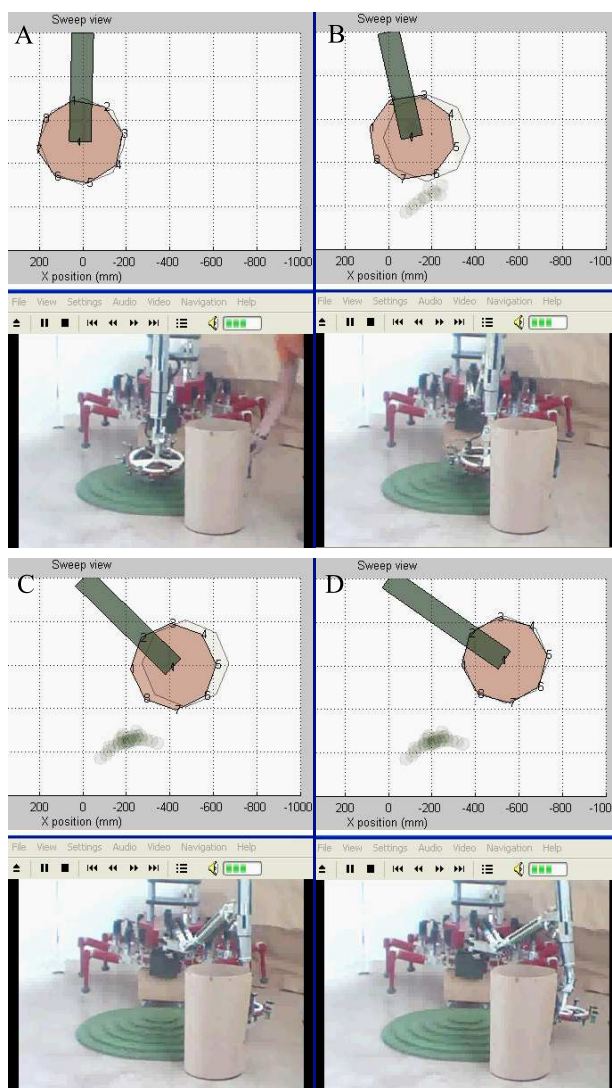


Figura 5.15: Validación del comportamiento acomodaticio del sistema de barrido. Experimento 3. Secuencia de cuadros de una obstrucción parcial de la trayectoria nominal.

5.2.1.2. Validación de la detección parcial del contorno de obstáculos

Se han desarrollado dos conjuntos de experimentos para probar la funcionalidad del módulo de detección parcial del contorno de obstáculos. Para

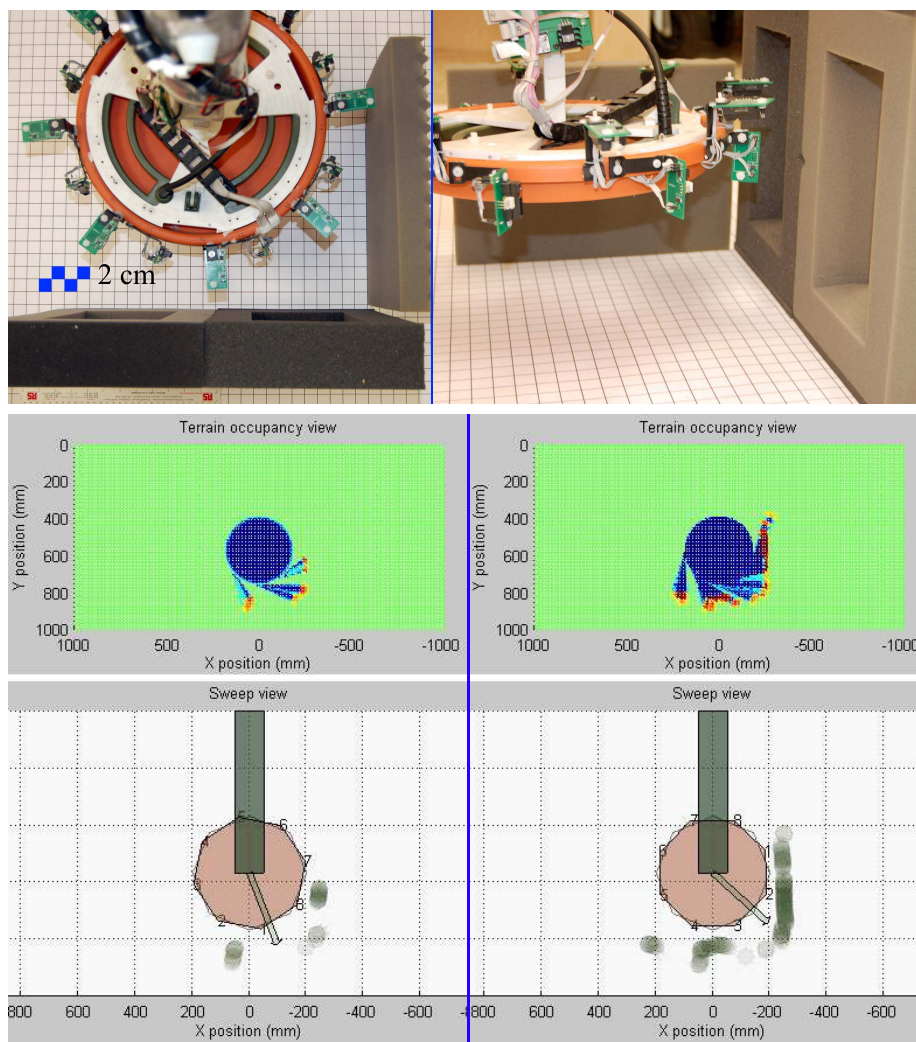


Figura 5.16: Validación de detección parcial de contornos. Experimento 1.

el primer experimento se ha programado en el sistema de barrido un movimiento de rotación sobre el eje de la cabeza sin desplazamiento, y alrededor de ésta se ha dispuesto una serie de obstáculos con geometría conocida. Se desea verificar los algoritmos de construcción de la rejilla de ocupación.

La Fig. 5.16 muestra la configuración inicial de este experimento y dos cuadros de la IHM capturados durante la ejecución del experimento. Se observa que la imagen inferior muestra una acumulación de puntos de contacto con forma similar a la geometría real del contorno del obstáculo. La rejilla muestra una distribución de probabilidad de ocupación (véase la Fig. 5.16, imagen del centro) con forma similar, de manera heurística, a la geometría

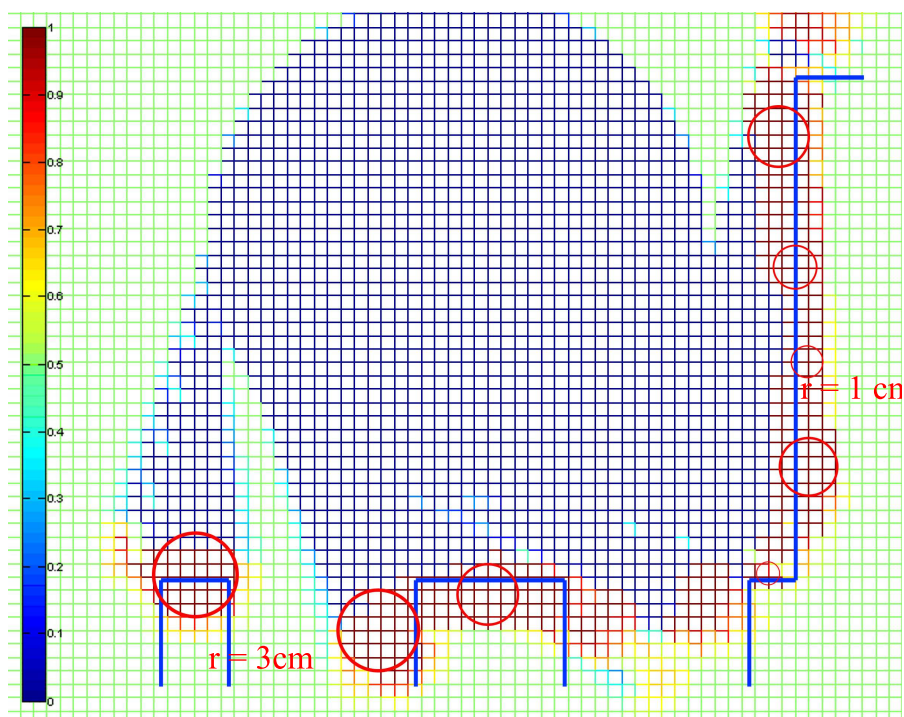


Figura 5.17: Validación de la detección parcial de contorno. Rejilla de ocupación obtenida después del primer experimento.

del obstáculo.

La Fig. 5.17 presenta una rejilla de ocupación resultante del experimento. Se observan tres zonas relevantes en este mapa, diferenciadas por el rango de probabilidad de ocupación al que pertenecen:

- Zona ocupada (puntos rojos y amarillos), representada por las celdas con mayor probabilidad de ocupación (con máxima verosimilitud de las lecturas de sensores), se ubica principalmente en la parte inferior de la figura dibujada en el mapa.
- Zona libre (zona azul) compone principalmente la forma observada en el centro del mapa.
- Zona no explorada (zona verde), compuesta por el resto del espacio del mapa.

Sobre esta imagen del mapa se han superpuesto una serie de círculos rojos para indicar el ancho de la zona ocupada. Se han superpuesto también líneas azules indicando la ubicación del borde exterior del obstáculo (contorno) en el mapa. Idealmente, la zona ocupada debería presentar el ancho de una celda (1 cm en este caso) y corresponder exactamente con las líneas de contorno superpuestas. Se observa, por medio de la distancia desde el centro de cada círculo a la línea de contorno más próxima, que la zona ocupada con más anchura presenta un radio de 3 cm y por lo tanto que el error máximo de posición del contorno detectado es aproximadamente de 3 cm.

Como se demostró en un trabajo previo a este experimento (Ponticelli et al., 2008), el error de medición de distancia de la cabeza sensora es de aproximadamente ± 1 cm. Esta precisión se deteriora al tomarse en cuenta los errores introducidos por las holguras de las articulaciones del brazo manipulador y a la acumulación de errores numéricos en los cálculos cinemáticos realizados en el controlador del robot.

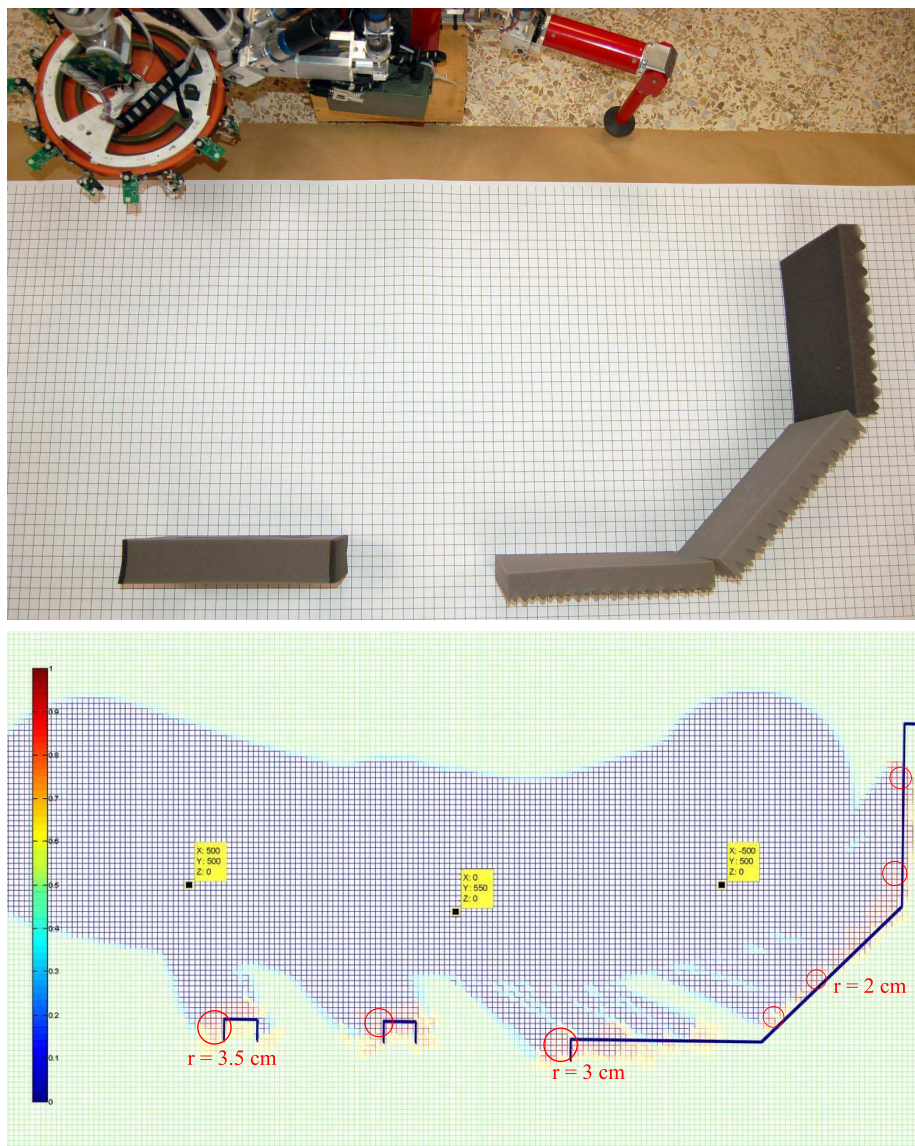


Figura 5.18: Validación de detección parcial de contorno. Experimento 2. Montaje experimental (arriba) y rejilla de ocupación (abajo). Se han superpuesto en la imagen de abajo las líneas del contorno de los obstáculos.

En el segundo experimento se colocó un conjunto de obstáculos con geometrías conocidas obstruyendo parcialmente la trayectoria nominal del barrido. Tal como se observó en los experimentos de la sección anterior, la cabeza sensora modifica su vector de velocidad de desplazamiento cuando se acerca a los obstáculos desviándose de su trayectoria nominal, y siguiendo el segmento del contorno que se encuentra dentro del área de barrido, hasta pasar completamente al obstáculo, retomando finalmente la trayectoria nominal. La rejilla de ocupación construida a partir de los datos capturados durante el experimento, revela una figura formada por las celdas ocupadas con forma similar a la del contorno real del obstáculo.

En la Fig. 5.18 se observa la configuración inicial de este experimento y la rejilla de ocupación resultante. Sobre la imagen de la rejilla se ha superpuesto nuevamente una serie de círculos rojos que indican el ancho de la zona con alta probabilidad de ocupación en la rejilla y las líneas azules que indican el borde exterior del contorno del obstáculo. La zona ocupada presenta diferentes anchuras en diferentes partes del mapa. Como se mencionó en el experimento anterior, idealmente se debería obtener una zona de ocupación con anchura de una celda (con máxima verosimilitud de las lecturas de sensores y mínimo error de posicionamiento del sistema de barrido). Debido a la presencia de errores de medición y posicionamiento, la zona de ocupación presenta una anchura variable, indicado por los círculos rojos con diferentes radios. La distancia entre el centro de cada círculo hasta la línea de contorno más cercana, el error máximo de posición del contorno detectado es de aproximadamente 3.5 cm.

5.2.2. Validación de los algoritmos de generación del mapa de superficie del terreno

En este experimento se empleó una superficie con irregularidades de geometría conocida. Se desea determinar la inclinación de la superficie de prueba a partir del mapa de elevación, construido a partir de la información de elevación del terreno obtenida por el sistema de exploración.

La Fig. 5.19 muestra la configuración inicial del experimento. Las irregularidades del terreno las constituyen una serie de escalones. La línea de división entre el primer y segundo escalón fue dispuesta cerca del centro transversal del área de barrido (eje X). Cada escalón incrementa 5 cm la altura del terreno y tienen 31 cm de largo. La escalinata presenta una línea

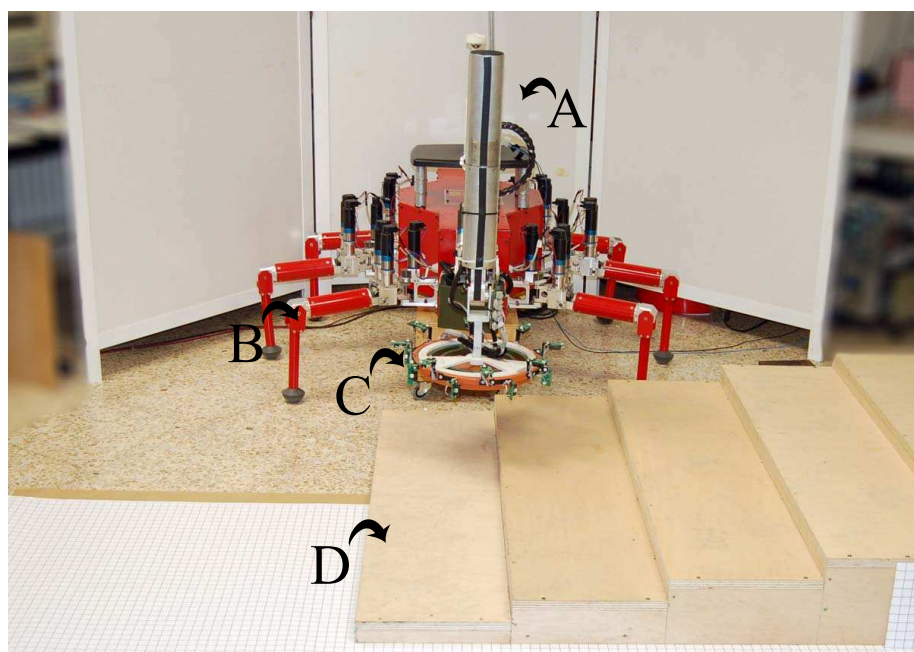


Figura 5.19: Validación del sistema de generación del mapa de superficie del terreno. A) Brazo manipulador, B) Robot caminante, C) Cabeza sensora, D) Superficie escalonada.

envolvente con una pendiente α de

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{5 \text{ cm}}{31 \text{ cm}} \right) = 9.2^\circ \quad (5.1)$$

El mapa de elevación obtenido se muestra en la Fig. 5.20. Sobre la vista del plano XY se muestra la trayectoria trapezoidal cruzada del centro de la

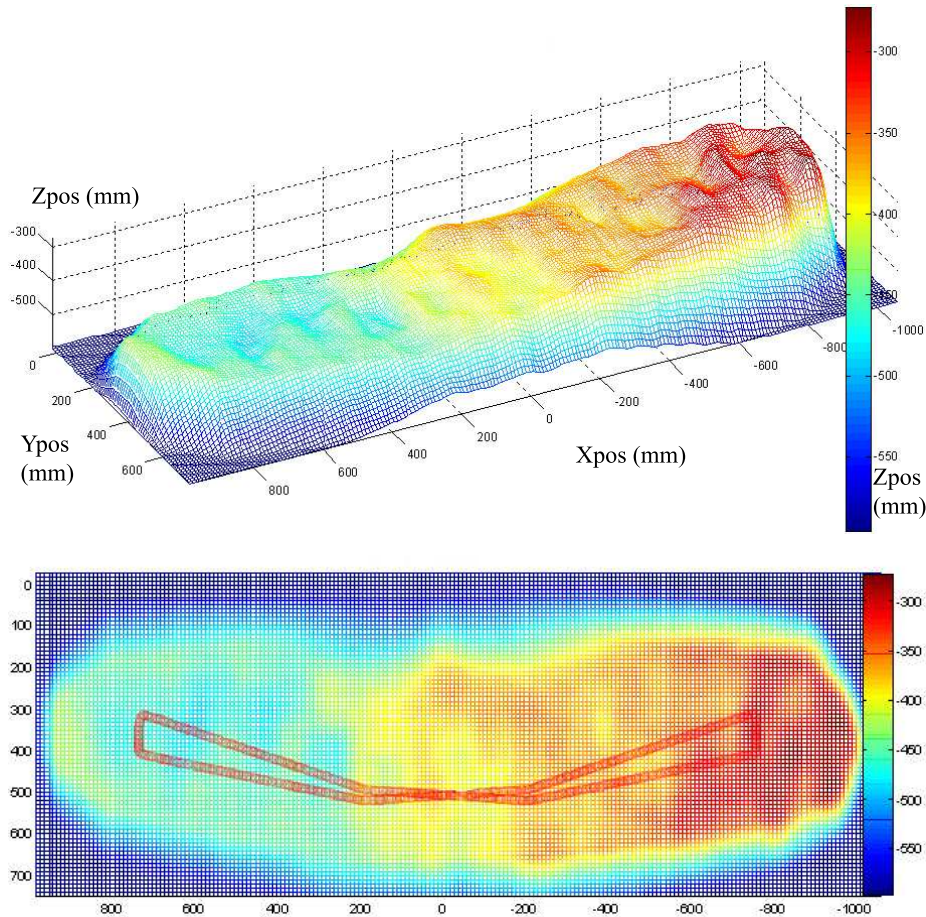


Figura 5.20: Validación de la generación de mapa de elevación de la escalinata. Imagen inferior: vista del plano XY . Imagen superior: vista 3D. Los valores de elevación son medidos con respecto a la base del brazo manipulador.

cabeza sensora. Los valores de elevación se miden con respecto al sistema de referencia con origen en la base del brazo manipulador. La configuración del robot ocasiona que este sistema de referencia se encuentre siempre por encima de la superficie del terreno, por lo tanto, los valores de altura obtenidos por la cabeza sensora son siempre negativos.

La pendiente de la superficie se extrae del mapa de elevación empleando (5.1) y los valores promedio de altura en las coordenadas $x = 0$ y $x = -800$:

$$\begin{aligned} \text{prom}_{z(x=0)} &= -427 \text{ mm} \\ \text{prom}_{z(x=-800)} &= -286 \text{ mm} \\ \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{427-286}{800} \right) &= 10^\circ \end{aligned} \quad (5.2)$$

Con los resultados obtenidos de (5.1) y (5.2), el error de estimación de la pendiente en este experimento es de 0.8 grados, aproximadamente. El error de estimación de la variación de alturas en la superficie del terreno en este experimento se obtiene de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{alt}_{escalera} &= 150 \text{ mm} \\ \text{dif}_{alt} = 426 \text{ mm} - 286 \text{ mm} &= 141 \text{ mm} \\ \text{error} = 150 \text{ mm} - 141 \text{ mm} &= 9 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5.3)$$

demostrando que el error de determinación de la elevación es menor que 1 cm.

El segundo experimento consiste en ejecutar el procedimiento de barrido sobre un terreno experimental con variaciones conocidas en el perfil. Se desea estudiar el comportamiento de los algoritmos de determinación de parámetros del plano del terreno. La configuración del experimento se muestra en la Fig. 5.21. En esta figura se observa un terreno con inclinación variable a la izquierda de la imagen (objeto verde), una zona plana en

el centro, y una zona con pendiente constante a la derecha (escalinata del experimento anterior).

En la Fig. 5.22 se muestra el recorrido que realizó el centro de la cabeza sensora durante un barrido completo. En la vista del plano XY se observa que la cabeza describe la trayectoria trapezoidal cruzada. En la vista del plano frontal (XZ) se observan los cambios de altura de la cabeza; cambios escalonados de altura en vez de seguir una trayectoria continua en Z durante el barrido. Esto se debe a que el sistema de exploración ha sido programado para ajustar la altura de la cabeza con una histéresis de 20 mm, disminuyendo las vibraciones en el robot causadas por los continuos ajustes de altura de la cabeza y disminuyendo también el consumo de potencia de los motores del brazo.

Se observa también que la altura del centro de la cabeza sensora permanece constante hasta rebasar al obstáculo que ha detectado debajo. La cabeza sube en función de la altura detectada del terreno, pero en presencia

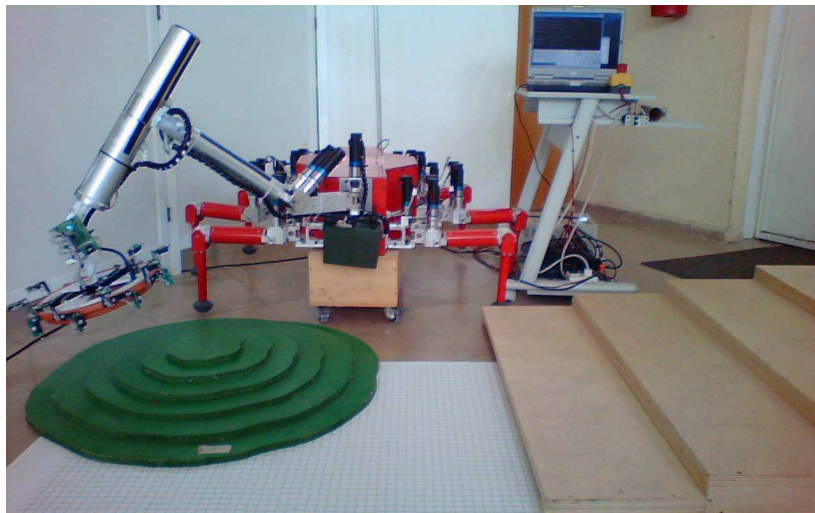


Figura 5.21: Configuración del experimento de validación de parámetros del plano.

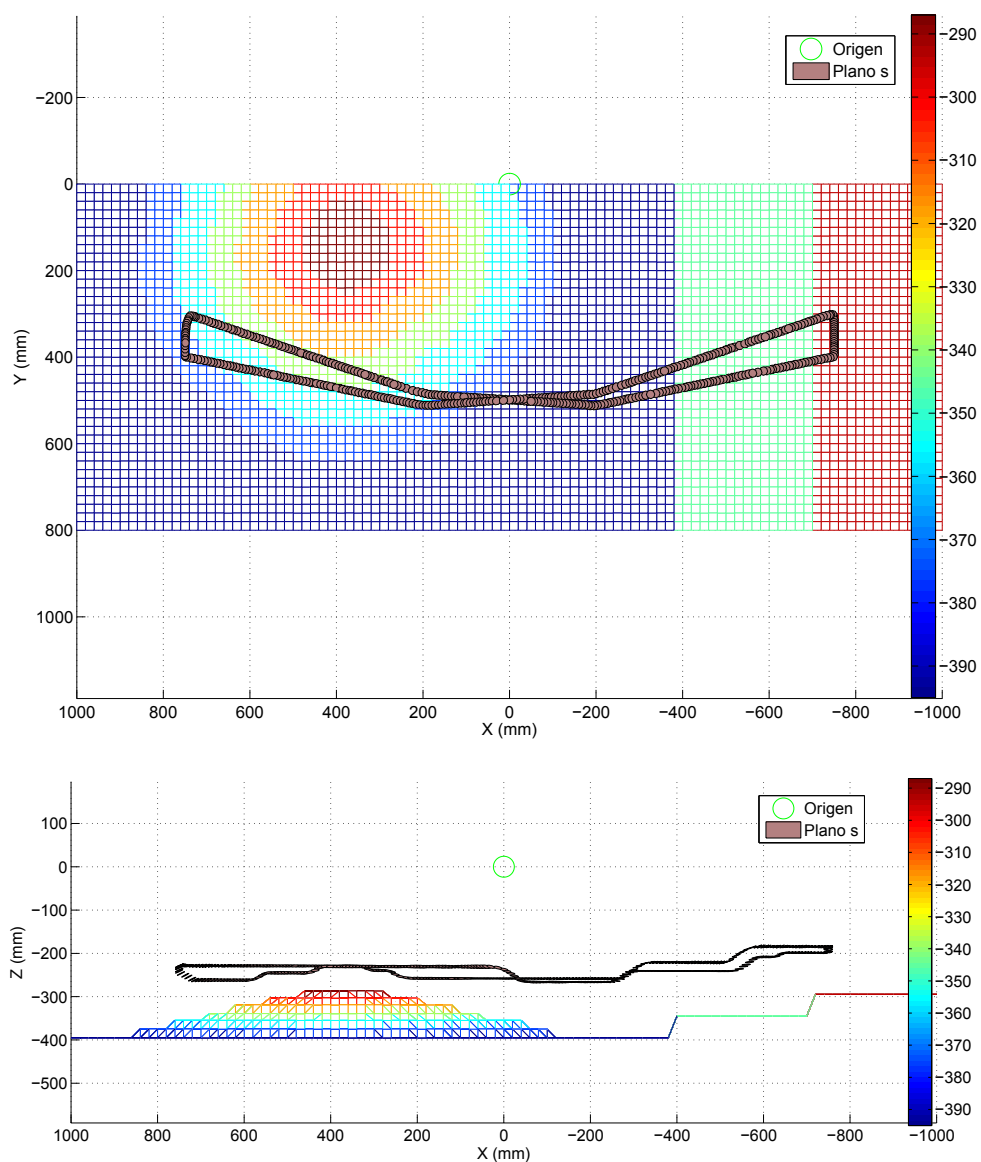


Figura 5.22: Trayectoria del centro de la cabeza sensora. Vista superior (plano XY, arriba) y vista frontal (plano XZ, abajo).

de un desnivel el sistema de exploración no baja la cabeza hasta que toda su estructura haya pasado la zona elevada del terreno. La Fig. 5.23 muestra una ampliación de la figura anterior donde ocurre claramente este comportamiento. En el movimiento hacia la derecha (flechas azules), la cabeza se eleva siguiendo el perfil del terreno y baja cuando se ha recorrido la distancia suficiente para que la cabeza pase el desnivel anterior. De igual manera ocurre en el sentido contrario del barrido (flechas rojas).

En la Fig. 5.24 se observa el recorrido del vector normal al plano de la cabeza sensora durante el barrido en un sentido. De manera cualitativa, se observa que este vector es aproximadamente perpendicular a la superficie del terreno. Aunque la precisión de la orientación de la cabeza sensora no es un requerimiento crítico del sistema de exploración, es posible orientar la cabeza adecuadamente en función del perfil del terreno. El procedimiento de orientación también implementa una histéresis, en este caso de 2 grados, y con la misma finalidad que en el control de altura: reducir vibraciones del robot y requerimientos de potencia eléctrica del brazo manipulador.

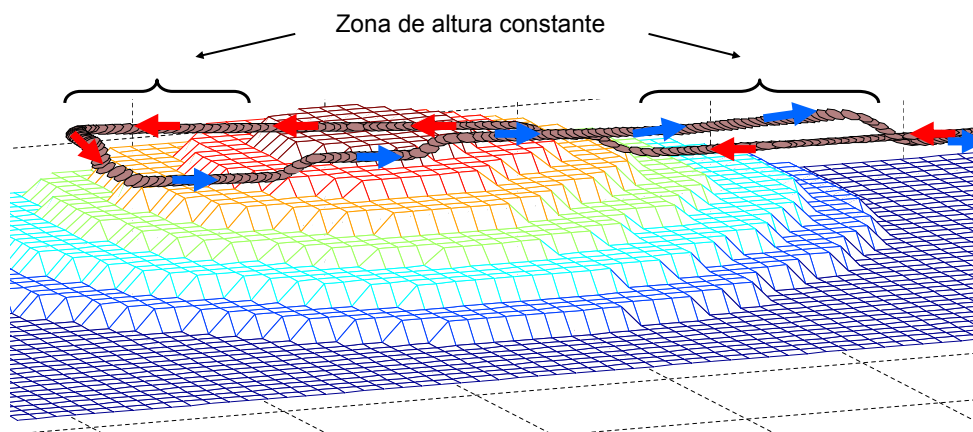


Figura 5.23: Vista ampliada de la trayectoria de la cabeza sensora. Se observa que la cabeza mantiene su altura hasta rebasar el obstáculo que ha detectado debajo.

Para estudiar el comportamiento del algoritmo de determinación del vector normal al plano de la superficie mediante reducción de puntos hemos comparado sus resultados con los que se obtienen empleando el método estándar de la pseudoinversa de Moore-Penrose. Ambos procedimientos se diferencian básicamente en que:

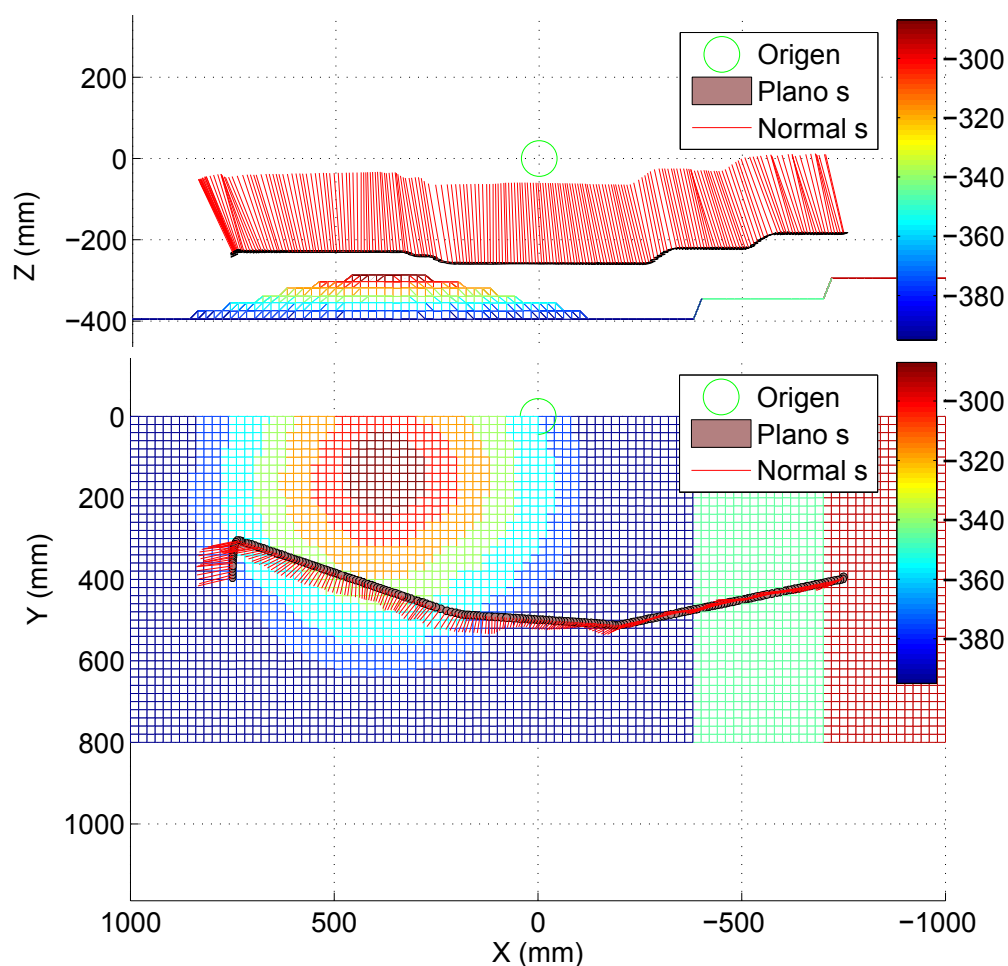


Figura 5.24: Recorrido del vector normal al plano de la cabeza sensora. Vista del plano XZ (arriba) y del plano XY (abajo). Se observa cómo los vectores normales a la cabeza sensora se ajustan a la inclinación de la superficie del terreno bajo la cabeza.

- Nuestro algoritmo de reducción de puntos selecciona 2 de los 8 puntos de la superficie medidos por la cabeza sensora, calcula un tercero y determina el vector normal al plano que los contiene.
- Mediante el método de la pseudoinversa, a partir de una matriz formada por los 8 puntos se obtiene un vector de parámetros del plano que se ajusta a estos puntos mediante minimización del error cuadrático medio.

Dada la ecuación normalizada del plano,

$$\begin{aligned}
 & ax + by + cz + 1 = 0 \\
 \rightarrow & X \cdot P = -1, \begin{cases} X = (x, y, z) \\ P = (a, b, c)^T \end{cases} \quad (5.4)
 \end{aligned}$$

el vector de parámetros P constituye el vector normal al plano. Si X es una matriz 3×3 no singular formada por tres puntos pertenecientes al plano, es posible determinar unívocamente el vector de parámetros P empleando la matriz inversa X^{-1} . En el caso de una matriz no cuadrada X 8×3 que contiene los 8 puntos de la superficie, empleando la pseudoinversa de X (5.4) se obtiene:

$$P = X^+[-1 \ -1 \ -1]^T \quad (5.5)$$

donde

$$X^+ = pinv(X) = [X^T X]^{-1} X^T \quad (5.6)$$

como ya se introdujo en la sección 4.2.2. Aplicando este procedimiento a los datos de distancia reportados por la cabeza sensora durante el barrido, se construye la Fig. 5.25.

En la Fig. 5.26 se muestra una gráfica del ángulo entre el vector normal al plano de la cabeza sensora ns y los vectores normal al plano estimado mediante pseudoinversa np y normal al plano estimado mediante reducción

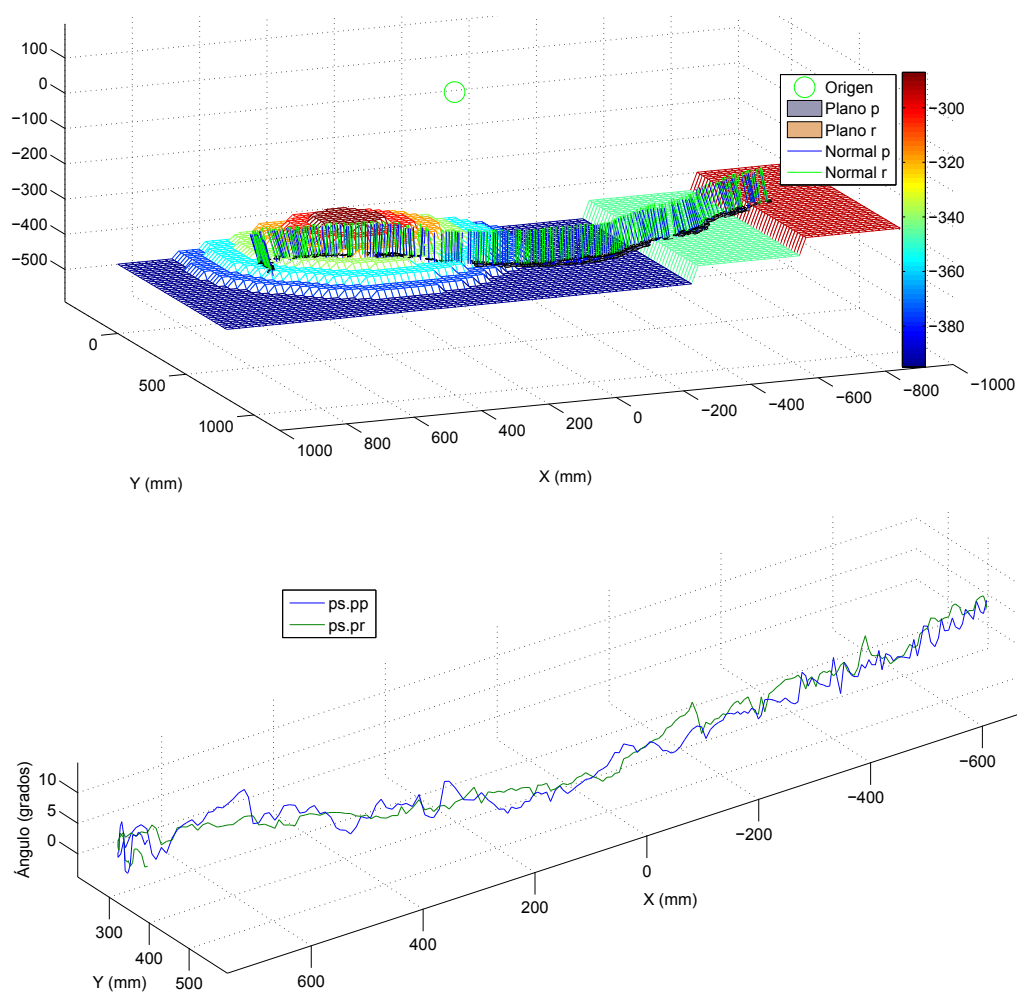


Figura 5.25: Recorrido de los vectores normales al plano mediante pseudoinversa np (plano p) y al plano mediante reducción de puntos nr (plano r). Vista 3D del recorrido de los vectores np y nr (arriba), y gráfica 3D del ángulo entre el vector normal de la cabeza sensora ns y los vectores normales np y nr (abajo).

de puntos nr , calculado mediante el producto escalar $ns \cdot np$ y $ns \cdot nr$. Se muestran también los valores de media m , desviación estándar ds y máximo max para cada ángulo. Se observa que de los dos procedimientos de determinación del vector normal de la superficie, el de reducción de puntos reporta los menores valores estadísticos; aunque en la práctica, se puede decir que ambos métodos ofrecen resultados similares.

La gráfica del ángulo entre el vector normal a la cabeza sensora ns y el vector normal al plano estimado del terreno mediante reducción de puntos nr ($ns \cdot nr$) permite observar específicamente el comportamiento del controlador de orientación de la cabeza sensora, que emplea al vector nr como entrada. El error máximo de orientación entre el plano del sensor y el plano estimado mediante el procedimiento de reducción de puntos es de 10.1 grados, con una media de 4.78 grados y una desviación estándar de

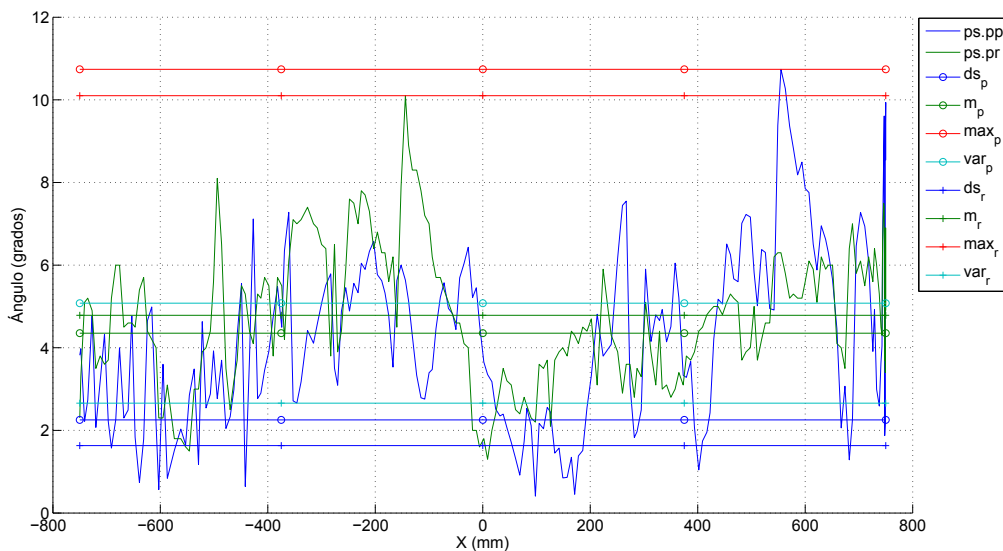


Figura 5.26: Gráfica del ángulo entre el vector normal de la cabeza sensora ns y los vectores normales np y nr . Se muestran los valores de media m , desviación estándar ds y máximo max para cada ángulo.

1.6 grados.

La variable que mejor compara los dos procedimientos de estimación del vector normal al plano de la superficie es la diferencia de ángulo entre ambos vectores normales $ns \cdot np - ns \cdot nr$ (véase la Fig. 5.27). La diferencia máxima alcanza los 5.35 grados. Este error de estimación del ángulo del plano de la superficie incide en la determinación de la distancia al terreno. Con este error de ángulo, el error de distancia introducido es de

$$d_e = R \cos(\omega) \sin(\omega) = 200 \sin(5.35) = 18.6 \text{ mm} \quad (5.7)$$

como se muestra en el esquema de la Fig. 5.28. Este error resulta despre-

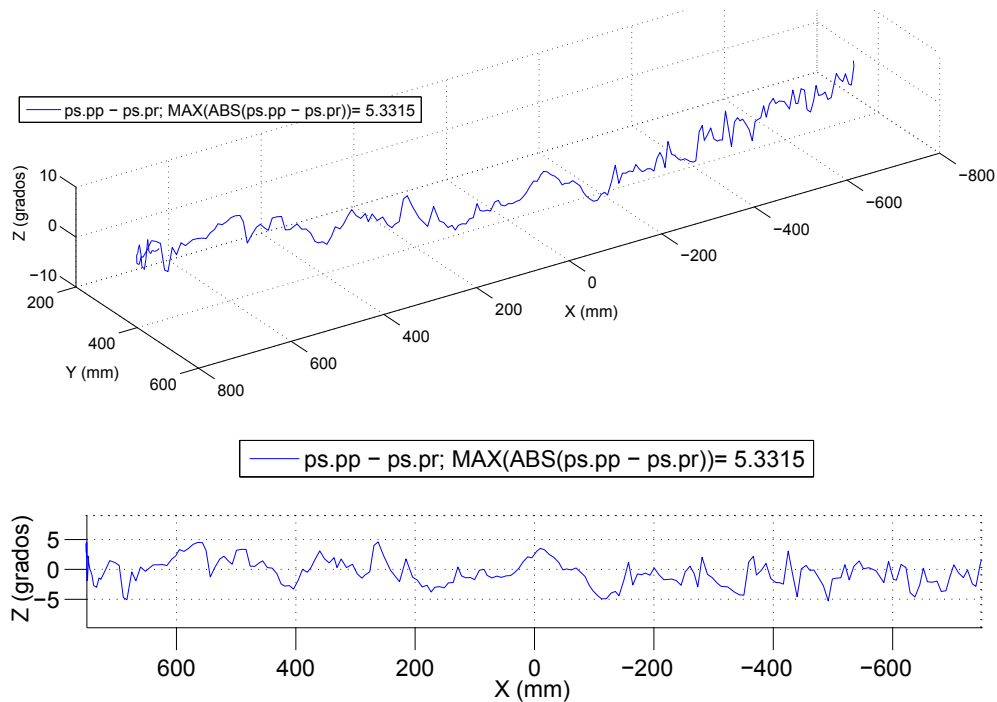


Figura 5.27: Diferencia de ángulo entre los vectores normales estimados $ns \cdot np - ns \cdot nr$.

ciable, en la práctica, para la operación del sistema de exploración.

Ambos métodos de estimación del vector normal al plano difieren en la interpretación de la altura del plano en los siguientes aspectos:

- El método de la pseudoinversa calcula el plano medio que se ajusta a todos los puntos medidos del terreno, por lo que el plano estimado se encuentra a una altura media entre los puntos medidos del terreno; es decir, por encima de los valles y por debajo de los picos de la superficie real.
- El método de reducción de puntos emplea los dos más elevados (i.e., los puntos más cercanos a la cabeza sensora), por lo que el plano estimado se encuentra siempre por encima de estos dos puntos (o picos) de la superficie, imitando el comportamiento de una plancha rígida del tamaño de la cabeza sensora apoyada sobre la superficie del terreno.

Esta característica del método de reducción de puntos cumple con el prin-

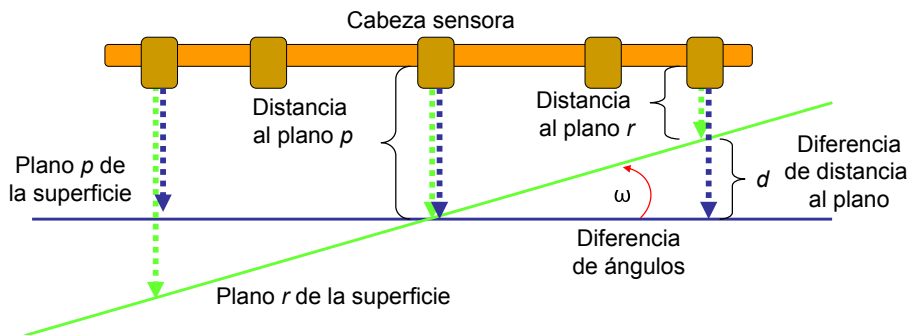


Figura 5.28: Esquema de la diferencia de distancia al terreno debido a la diferencia de ángulo de inclinación estimada del terreno. En este ejemplo, se ha dispuesto la cabeza sensora paralela al plano estimado mediante pseudoinversa p . Se mide el ángulo ω entre éste y el plano estimado mediante reducción de puntos r , y se determina la diferencia de distancia d entre ambos planos.

El principal requerimiento de diseño planteado: el sistema de exploración debe mantener la cabeza sensora siempre por encima de todos los elementos del terreno, y ocasiona que el plano estimado por reducción de puntos se encuentre generalmente por encima del plano estimado mediante pseudoinversa, como se observa en la Fig. 5.29.

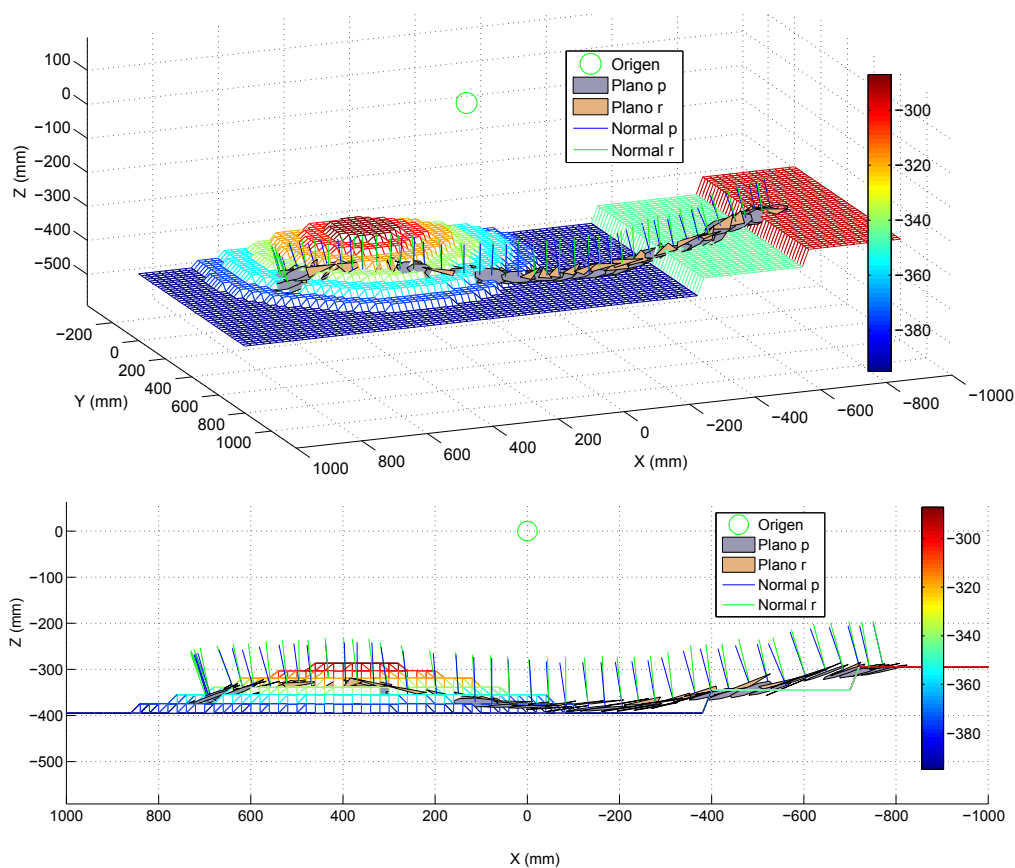


Figura 5.29: Planos estimados del terreno mediante pseudoinversa p y mediante reducción de puntos r a lo largo de un barrido. Se observa cómo, generalmente, el plano r se encuentra por encima del plano p , que el plano p se encuentra a una altura media entre los elementos de la superficie, y el plano r se apoya en los elementos más elevados.

Capítulo 6

Resumen, conclusiones y principales aportaciones

En este capítulo final se presenta un breve resumen de la memoria que abarca la motivación de la investigación, el estado de la técnica, los principales objetivos planteados y las principales aportaciones de esta tesis. Posteriormente se exponen con más detalle las principales aportaciones científicas y técnicas.

6.1. Resumen y conclusiones

El objetivo inicial de este trabajo de tesis doctoral ha sido el desarrollo de un sistema automático de exploración de terrenos, que implica el diseño de los algoritmos asociados para tareas de detección y localización de minas antipersonas (véase la sección 1.3). El desarrollo del sistema automático de exploración pretendía aumentar la eficiencia de detección de alarmas de minas del sistema previamente existente, diseñado dentro del

proyecto del Plan Nacional de I+D+i “Técnicas de sensorización y control para la detección eficiente de minas antipersonas (DYLEMA)”, Dirección General de Investigación, proyecto (MCYT) DPI2001-1595 (2002-2004). Para ello se diseñó un sistema que permitiera localizar alarmas de minas al mismo tiempo que determinara las características básicas de la superficie del terreno. La información de localización de las alarmas de minas se almacenaría en una base de datos a cargo del controlador del sistema DYLEMA, y la información relativa al terreno sería procesada por el controlador del sistema de exploración, tanto para su propio uso como para ser usado por el controlador del sistema DYLEMA en la determinación de trayectorias óptimas de desplazamiento de la plataforma móvil. Las alarmas de minas se detectarían empleando un detector de metales convencional, que debía ser integrado dentro del sistema de exploración de terrenos.

El desminado presenta en general dos modalidades: militar y humanitario. El desminado militar se lleva a cabo durante la actividad bélica, con la finalidad de abrir un paso “seguro” en el terreno para el tránsito de recursos humanos y maquinarias bélicas; para este propósito se suelen emplear métodos agresivos que remueven el terreno lanzando las minas lejos del camino a despejar, o simplemente haciendo explotar los artefactos activándolos intencionalmente con maquinaria especial. Se asume que la tarea de desminado se ha completado cuando se ha desactivado el 80 % de los artefactos.

El desminado humanitario se realiza después de finalizada la actividad bélica, y busca restituir las condiciones de habitabilidad del terreno para que la población civil ocupe nuevamente sus territorios. En este caso no es admisible un tasa de desactivación menor que el 99.6 % (según las directivas de la ONU) (IMAS, 2009). Por esta razón, en el desminado humanitario se emplean procedimientos mucho más rigurosos que ofrecen tasas bajas de detección de falsos-negativos (no-detección de una mina). Sin embargo, es preocupante que actualmente en el desminado humanitario se empleen tec-

nologías, técnicas y procedimientos manuales heredados de la segunda guerra mundial que presentan tasas elevadas de falsos-positivos en la detección de minas (MacDonald y Lockwood, 2003). Existen estadísticas del *Cambodian Mine Action Centre* (CMAC) donde la probabilidad de falsos-positivos alcanzó el 99.7% contra un 0.3% de verdaderos materiales peligrosos (véase el Apéndice A). Resulta aún más preocupante que la velocidad actual de desactivación de minas sea mucho menor que la velocidad de dispersión de nuevas unidades (100.000/año y 2.000.000/año, respectivamente).

Es evidente, por tanto, la necesidad de aumentar la eficiencia del proceso de desminado humanitario, que requiere desarrollar sistemas de detección de minas más eficaces y sistemas automatizados de exploración de terrenos, localización y desactivación de minas. Pero se precisan dos desarrollos importantes para alcanzar estos objetivos: (a) la detección eficiente de minas requiere el desarrollo de nuevas tecnologías de sensores de minas y de fusión sensorial que exploten las ventajas de cada tecnología, y (b) el desarrollo de sistemas móviles que permitan desplazar estos sensores de minas sobre el terreno eficientemente. Estos sistemas móviles deben ser capaces de operar de manera eficiente sobre terrenos naturales heterogéneos, surgiendo así la implementación de sistemas móviles con patas en tareas de desminado, ya que resultan más adecuados que otros tipos de vehículos terrestres para el desplazamiento sobre estos terrenos, ofreciendo además un mayor número de grados de libertad de movimiento y volúmenes de trabajo más amplios para posicionar el sensor de minas.

Con el fin de aumentar la eficiencia del sistema (en desplazamiento y detección) sin aumentar excesivamente la complejidad mecánica y las técnicas de control de estos vehículos con patas, se suele emplear un brazo manipulador a bordo del vehículo (véase la sección 2.1.1). Hasta ahora, los sistemas de detección de minas que emplean brazos manipuladores suelen ser prototipos que implementan algoritmos básicos de exploración de terrenos; sus

diseños se enfocan principalmente en el estudio de los problemas de control individual del vehículo y del brazo manipulador. Éstos implementan algoritmos sencillos de control del brazo manipulador empleando servo-control visual y complejos sistemas de visión artificial.

En las tareas de detección de minas, los sistemas móviles existentes suelen ser semi-automáticos o manuales (tele-operados), empleando sistemas básicos de detección de obstáculos y sistemas de tele-observación, respectivamente. Por lo general, para los sistemas semi-automáticos se dispone de un mapa previo del terreno con la descripción de las características del entorno, y para los sistemas manuales es el operario el que toma las decisiones acerca de la trayectoria del móvil. El sistema de localización de minas DYLEMA presentaba una ventaja adicional sobre los demás sistemas de localización de minas, puesto que implementaba algoritmos de cobertura total del terreno (véase la sección 4.1.1.2); pero requería de un sistema sensorial para detección de contornos de obstáculos y perfil del terreno.

La detección de obstáculos y su representación adecuada en los sistemas móviles son temas aún en desarrollo. Entre los paradigmas existentes para la representación del entorno, el basado en rejillas de ocupación resulta adecuado para las tareas de exploración de terrenos (véase la sección 2.1.2). De esta manera es posible no sólo construir un mapa de la ocupación de los obstáculos en el entorno, sino que favorece la fusión sensorial y el manejo de datos redundantes en sistemas con múltiples sensores. Así mismo, para la representación del perfil del terreno, los mapas de elevación resultan apropiados en la exploración de terrenos naturales. Es común el empleo de complejos sistemas de visión artificial o de costosos y voluminosos sistemas de medición de distancia por láser (*laser rangefinders*) para medir este perfil del terreno.

En este trabajo de tesis doctoral se ha desarrollado un sistema de ex-

ploración de terrenos con robots móviles para la localización y detección de minas en tareas de desminado humanitario. Dada la base establecida por el diseño previo del sistema DYLEMA, se desarrolló su sistema de exploración de terrenos mediante el diseño de algoritmos de control de movimiento del brazo manipulador, el diseño de una cabeza sensora para tareas de exploración de terrenos, el diseño de algoritmos de detección de obstáculos y de fusión sensorial, y finalmente el diseño de algoritmos para determinación del perfil del terreno.

El estado de la técnica en esta área de sistemas de exploración de terrenos (Capítulo 2) se encuentra todavía en un estadio inicial, donde aún se está investigando la solución de problemas técnicos y tecnológicos relacionados con los vehículos, los sistemas sensores de minas y los sensores del terreno. En este sentido, este trabajo de tesis aporta un nuevo esquema de exploración de terrenos basado en diseño de algoritmos de soporte a la exploración.

El desarrollo del sistema de exploración de terrenos propuesto consta de las siguientes partes y características:

- Diseño de dos prototipos de cabezas sensoras, que ofrecen soluciones a las necesidades del sistema de exploración de terrenos empleando un reducido número de sensores dispuesto de manera especial, ofreciendo además capacidad de procesamiento local de datos, pesos ligeros, reducidas dimensiones y bajo costo (Capítulo 2).
- Diseño de algoritmos de procesamiento de datos que permiten ser embebidos fácilmente en la cabeza sensora para determinación de parámetros de los obstáculos y del perfil del terreno (véase la sección 4.2).
- Diseño de algoritmos de exploración de terrenos que se basan en un esquema de contacto virtual acomodaticio (sección 4.1).

- Diseño de un algoritmo especial de control de movimiento de motores que aumenta la seguridad de operación empleando controladores sencillos de gama baja (sección 3.2.1).
- Diseño de experimentos específicos que permiten el estudio y la validación de los algoritmos propuestos (Capítulo 5).

El prototipo final de cabeza sensora consta de un diseño nuevo de sensor de distancia perimetral (del que se ha realizado una solicitud de patente de invención; véase el Apéndice D) que rodea al detector de minas y procesa los datos de distancia, entregando algunos parámetros de los obstáculos (posición del contorno) y del perfil del terreno (plano de la superficie). La exploración de terrenos se lleva a cabo por medio de la implementación de una secuencia nominal de barrido de la superficie, manteniendo la cabeza sensora a una altura predeterminada sobre el terreno y paralela a éste. La altura y orientación de la cabeza sensora se ajusta en función de la información procesada y entregada por la cabeza sensora acerca de la distancia al terreno y los parámetros del plano de la superficie del terreno bajo la cabeza. La interacción del contacto de la cabeza sensora con los obstáculos está modelada por un conjunto de sistemas muelle-amortiguador virtuales, al mismo tiempo que se emplea la información de distancia a los obstáculos para construir un mapa de ocupación del área barrida por medio de métodos estadísticos y modelos estadísticos de los sensores de la cabeza.

Cada uno de los módulos del sistema de exploración ha sido validado mediante una serie de experimentos diseñados específicamente para cada módulo en cuestión, también se ha validado la operación del sistema integrado mediante experimentos más complejos y en terrenos naturales.

El sistema de exploración diseñado ha sido probado tanto en el laboratorio como en terrenos naturales, demostrado que es un prototipo viable para ser implementado en misiones reales de desminado humanitario.

6.2. Principales aportaciones

Consideramos que las principales aportaciones de este trabajo de tesis doctoral son:

1. **Nuevo sistema de exploración de terrenos:**

El principal inconveniente de los sistemas actuales más avanzados de exploración es que requieren visión artificial para operar de manera automática. Los diseños de prototipos de cabeza sensora propuestos en esta tesis eliminan esta necesidad, y sus condiciones especiales de iluminación de la escena, permitiendo implementar sistemas más simples, de menor costo, más ligeros, y aumentando la velocidad de procesamiento de datos gracias al diseño e implementación de algoritmos especiales de procesamiento que se ejecutan dentro del controlador de la cabeza sensora.

2. **Configuración novedosa de sensores perimetrales de distancia:**

Las configuraciones de los sensores de los prototipos de cabeza sensora pueden ser empleadas fácilmente en otras aplicaciones de robots móviles, ofreciendo dos alternativas novedosas, sencillas y eficaces al problema de la detección de obstáculos.

3. **Nuevo algoritmo de procesamiento de estimación de un plano a partir de mediciones de distancia:**

Con este novedoso algoritmo de reducción de puntos se resuelve satisfactoriamente el problema común de estimación del plano al cual pertenece un conjunto de mediciones de la superficie, empleando pocos recursos computacionales, siendo apto para ser embebido en sistemas de bajo costo (como microcontroladores). Con este algoritmo se ha implementado un control de altura y de orientación de la cabeza sen-

sora sobre la superficie (paralela al plano del terreno) que resulta muy eficiente dada la naturaleza de las variables de entrada y salida del sistema.

4. **Nuevo algoritmo de barrido de terrenos:**

Este algoritmo emplea un esquema de control acomodaticio de una cabeza sensora por medio del contacto virtual con obstáculos. El algoritmo, implementado en el controlador de barrido, modifica activamente la trayectoria nominal del detector de minas en función de los obstáculos y del perfil del terreno. Hasta la fecha de realización de esta tesis, no se tiene constancia de que exista algoritmos similares en la literatura científica.

5. **Esquema innovador de anillo virtual móvil y sistemas muelle-amortiguador no-lineal:**

Este esquema mejora las implementaciones existentes de los sistemas de detección de obstáculos mediante contacto, de los métodos basados en teorías de campos de fuerzas, y en los basados en fuerzas virtuales de contacto modeladas por sistemas simples muelle-amortiguador. La aproximación pragmática que proponemos para la implementación de este esquema permite ajustar la respuesta del sistema de manera más intuitiva, dada su similitud con los sistemas físicos conocidos.

6. **Algoritmo para la detección sin contacto del contorno de los obstáculos mediante cabeza sensora y brazo manipulador:**

Construido en base al esquema del anillo virtual móvil, permite determinar el contorno de los obstáculos a medida que se desarrolla la actividad de exploración del terreno. Se aporta además un nuevo conjunto de modelos de sensores y fusión sensorial para ser empleados en la construcción de rejillas de ocupación.

7. **Diseño de nuevos experimentos para validación de módulos**

y algoritmos del sistema de exploración:

El empleo de los sistemas propuestos en esta tesis para la exploración de terrenos requiere de experimentos específicos para la comprobación de sus funciones. Los experimentos diseñados permiten estudiar las características de cada uno de los módulos y validar su funcionamiento.

8. Nueva solución al problema técnico de seguridad en el control de movimiento de actuadores:

Tanto si se trabaja con controladores de gama baja o de gama superior, este algoritmo de control PosVel aumenta la seguridad de la máquina y del operario.

Referencias

- Acroname (2007). *Demystifying the Sharp IR Rangers*.
<http://www.acroname.com/robotics/info/articles/sharp/sharp.html>:
Acroname Inc.
- Adler, R. J. y J. E. Taylor (2007). *Random Fields and Geometry*. Springer
Science+Business Media LLC. ISBN-13: 978-0-387-48112-8, e-ISBN-
13: 978-0-387-48116-6.
- Albert, K., M. Myrick, S. Brown, F. Milanovich, y W. D.R. (1999). High-
speed fluorescence detection of explosives vapor. *SPIE* (3710), 308–
314.
- Alonso, P. (2005, julio). Estudio y tratamiento de la señal de un detector
de minas antipersonales: aplicación al proyecto dylema. Trabajo de fin
de carrera, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela de Informáti-
ca.
- Arbuckle, D., A. Howard, y M. Mataric (2002). Temporal occupancy
grids: a method for classifying spatio-temporal properties of the envi-
ronment. En *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference
on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 409–414.
- Asada, M. (1988). Building a 3d world model for mobile robot from
sensory data. En *Robotics and Automation. Proceedings, 1988 IEEE*

- International Conference*, Vol. 2, pp. 918–923. DOI 10.1109/ROBOT.1988.12177.
- Asada, M. (1990, Nov/Dic). Map building for a mobile robot from sensory data. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 20(6), 1326–1336.
- Asada, M., E. Ikeda, y Y. Shirai (1989). Interpretation and integration of height maps from a range image sequence. En *Intelligent Robots and Systems. The Autonomous Mobile Robots and Its Applications. IROS '89. Proceedings, IEEE/RSJ International Workshop on*, pp. 54–61.
- Ayers, J., J. Witting, C. Wilbur, P. Zavracky, H. McGruer, y D. Massa (1998). Biomimetic robots for shallow water mine countermeasures. Available at <http://www.neurotechnology.neu.edu/NPS2000Manuscript.pdf>.
- Basharin, G. P., A. N. Langville, y V. A. Naumov (2004). The life and work of a.a. markov. *Linear Algebra and its Applications*, 386, 3 – 26. Special Issue on the Conference on the Numerical Solution of Markov Chains 2003. DOI: 10.1016/j.laa.2003.12.041.
- Baudoin, Y. (2005). Mobile robotic systems facing the humanitarian demining problem. State of the art, technical report task 3.1.4, international test and evaluation program for humanitarian demining, The Royal Military Academy of Belgium (RMA).
- Baudoin, Y., M. Acheroy, M. Piette, y J. Salmon (1999). Humanitarian demining and robotics. *Mine Action Information Center Journal*, 3(2), 1–4.
- Bayes, T. y R. Price (1763). An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances. By the late Rev. Mr. Bayes, communicated by Mr. Price, in a letter to John Canton, M. A. and F. R. S. *Philo-*

- sophical Transactions of the Royal Society of London* (53), 370–418.
<http://www.stat.ucla.edu/history/essay.pdf>.
- Benet, G., F. Blanes, J. Simo, y P. Perez (2002). Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems* (40), 255 – 266.
- Biswas, R., B. Limketkai, S. Sanner, y S. Thrun (2002). Towards object mapping in non-stationary environments with mobile robots. En *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1014–1019.
- Borenstein, J. y Y. Koren (1988, April). Obstacle avoidance with ultrasonic sensors. *IEEE Journal of robotics and automation*, 4(2), 213–218.
- Borenstein, J. y Y. Koren (1989). Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 19(5).
- Cherian, A., V. Morellas, y N. Papanikolopoulos (2009, May.). Accurate 3d ground plane estimation from a single image. En *Robotics and Automation, ICRA 2009. IEEE International Conference*, pp. 2243–2249. doi 10.1109/ROBOT.2009.5152260, ISSN 1050-4729.
- Cobano, J., J. Estremera, y P. González de Santos (2008). Location of legged robots in outdoor environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 56, 751–761.
- Cobano, J., R. Ponticelli, y P. González de Santos (2008). Mobile robotic system for detection and location of antipersonnel land-mines: Field tests. *Industrial Robot*, 35(6), 520–527. DOI: 10.1108/01439910810909510.
- Coope, M. (2009). The online information centre for sensing and measurement. Technical report, sensorland.com/,

- <http://www.sensorland.com/>.
- Duckett, T. y A. Saffiotti (2000). Building globally consistent gridmaps from topologies. En *Proceedings of the 6th International IFAC Symposium on Robot Control, SYROCO'00*. ftp://aass.oru.se/pub/tdt/syroco_pdf.pdf.
- Ealo, J., A. Jiménez, F. Seco, C. Prieto, J. Roa, F. Ramos, y J. Guevara (2006). Broadband omnidirectional ultrasonic transducer for airborne ultrasound based on emfi. En *Proceedings of the 2006 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Vancouver-Canada.
- Elfes, A. (1986). A sonar-based mapping and navigation system. En *Robotics and Automation. Proceedings, 1986 IEEE International Conference*, Vol. 3, pp. 1151–1156.
- Elfes, A. (1987). Sonar-based real-world mapping and navigation. En *Robotics and Automation, IEEE Journal of [legacy, pre - 1988]*, Vol. 3, pp. 249–265.
- Elfes, A. (1989). Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation. *IEEE Computer journal*, 46–57. DOI 0018-9162/89/0600-06\$01 .00.
- ESI (2008). Mr-2 terrain mapping and in-ground mine detection. <http://www.esit.com/revd-mobileRobots-mr2.php>.
- Espinoza, C. (2007). Manipulador para la detección de minas antipersonas: diseño, realización y puesta a punto. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid.
- Estremera, J., E. García, y P. González de Santos (2002). A multi-modal and collaborative human-machine interface for a walking robot. *Journal of Intelligent and Robotics Systems*, 35, 397–425.
- Fabrizi, E. y A. Saffiotti (2000). Extracting topology-based maps

- from gridmaps. En *Robotics and Automation, ICRA 2000. Proceedings, IEEE International Conference*, Vol. 3, pp. 2972–2978. DOI: 10.1109/ROBOT.2000.846479.
- Fabrizi, E. y A. Saffiotti (2002). Augmenting topology-based maps with geometric information. *Robotics and Autonomous Systems* (40), 91–97.
- Ferreira, A., F. García, R. Frizera, T. Freire, y M. Sarcinelli (2008, Dec.). An approach to avoid obstacles in mobile robot navigation: The tangential escape. *Sba Controle & Automação*, 19(4). DOI: 10.1590/S0103-17592008000400003.
- Fong, T., C. Thorpe, y C. Baur (1999). Collaborative control: A robot-centric model for vehicle teleoperation. En *AAAI 1999 Spring Symposium: Agents with Adjustable Autonomy*, Stanford, CA., pp. 210–219.
- Fritsch, C., J. Camacho, A. Ibáñez, J. Brizuela, R. Giachetta, R. González, y S. Dasel (2006). A full featured ultrasound nde system in a standard fpga. En *Proceedings of the European Congress of Nondestructive Testing*.
- Fukushima, E., P. Debenest, Y. Tojo, K. Takita, M. Freese, H. Radrich, y S. Hirose (2005). Teleoperated buggy vehicle and weight balanced arm for mechanization of mine detection and clearance tasks. En *Proceedings of the IARP International workshop on Robotics and Mechanical Assistance in Humanitarian Demining (HUDEM2005)*, pp. 58–63.
- Gader, P. D., B. Nelson, H. Frigui, G. Vaillette, y J. Keller (2000). Landmine detection in ground penetrating radar using fuzzy logic. *Signal Processing, Special Issue on Fuzzy Logic in Signal Processing*, 80(6), 1069–1084. Invited Paper.
- García, E. y P. González de Santos (2004). Mobile robot navigation with

- complete coverage of unstructured environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 46(2), 195–204.
- Gentile, A. (1989). Power glove. Technical report, <http://www.ageinc.com/>, <http://www.ageinc.com/tech/index.html>.
- González de Santos, P., J. Cobano, E. García, J. Estremera, y M. Armada (2007). A six-legged robot-based system for humanitarian demining missions. *Mechatronics*, 17, 417–430.
- González de Santos, P., J. Estremera, y E. García (2005, April). Optimizing leg distribution around the body in walking robots. En *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, pp. 3218–3223.
- González de Santos, P., E. García, J. Cobano, y A. Ramírez (2004). Silo6: A six-legged robot for humanitarian de-mining tasks. En *Proceedings of 10th International Symposium on Robotics and Applications, World Automation Congress, Seville, Spain*.
- González de Santos, P., E. García, y J. Estremera (2007). Improving walking-robot performances by optimizing leg distribution. *Autonomous Robots*, 23(4), 247–258.
- González de Santos, P., E. García, R. Ponticelli, y M. Armada (2009). Minimizing energy consumption in hexapod robots. *Advanced Robotics*, 23(6), 681–704. DOI: 10.1163/156855309X431677.
- Gorinevsky, D. M., A. M. Formalsky, y A. Y. Schneider (1997). *Force control of robotics systems*. New York: CRC Press LLC.
- Gutmann, J.-S., M. Fukuchi, y M. Fujita (2005). A floor and obstacle height map for 3d navigation of a humanoid robot. En *Robotics and Automation, ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference*, pp. 1066–1071.

- Habib, M. K. (2000). Mechanical mine clearance technologies and humanitarian demining applicability and effectiveness. Available at [http://www.demine.org/ SCOT/Papers/Habib.pdf](http://www.demine.org/SCOT/Papers/Habib.pdf).
- Habumuremyi, J. C. (1998). Rational designing of an electropneumatic robot for mine detection. En *Proceedings of the 1st International Conference on Climbing and Walking Robots*, Brussels, Belgium, pp. 267–273.
- Hebert, M. (1986). Outdoor scene analysis using range data. En *Robotics and Automation. Proceedings, 1986 IEEE International Conference*, Vol. 3, pp. 1426–1432.
- Hebert, M. (1989). Building and navigating maps of road scenes using an active sensor. En *Robotics and Automation. Proceedings, 1989 IEEE International Conference*, Vol. 2, pp. 1136–1142. DOI 10.1109/ROBOT.1989.100133.
- Hirose, S. (2006). titan9. Technical report, Hirose Robotic Laboratory, http://www-robot.mes.titech.ac.jp/robot/walking/titan9/titan9_e.html.
- Hirose, S. y K. Kato (1998). Quadruped walking robot to perform mine detection and removal task. En *Proceedings of the 1st International Conference on Climbing and Walking Robots*, Brussels, Belgium, pp. 261–266.
- Hirose, S., S. Yokota, A. Torii, M. Ogata, S. Sugamuna, K. Takita, y K. Kato (2005). Quadruped walking robot centered demining system - development of titan-ix and its operation. En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, pp. 1296–1302.
- Hogan, N. (1985). Impedance control - an approach to manipulation. i - theory. ii - implementation. iii - applications. *ASME Transactions on*

- Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107, 1–24.
- Huang, Q. J. y K. Nonami (2003). Humanitarian mine detecting six-legged walking robot and hybrid neuro walking control with position/force control. *Mechatronics* (13), 773–790.
- IMAS (2009). Imas - the international mine action standards. <http://www.mineactionstandards.org/>.
- Instruments, N. (2006, Sept.). Measuring position and displacement with lvdts. Technical report, National Instruments, <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3638>.
- Jameco (2009). Flex sensor 4.5 length. Technical report, <http://www.jameco.com/>. Jameco part number: 150551.
- Jung, D. y A. Zelinsky (1996). Whisker based mobile robot navigation. En *Intelligent robotic systems conference (IROS)*, pp. 497–504.
- Khatib, O. (1986). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*, 5(1), 90–98.
- Kindermann, R. y J. L. Snell (1980). *Markov random fields and their applications*. American Mathematical Society. ISBN 0-8218-5001-6, <http://www.ams.org/>.
- Kok Kiong, T., L. Tong Heng, y H. Sunan (2008). *Precision Motion Control* (2 ed.). ISBN 978-1-84800-020-9. Springer-Verlag London Limited.
- Konolige, K. (1997, Oct.). Improved occupancy grids for map building. *Autonomous Robots*, 4(4), 351–367. DOI: 10.1023/A:1008806422571.
- Lamperski, A.G. and Loh, O., B. Kutscher, y N. Cowan (2005, April). Dynamical wall following for a wheeled robot using a passive tactile

- sensor. En *Robotics and Automation, ICRA 2005. Proceedings, IEEE International Conference*, Barcelona, Spain, pp. 3838–3843.
- LAPACK (2009). Lapack - liner algebra package. <http://www.netlib.org/lapack/>.
- Lebl, J. (2009). *Notes on Diffy Qs - Differential equations for engineers*.
- Maaref, H. y C. Barret (2002). Sensor-based navigation of a mobile robot in an indoor environment. *Robotics and Autonomous Systems* (38), 1–18.
- MacDonald, J. y J. Lockwood (2003). *Alternatives for landmine detection*. RAND URL: <http://www.rand.org/>; RAND. ISBN 0-8330-3301-8.
- Mamdani, E. H. (1976). Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. En *Proceedings of the sixth international symposium on Multiple-valued logic*, Los Alamitos, CA, USA, pp. 196–202. IEEE Computer Society Press.
- Marques, L., M. Rachkov, y A. T. Almeida (2002). Mobil pneumatic robot for demining. En *Robotics and Automation. Proceedings, IEEE International Conference*, Vol. 4, pp. 3508–3513.
- Matsurnoto, T. y K. Kosuge (2001, July). Collision detection of manipulator based on adaptive control law. En *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings*, Como, Italy, pp. 177–182.
- Matthies, L. y A. Elfes (1988). Integration of sonar and stereo range data using a grid-based representation. En *Robotics and Automation. Proceedings, 1988 IEEE International Conference*, Vol. 2, pp. 727–733. DOI 10.1109/ROBOT.1988.12145.
- Meyn, S. y R. Tweedie (1993). *Markov chains and stochastic stability* (Originally published by Springer-Verlag, 1993. This ver-

- sion compiled September, 2005 ed.). London: Springer-Verlag.
<http://probability.ca/MT>.
- Moravec, H. y A. Elfes (1985). High resolution maps from wide angle sonar. En *Robotics and Automation. Proceedings, 1985 IEEE International Conference*, Vol. 2, pp. 116–121.
- Mori, Y., K. Takayama, T. Adachi, S. Omote, y T. Nakamura (2005). Feasibility study on an excavation-type demining robot. *Autonomous Robots* (18), 263–274.
- Nanayakkara, T., L. Piyathilaka, y A. Subasinghe (2005). A simplified statistical approach to classify vegetated environments for robotic navigation in tropical minefields. En *Proceedings of the International Conference on Information and Automation*, Colombo, Sri Lanka.
- Nguyen, H. T. y E. A. Walker (2000). *A First Course in Fuzzy Logic* (2 ed.). ISBN 0-8493-1659-6. CRC Press.
- Nicoud, J. D. (1997). Vehicles and robots for humanitarian demining. *Industrial Robot: An International Journal*, 24(2), 164–168.
- Nonami, K., Q. J. Huang, D. Komizo, N. Shimoi, y H. Uchida (2000). Humanitarian mine detection six-legged walking robot. En *Proceedings of the 3rd International Conference on Climbing and Walking Robots*, Madrid, Spain, pp. 861–868.
- Palacin, J., I. Valgañon, y R. Pernia (2006). The optical mouse for indoor mobile robot odometry measurement. *Sensors and Actuators A* (126), 141 – 147.
- Palejiya, D. y H. Tanner (2006). Hybrid velocity/force control for robot navigation in compliant unknown environments. *Robotica - Cambridge University Press*, 24(6), 745–758. DOI: 10.1017/S026357470600292X.
- Peebles, P. Z. J. (1987). *PROBABILITY, RANDOM VARIABLES, AND*

- RANDOM SIGNAL PRINCIPLES*. McGraw-Hill. ISBN 0-07-049219-0.
- Piezocryst (2009). Piezoelectric sensors - basics. Technical report, Piezocryst Advanced Sensorics GmbH, http://www.piezocryst.com/piezoelectric_sensors.php.
- Ponticelli, R., E. García, P. González de Santos, y M. Armada (2008). A scanning robotic system for humanitarian de-mining activities. *Industrial Robot*, 35(2), 133–145.
- Ponticelli, R. y P. González de Santos (2008, October). Full perimeter obstacle contact sensor based on flex sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147(2), 441–448. DOI: 10.1016/j.sna.2008.05.029.
- Ponticelli, R. y P. González de Santos (2009). Obtaining terrain maps and obstacle contours for terrain recognition tasks. *Mechatronics*. Elsevier. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2009.11.008, en prensa.
- Ponticelli, R., P. González de Santos, y M. Armada (2006). Lateral sensor for ground tracking systems in humanitarian-demining tasks. En *Proceedings 9th International Conference on Climbing and Walking Robots*, Brussels, Belgium, pp. 485–489.
- RIMHO (1992). Rimho. <http://www.iai.csic.es/users/gds/web1c2.htm#rimho>.
- Rizo, J., J. Coronado, C. Campo, A. Forero, C. Otalora, M. Devy, y C. Parra (2003). Ursula: Robotic demining system. En *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics*, Coimbra, Portugal, pp. 538–543.
- Ross, T. J. (2004). *Fuzzy Logic with Engineering Applications* (2 ed.). ISBN 0-470-86075-8. John Wiley and Sons.
- Rouhi, A. (1997). Land mines: Horrors begging for solutions. *Chemical & Engineering news*, 75(10), 14–22.

- Schiebel (2006). *AN-19/2 MINE DETECTING SET*.
<http://www.schiebel.net/>: Schiebel Corporation.
- Schiebel (2007). *VAMIDS Vehicular Array Mine Detection System*.
<http://www.schiebel.net/>: Schiebel Corporation.
- Schiele, B. y J. Crowley (1994). A comparison of position estimation techniques using occupancy grids. En *Robotics and Automation. Proceedings, 1994 IEEE International Conference*, Vol. 2, pp. 1628–1634. DOI 10.1109/ROBOT.1994.351357.
- Sciavicco, L. y B. Siciliano (2000). *Modelling and Control of Robot Manipulators* (2 ed.). Springer.
- Sharp (2006). *GP2D120 Datasheet: General purpose type distance measuring sensor*. <http://www.sharpsma.com/Page.aspx/americas/en/part/GP2D120>: Sharp Electronics Corporation.
- SILO-6 (2008). The silo-6 and DYLEMA projects' home page.
<http://www.iai.csic.es/users/silo6/>.
- Song, S. y K. Waldron (1989). Machines that walk: The adaptive suspension vehicle. *The MIT Press Series in AI*.
- Spong, M. y M. Vidyasagar (1989). *Robot Dynamics and Control*. John Wiley and Sons. ISBN 047161243X.
- Stevens, J. (2000). U.s. office of global humanitarian demining works toward demining 2010 goals. Available from <http://maic.jmu.edu/Journal/5.1/Focus/E-Cramer/ecramer.htm>.
- Sugeno, M. (1992). *Industrial applications of fuzzy control* (Michio Sugeno ed.), Vol. 2 of *ISBN 0-444-87829-7*. Amsterdam: North-Holland.
- SYMBOL, S. (2009). The softpot potentiometer. Technical report, SPECTRA SYMBOL, <http://www.spectrasymbol.com/typo3/site/en/softpotsplash/softpot.html>.

- The MathWorks, Inc. (2006). *Fuzzy Logic Toolbox for Use with MATLAB*. 3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098: The MathWorks, Inc. <http://www.mathworks.com/>.
- Thrun, S., W. Burgard, y D. Fox (2005). *Probabilistic robotics*. The MIT Press.
- Trevelyan, J. (2000). Quality standards for demining. *Journal of mine action*, 4(2). <http://maic.jmu.edu/Journal/4.2/Focus/Qs/qualitystandards.htm>.
- Ullate, L., G. Godoy, y M. Martínez, O. Sánchez (2006). Beam steering with segmented annular arrays. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 53(10).
- Voth, D. (2002, November/December). Nature's guide to robot design. *IEEE Intelligent Systems*, 4–7.
- Waldron, K., V. Vohnout, A. Perry, y R. McGhee (1984). Configuration design of the adaptive suspension vehicle. *The international Journal of Robotic Research*, 3(2), 37–48.
- Zadeh, L. A. (1965, Junio). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.
- Zhang, L. y B. Ghosh (2000). Line segment based map building and localization using 2d laser rangefinder. En *Robotics and Automation, ICRA 2000. Proceedings, IEEE International Conference*, Vol. 3, pp. 2538–2543. DOI: 10.1109/ROBOT.2000.846410.

Apéndices

Apéndice A

Introducción a la problemática de las minas antipersonas

Una mina antipersonas es un instrumento bélico pirotécnico ideado para dejar fuera de combate a un enemigo potencial y se activa por la acción involuntaria de la víctima (véase la Fig. A.1). Con éstas se pretende, generalmente, no matar sino herir, ya que esto supone una carga más gravosa para el enemigo. Sin embargo, los daños causados en las personas, normalmente amputaciones de los miembros inferiores, son irreparables. Aunque las minas se “siembran” normalmente durante acciones bélicas, pueden permanecer activas durante más de 50 años suponiendo todo ese tiempo una amenaza para civiles, niños, agricultores y animales.

La neutralización de las minas antipersonas se puede gestionar de dos formas muy diferentes dependiendo de que la misión sea militar o humanitaria. La desactivación militar, que se realiza durante el conflicto armado, tiene como objetivo principal abrir un camino que permita el paso de tropas. Se considera que esta tarea se completa con la desactivación del 80 % de los artefactos. El desminado humanitario se suele llevar a cabo después

de terminar la confrontación e intenta proteger a la población y restablecer la vida cotidiana en el área del conflicto. Según las directivas de la ONU esta tarea debe eliminar el 99.6 % de las minas en el área (IMAS, 2009).

La presencia de campos minados es un problema muy grave que afecta a gran parte de la geografía mundial, teniendo un fuerte impacto en la política, la agricultura, el turismo, la industria, el medio ambiente y, por supuesto, en las condiciones de vida de los afectados. Sin embargo, es un problema que está lejos de resolverse satisfactoriamente. Se estima que hay más de 110 millones de minas sembradas en todo el mundo que causan alrededor de 26.000 bajas anuales, no sólo en países del tercer mundo sino inclusive en Europa. Como ejemplo, el conflicto de los Balcanes (Croacia, Bosnia y Herzegovina, Kosovo y Eslovenia) y la antigua URSS (Chechenia, Georgia



Figura A.1: Diferentes tipos de minas antipersonas.

y Ucrania) ha dejado listas para ser activadas más de 3 millones de minas. Se estima que el coste de desactivación de una mina antipersonas está entre 200 € y 700 €. Así pues, el presupuesto total para desactivar todas las minas puede alcanzar los 77.000 millones de euros. Un problema adicional se encuentra en que a la velocidad actual de desactivación, próxima a los 100.000 minas/año, el tiempo total rondaría los 1.100 años. Teniendo en cuenta, además, que el gran número de conflictos regionales e internacionales dispersa más de 2 millones de minas por año, el problema en vez de resolverse se está agravando.

La comunidad internacional ha mostrado su interés en el problema de las minas antipersonas, como lo demuestra la conferencia celebrada en Ottawa (Canadá) en 1997, donde 124 países firmaron un acuerdo para eliminar los arsenales de minas. Además, otros países han lanzado programas, como la *U.S. President Clinton's De-mining 2010 Initiative*, con la intención de eliminar las minas sembradas (Stevens, 2000), o las acciones de proyectos especiales ESPRIT financiadas por la U.E. para el desarrollo y perfeccionamiento de detectores de minas.

El gran número de minas activas en todo el mundo, la velocidad actual de desminado, el peligro que supone para los operarios y los inconvenientes de los vehículos blindados, son razones consistentes para acometer la automatización total o parcial de esta tarea. Sin embargo, la tecnología parece estar lejos aún de solucionar el problema. En primer lugar, se requieren diferentes subsistemas para detectar, localizar e identificar las diferentes alarmas. En segundo lugar, con importancia suprema, se precisan vehículos fiables capaces de transportar los sistemas sensoriales a través de los campos minados. Y finalmente, todos los subsistemas deben integrarse para realizar la tarea con mayor eficiencia que la actual. Como referencia se tienen los datos de la *Cambodian Mine Action Centre* (CMAC), recopilados desde marzo 1992 hasta octubre 1998. Aproximadamente 500.000 minas antiper-

sonas fueron eliminadas, pero también otros 200.000.000 de elementos no explosivos fueron extraídos del terreno. La probabilidad de falsos positivos alcanzó el 99.7 % contra un 0.3 % de verdaderos materiales peligrosos. Tomando en cuenta únicamente el proceso de excavación, el 99.6 % del tiempo se dedicó a extraer “basura”.

Cuando se habla de desminado humanitario es necesario hablar también de “riesgo aceptable” y de “calidad de desminado”. Los aspectos más críticos de esta problemática están en estrecha relación con las siguientes preguntas: qué es un estándar aceptable de calidad de desminado humanitario, cómo se puede medir la calidad de desminado después de una acción, y finalmente cómo se puede establecer un proceso de entrenamiento y monitorización que asegure que el estándar se alcanza efectivamente (Trevelyan, 2000).

El propósito principal del desminado humanitario es reducir el riesgo de incidentes que causen daños o muerte a los pobladores o usuarios de las tierras. Este riesgo depende de varios factores, como el uso que se le dará a la tierra en cuestión. Una zona que se vaya a emplear como mercado público o como vía de circulación de personas o animales conlleva mucho mayor riesgo que una zona de igual área pero alejada de la población. Otro factor importante es la cantidad de población que usará la tierra, así como el crecimiento poblacional estimado en dicha zona a medida que se recupere la confianza y la sensación de seguridad. El tipo de material explosivo que se encuentra enterrado es también un factor a tomar en cuenta, así como las condiciones climatológicas de la zona, ya que en función de la humedad de la tierra puede variar el riesgo de activación de una mina (estadísticamente se sabe que en temporadas de lluvia aumenta dramáticamente el número de accidentes por activación de minas).

Los niveles de calidad de desminado se establecen por medio de estándares internacionales. Resulta muy difícil decidir cuál es un nivel aceptable de

riesgo para una población, así como también resulta difícil determinar (medir) el verdadero porcentaje de desminado alcanzado a partir del número de minas extraídas durante una campaña de limpieza. Uno de los estándares empleado para inspeccionar la calidad del desminado después de una campaña es el ISO2859. Dado un nivel hipotético de calidad de desminado de 0,001 minas por metro cuadrado (1 mina por cada 1000 m^2 de terreno), el estándar establece que se debe inspeccionar de nuevo casi la totalidad del terreno minado para poder asegurar que la calidad alcanzada es la indicada. El típico proceso de inspeccionar una muestra del terreno de sólo un 5 o 10 % evidentemente no resulta adecuado para asegurar este nivel de calidad. Por otro lado, en muchos casos el proceso de inspección de calidad emplea el mismo método utilizado durante la campaña de desminado, por lo que una mina no detectada en el proceso de desminado será posiblemente pasada por alto nuevamente en el proceso de inspección.

Existen propuestas para estándares de inspección de calidad de desminado que proponen enterrar señuelos de minas en el campo a desminar con una ubicación conocida y profundidad conocidas, que servirían como control del proceso de detección y limpieza. En función del porcentaje de señuelos detectados y su profundidad bajo la superficie del terreno, se puede estimar la confiabilidad total del proceso de desminado de un terreno y ponerla en relación con la profundidad máxima de detección del instrumento detector.

Apéndice B

Módulos de soporte del sistema de exploración

En este apéndice se desarrollan los aspectos técnicos de los dos principales módulos de soporte del sistema de exploración.

B.1. Interfaz hombre-máquina

La integración de la cabeza sensora con el sistema de exploración de terrenos, y de éste con el sistema DYLEMA se lleva a cabo a través de interfaces. Estas interfaces se han diseñado para ofrecer también al operario acceso a parámetros de configuración y a controles de operación de cada sistema por medio de la denominada interfaz hombre-máquina (IHM) (véase esquema en la Fig. B.1).

De manera general, se ha diseñado una interfaz simple por medio de la cual se puede acceder a todas las opciones de configuración y control por medio de una terminal de texto desde la que se envían comandos y se

reciben datos. El procesador de comandos de la interfaz está implementado como un hilo de procesamiento de *software* que se ejecuta en paralelo con las demás tareas del sistema controlador. Las interfaces se han diseñado con las siguientes características básicas:

- El controlador de la interfaz se comunica por medio de mensajes de texto.
- Los mensajes consisten en una línea de texto que contiene un comando y un conjunto de parámetros.
- El comando indica la acción que se desea del controlador, y los parámetros indican los valores que configuran la acción indicada por el comando. Estos parámetros pueden ser palabras, letras, números u otros

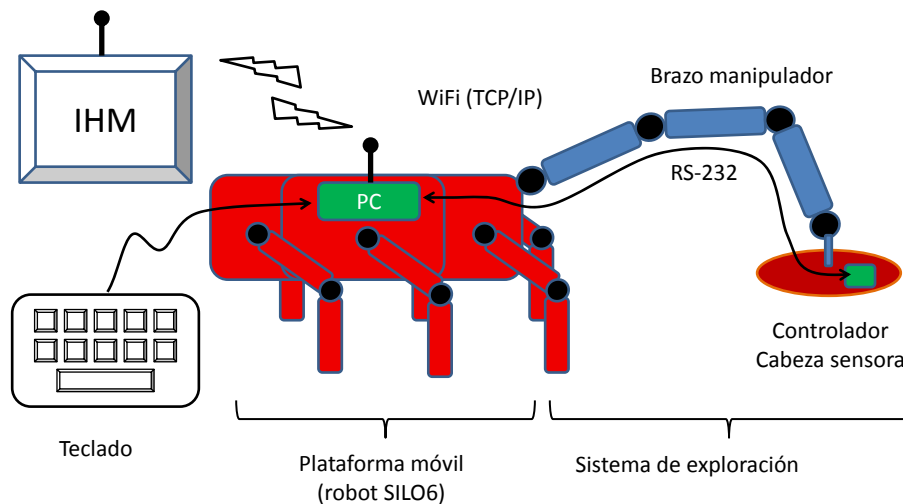
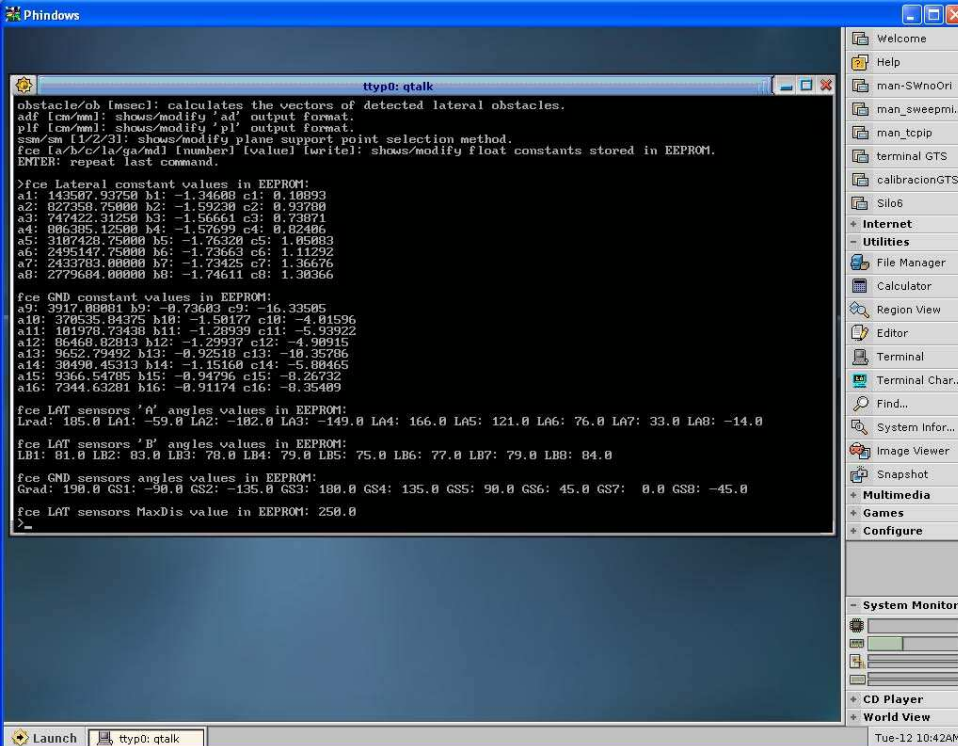


Figura B.1: Esquema de interfaces del sistema de exploración. La cabeza sensora se conecta al controlador del sistema de exploración (reside en el PC del robot SILO6) a través de conexión RS-232 y una interfaz de comandos. El controlador del sistema de exploración se comunica con el controlador del sistema DYLEMA por medio de una interfaz de comandos vía conexión local TCP/IP, y también con el operario por medio de conexión remota TCP/IP y/o el teclado.

símbolos.

- La respuesta del sistema puede ser una acción, puede devolver una serie de datos con formato de texto, o ambos.

En el caso de la cabeza sensora, el procesador de comandos está implementado dentro del controlador de la cabeza, y se emplea como vía de comunicación el puerto serial RS-232. En el caso del controlador del sistema de exploración (que reside en el PC a bordo del robot SILO6), se admite como vía de entrada tanto el teclado de usuario como un canal de comuni-



```
Phindows
tty0: qtalk
obstacle/ob [msec]: calculates the vectors of detected lateral obstacles.
adf [cm/mm]: shows/modify 'ad' output format.
plf [cm/mm]: shows/modify 'pl' output format.
ssm/sm [1/2/3]: shows/modify plane support point selection method.
fce [a/b/c/la/ga/md] [number] [value] [writel]: shows/modify float constants stored in EEPROM.
ENTER: repeat last command.

>fce Lateral constant values in EEPROM:
a1: 143507.93750 b1: -1.34603 c1: 0.10893
a2: 627359.75000 b2: -1.59230 c2: 0.93700
a3: 747422.31250 b3: -1.56661 c3: 0.73871
a4: 806385.12500 b4: -1.57699 c4: 0.82406
a5: 3107423.75000 b5: -1.76320 c5: 1.05003
a6: 2495147.75000 b6: -1.73663 c6: 1.11292
a7: 2433783.00000 b7: -1.73425 c7: 1.36676
a8: 2779684.00000 b8: -1.74611 c8: 1.30366

fce GND constant values in EEPROM:
a9: 3917.00000 b9: -0.73603 c9: -16.33505
a10: 370535.04375 b10: -1.58177 c10: -4.01596
a11: 101978.73438 b11: -1.20939 c11: -5.93922
a12: 86460.02013 b12: -1.29937 c12: -4.90915
a13: 9652.79492 b13: -0.92518 c13: -10.35705
a14: 30490.45313 b14: -1.15160 c14: -5.00465
a15: 9366.54705 b15: -0.94796 c15: -8.26732
a16: 7344.63201 b16: -0.91174 c16: -8.35409

fce LAT sensors 'A' angles values in EEPROM:
Lead: 185.0 LA1: -59.0 LA2: -102.0 LA3: -149.0 LA4: 166.0 LA5: 121.0 LA6: 76.0 LA7: 33.0 LA8: -14.0

fce LAT sensors 'B' angles values in EEPROM:
LB1: 01.0 LB2: 03.0 LB3: 70.0 LB4: 79.0 LB5: 75.0 LB6: 77.0 LB7: 79.0 LB8: 04.0

fce GND sensors angles values in EEPROM:
Gead: 190.0 GS1: -90.0 GS2: -135.0 GS3: 100.0 GS4: 135.0 GS5: 90.0 GS6: 45.0 GS7: 0.0 GS8: -45.0

fce LAT sensors MaxDis value in EEPROM: 250.0
>
```

Figura B.2: IHM de la cabeza sensora. Captura de pantalla de una terminal de texto por medio de la que se le solicita a la cabeza sensora que reporte los valores de las constantes de calibración almacenados en su memoria no-volátil.

cación TCP/IP. En el controlador del sistema de exploración se admite la operación concurrente del sistema desde una terminal de texto (ya sea en el mismo PC del robot o mediante una terminal remota) y desde una conexión mediante protocolo TCP/IP. De esta manera, es posible diseñar una interfaz de usuario más sofisticada (gráfica) que se comunique vía TCP/IP de manera remota.

La idea de esta estructura de interfaz es permitir el control total del sistema ya sea desde una interfaz que consuma mínimos recursos informáticos, o desde una interfaz que ofrezca información mucho más completa, con representaciones gráficas de datos y controles intuitivos. En la Fig. B.2 se muestra una captura de pantalla de la IHM por medio de una terminal de texto y comunicación RS-232 con la cabeza sensora. En esta imagen se muestra el resultado devuelto por la cabeza sensora cuando se le solicita

```

ttyp0: qtalk
LS7 -> X: 113.0 Y: 205.1 Mod: 234.1 Ang: 61.1
LS8 -> X: 215.9 Y: 55.3 Mod: 222.9 Ang: 14.4
T 265
>ad L 631 449 267 433 525 489 115 106 G 202 229 249 205 204 244 104 219 T 137
>pl sen 7 4 1 dist 193 225 203 AngH -210 AngU 047 T 203
>ob Obstacles: 1
LS8 -> X: 216.0 Y: 55.6 Mod: 223.1 Ang: 14.4
T 175
>ad L 632 451 268 421 531 494 476 107 G 202 228 252 205 203 235 194 212 T 136
>pl sen 7 4 1 dist 104 224 202 AngH -100 AngU 034 T 203
>ob Obstacles: 1
LS8 -> X: 216.1 Y: 55.7 Mod: 223.1 Ang: 14.5
T 170
>ad L 633 453 270 415 533 497 242 107 G 202 229 249 205 205 239 190 223 T 136
>pl sen 7 4 1 dist 196 222 202 AngH -263 AngU 057 T 198
>ob Obstacles: 2
LS7 -> X: 113.2 Y: 204.5 Mod: 233.8 Ang: 61.0
LS8 -> X: 216.1 Y: 55.7 Mod: 223.1 Ang: 14.5
T 264
>ad L 632 453 270 442 534 497 112 107 G 202 231 251 205 204 241 191 224 T 137
>pl sen 7 4 1 dist 193 225 202 AngH -220 AngU 048 T 199
>ob Obstacles: 1
LS8 -> X: 216.1 Y: 55.8 Mod: 223.2 Ang: 14.5
T 169
>ad L 630 451 267 433 531 494 476 107 G 202 228 251 206 204 228 200 215 T 137
>pl sen 7 4 1 dist 190 224 202 AngH -175 AngU 044 T 198
>ob Obstacles: 2
LS7 -> X: 61.9 Y: 331.7 Mod: 337.4 Ang: 79.4
LS8 -> X: 216.1 Y: 55.7 Mod: 223.1 Ang: 14.5
T 257
>ad L 629 450 271 420 530 495 250 107 G 202 230 253 205 205 248 190 213 T 137
>pl sen 1 5 3 dist 202 203 222 AngH -26 AngU 041 T 202
>ob Obstacles: 2
LS7 -> X: 114.5 Y: 201.3 Mod: 231.6 Ang: 60.4
LS8 -> X: 216.0 Y: 55.5 Mod: 223.0 Ang: 14.4
T 264
>ad L 628 450 268 429 530 493 112 107 G 202 231 251 205 204 238 194 235 T 136

```

Figura B.3: IHM de la cabeza sensora. Captura de pantalla de una terminal de texto por medio de la que se le solicita a la cabeza sensora que reporte periódicamente los valores de las distancias medidas por los sensores, los parámetros del plano de la superficie detectada, y las coordenadas de los obstáculos laterales detectados.

que reporte los valores de las constantes de calibración almacenados en su memoria no-volátil EEPROM, y en la Fig. B.3 se muestra un detalle de la interfaz con los resultados que devuelve la cabeza reportando periódicamente los valores de las distancias medidas por los sensores, los parámetros del plano y las coordenadas de los obstáculos detectados.

Se ha desarrollado también una interfaz gráfica que permite mostrar gráficas en tiempo real de estos datos, como se muestra en la Fig. B.4. En la Fig. B.5 se muestra una captura de pantalla del IHM gráfico desarrollado para el control básico del sistema de exploración y especialmente para el procesamiento de datos de la cabeza sensora. Esta IHM se conecta de forma remota con el controlador del sistema de exploración por medio de una conexión TCP/IP, permitiendo acceder tanto a parámetros de configuración del sistema y de la cabeza sensora, como a los datos que estos generan.

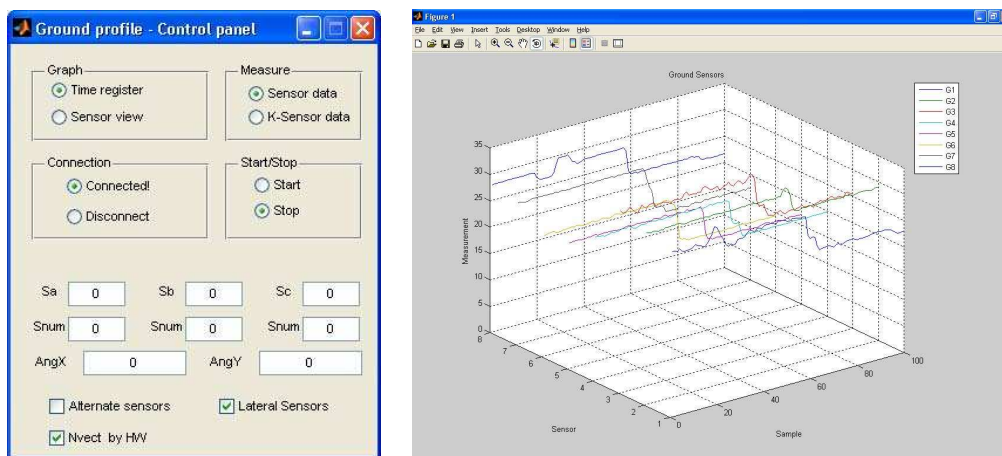


Figura B.4: IHM de la cabeza sensora. Captura de pantalla de la IHM gráfica donde se muestra el módulo de configuración básica y monitorización de estado (izq.) y gráfica de los datos de distancia (der.) reportados por los sensores del suelo del sistema de exploración.

B.2. Calibración de los sensores de la cabeza sensora

Los sensores de distancia empleados en la cabeza sensora son todos del mismo tipo y modelo; sin embargo, es necesario calibrarlos individualmente puesto que sus curvas de salida no son idénticas (véase la Fig. E.2 en el apéndice E).

El procedimiento desarrollado para la calibración de cada sensor de la

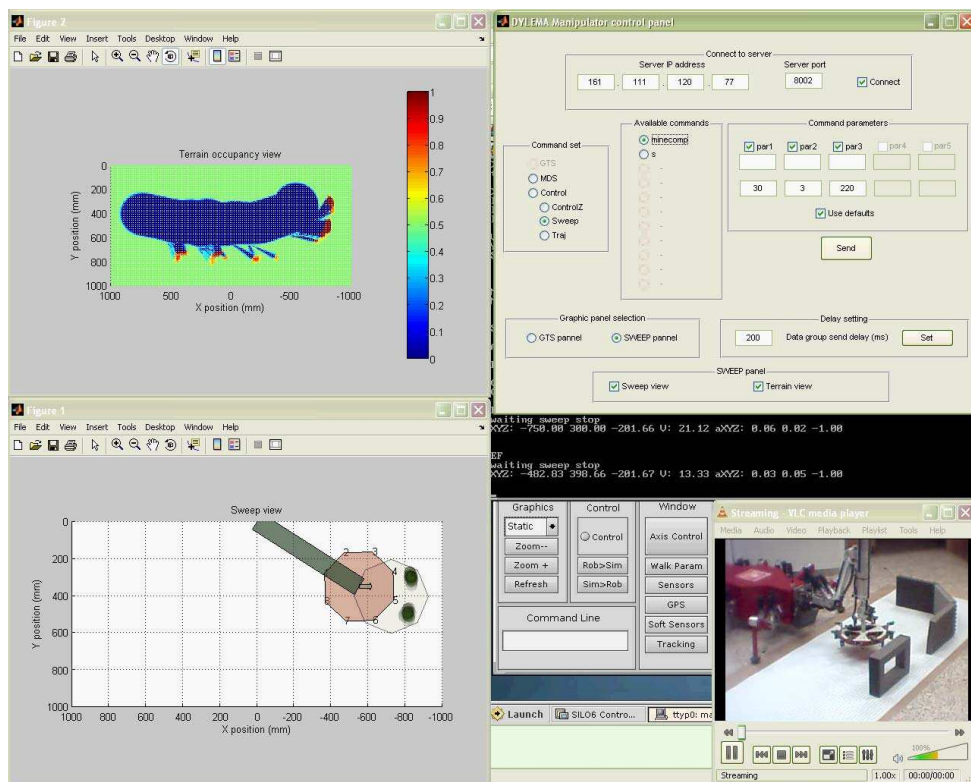


Figura B.5: IHM gráfica para la configuración, manejo y procesamiento de datos del sistema de exploración, conectada remotamente vía TCP/IP.

cabeza sensora consiste, de manera general, en tomar muestras de su salida a intervalos regulares de distancia a un obstáculo y posteriormente realizar una regresión numérica con estos datos para obtener los parámetros de la ecuación 3.36. Específicamente, se toman 20 muestras de la salida del sensor cada 500 ms, en cada intervalo de 1 cm dentro del rango [5...25] cm. Se calcula el promedio de las 20 muestras para cada centímetro del rango de distancia y con estos puntos se obtiene una gráfica de la curva de salida del sensor.

El sistema de calibración consta de 3 módulos:

- Parte mecánica (guía lineal motorizada), encargada de mover el obstáculo frente al sensor con precisión y de manera automática.
- Módulo de control, encargado de controlar la guía lineal y la cabeza sensora.
- Módulo de procesamiento de datos, encargado de obtener los parámetros de calibración.

En la Fig. B.6 se muestra la parte mecánica del sistema calibrador automático. El programa de control de calibración se encarga de:

- Controlar la posición de la guía lineal motorizada, de manera que se desplace a intervalos de 1 cm dentro del rango [5...25] cm.
- Controlar la cabeza sensora, configurándola para que envíe de manera periódica (cada 500 ms) los datos directos desde el sensor a calibrar.
- Crear un fichero de registro de los datos recibidos desde la cabeza sensora donde se almacene el número del sensor a calibrar y las 20 lecturas del sensor para cada intervalo de 1 cm de distancia.

Y, finalmente, el módulo de procesamiento de datos, desarrollado sobre Matlab y con la ayuda de la toolbox de *curve fitting*, realiza las siguientes

tareas:

- Lectura de los datos desde cada fichero generado por el módulo de control para cada uno de los 16 sensores de la cabeza sensora.
- Cálculo de los promedios de lecturas por cada parada en el rango del sensor.
- Generación de las gráficas de las curvas reales y de calibración de los sensores.
- Cálculo de los parámetros de la ecuación de calibración (*curve fitting* o regresión numérica) para cada sensor.

El fichero resultante se emplea para programar estas constantes dentro de la memoria no-volátil (EEPROM) del controlador de la cabeza sensora.

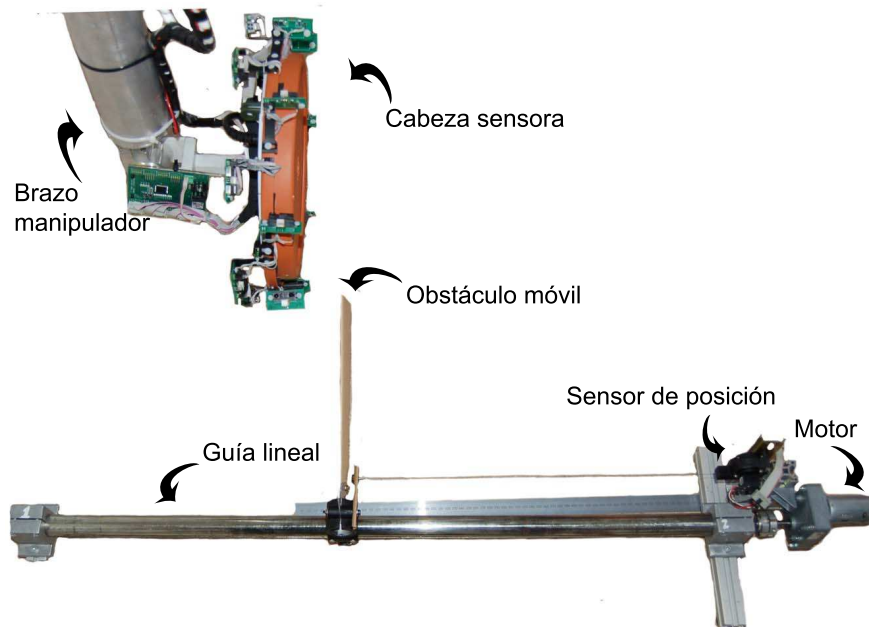


Figura B.6: Parte mecánica del sistema de calibración de los sensores de la cabeza sensora.

Para verificar el resultado de la calibración, una vez programados los nuevos valores en la cabeza sensora, se repite el procedimiento de captura de datos del sensor en cuestión, pero esta vez se capturan los datos procesados (lecturas en unidades de distancia) del sensor. Este procedimiento, si se realizara manualmente para cada uno de los 16 sensores de distancia de la cabeza, puede requerir más de 10 horas de trabajo. Gracias a este sistema de calibración y verificación semi-automático se logra calibrar la cabeza sensora en menos de 2 horas.

Apéndice C

Descripción del sistema experimental

C.1. Introducción

El sistema DYLEMA, plataforma desarrollada para la detección y localización eficiente de minas antipersonas, constituye el sistema sobre el cual se ha realizado el trabajo experimental presentado en esta memoria. Esta plataforma consta de los siguientes subsistemas principales (véase la Fig. C.1):

- Cabeza sensora.
- Manipulador.
- Localizador.
- Plataforma móvil.
- Controlador.
- Sistema de alimentación.

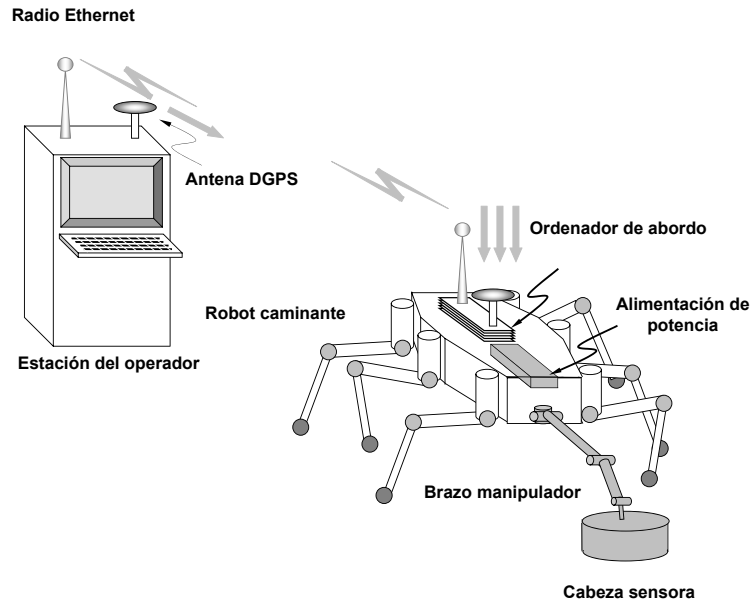


Figura C.1: Esquema del sistema DYLEMA.

Las siguientes secciones describen brevemente cada uno de estos subsistemas haciendo énfasis en aquellos aspectos que inciden directamente sobre este trabajo.

C.2. Cabeza sensora

La cabeza sensora constituye un sistema de apoyo al sistema de exploración de terrenos, formada por un detector de minas y sensores adicionales para detectar el entorno. Permite al controlador del robot mantener la cabeza a una determinada altura sobre el terreno y con una determinada orientación mediante el uso de sensores de infrarrojos de distancia, así como también detectar objetos (obstáculos) en la trayectoria de la cabeza

sensora. El capítulo 4 de esta memoria describe ampliamente el desarrollo de este subsistema como parte sustancial de este trabajo.

C.3. Manipulador

La cabeza sensora es en esencia un detector puntual¹, por lo que solo puede detectar la presencia de metales en un área muy pequeña. Para cubrir áreas mayores debe realizarse un barrido sistemático del terreno, para lo que se emplea un brazo manipulador.

De manera general, la configuración del manipulador es del tipo RRR (rotacional en 3 articulaciones contiguas), en configuración codo arriba. Numerando las articulaciones del 1 al 5 y partiendo desde la base del manipulador, la articulación 5 provee una movilidad de $\pm 45^\circ$ de cabeceo, y la articulación 4 unos $\pm 200^\circ$ de balanceo, permitiendo en conjunto orientar hacia el suelo la herramienta acoplada en su extremo. La articulación 1 (próxima a la base) produce una rotación que mueve todo el brazo lateralmente, en un plano horizontal. Las articulaciones 2 y 3 soportan el mayor par, ya que accionan la elevación del brazo en contra de la gravedad. Estas dos articulaciones están combinadas en un sistema diferencial con tres piñones cónicos (véase la Fig. C.2), donde los motores accionan sendos piñones fijos coaxiales y dispuestos en posición opuesta uno del otro, que a su vez accionan a un tercer piñón de tres maneras distintas:

- Alrededor del eje común de los piñones fijos.
- Alrededor de su propio eje.
- Una combinación de ambos movimientos.

¹La cabeza sensora está compuesta por un detector comercial de minas y un conjunto de sensores del terreno. El detector de minas es un dispositivo que opera sobre un área reducida de unos 10 cm de diámetro, por lo que es considerado como un detector puntual.

Los 5 grados de libertad (GDL) están organizados de la siguiente manera: los tres primeros GDL permiten la posición del punto efectivo de la cabeza sensora en cualquier punto del espacio de trabajo del manipulador; los dos últimos GDL permiten la orientación de la cabeza sensora sobre terrenos irregulares. La simetría radial del detector de minas ha permitido prescindir del sexto GDL. El manipulador se ha diseñado con un volumen de trabajo que permite alcanzar los posibles puntos de apoyo de los pies del robot caminante antes del apoyo real de éstos.

Dada la carga que el manipulador debe portar (la cabeza sensora y la desbrozadora, en configuración de herramienta doble acoplada al extremo del brazo), se ha optimizado su diseño desde varios puntos de vista. En primer lugar la carga está equilibrada de manera tal que no se requiere ejercer ningún par en la muñeca del brazo para mantener al detector nivelado. Para

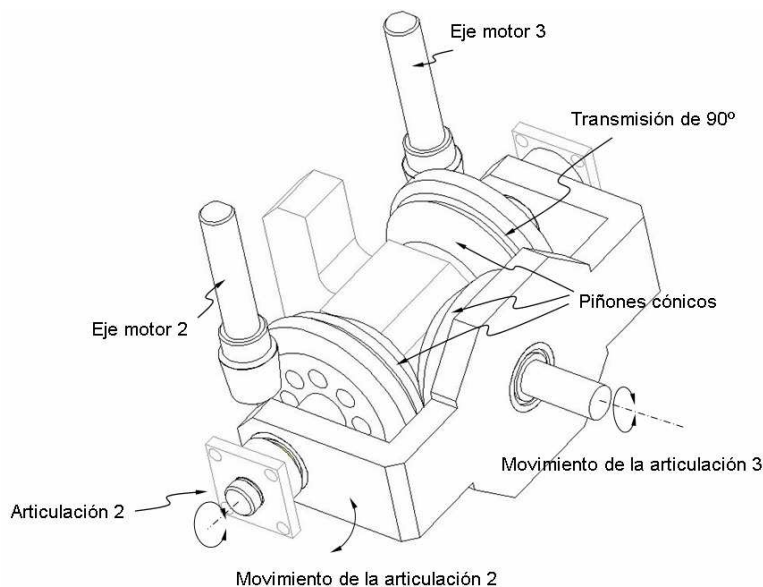


Figura C.2: Sistema diferencial de las articulaciones 2 y 3 del brazo manipulador.

Tabla C.1: Principales características del manipulador de barrido.

Articulación eslabón	Longitud de eslabón (mm)	Potencia del motor (W)	Reducción	Masa eslabón (Kg)
1	206	220	492:1	1.82
2	375	220	881:1	2.3
3	100	220	881:1	2
4	361	83.2	246:1	0.5
5	135	83.2	246:1	0.5
Total				5.4

esta aplicación la movilidad de la configuración de manipulador RRR resulta adecuada y estando los eslabones principales siempre en un plano perpendicular al suelo (asumiendo que el robot está nivelado) las interacciones con obstáculos disminuyen drásticamente y las masas, equilibradas adecuadamente, permiten disminuir los requerimientos de pares en las articulaciones, lo que reduce el tamaño y peso final de los motores. El manipulador ha sido elaborado empleando aluminio 7075. Las características del manipulador se muestran en la Tabla C.1. Algunos de los parámetros del manipulador, como la longitud de los eslabones principales, dependen de la envergadura del robot y la altura máxima al suelo que puede alcanzar. El manipulador alcanza los de 942 mm en su máxima extensión y con la cabeza sensora paralela al suelo (eslabón 5 verticalmente hacia abajo). Los detalles específicos del diseño mecánico del manipulador pueden encontrarse en Espinoza (2007).

C.4. Localizador

En un sistema de localización de minas es esencial registrar en una base de datos la posición de todas las alarmas suministradas por la cabeza

sensora. Esta base de datos se sitúa en el computador de la estación de control. Las técnicas GPS parecen las más adecuadas para estas tareas, dada su disponibilidad global y precisión. El proyecto DYLEMA requiere la localización de alarmas con una precisión de ± 2 centímetros. Esta precisión puede alcanzarse con la técnica RTK (*Real Time Kinematics*). Sin embargo, requiere una antena GPS adicional que estará situada en la estación de operación. Dadas estas premisas, el sistema receptor de GPS seleccionado es un equipo TRIMBLE 5700 (véase la Fig. C.3).

El posicionamiento global del robot móvil se lleva a cabo específicamente mediante un módulo *hardware-software* que incluye un GPS diferencial (DGPS) y el sistema propioceptivo del robot (posición de las patas del robot) fusionado con un algoritmo de corrección de errores basado en un filtro de Kalman modificado (Cobano et al., 2008).



Figura C.3: GPS TRIMBLE 5700.

C.5. Plataforma móvil

La plataforma móvil del sistema debe desplazar sobre el campo minado los módulos requeridos para la exploración del terreno. Esta plataforma está constituida por el robot caminante SILO6, configurado teniendo en cuenta los siguientes requerimientos:

- El robot caminante se basa en un sistema de seis patas: Las máquinas caminantes son intrínsecamente lentas y es conocido que la velocidad de estos robots depende del número de patas (Waldron et al., 1984). Por tanto, teóricamente, un hexápodo puede alcanzar mayores velocidades que un cuadrúpedo. Además, un hexápodo alcanza su máxima velocidad cuando utiliza un modo de caminar con un factor de apoyo $\beta = \frac{1}{2}$; esto es, cuando utilizan trípodas alternados (Song y Waldron, 1989). Aunque la estabilidad del robot caminante empleando estos trípodas alternados, es suficientemente buena (equivalente a la de los cuadrúpedos) y se ha escogido este modo de caminar para paliar en lo posible la baja velocidad intrínseca de los robots caminantes.
- El robot caminante debe ser suficientemente liviano para ser portado por dos operarios. Este requerimiento es importante para rescatar al robot de las situaciones de bloqueo que pueden encontrarse durante el desarrollo de su tarea, requerimiento planteado en las directrices de la *International Test and Evaluation Program for Humanitarian Demining* (ITEP)².
- El robot debe ser autónomo desde el punto de vista energético. No se utilizan fuentes de energía exteriores y por tanto no se utilizan cables “umbilicales”.

²La ITEP establece que “...una plataforma para desminado debe ser suficientemente pequeña para ser portada mediante transporte terrestre de personal, ya sea para instalarlo en el campo o para quitarlo de allí, fácil de transportar y de instalar en el campo”.

- El robot es semi-autónomo desde el punto de vista del control. El operario está incluido en el lazo de control mediante técnicas de teleoperación o control colaborativo.

El robot se ha configurando para optimizar la energía consumida, la movilidad y la estabilidad. Estas son condiciones antagonistas que deben equilibrarse a través de un cuidadoso diseño.

C.5.1. Estructura del cuerpo

El cuerpo de un robot caminante tiene la misión principal de albergar el sistema de control y servir de soporte de las patas. Por tanto su tamaño viene determinado por el volumen del sistema de control: computador, amplificadores de potencia, DGPS, baterías, etc.; y su forma está influenciada por las medidas de estabilidad que se requieran y otras características adicionales como el rendimiento energético, por ejemplo.

El uso de trípodés alternados como modo de caminar significa que en cualquier instante el robot esta soportado por dos patas colaterales no adyacentes y la pata central del lado opuesto. Si todos los pies están situados a la misma distancia del eje longitudinal del cuerpo, la pata central está soportando aproximadamente la mitad del peso del cuerpo mientras que las otras dos patas están soportando cada una aproximadamente la cuarta parte del peso. Si el robot tiene las patas iguales, las patas laterales estarán sobredimensionadas puesto que no deben soportar la misma carga que las patas centrales y para optimizar el sistema las patas deberían ser diferentes (las centrales estarían diseñadas para soportar más carga). Esto tiene el inconveniente de encarecer el diseño y la construcción del robot, por lo que suele optarse por utilizar un mismo tipo de pata, ganándose en modularidad, facilidad de reposición y disminución costes. Una distribución

Tabla C.2: Características del robot caminante SILO6.

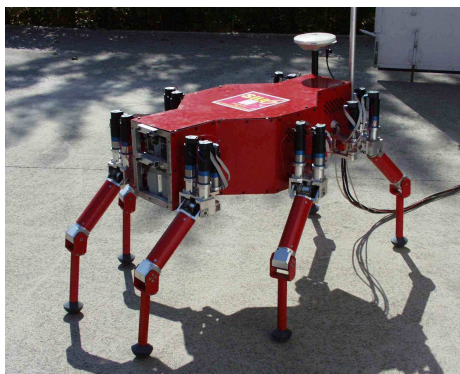
Cuerpo	Dimensiones (m)	Largo		0.88		
		Ancho	Del/tras	0.2		
			Med	0.45		
		Altura		0.26		
	Moment. de inercia (kgm²)	I _{xx}		0.99		
		I _{yy}		3.11		
		I _{zz}		0.99		
Masa (kg)		44.34				
Velocidad (mm/s)		50				
Pata	eslab.		1	2	3	
	Longitud (mm)		94	250	250	
	Moment. de inercia (kgm²)	I _{xx}		0.016	0.0027	0.0031
		I _{yy}		0.016	0.0027	0.0031
		I _{zz}		0.018	0.0001	3 · 10 ⁻⁵
	Masa (kg)		1	0.5	0.6	
	Velocidad pie (mm/s)	Fase transf		140		
Fase soport		50				

más homogénea de pesos soportados por las patas puede conseguirse si se desplazan las patas centrales alejándolas del eje longitudinal del cuerpo. De este modo, se disminuyen las fuerzas soportadas en las patas centrales y se aumenta en las laterales, con lo que la fuerza máxima que éstas tienen que soportar disminuye sustancialmente (González de Santos et al., 2005; González de Santos et al., 2007). La solución final ha consistido en el desplazamiento de las patas centrales 125 mm frente a las laterales. Con esto se consigue una disminución de las fuerzas en las patas centrales del 14%. Este diseño determina la forma del cuerpo del robot (véase la Fig. C.4). Las dimensiones del cuerpo del robot aparecen en la Tabla C.2.

C.5.2. Estructura de la pata

Una pata para un robot caminante no es más que un sistema articulado que necesita al menos 3 GDL para proporcionar movilidad en un entorno natural. Las patas deben diseñarse como mecanismos ligeros que soportan cargas elevadas y en muy diferentes posiciones (configuraciones la pata). La configuración mamífera (véase la Fig. C.4a); es la más eficiente desde el punto de vista del consumo energético (requiere pares bajos). Sin embargo, no resulta muy eficiente al analizar su estabilidad. Las patas de tipo insecto son más eficaces en este caso (véase la Fig. C.4(b)); pero, la potencia requerida aumenta considerablemente con esta configuración. La solución óptima es configurar una pata que pueda proporcionar buena estabilidad y rendimiento energético dependiendo de las necesidades impuestas, básicamente, por el terreno: en terrenos muy irregulares se utilizará la configuración que proporcione buena estabilidad (tipo insecto) y en terrenos propicios, cuando la estabilidad puede garantizarse fácilmente, se impondrá la configuración que mejore el rendimiento energético (tipo mamífero).

El punto de partida para el diseño de la pata consiste en determinar los



(a)



(b)

Figura C.4: Configuraciones de patas del robot SILO6. (a) Mamífero, (b) Insecto.

pares que se requieren en la configuración más desfavorable: la configuración insecto. Una forma de disminuir el tamaño y potencia de los actuadores para ejercer un par determinado consiste en utilizar motores en paralelo; esto es, se disponen los actuadores de manera que dos motores simultáneamente proporcionan par a la misma articulación. Estas configuraciones son especialmente ventajosas puesto que los motores actúan simultáneamente sobre dos articulaciones: Por tanto, se tiene tantos grados de libertad como grados de movilidad y los motores aportan cada uno la mitad del par requerido. Esta disposición funciona de este modo cuando se mueven las articulaciones independientemente. Cuando se mueven simultáneamente ambos motores deben aportar el par requerido por las dos articulaciones y pueden llegar a resultar insuficientes. Estas consideraciones deben tenerse en cuenta en la generación de trayectorias de las patas. Para configurar el sistema paralelo se ha optado por un mecanismo diferencial que se utiliza para mover las articulaciones 2 y 3 (véase la Fig. C.5). La Fig. C.6 muestra un esquema del diseño de la pata.

Existen dos configuraciones básicas para los pies: pie semiesférico rígido y pie con suela plana y dos articulaciones pasivas. El primero es el más sencillo y con buen funcionamiento en terrenos naturales si el radio de la semiesfera es suficientemente grande. El segundo tiene buenas prestaciones en terrenos blandos, pero resulta más caro y presenta problemas en terrenos muy irregulares por la tendencia de la suela a girarse. La solución en nuestro caso se reduce a un pie semiesférico completamente rígido (véase la Fig. C.7).

C.6. Sistema de control

El controlador del sistema está distribuido entre la estación de operación y el controlador del robot (embarcado). Ambos computadores están

basados en un *bus* PC. La estación de operación está basada en un sistema operativo *Windows XP* mientras que el controlador del robot utiliza un sistema operativo QNX de tiempo real y multitarea. La comunicación entre la estación de operación y el computador del robot se realiza mediante enlace de radio *ethernet*. Las siguientes secciones ilustran el *hardware y software* básico del sistema.

C.6.1. Estación de operación

La estación de operación está basada en un computador PC situado remotamente respecto al robot caminante y se encarga de la comunicación robot/operador y de la gestión de la base de datos fundamentalmente. Con-

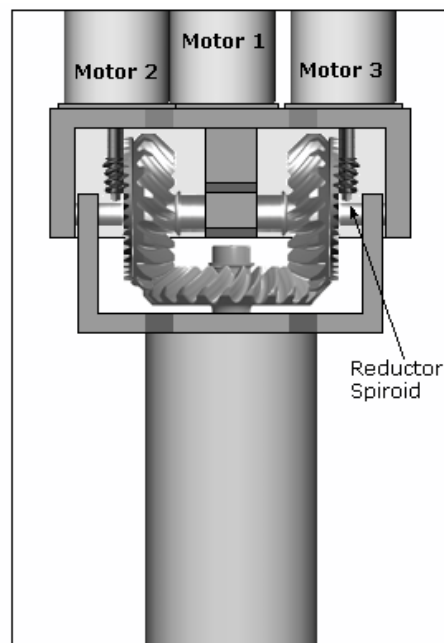


Figura C.5: Detalle del sistema diferencial de las patas del robot SILO6.

siste en los siguientes módulos:

1. Interfaz con el operador.
2. Gestión de la base de datos de alarmas potenciales.
3. Comunicación con el robot móvil.

C.6.1.1. Interfaz operario/robot

Este módulo es un programa basado en Java que pretende conseguir tres requisitos principales: (a) la monitorización del estado del robot, (b) la teleoperación del robot y (c) la definición de la tarea. El usuario podría guiar el movimiento del robot remotamente, teniendo información visual de lo que el robot está haciendo en tiempo real. El interfaz hombre-máquina permite también que el usuario defina la tarea a realizar. Esto implica la

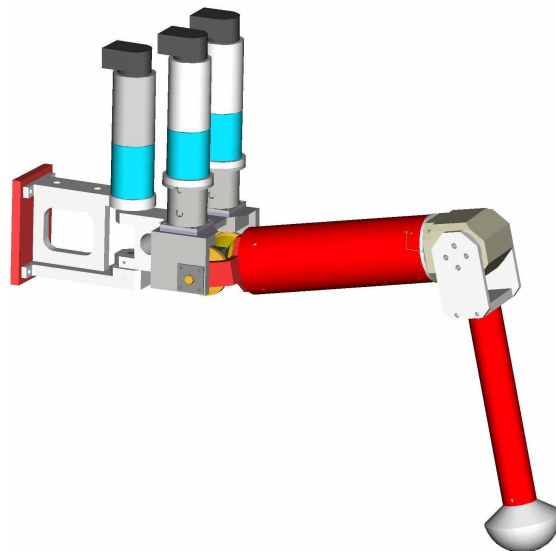


Figura C.6: Esquema CAD de una pata del robot SILO6.



Figura C.7: Pie empleado en las patas del robot SILO6.

definición de características de campos minados (dimensiones del campo, las irregularidades del terreno, etc), la trayectoria del robot y las estrategias de navegación autónoma. La Fig. C.8 muestra el aspecto de esta interfaz hombre-máquina.

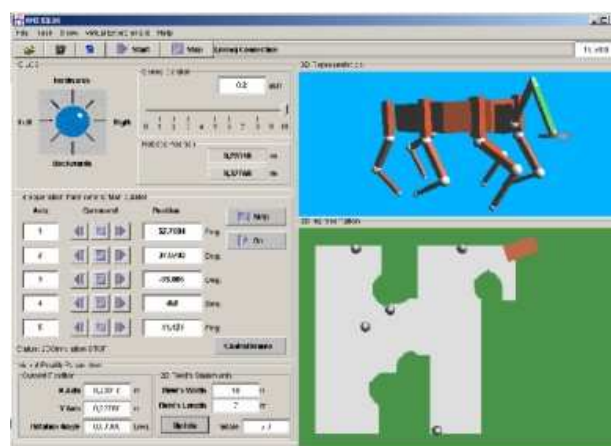


Figura C.8: Interfaz hombre-máquina del robot hexápodo SILO6.

C.6.1.2. Gestor de la base de datos

Cada vez que el robot detecta una alarma se almacena la posición espacial de la detección en una base de datos relacional. De esta forma el usuario puede encontrar la localización de cada alarma encontrada en un campo dado de un país dado. Las características del campo y las minas se almacenan también. Esta base de datos permite la posterior tarea de remover la mina. La Fig. C.9 muestra una imagen de la interfaz hombre-máquina desde la que se puede operar sobre esta base de datos.

C.6.1.3. Comunicación con el robot caminante

La comunicación entre ambos computadores se realiza por medio de un enlace de radio *ethernet*. Los diferentes sistemas operativos que utilizan los computadores requieren la utilización de sistemas de comunicación compatibles. Uno de estos protocolos es el TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) utilizado en todo el mundo para comunicacio-

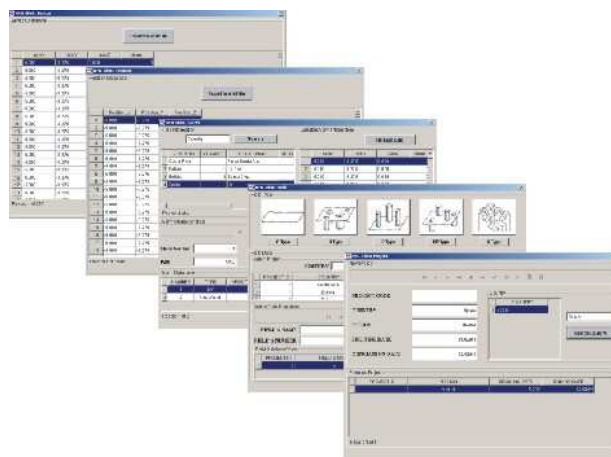


Figura C.9: Vista de la interfaz del gestor de la base de datos.

nes a través de internet. Se ha empleado una arquitectura cliente/servidor donde la estación de operación es el servidor y el robot es el cliente.

C.6.2. Controlador del robot

El controlador del robot se basa en una arquitectura distribuida, con diferentes módulos organizados jerárquicamente tanto en *software* como en *hardware*.

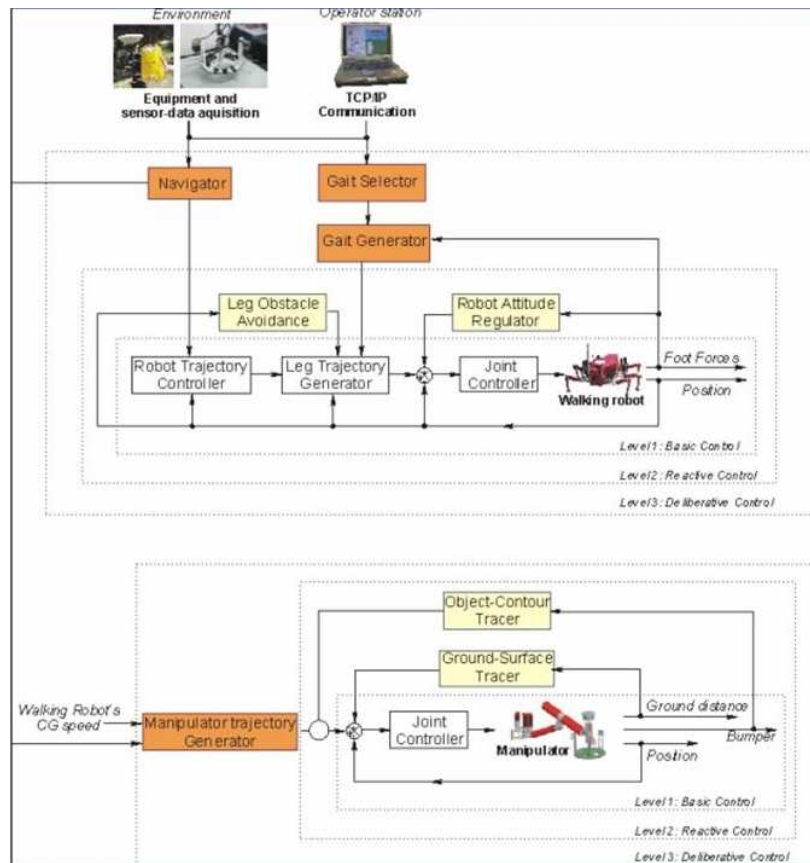


Figura C.10: Esquema general de la arquitectura del controlador del robot SILO6.

C.6.2.1. Arquitectura *Hardware*

El controlador del robot se basa en una arquitectura distribuida que consta de un computador PC, una tarjeta de adquisición de datos, y ocho tarjetas de control de motores CC. Cada una de las tarjetas de control de motores puede controlar en lazo cerrado (posición y velocidad) hasta tres motores de corriente continua y utiliza tres controladores de movimiento LM629 de *National Semiconductors* interconectados a través del *bus* ISA-PC. Estos controladores disponen de un filtro PID con un generador de trayectorias articulares. Cada controlador de movimiento comanda un motor CC a través de un amplificador de potencia con una señal modulada por ancho de pulso (PWM). Se emplea una tarjeta analógica, además, para la interconexión de sistemas adicionales (detector de metales, sensores de proximidad, etc.). Una tarjeta de comunicaciones radio *ethernet* permite la comunicación con la estación de operación. La comunicación del DGPS con el computador de control del robot se realiza vía RS-232. El diagrama general del controlador se presenta en la Fig. C.11.

C.6.2.2. Arquitectura *Software*

El controlador del robot está a cargo de la generación de trayectorias del robot, control del manipulador, procesamiento de señales del detector, comunicaciones con la estación de operación y de la coordinación de los 23 motores sobre el robot caminante (robot y manipulador). Todas estas tareas están distribuidas en una arquitectura jerárquica donde se distingue:

Nivel de interfaces *hardware* Este nivel contiene los amplificadores de potencia (*drivers*) para las articulaciones del robot caminante y el manipulador.

Nivel de control de articulaciones Este nivel se encarga del control in-

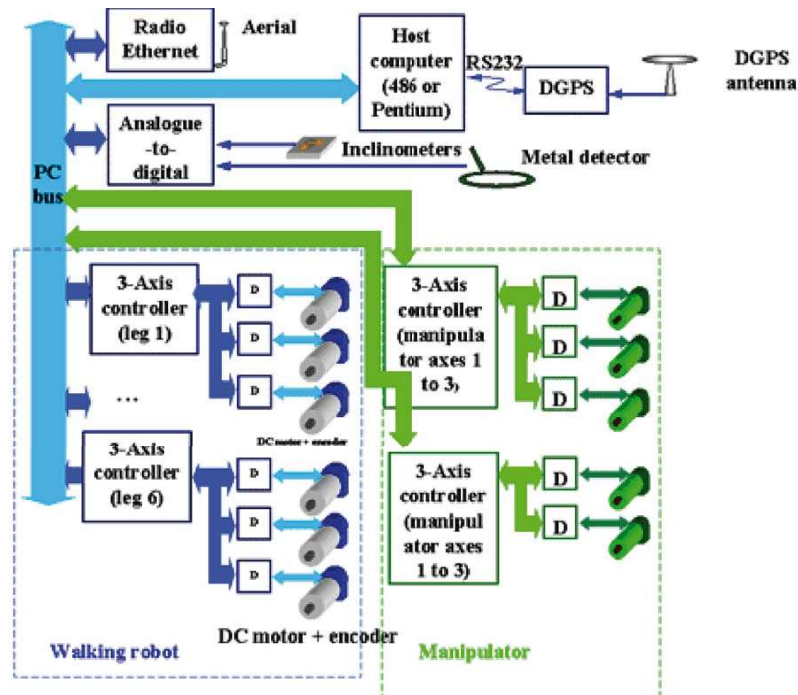


Figura C.11: Esquema general del controlador del robot SILO6.

dividual de las articulaciones del sistema.

Nivel de control de pata En este nivel se coordinan las tres articulaciones de una pata para producir movimientos coordinados

Nivel cinemático Este nivel contiene las transformaciones cinemáticas directa e inversa para realizar trayectorias con los pies.

Nivel de control de trayectoria Este nivel coordina el desplazamiento simultáneo de todas las patas para producir movimientos del robot en línea recta o movimientos circulares.

Nivel de estabilidad Este módulo determina cuándo una configuración de puntos de apoyo es o no estable.

Nivel de Generador de modo de caminar Este nivel genera las secuen-

cias de levantamiento y apoyo de patas coordinado con los movimientos del cuerpo para producir el desplazamiento estable del robot. El generador de modos de caminar del robot SILO6 se basa en un modo de trípodes alternados, un modo de giro y un modo de rotación.

Nivel de comunicaciones Este nivel establece la comunicación con la estación de control a través de radio *ethernet* con un protocolo TCP/IP.

Nivel de cinemática del manipulador Este nivel implementa el modelo cinemático directo e inverso del robot manipulador.

Nivel de adquisición de datos Se encarga de la comunicación y adquisición de datos del detector, sensores de distancia de la cabeza sensora, DGPS, etc. La Fig. C.12 muestra esta estructura de control.

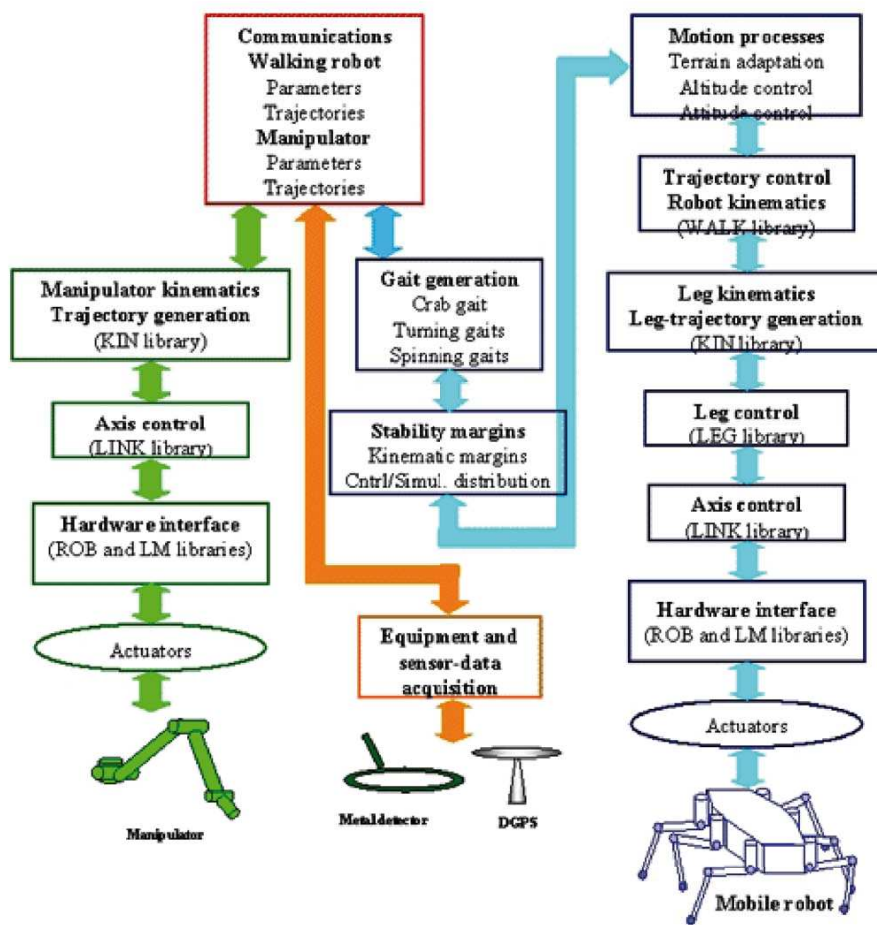


Figura C.12: Esquema del sistema de control del robot SILO6.

Apéndice D

Patente de la cabeza sensora



MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO



Oficina Española
de Patentes y Marcas

INSTANCIA DE SOLICITUD

NUMERO DE SOLICITUD
P200701732
22 JUN '07 11:14

(1) MODALIDAD: <input checked="" type="checkbox"/> PATENTE DE INVENCION <input type="checkbox"/> MODELO DE UTILIDAD		(3) EXP. PRINCIPAL O DE ORIGEN: MODALIDAD N° SOLICITUD FECHA SOLICITUD		FECHA Y HORA DE PRESENTACION EN LA O.E.P.M.	
(2) TIPO DE SOLICITUD: <input type="checkbox"/> ADICION A LA PATENTE <input type="checkbox"/> SOLICITUD DIVISIONAL <input type="checkbox"/> CAMBIO DE MODALIDAD <input type="checkbox"/> TRANSFORMACION SOLICITUD PATENTE EUROPEA <input type="checkbox"/> PCT: ENTRADA FASE NACIONAL				FECHA Y HORA PRESENTACION EN LUGAR DISTINTO O.E.P.M.	
(5) SOLICITANTE (S): APELLIDOS O DENOMINACION SOCIAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS		NOMBRE		(4) LUGAR DE PRESENTACION: MADRID CODIGO 28	
		NACIONALIDAD ESPAÑOLA		CODIGO PAIS ES	
		DNI/CIF Q-2818002D		CNAE 	
		PYME 			
(6) DATOS DEL PRIMER SOLICITANTE: DOMICILIO Serrano, nº 117 LOCALIDAD MADRID PROVINCIA MADRID PAIS RESIDENCIA ESPAÑA NACIONALIDAD Española		TELÉFONO FAX CORREO ELECTRÓNICO CÓDIGO POSTAL 28006 CÓDIGO PAIS ES CÓDIGO PAIS ES			
(7) INVENTOR (ES): PONTICELLI GONZALEZ DE SANTOS ARMADA RODRIGUEZ		APELLIDOS		NOMBRE	
		ROBERTO PABLO MANUEL ANGEL		NACIONALIDAD	
		ITALIANA ESPAÑOLA ESPAÑOLA		CODIGO PAIS IT ES ES	
(8) <input type="checkbox"/> EL SOLICITANTE ES EL INVENTOR <input checked="" type="checkbox"/> EL SOLICITANTE NO ES EL INVENTOR O ÚNICO INVENTOR		(9) MODO DE OBTENCIÓN DEL DERECHO: <input checked="" type="checkbox"/> INVENC. LABORAL <input type="checkbox"/> CONTRATO <input type="checkbox"/> SUCESIÓN			
(10) TÍTULO DE LA INVENCION: DISPOSITIVO ÚTIL PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE CONTORNO Y SUS APLICACIONES.					
(11) EFECTUADO DEPÓSITO DE MATERIA BIOLÓGICA: <input type="checkbox"/> SI <input checked="" type="checkbox"/> NO					
(12) EXPOSICIONES OFICIALES: LUGAR					
(13) DECLARACIONES DE PRIORIDAD:					
PAIS DE ORIGEN		CODIGO PAIS		NUMERO	
				FECHA	
(14) EL SOLICITANTE SE ACOGE AL APLAZAMIENTO DE PAGO DE TASAS PREVISTO EN EL ART. 162. LEY 11/86 DE PATENTES <input type="checkbox"/>					
(15) AGENTE /REPRESENTANTE: NOMBRE Y DIRECCION POSTAL COMPLETA. (SI AGENTE P.I., NOMBRE Y CODIGO) (RELLÉNESE, ÚNICAMENTE POR PROFESIONALES)					
D.JAVIER UNGRIA LÓPEZ (392/1) (POR PODER GENERAL Nº 2007/3777) Avda. Ramón y Cajal, 78 - 28043 - MADRID					
(16) RELACION DE DOCUMENTOS QUE SE ACOMPAÑAN: <input checked="" type="checkbox"/> DESCRIPCION Nº DE PAGINAS: 14 <input checked="" type="checkbox"/> Nº DE REIVINDICACIONES: 10 <input checked="" type="checkbox"/> DIBUJOS. Nº DE PAGINAS: 5 <input type="checkbox"/> LISTA DE SECUENCIAS Nº DE PAGINAS: <input type="checkbox"/> RESUMEN <input type="checkbox"/> DOCUMENTO DE PRIORIDAD <input type="checkbox"/> TRADUCCION DEL DOCUMENTO DE PRIORIDAD				FIRMA DEL SOLICITANTE O REPRESENTANTE (VER COMUNICACION)	
				FIRMA DEL FUNCIONARIO	
NOTIFICACION SOBRE LA TASA DE CONCESION: Se le notifica que esta solicitud se considerará retirada si no procede al pago de la tasa de concesión; para el pago de esta tasa dispone de tres meses a contar desde la publicación del anuncio de la concesión en el BOPI, más los diez días que establece el art. 81 del R.D. 2245/1986.					

MOD. 3101 - 2 - EJEMPLAR PARA EL SOLICITANTE

NO CUMPLIMENTAR LOS RECUADROS ENMARCADOS EN ROJO

ILMA. SRA. DIRECTORA DE LA OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
informacion@oepm.es
www.oepm.es

C/ PANAMÁ, 1 • 28071 MADRID



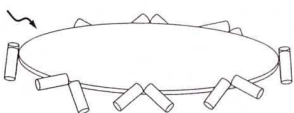
MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO



Oficina Española
de Patentes y Marcas

12

SOLICITUD DE PATENTE DE INVENCION

31 NÚMERO DATOS DE PRIORIDAD 32 FECHA 33 PAÍS		21 NÚMERO DE SOLICITUD 22 FECHA DE PRESENTACIÓN 62 PATENTE DE LA QUE ES DIVISORIA
71 SOLICITANTE (S) CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS DOMICILIO Serrano, nº 117 - 28006 MADRID NACIONALIDAD ESPAÑOLA		
72 INVENTOR (ES) ROBERTO PONTICELLI, de nacionalidad italiana, PABLO GONZÁLEZ DE SANTOS y MANUEL ANGEL ARMADA RODRÍGUEZ, ambos de nacionalidad española.		
51 Int. Cl.	GRÁFICO (SÓLO PARA INTERPRETAR RESUMEN)  Figura 1.a	
54 TÍTULO DE LA INVENCION DISPOSITIVO ÚTIL PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE CONTORNO Y SUS APLICACIONES.		
57 RESUMEN DISPOSITIVO ÚTIL PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE CONTORNO Y SUS APLICACIONES <p>La presente invención describe un dispositivo útil para la generación de mapas de contorno que comprende un soporte abierto, cerrado o con cualquier forma, sobre el que sitúa una red de uno o más medidores de distancia puntuales dispuestos consecutivamente alrededor del perímetro de dicho soporte creando una zona o perímetro de medición cerrado y continuo. Este dispositivo puede acoplarse a un aparato, con o sin capacidad de movilidad, por ejemplo un robot manipulador de objetos, un robot detector de minas antipersonas, un sistema de direccionamiento de una persona ciega, un robot volador (como un quadrotor o helicóptero autónomo), etc.</p>		

**DISPOSITIVO ÚTIL PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE CONTORNO
Y SUS APLICACIONES**

5 **RESUMEN**

La presente invención describe un dispositivo útil para la generación de mapas de contorno que comprende un soporte abierto, cerrado o con cualquier forma, sobre el que sitúa una red de uno o más medidores de distancia
10 puntuales dispuestos consecutivamente alrededor del perímetro de dicho soporte creando una zona o perímetro de medición cerrado y continuo. Este dispositivo puede acoplarse a un aparato, con o sin capacidad de movilidad, por ejemplo un robot manipulador de objetos, un robot
15 detector de minas antipersonas, un sistema de direccionamiento de una persona ciega, un robot volador (como un quadrotor o helicóptero autónomo), etc.

**DISPOSITIVO ÚTIL PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE CONTORNO
Y SUS APLICACIONES**

SECTOR DE LA TÉCNICA

5 El dispositivo de la presente invención se refiere a
un sistema basado en una red de medidores puntuales de
distancia configurados de tal modo que permiten la
generación de mapas de contorno en tres dimensiones sin
contacto con el entorno. Este dispositivo es útil para la
10 navegación, en general, de vehículos y robots móviles en
entornos con obstáculos y para el levantamiento de mapas
del terreno en la navegación de robots caminantes y de
personas.

15 **ESTADO DE LA TÉCNICA**

La detección de obstáculos en el camino de vehículos
automáticos ha sido un tema de investigación que ha
acaparado grandes esfuerzos de investigación. Estos
sistemas han explotado diferentes conceptos sensoriales
20 que han dado lugar a técnicas diversas que se han
complementado en diferentes grados. Así, en los años
ochenta y noventa pueden encontrarse ideas patentadas
para el seguimiento del terreno utilizando diferentes
técnicas de guiado (Patente CA1196711, "*Terrain*
25 *positioning tracking means and guidance sensor therefor*",
1985, y Patente US4505441, "*Terrain-following transient*
surface contact vehicle", 1985) o para el seguimiento de
trayectorias con sensores para el nivelado de superficies
(Patentes DE3827619 y DE3827620 ambas con el título
30 "*Sensor-controlled tracking device, especially for*
levelling of ground surfaces", 1990).

Recientemente, han aparecido nuevas patentes para evitación de obstáculos empleando dispositivos de contacto (Patente US2004112662, "Contact detecting device and vehicle mounting the same", 2004, o técnicas láser (Patentes US7133123, "Laser obstacle avoidance apparatus", 2006, y JP2005326944, "Device and method for generating map image by laser measurement", 2005).

Todas estas ideas ya han dado lugar a sistemas comerciales como el sistema de medición láser SICK fabricado por la empresa alemana Sick AG. Este sistema ofrece una gran precisión, pero resulta voluminoso, pesado y caro.

Los sistemas conocidos se basan en (a) dispositivos de contacto que suelen presentar problemas de interacción con el entorno, (b) dispositivos de no-contacto (láser, ultrasonidos, infra-rojos, microondas, etc.) que resultan ser voluminosos, pesados y fundamentalmente caros y (c) redes formadas por un gran número de medidores de distancia.

La idea básica de esta patente es la realización de un sistema para la generación de mapas de contorno tridimensionales, mucho más pequeño, ligero, y económico, pero sin llegar a las precisiones conseguidas por los dispositivos basados en sistemas láser y empleando un número reducido de medidores de distancia básicos.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

Descripción Breve

Un aspecto de la invención lo constituye un dispositivo útil para la generación de mapas de contorno, en adelante dispositivo de la invención, que comprende un

soporte con cualquier forma, preferentemente forma circular, sobre el que sitúa una red de uno o más medidores de distancia puntuales dispuestos consecutivamente alrededor del perímetro de dicho soporte
5 formando cada uno un ángulo con respecto a la tangente del perímetro, solapando la zona de medición de un medidor con la zona de medición de uno o más medidores adyacentes creando una zona o perímetro de medición cerrado y continuo que cubre la totalidad del perímetro
10 y/o con otra serie de medidores dispuestos en cualquier ángulo con el plano del soporte.

Una realización preferente de la invención lo constituye el dispositivo de la invención cuyo soporte es circular con medidores de distancia de tipo infrarrojo
15 dispuestos en el plano horizontal y vertical, con un ángulo de los medidores de distancia con respecto a la tangente del soporte de 0°.

Otro aspecto de la invención lo constituye cualquier aparato que incluya el dispositivo de la invención, en
20 adelante aparato de la invención, con o sin capacidad de movilidad, perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, al siguiente grupo: robot manipulador de objetos, por ejemplo un robot detector de minas antipersonas, un sistema de
25 direccionamiento de una persona ciega, robot volador (por ejemplo: quadrotor o helicóptero autónomo), etc.

Descripción Detallada

La presente invención se refiere a un dispositivo y
30 al uso del mismo para la generación de mapas de contorno (elevación de terreno y mapas de obstáculos)

tridimensionales aplicable, por ejemplo, a la navegación de vehículos y robots autónomos e, incluso, al desplazamiento de personas con minusvalías sin contacto con el entorno. La presente invención se basa en que los
5 inventores han observado que una determinada disposición de una red limitada de sensores de medida de distancia, sin tener que apuntar necesariamente al objeto en la dirección del movimiento, permite crear un cinturón o área cerrada, alrededor del dispositivo o aparato al que
10 esté unido.

Estos medidores de distancia (3) pueden situarse formando diferentes ángulos con el soporte de tal forma que sus haces (4) se cortan conformando un cinturón cerrado (5). Cuando este cinturón corta o intercepta un
15 objeto del entorno, uno o varios medidores de distancia proporcionan la posición del punto de corte en el sistema de referencia del dispositivo (13), y un algoritmo genera un mapa local de elevación con las posiciones de los puntos detectados y medidos por los detectores de
20 distancia. Si el dispositivo se mueve sobre una superficie es posible formar un mosaico con los mapas locales para formar un mapa del entorno barrido tri- o bidimensional.

Esta red de medidores puntuales se dispone alrededor
25 del dispositivo de manera que es capaz de detectar y localizar respecto de un sistema de referencia (13) tanto los objetos que el dispositivo encuentre en su camino como la situación relativa del sensor al suelo. El dispositivo es pequeño, ligero y de bajo costo. Este
30 dispositivo proporciona información zonal (de un área relativamente pequeña) y para la representación de mapas

puede utilizarse, por ejemplo, conjuntamente con un sistema móvil, estando indicados para la navegación, en general, de vehículos y robots móviles en entornos con obstáculos; el levantamiento de mapas del terreno en la
5 navegación de robots móviles y el barrido de zonas con sensores utilizando manipuladores, como es el caso de la detección de minas antipersonas.

Así, un aspecto de la invención lo constituye un dispositivo útil para la generación de mapas de contorno,
10 en adelante dispositivo de la invención, que comprende un soporte abierto, cerrado o con cualquier forma, preferentemente forma circular, sobre el que sitúa una red de uno o más medidores de distancia puntuales dispuestos consecutivamente alrededor del perímetro de
15 dicho soporte formando cada uno un ángulo con respecto a la tangente del perímetro, solapando la zona de medición de un medidor con la zona de medición de uno o más medidores adyacentes creando una zona o perímetro de medición cerrado y continuo que cubre la totalidad del
20 perímetro y/o con otra serie de medidores dispuestos en cualquier ángulo con el plano del soporte.

Un aspecto preferente de la invención lo constituye el dispositivo de la invención en el que el soporte o plataforma presenta una forma circular.

25 Otro aspecto preferente de la invención lo constituye el dispositivo de la invención en el que el soporte o plataforma presenta una forma poligonal. En este último caso, la superficie del soporte es dividida en sectores menores a partir de los cuales se puede
30 calcular la disposición de los medidores de distancia para cada caso.

Otro aspecto preferente de la invención lo constituye el dispositivo de la invención en el que los medidores de distancia se disponen en un plano horizontal, vertical (superior o inferior) o en ambas 5 disposiciones. Con esta última disposición de medidores el dispositivo puede controlar movimientos en un plano horizontal o vertical por separado o de forma conjunta, creándose de esta forma una malla de haces cruzados alrededor y en la parte inferior del soporte, conformando 10 de esta manera un cinturón cerrado a lo largo del perímetro del soporte.

Otro aspecto preferente de la invención lo constituye el dispositivo de la invención en el que los medidores de distancia se disponen formando diferentes 15 ángulos y configuraciones con el soporte, por ejemplo, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, perteneciente al siguiente grupo:

- Una configuración en la que los medidores se disponen en parejas de manera que los haces 20 del sensor sean opuestos. Esta configuración produce unos haces cuya envolvente crea un cinturón cerrado resultando una configuración muy eficiente; sin embargo, puede aparecer un problema de interferencias dependiendo de la tecnología utilizada en el 25 medidor de distancia.
- Una configuración en la que la red de medidores de distancia se divide en dos subredes: horizontal y vertical. La 30 horizontal está dispuesta para que los rayos de los medidores sean tangenciales al

soporte. La subred vertical dispone los medidores perpendicularmente al soporte. Así, una subred detecta los posibles objetos en el camino (horizontal) mientras que la otra (vertical) traza el mapa del terreno sobre el que actúa (Figura 4).

Otro aspecto preferente de la invención lo constituye el dispositivo de la invención en el que los medidores de distancia pertenecen, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, al siguiente grupo: medidores por ultrasonidos, infrarrojos, microondas, sensores resistivos flexibles y láser.

Una realización preferente de la invención lo constituye el dispositivo de la invención cuyo soporte es circular con medidores de distancia de tipo infrarrojo dispuestos en el plano horizontal y vertical, con un ángulo de los medidores de distancia con respecto a la tangente del soporte de 0° .

Otro aspecto de la invención lo constituye cualquier aparato que incluya el dispositivo de la invención, en adelante aparato de la invención, con o sin capacidad de movilidad, perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, al siguiente grupo: robot manipulador de objeto, por ejemplo un robot detector de minas antipersonas, un sistema de direccionamiento de una persona ciega, robot volador (por ejemplo: helicóptero autónomo), etc.

Otro aspecto preferente de la invención lo constituye el aparato de la invención que incluye los elementos necesarios para que el dispositivo de la invención pueda moverse en distintas orientaciones del

espacio (véase la Figura 5) y pueda realizar medidas de distancia alrededor de todo el perímetro de dicho dispositivo y/o del propio aparato. De esta forma este movimiento permite eliminar los efectos de las zonas muertas, realizar medidas de distancia a los distintos objetos del entorno y reconstruir así mapas en dos o tres dimensiones que permiten al robot o a la persona tomar decisiones con respecto a su desplazamiento o no. El robot o la persona se relacionan con el dispositivo de la invención mediante el Punto de manipulación o punto de fijación (Figura 4, (8)).

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS DIBUJOS

Figura 1.- Esquema del dispositivo de la invención. 1a)

Vista global del dispositivo (1). 1b) Desglose de componentes del dispositivo y haces. Soporte o plataforma (2), Medidor de distancia (3), Haz del medidor de distancia (4), Envolvente de la red de medidores de distancia (5) y Punto de manipulación o punto de fijación (8).

Figura 2.- Versión del dispositivo con dos subredes. A)

Vista vertical. Medidor de distancia verticales y horizontales (3-V y 3-H, respectivamente). Haz del medidor de distancia (4). Envolvente de la red de medidores de distancia (5). **B) Vista superior.** Línea envolvente de la red de medidores de distancia para la configuración de subred horizontal (6), Zona muerta de la envolvente de la subred horizontal (7), y Punto de manipulación o punto de fijación (8).

Figura 3 - Versión del dispositivo con los sensores formando diferentes ángulos con la tangente al soporte.

Medidor de distancia (3), Haz del medidor de distancia (4) y envolvente de la red de medidores de distancia (5).

Figura 4.- Visión del dispositivo de la invención con dos subredes en un detector de minas. Punto de manipulación o
5 punto de fijación (8), Cabeza sensora (9), Detector de minas (10), Soporte cilíndrico de los medidores (11), Medidor de distancia verticales y horizontales por infrarrojos (12).

Figura 5 - Visión de los diferentes movimientos del dispositivo cuando está unido a un manipulador.
10 Manipulador (14), punto de manipulación o punto de fijación (8), Cabeza sensora (9).

EJEMPLOS DE REALIZACIÓN

15 **Ejemplo 1.- Diseño y fabricación del dispositivo de la invención sobre soporte circular y medidores en dos planos.**

El prototipo del dispositivo de la invención para la generación de mapas de contorno (1) está formado por un
20 soporte plano circular (2) con una red de uno o más medidores de distancia (3) basados en técnicas de infrarrojos (12). Como se ha indicado anteriormente estos medidores de distancia (3) pueden situarse formando diferentes ángulos con el soporte de tal forma que sus
25 haces (4) se corten conformando un cinturón cerrado 5. En esta variante del dispositivo de la invención se ha dividido la red de medidores (3) en dos subredes: una red horizontal, formada por los medidores 3-H (n=8), y otra red vertical, formada por los medidores 3-V (n=8) (Figura
30 2).

Los medidores 3-V de la subred vertical están situados de tal manera que todos son paralelos y perpendiculares al soporte. Los medidores 3-H de la subred horizontal están situados de tal manera que todos
5 forman un ángulo de 0° con la tangente al perímetro del soporte y están en un plano normalmente paralelo al del soporte, y los haces se disponen en el sentido de las agujas del reloj. Con esta configuración el mapa del terreno puede determinarse con facilidad mientras que el
10 cinturón determina unas zonas muertas (7) en las que podrían no detectarse obstáculos pequeños. El ángulo de estas zonas muertas (7) puede disminuirse aumentando el número de medidores de distancia (3) de la subred o disminuyendo el ángulo que cada sensor forman con la
15 tangente al soporte (Figura 3).

Este dispositivo concreto se manobra desde el punto de manipulación (8) que está unido a un manipulador (14) (Figura 5) situado a bordo de un robot caminante. Todos estos elementos configuran un dispositivo detector de
20 minas antipersonas. Más concretamente, el soporte circular de los medidores de distancia contiene un sistema de detección de metales circular (10) utilizado para la detección de minas constituyendo así la Cabeza Sensora (9). Este detector de minas tiene simetría radial y la señal de salida cambia su frecuencia cuando se sitúa
25 encima de un componente metálico. Los detectores verticales y horizontales están situados en un soporte (11) el cual es un cilindro de material plástico para no interferir en el detector de metales y los medidores de
30 distancia por infrarrojos (12) están separados del detector de metales lo suficiente para que no le

interfieran. El punto de manipulación (8) se fija al punto de conexión de la herramienta de un robot manipulador (14) de 5 grados de libertad que desplaza la Cabeza Sensora (9) para la generación del mapa de contorno (Figura 5).

Si este cinturón formado por los haces de los detectores corta o intercepta con el entorno, por ejemplo, suelo o un objeto, uno o varios medidores de distancia proporcionan la posición del punto de corte en el sistema de referencia del dispositivo. En ese momento un procedimiento de cálculo o algoritmo utiliza estos puntos y genera un mapa local de elevación con las posiciones de los puntos detectados y medidos por los detectores de distancia. Si el dispositivo se mueve sobre una superficie es posible formar un mosaico con los mapas locales para formar un mapa del entorno barrido.

Este prototipo se ha empleado, preferentemente, sobre una plataforma con movimiento relativo al entorno (la plataforma se mueve en el entorno, o los objetos del entorno se mueven con relación a la plataforma). De esta manera, existen dos procedimientos generales para cumplir los dos principales objetivos generales de la presente invención: detección de obstáculos y generación de mapas de contorno que permitan al soporte, preferentemente móvil, la toma de decisiones con respecto al siguiente movimiento a realizar.

El primer procedimiento general consiste en la generación del movimiento (relativo) de la plataforma o soporte que permite a la red de medidores de distancia cubrir todo el perímetro de dicha plataforma. Para el caso de una realización de la invención como el mostrado

en la Figura 2 y 3, existe un conjunto de zonas muertas (7) donde, en estado estático de la plataforma, no será detectado ningún objeto de dimensiones inferiores a esta zona. El movimiento de la plataforma continuo evita
5 dichas zonas muertas estáticas y permite la detección de objetos en el entorno de los medidores con lo que el sistema de control del robot los evita. En el caso del ejemplo mostrado en la Figura 4, un movimiento de rotación de la plataforma con sentido horario sumado a un
10 movimiento de traslación particular puede ocasionar la entrada de un objeto dentro de una zona muerta sin ser detectado. La generación de movimiento de la plataforma, entonces, debe ser tal que incluya en sus restricciones evitar la generación de un movimiento compuesto que pueda
15 ocasionar la entrada de algún obstáculo en zonas muertas. Como ejemplo de estas restricciones, con el mismo movimiento de traslación pero sin el de rotación (y viceversa), se descarta la entrada de algún objeto en estas zonas muertas; se puede limitar el movimiento de
20 rotación de la plataforma a un movimiento simple sin traslación, o un movimiento complejo con rotación en sentido anti-horario. En cualquier caso de movimiento, si el objetivo es evitar el contacto con los objetos del entorno, la trayectoria del movimiento de la plataforma
25 debe ser modificada al detectarse un objeto a una distancia mínima establecida, desviando el movimiento en una dirección distinta a la de colisión con el objeto, o deteniendo totalmente el movimiento.

30 El segundo procedimiento general consiste en la generación y registro de movimiento de la plataforma, de tal manera que con las medidas de distancia a los objetos

14

del entorno, las coordenadas espaciales de la plataforma durante el movimiento, los movimientos de recorrido del entorno y los movimientos de evitación de obstáculos se construya un mapa en dos o tres dimensiones del entorno, 5 que puede incluir el perfil de elevaciones del suelo y el contorno de los objetos del entorno. La generación de trayectorias de movimiento de la plataforma estará referenciada a un sistema de coordenadas fijado en un punto en el entorno, de manera que todas las posiciones y 10 distancias medidas por el sistema de medición puedan ser transportadas al sistema de coordenadas del entorno, permitiendo así el levantamiento del mapa de elevaciones y contornos con referencia el citado sistema de coordenadas.

15

REIVINDICACIONES

- 1.- Dispositivo útil para la generación de mapas de contorno caracterizado porque comprende un soporte con cualquier forma, preferentemente forma circular, sobre el
- 5 que sitúa una red de uno o más medidores de distancia puntuales dispuestos consecutivamente alrededor del perímetro de dicho soporte formando cada uno un ángulo con respecto a la tangente del perímetro, solapando la zona de medición de un medidor con la zona de medición de
- 10 uno o más medidores adyacentes creando una zona o perímetro de medición cerrado y continuo que cubre la totalidad del perímetro y/o con otra serie de medidores dispuestos en cualquier ángulo con el plano del soporte.
- 2.- Dispositivo según la reivindicación 1 caracterizado
- 15 porque el soporte o plataforma presenta una forma circular.
- 3.- Dispositivo según la reivindicación 1 caracterizado porque el soporte o plataforma presenta una forma poligonal.
- 20 4.- Dispositivo según la reivindicación 1 caracterizado porque los medidores de distancia se disponen en un plano horizontal, vertical (superior o inferior) o en ambas disposiciones.
- 5.- Dispositivo según la reivindicación 1 caracterizado
- 25 porque los medidores de distancia se disponen formando diferentes ángulos con el soporte y con una configuración perteneciente al siguiente grupo:
- i) una configuración con los medidores en
- 30 parejas de manera que los haces del sensor sean opuestos, y

ii) una configuración en la que la red de medidores de distancia se disponen en dos subredes: horizontal y vertical.

6.- Dispositivo según la reivindicación 1 caracterizado porque los medidores de distancia pertenecen al siguiente grupo: medidores por ultrasonidos, infrarrojos, microondas, sensores resistivos flexibles y láser.

7.- Dispositivo según la reivindicación 1 caracterizado porque el soporte es circular con medidores de distancia de tipo infrarrojo dispuestos en el plano horizontal y vertical, con un ángulo de los medidores de distancia con respecto a la tangente del soporte de 0° .

8.- Aparato caracterizado porque comprende el dispositivo según las reivindicaciones 1 a la 7 con o sin capacidad de movilidad.

9.- Aparato según la reivindicación 8 caracterizado porque pertenece al siguiente grupo: robot manipulador de objetos, por ejemplo un robot detector de minas antipersonas, un sistema de direccionamiento de una persona ciega y un robot volador, por ejemplo: helicóptero autónomo.

10.- Aparato según las reivindicaciones 8 y 9 caracterizado porque comprende los elementos necesarios para que el dispositivo de la invención pueda moverse en distintas orientaciones del espacio y pueda realizar medidas de distancia alrededor de todo el perímetro de dicho dispositivo y/o del propio aparato.

17

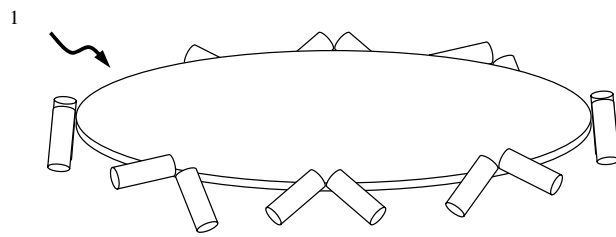


Figura 1.a

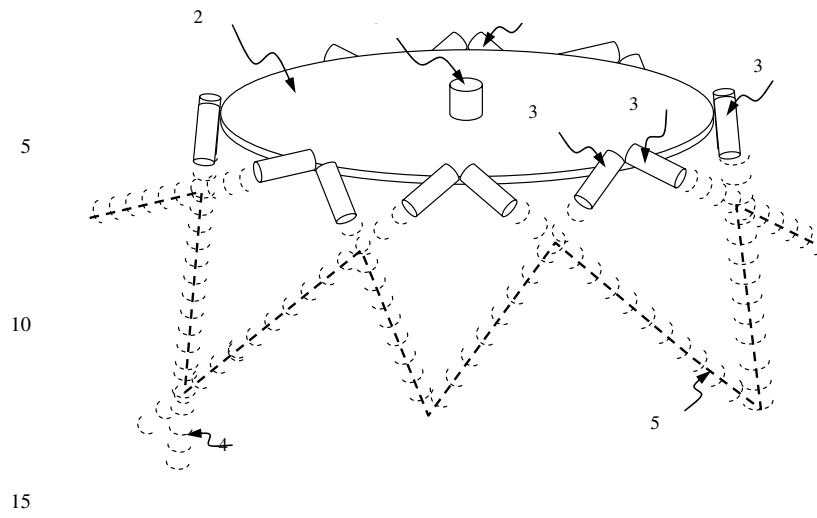


Figura 1.b

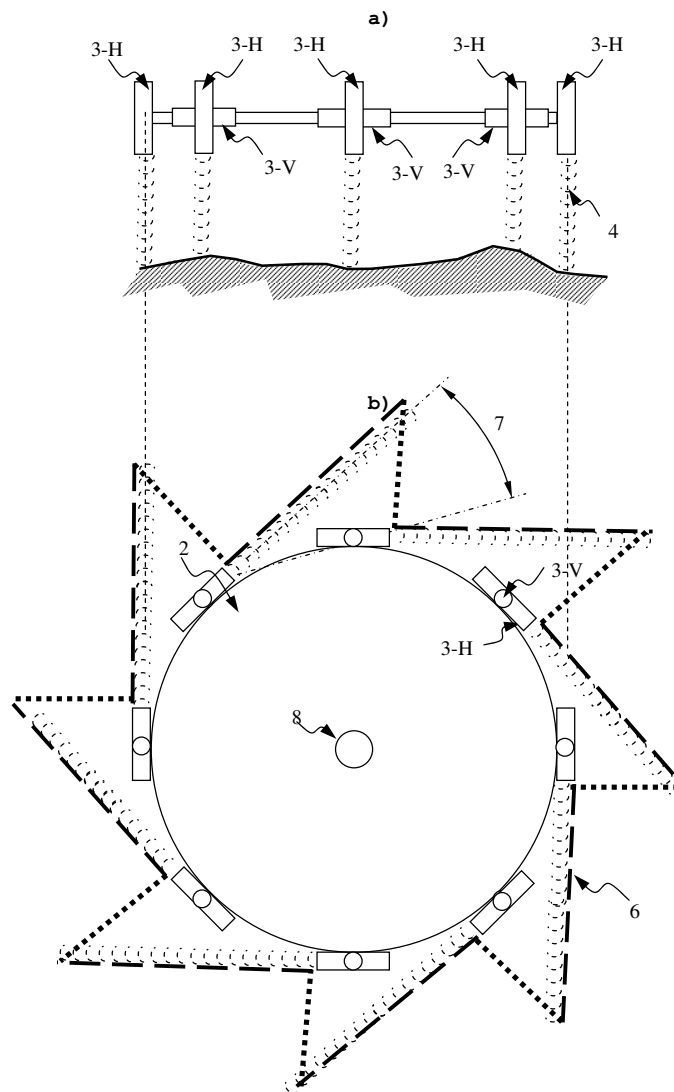


Figura 2

20

5

10

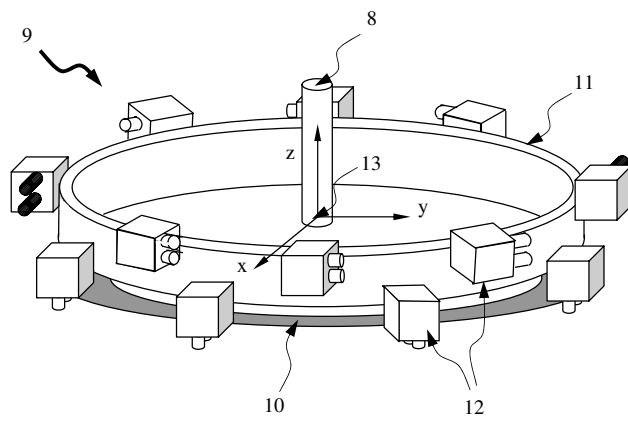


Figura 4

21

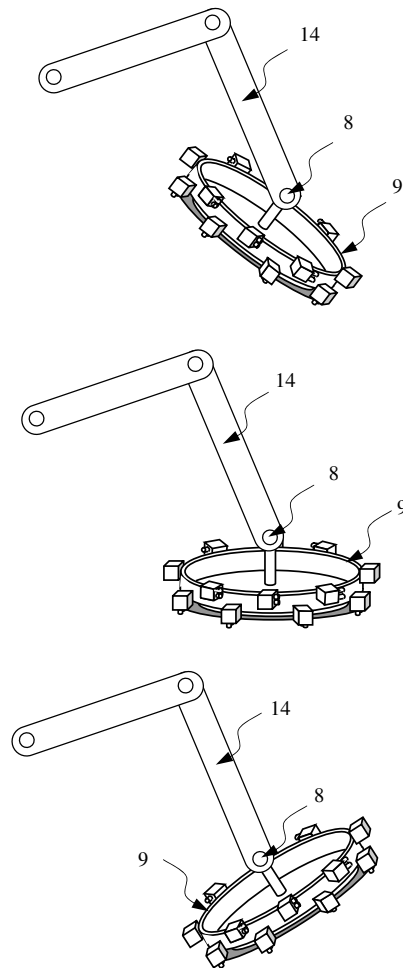


Figura 5

Apéndice E

Sensores para la exploración del entorno

El conjunto sensorial del sistema de exploración de terrenos consta de 3 bloques principales:

Sistema propioceptivo del brazo robot formado por los sensores de posición angular de las articulaciones y de intensidad de corriente eléctrica de motores, necesarios para el control a bajo nivel de las articulaciones del brazo manipulador.

Sistema de detección de minas encargado de detectar la existencia de una mina dentro del volumen de acción del detector.

Sistema sensor de terreno encargado de medir algunas características del terreno en el entorno del sensor de minas, para alimentar al sistema de control de exploración.

Forma parte de este trabajo de tesis doctoral el diseño del sistema sensor del terreno, realizado en forma de cabeza sensora que contiene un detector comercial de metales y un conjunto de sensores del terreno instalado alre-

dedor del detector.

E.1. Tipos de sensores y medidores

Se puede asumir que la cabeza sensora se comporta como un robot móvil que se desplaza en un entorno natural no estructurado, por lo se estudia la gama de sensores disponibles para ser empleados en la navegación de este tipo de robot.

Los robots móviles generalmente necesitan medir su entorno para realizar sus labores, para ubicarse en el entorno, interactuar con él, etc. Se han propuesto a lo largo de las últimas dos décadas diversas soluciones para resolver problemas que, en principio, parecen sencillos, pero que dependiendo de la naturaleza del robot, de sus capacidades y tareas asignadas, no siempre resulta trivial. Tres problemas básicos que aún son tema de investigación son la odometría (Palacin et al., 2006), medición de distancia a obstáculos y detección de contacto con obstáculos (Borenstein y Koren, 1988; Matsuoto y Kosuge, 2001; Lamperski et al., 2005),

Los sensores de contacto son especialmente útiles en entornos no estructurados, que es el caso que nos interesa resolver: una cabeza sensora acoplada a un brazo manipulador (Ponticelli et al., 2006), que requiere re-alimentación del entorno para llevar a cabo su tarea de reconocimiento del terreno, en particular detectando la proximidad a obstáculos y reaccionando adecuadamente (Maaref y Barret, 2002) durante las tareas de localización de minas antipersonas.

Entre los sensores considerados para la implementación de los prototipos de cabeza sensora se encuentran los comúnmente empleados para detectar contacto y medir distancias. Una importante selección de sensores puede ser

vista en (Coope, 2009). A continuación se presenta una pequeña muestra de las tecnologías consideradas para el diseño de la cabeza sensora.

Sensores de contacto Existe una gran variedad de sensores de contacto, desde interruptores mecánicos hasta sensores de deformación. En función de su construcción, pueden detectar el evento cuando la presión de contacto supera su umbral de activación, o cuando la presión de contacto ha deformado al elemento sensor, modificando alguna variable física medible. Por ser de tecnología sencilla, suelen ser de bajo costo; sin embargo, al tratarse de sensores expuestos al desgaste mecánico, su costo estará relacionado con la durabilidad esperada. Entre los sensores que miden la deformación de su estructura se encuentran los sensores piezoeléctricos. Estos sensores se basan en un material que presenta el efecto piezoeléctrico¹, donde una diferencia de potencial se genera en el material causada por la deformación de su estructura cristalina (Piezocryst, 2009). Estos sensores son empleados ampliamente en la detección de contacto y en la medición de presión, fuerza o deformación. Existen otros sensores de tipo “piezo”, como los piezorresistivos, y otros medidores de deformación, como las galgas extensiométricas, que permiten realizar mediciones de presión o fuerza en función de la variación de resistividad eléctrica que la deformación de su material ocasiona. Una variante de estos últimos sensores son los sensores Flex (Gentile, 1989, SYMBOL, 2009, Jameco, 2009), que varían su resistividad por medio de la flexión del sustrato donde ha sido depositado el material resistivo. Este tipo de sensor ha sido empleado comúnmente en la fabricación de guantes que miden la flexión de los dedos (para teleoperación de sistemas, videojuegos, etc.)

Sensores por luz Es frecuente encontrar sensores de proximidad y de dis-

¹Piezo: Esta palabra deriva del griego *piezein* o *Πιέζειν*, que significa comprimir o presionar.

tancia que emplean un haz de luz infrarroja. Estos sensores pueden emplear un emisor de luz común (LED estándar) o un emisor de luz láser, en función de las especificaciones de apertura, potencia, alcance y coherencia del haz de luz. Dependiendo del tipo de salida, estos sensores se pueden clasificar en detectores de proximidad y sensores de distancia. Los primeros entregan una señal que indica la presencia de un obstáculo reflectante dentro del rango de detección (distancia del obstáculo al sensor menor que un cierto valor); los segundos entregan una señal variable en función de la distancia al obstáculo reflectante. Independientemente del tipo de salida, estos sensores suelen operar mediante la emisión de un haz de luz que al reflejarse en el obstáculo es captado por un receptor de luz. La medida se puede realizar por intensidad de luz, por ángulo de incidencia, por diferencia de fase entre la onda emitida y recibida, etc. Los sensores por infrarrojos se pueden ver afectados por el ángulo de la superficie reflectante, el coeficiente de reflexión de luz y la interferencia por otras ondas infrarrojas (luz solar, fuentes de calor intenso, etc.).

Sensores ultrasónicos Estos sensores emplean la reflexión de una onda de ultrasonido para determinar la distancia del objeto reflectante. Típicamente se configuran para determinar la distancia indirectamente por medio del tiempo de vuelo de la onda: se emite un pulso de sonido y se cuenta el tiempo desde la emisión hasta la primera recepción del sonido. Estos sensores han tenido amplia aceptación en el campo de los robots móviles debido a su facilidad de utilización, precisión y bajo costo. Sin embargo adolecen de ciertos problemas, como baja direccionalidad (es difícil lograr emitir un haz fino a partir de un emisor simple), puntos ciegos en los mínimos en ondas estacionarias, interferencia por multitraectorias, variaciones de la velocidad de propagación del sonido (y por ende de la lectura de distancia) debido a

cambios en la temperatura del aire, distorsión de la lectura debido al efecto Doppler, etc. De igual manera que para los sensores de infrarrojos, los ultrasónicos pueden presentar dos tipos generales de salida, digital si se trata de un sensor de proximidad y analógica o continua si se trata de un sensor de distancia, y la estas salidas se ven igualmente afectadas por el ángulo de la superficie reflectante, su coeficiente de reflexión del sonido y la interferencia por otras ondas ultrasónicas (en caso de múltiples en el mismo espacio). Mediante técnicas sofisticadas es posible emplear ultrasonidos con excelente precisión para la creación de imágenes en medicina, para el análisis no destructivo de materiales y estructuras, así como también son empleados para la localización tridimensional, pero todas estas aplicaciones requieren condiciones y/o medios de transmisión especiales de operación (Ealo et al., 2006, Fritsch et al., 2006, Ullate et al., 2006).

Sensores magnéticos Existen diferentes tipos de sensores de distancia basados en campos magnéticos. Generalmente estos sensores, también denominados sensores de inducción, se emplean como detectores de proximidad a muy corta distancia (en ocasiones intercambiables con sensores de contacto mecánico) cuando el obstáculo posee propiedades magnéticas. Para medir distancias se suele emplear métodos sofisticados como en los sensores LVDT (Transformador Diferencial Variable Lineal) (Instruments, 2006), que por medio del desplazamiento mecánico de un devanado bajo la inducción de otro inductor se determina la distancia y dirección del movimiento a partir de la diferencia de amplitud y fase de la onda de excitación del sensor y la onda de salida del elemento móvil. Por lo general los sensores magnéticos se emplean en distancias cortas y requieren condiciones específicas en el objeto a medir. Aunque pueden ofrecer precisiones y resoluciones altísimas, generalmente por su rango y condiciones de operación no

resultan útiles para medir el entorno de un robot. Sin embargo existen sensores magnéticos que miden el flujo magnético, que empleados dentro de un ambiente controlado con flujos magnéticos determinados, sirven para determinar su posición en el espacio.

Dada la amplia gama de dispositivos y tecnologías, es posible emplear sensores en la cabeza sensora que sean robustos, ligeros, económicos, fáciles de usar y de común distribución en el mercado, como el sensor de distancia SHARP GP2D120.

E.2. Sensor de distancia SHARP GP2D120

El sensor de distancia empleado para la configuración de la cabeza sensora es el GP2D120 de la casa fabricante Sharp. Este sensor entrega un voltaje dentro del rango aproximado $[0.4 \dots 3.2]$ V en función de la distancia frontal a un objeto, como se muestra en la Fig. E.1. La respuesta varía de un sensor a otro del mismo tipo, como se puede apreciar en la Fig. E.2; de forma cualitativa se observa visualmente la diferencia entre las curvas de los sensores.

Entre las características generales se puede destacar que el funcionamiento de estos sensores de distancia se basa en un par de elementos emisor-receptor de luz infrarroja, presentan un rango de operación de $[4 \dots 30]$ cm, y tienen un requerimiento de alimentación de 5 V DC con un consumo de corriente aproximado de 40 mA. Específicamente, este sensor está constituido por un elemento emisor de luz infrarroja y un conjunto lineal de elementos receptores de luz infrarroja. La distancia al objeto se determina internamente en función de los elementos del conjunto receptor activados por el haz de luz que incida sobre ellos, que está relacionado con el ángulo de incidencia, que a su vez se relaciona con la distancia al objeto que refleja

la luz (Acroname, 2007).

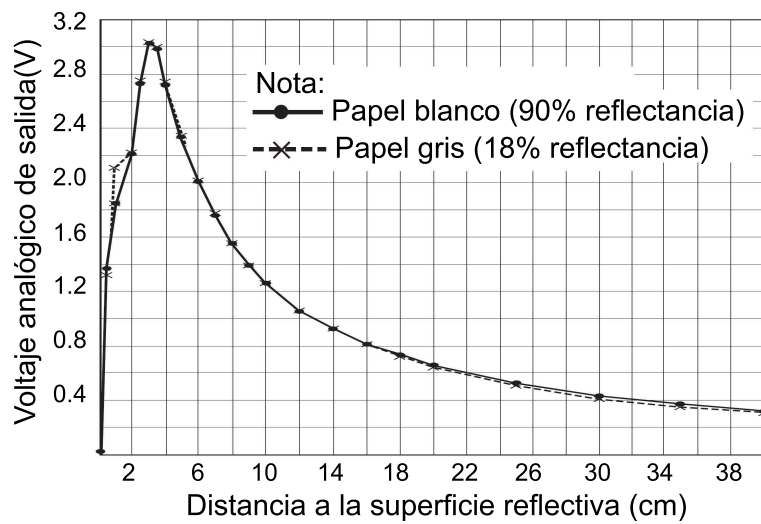


Figura E.1: Respuesta característica del sensor GP2D120.

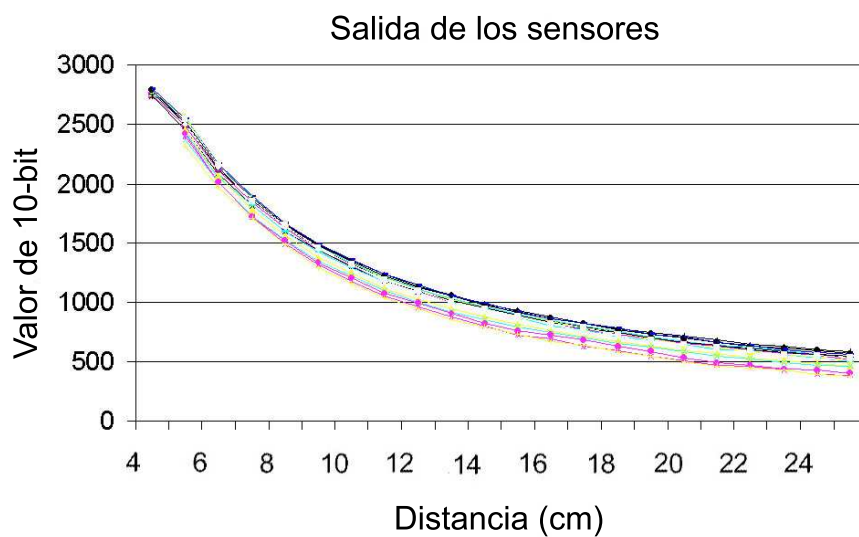


Figura E.2: Respuesta de los 16 sensores GP2D120 de la cabeza sensora.

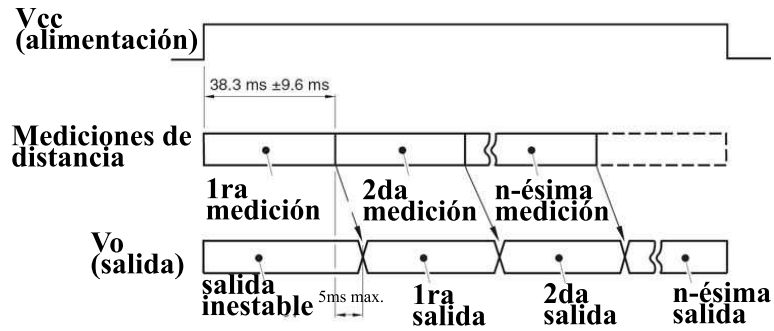


Figura E.3: Diagrama de tiempos del sensor GP2D120.

Se debe tener en cuenta que a pesar de la característica analógica de su salida de voltaje, este valor de salida del sensor no se actualiza de forma continua sino con una periodicidad aproximada de 40 ms. El ciclo de muestreo de la distancia se representa en la Fig. E.3.

El haz infrarrojo que incide sobre el objeto presenta una sección aproximadamente elíptica que se va expandiendo a medida que se aleja el objeto. A una distancia de 10 cm, el diámetro mayor del haz es de unos 5 cm y el diámetro menor de unos 2 cm. La salida de voltaje en función de la posición espacial del objeto frente al haz está representada en la Fig. E.4.

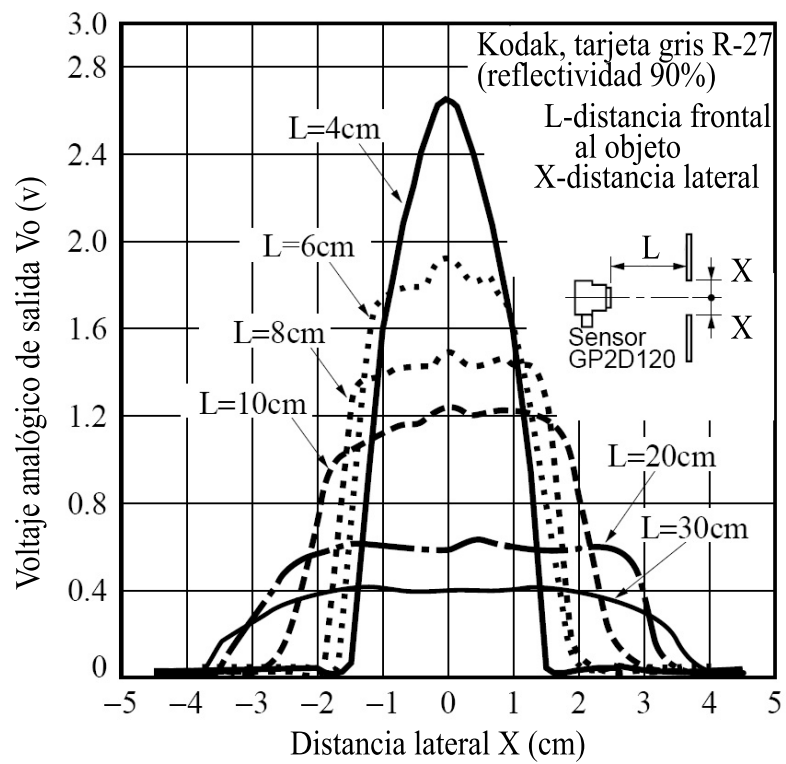


Figura E.4: Respuesta en función de distancia lateral del sensor GP2D120.

Apéndice F

Algunas definiciones básicas de conjuntos y probabilidad

F.1. Conjuntos

Un **conjunto** es una colección de objetos denominados **elementos**. Representando al conjunto con una letra mayúscula y al elemento con una letra minúscula, tenemos:

$$\begin{aligned} a \in A, & \text{ si } a \text{ pertenece al conjunto } A \\ a \notin A, & \text{ si } a \text{ no pertenece al conjunto } A \end{aligned} \tag{F.1}$$

Un conjunto puede ser **contable** o **incontable**, en función de si a cada elemento del conjunto se le puede asignar o no un número natural $(1, 2, 3, \dots)$.

Un conjunto puede ser **finito** o **infinito**, en función de si la cuenta de elementos tiene o no tiene fin. Puede existir, por ejemplo, un conjunto **contable infinito**.

Un conjunto puede estar **vacío** cuando no contiene ningún elemento. Suele denominarse **conjunto nulo**, denotándose con el símbolo \emptyset .

Si todos los elementos del conjunto A se encuentran también en el conjunto B , se dice que A está **contenido en** B :

$$A \subseteq B \quad (\text{F.2})$$

pero si al menos un elemento de B no está en A , se dice entonces que A es un **subconjunto** de B :

$$A \subset B \quad (\text{F.3})$$

deduciéndose que el conjunto nulo \emptyset es un subconjunto de cualquier otro conjunto.

Aquel conjunto que contenga todos los posibles elementos en una situación dada se denomina **conjunto universal**, denotado por S , del que todos los otros conjuntos involucrados en dicha situación serán subconjuntos. Del conjunto universal suele decirse que es **discreto** si es contable, ya sea finito o infinito; y de no ser contable, suele decirse que es **continuo**.

La **diferencia** de dos conjuntos se denota como $A - B$, y es el conjunto que contiene los elementos de A que no están en B .

La **unión** de dos conjuntos contiene todos los elementos de A y B :

$$C = A \cup B \quad (\text{F.4})$$

La **intersección** de dos conjuntos contiene los elementos comunes entre A y B :

$$D = A \cap B \quad (\text{F.5})$$

donde para el caso de dos conjuntos **mutuamente exclusivos** se tiene $A \cap B = \emptyset$.

El **complemento** de un conjunto A contiene todos aquellos elementos no presentes en A :

$$\bar{A} = S - A \quad (\text{F.6})$$

de donde se deduce que $A \cap \bar{A} = \emptyset$, $\bar{\emptyset} = S$ y $\bar{S} = \emptyset$.

El conjunto de todos los posibles resultados de un **experimento** definido matemáticamente (que se explicará más adelante en la sección F.2) con conjuntos, se denomina **espacio muestral**, y representa un conjunto universal para dicho experimento.

Un **evento** se define como un subconjunto del espacio muestral, por lo tanto, un evento está directamente relacionado con el experimento que da lugar al espacio muestral conformado por todos los posibles resultados del experimento. Los eventos pueden presentar una naturaleza distinta de la del espacio muestral al que pertenecen; e.g., se puede definir un evento de tipo contable finito sobre un espacio muestral contable infinito, así como también se puede definir un evento de tipo discreto sobre un espacio muestral continuo.

F.2. Probabilidad

De manera general se puede decir que la **probabilidad** es una función que opera sobre los eventos, definidos sobre el espacio muestral S , denotada

$P(A)$, leída como **probabilidad del evento** A , y que cumple los siguientes axiomas:

$$\begin{aligned}
 P(A) &\geq 0 \\
 P(S) &= 1 \\
 P\left(\bigcup_{n=1}^N A_n\right) &= \sum_{n=1}^N P(A_n); \text{ if } A_n \cap A_m = \emptyset \\
 &\text{para todo } m \neq n = 1, 2, \dots, N
 \end{aligned}
 \tag{F.7}$$

Se dice, entonces, que un **experimento real** está definido matemáticamente por tres aspectos fundamentales:

1. Asignación del espacio muestral.
2. Definición de los eventos.
3. Asignación de las probabilidades de los eventos de tal manera que se cumplan los tres axiomas de la probabilidad planteados en (F.7).

F.2.1. Variable aleatoria

Se define **variable aleatoria real** como una **función real** de los elementos de un espacio muestral S . Se suele representar esta variable con una letra mayúscula, y los valores particulares de la variable se representan con una letra en minúscula: $X(s)$. Una variable aleatoria X puede considerarse como una función de mapeo de todos los elementos del espacio muestral sobre puntos del eje de los números reales. Esta función debe satisfacer ciertas condiciones:

1. Debe ser una función inyectiva, donde a dos elementos distintos cualesquiera del espacio muestral se correspondan dos valores reales diferentes.

2. El conjunto $\{X \leq x\}$ debe ser un evento para cualquier número real x .
3. La probabilidad de los eventos $\{X = -\infty\}$ y $\{X = \infty\}$ debe ser igual a 0.

F.2.2. Función de distribución

La **función de distribución de probabilidad acumulativa** de la **variable aleatoria** X se define como:

$$F_X(x) = P\{X \leq x\} \quad (\text{F.8})$$

$F_X(x)$ suele llamarse simplemente **función de distribución de X** . Esta función tiene ciertas propiedades derivadas de su condición de ser una probabilidad:

$$\begin{aligned} F_X(-\infty) &= 0 \\ F_X(\infty) &= 1 \\ 0 &\leq F_X(x) \leq 1 \\ F_X(x_1) &\leq F_X(x_2) \quad \text{if } x_1 < x_2 \\ P\{x_1 < X \leq x_2\} &= F_X(x_2) - F_X(x_1) \\ F_X(x^+) &= F_X(x) \end{aligned} \quad (\text{F.9})$$

F.2.3. Función de densidad de probabilidad

La función de densidad de probabilidad se define como la derivada de la función de distribución:

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (\text{F.10})$$

y suele llamarse simplemente **función de densidad** de la variable aleatoria X .

La función de densidad debe cumplir con ciertas condiciones:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq f_X(x) \quad \text{para todo } x \\
 \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) dx &= 1 \\
 f_X(x) &= \int_{-\infty}^x f_X(r) dr \\
 P\{x_1 < X \leq x_2\} &= \int_{x_1}^{x_2} f_X(x) dx
 \end{aligned}
 \tag{F.11}$$

F.2.4. Variable aleatoria Gaussiana

La **variable aleatoria Gaussiana** presenta la siguiente función de densidad:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_X^2}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(r - a_X)^2}{2\sigma_X^2}} dr
 \tag{F.12}$$

F.2.5. Probabilidad conjunta y condicional

Se define como la **probabilidad conjunta de dos eventos** A y B , que se intersectan en el espacio muestral, como

$$P(A \cap B) = P(A) + P(B) - P(A \cup B)
 \tag{F.13}$$

Se define como la **probabilidad condicional de un evento** A **dado** B , siendo B un evento con probabilidad mayor que cero, $P(B) > 0$, como

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}
 \tag{F.14}$$

La probabilidad condicional $P(A|B)$ refleja el hecho de que la probabilidad del evento A puede depender de otro evento B . En el caso de que A y B fueran mutuamente excluyentes, se tiene que $A \cap B = \emptyset$, y $P(A|B) = 0$.

F.2.6. Independencia estadística

Se dice que los eventos A y B , ambos con probabilidad de ocurrencia diferente de cero, son **estadísticamente independientes** cuando la probabilidad de ocurrencia de un evento no es afectada por la ocurrencia del otro:

$$\begin{cases} P(A|B) = P(A) \\ P(B|A) = P(B) \end{cases} \quad (\text{F.15})$$

Substituyendo (F.15) en (F.14) se tiene que independencia estadística también significa que la probabilidad conjunta de los dos eventos debe ser igual al producto de las probabilidades individuales:

$$P(A \cap B) = P(A)P(B) \quad (\text{F.16})$$

siendo este resultado condición necesaria y suficiente para que estos dos eventos sean estadísticamente independientes.

Dado que la probabilidad conjunta de dos eventos mutuamente excluyentes es cero

$$P(A \cap B) = 0 \quad (\text{F.17})$$

y suponiendo que las probabilidades individuales de los eventos A y B son diferentes de cero, se tiene que, comparando (F.16) con (F.17), dos eventos

mutuamente excluyentes no pueden ser también estadísticamente independientes.

Aplicando estas definiciones a dos variables aleatorias X e Y , y definiendo los eventos $A = \{X \leq x\}$ y $B = \{Y \leq y\}$ para dos números reales x e y , se dice que X e Y son variables aleatorias estadísticamente independientes si, y solo si, se tiene:

$$P\{X \leq x, Y \leq y\} = P\{X \leq x\}P\{Y \leq y\} \quad (\text{F.18})$$

Como consecuencia también será válida la expresión para la función de distribución:

$$F_{X,Y}(x, y) = F_X(x)F_Y(y) \quad (\text{F.19})$$

así como la expresión de las densidades de probabilidad:

$$f_{X,Y}(x, y) = f_X(x)f_Y(y) \quad (\text{F.20})$$

F.2.7. Distribución de probabilidad conjunta

Dados dos eventos $A = \{X \leq x\}$ y $B = \{Y \leq y\}$, con funciones de distribución de probabilidad $F_X(x) = P\{X \leq x\}$ y $F_Y(y) = P\{Y \leq y\}$, se denota la **función de distribución de probabilidad conjunta** como:

$$F_{X,Y}(x, y) = P\{X \leq x, Y \leq y\} = P(A \cap B) \quad (\text{F.21})$$

Esta función de probabilidad conjunta debe cumplir con las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned}
F_{X,Y}(-\infty, y) &= F_{X,Y}(x, -\infty) = 0 \\
F_{X,Y}(\infty, \infty) &= 1 \\
0 &\leq F_{X,Y}(x, y) \leq 1 \\
F_{X,Y}(x, y) &\text{ función creciente monotónica en } x, y \\
F_{X,Y}(x_1 < X \leq x_2, y_1 < Y \leq y_2) &= \\
&F_{X,Y}(x_1, y_1) + F_{X,Y}(x_2, y_2) - F_{X,Y}(x_1, y_2) - F_{X,Y}(x_2, y_1) \geq 0 \\
F_{X,Y}(x, \infty) &= F_X(x); F_{X,Y}(\infty, y) = F_Y(y)
\end{aligned} \tag{F.22}$$

F.2.8. Función de densidad de probabilidad conjunta

Dadas dos variables aleatorias X e Y , la función $f_{X,Y}(x, y)$ denota la **función de densidad de probabilidad conjunta**, o simplemente denominada **función de densidad conjunta**, definida como:

$$f_{X,Y}(x, y) = \frac{\partial^2 F_{X,Y}(x, y)}{\partial x \partial y} \tag{F.23}$$

Esta función cumple con las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned}
& f_{X,Y}(x, y) \geq 0 \\
& \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{X,Y}(x, y) dx dy = 1 \\
& F_{X,Y}(x, y) = \int_{-\infty}^y \int_{-\infty}^x f_{X,Y}(r_1, r_2) dr_1 dr_2 \\
& \begin{cases} F_X(x) = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^{\infty} f_{X,Y}(r_1, r_2) dr_1 dr_2 \\ F_Y(y) = \int_{-\infty}^y \int_{-\infty}^{\infty} f_{X,Y}(r_1, r_2) dr_1 dr_2 \end{cases} \quad (\text{F.24}) \\
& F_{X,Y}(x_1 < X \leq x_2, y_1 < Y \leq y_2) = \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} f_{X,Y}(x, y) dx dy \\
& \begin{cases} f_X(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{X,Y}(x, y) dy \\ f_Y(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{X,Y}(x, y) dx \end{cases}
\end{aligned}$$

Las dos ecuaciones mostradas en la última propiedad de (F.24) se denominan **funciones de densidad de probabilidad marginal**, o simplemente **funciones de densidad marginal**, y están definidas de la siguiente manera:

$$\begin{cases} f_X(x) = \frac{df_X(x)}{dx} \\ f_Y(y) = \frac{df_Y(y)}{dy} \end{cases} \quad (\text{F.25})$$

Nota: En el caso de N variables aleatorias X_1, X_2, \dots, X_N , la función de densidad marginal k -dimensional está definida como la k -ésima derivada parcial de la función de distribución marginal k -dimensional. También puede obtenerse a partir de la función de densidad conjunta, integrando todas las variables a excepción de las k variables de interés X_1, X_2, \dots, X_k :

$$f_{X_1, X_2, \dots, X_k}(x_1, x_2, \dots, x_k) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f_{X_1, X_2, \dots, X_N}(x_1, x_2, \dots, x_N) dx_{k+1} dx_{k+2} \dots dx_N \quad (\text{F.26})$$

F.2.9. Función de distribución marginal

De la última propiedad mostrada en (F.24) se obtiene la denominada función de distribución marginal, que permite hallar la función de distribución de una variable ($F_X(x)$ o $F_Y(y)$) a partir de la función de distribución conjunta $F_{X,Y}(x, y)$, haciendo que la otra variable sea infinita.

F.2.10. Distribución y densidad de probabilidad condicional

Reescribiendo la ecuación (F.14), y manteniendo la condición de que la probabilidad $P(B) > 0$, se tiene función de distribución de probabilidad condicional:

$$F_X(x|B) = P\{X \leq x | B\} = \frac{P\{X \leq x \cap B\}}{P(B)} \quad (\text{F.27})$$

La función de densidad condicional queda definida por:

$$f_X(x|B) = \frac{dF_X(x|B)}{dx} \quad (\text{F.28})$$

La forma de la función de distribución condicional y de la función de densidad condicional para eventos independientes puede ser escrita también como:

$$F_X(x|Y \leq y) = \frac{P\{X \leq x | Y \leq y\}}{P\{Y \leq y\}} = \frac{F_{X,Y}(x, y)}{P\{Y \leq y\}} = F_x(x) \quad (\text{F.29})$$

Nota: Para eventos independientes la distribución condicional deja de ser condicional y pasa a ser distribución marginal de una variable aleatoria independiente. Igual conclusión se obtiene para la función de densidad condicional:

$$f_X(x|Y \leq x) = f_x(x) \quad (\text{F.30})$$

F.2.11. Probabilidad total

La probabilidad de un evento A definido en un espacio muestral S puede ser expresada en términos de probabilidades condicionales. Suponiendo la existencia de N eventos mutuamente excluyentes, cuya unión es el espacio S , se tiene:

$$\begin{aligned} B_m \cap B_n &= \emptyset \quad m \neq n = 1, 2, \dots, N \\ \bigcup_{n=1}^N B_n &= S \\ P(A) &= \sum_{n=1}^N P(A|B_n)P(B_n) \end{aligned} \quad (\text{F.31})$$

donde esta última ecuación se conoce como **probabilidad total** del evento A .

F.2.12. Bayes

Retomando la definición de probabilidad condicional dada en la ecuación F.14, se tiene:

$$\begin{aligned}
 P(A|B) &= \frac{P(A \cap B)}{P(B)}; & P(B) \neq 0 \\
 P(B|A) &= \frac{P(B \cap A)}{P(A)}; & P(A) \neq 0
 \end{aligned}
 \tag{F.32}$$

Igualando las dos ecuaciones se obtiene una de las formas del teorema de Bayes:

$$P(B|A) = \frac{P(A|B)P(B)}{P(A)}; \quad P(A) \neq 0
 \tag{F.33}$$

Empleando la definición de probabilidad total (F.31), el teorema de Bayes se puede presentar de la siguiente manera:

$$P(B_n|A) = \frac{P(A|B_n)P(B_n)}{P(A|B_1)P(B_1) + \cdots + P(A|B_N)P(B_N)}
 \tag{F.34}$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

Nota: Las probabilidades $P(B_n)$ son referidas como **probabilidades a priori**, o *prior* (del inglés *prior probability*), puesto que se aplican a los eventos B_n antes de realizar el experimento. Las probabilidades $P(A|B_n)$ típicamente se conocen antes de realizar el experimento. Las probabilidades $P(B_n|A)$ se suelen denominar **probabilidades a posteriori**, o **posterior** (del inglés *posterior probability*) ya que se obtienen después de realizar el experimento donde ocurre el evento A .

F.2.13. Campos aleatorios

Se puede definir un **campo aleatorio**, de manera general, como un proceso estocástico que toma valores en un espacio Euclidiano y definido

sobre un espacio de parámetros de dimensionalidad de al menos 1 (Adler y Taylor, 2007). Aunque se suelen usar de manera indistinta los términos **proceso** y **campo**, se habla de campo cuando la estructura geométrica del espacio de parámetros es importante; en cualquier otro caso se habla de proceso. Con respecto a los términos **aleatorio** y **estocástico**, estos se suelen emplear como sinónimos.

Una definición más formal puede plantearse de la siguiente manera. Sea $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ un espacio de probabilidad completo y T un espacio topológico. Entonces un mapeo medible $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^T$ (el espacio de todas las funciones en T de valor real) se denomina *campo aleatorio de valor real*. Los **mapeos medibles** de Ω a $(\mathbb{R}^T)^d$, $d > 1$, son denominados *campos aleatorios de valor vectorial*. Si $T \subset \mathbb{R}^N$, se denomina f campo aleatorio (N, d) , y si $d = 1$, se denomina campo aleatorio N -dimensional.

F.2.14. Campos aleatorios de Markov

El campo aleatorio de Markov es una generalización de un tipo de proceso estocástico denominado **proceso de Markov**, basándose en los conceptos de las **cadena de Markov** pero donde un índice de tiempo es reemplazado por un índice espacial (Kiefermann y Snell, 1980).

De manera general, en un proceso de Markov la probabilidad de un resultado en el tiempo $n + 1$ dado todos los resultados previos depende únicamente del resultado en el tiempo n . Esta probabilidad de obtener el resultado del tiempo $n + 1$ dado el resultado del tiempo n se denomina probabilidad de transición. Para determinar un proceso de Markov específico se debe dar una distribución inicial y la probabilidad de transición. Esta definición no es simétrica en el tiempo, ya que plantea solamente la probabilidad de los resultados futuros dado el pasado y no en sentido inverso; sin

embargo, se puede plantear esta propiedad de Markov de manera simétrica, donde la probabilidad de un resultado en el tiempo n dado todos los resultados pasados y futuros depende solo de los resultados inmediatamente pasado y futuro, en los tiempos $n-1$ y $n+1$. Esta definición tiene aplicación directa cuando se trabaja con distribuciones espaciales, donde la noción de secuencia en el tiempo se reemplaza por secuencia espacial; es decir, por posiciones en el espacio, reemplazando los conceptos de tiempo anterior y futuro por posición anterior y siguiente.

El concepto de un campo aleatorio de Markov nace del intento de expresar de manera general y mediante probabilidades un modelo muy específico llamado modelo de Ising, desarrollado previamente por el físico alemán Ernst Ising. Este fue estudiante de Lenz y desarrolló su tesis doctoral en lo que hoy se conoce como el modelo que lleva su nombre, el modelo de Ising, con el que intentó explicar algunos hechos observados empíricamente acerca de materiales ferromagnéticos. En 1925 publica un resumen de sus resultados, donde se dice también que el modelo fue sugerido por Lenz.

El planteamiento original de Ising incluye los siguientes elementos. Una secuencia de n puntos sobre una línea, en cada punto o **sitio**, existe un dipolo o **espín** (del inglés *spin*) que en cada momento dado presenta una de dos posibles “posiciones”, hacia arriba o abajo. La siguiente notación ayudará a introducir la propiedad que define un campo aleatorio de Markov:

$$\omega = (\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_n); \quad \text{donde } \omega_j = \{+, -\}$$

$$\begin{cases} \sigma_j(\omega) = 1 & \text{si } \omega_j = + \\ \sigma_j(\omega) = -1 & \text{si } \omega_j = - \end{cases} \quad (\text{F.35})$$

El *espín* σ_j es una función definida en Ω , el espacio muestral de todas las posibles secuencias $\omega = (\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_n)$, que devuelve un valor de 1 o -1 según la orientación del espín. Ising asigna a cada configuración ω una

energía $U(\omega)$ que depende principalmente de la interacción entre *espines* y de la presencia de un campo magnético externo, aunque Ising asumió la simplificación de que la interacción relevante entre *espines* solo ocurre entre *espines* vecinos (alejados entre sí solo una unidad). Este estudio de la distribución de *espines* puede hacerse también sobre una rejilla de 2 o más dimensiones.

Siendo N_j el conjunto de vecinos (todos los puntos a una unidad de distancia) de un punto j en la rejilla, se tiene:

$$P(\sigma_j = a | \sigma_k, k \neq j) = P(\sigma_j = a | \sigma_k, k \text{ in } N_j) \quad (\text{F.36})$$

que es un tipo de *propiedad de Markov*, que para el caso de los *espines* dice que la probabilidad de cierto espín en el punto j , dado el valor de espín en todos los demás puntos de la rejilla, es la misma probabilidad de dicho punto j dado solamente los valores de espín en los puntos vecinos del punto j , y de manera general se tiene que la probabilidad condicional del estado de un punto dado el estado del resto de puntos de la rejilla depende únicamente del estado de los puntos vecinos. Una medida de probabilidad que presente esta propiedad se denomina **campo aleatorio de Markov**.

Apéndice G

Introducción a los conceptos básicos de lógica difusa

De manera general, se puede decir que la lógica difusa es una extensión del cálculo lógico binario estándar empleando conjuntos difusos. La palabra “fuzzy”, en la teoría de conjuntos difusos, se usa para describir términos, frases o sentencias que no son suficientemente claras, no son bien conocidas, o su especificación está sujeta a la estimación, subjetividad o intuición de la persona que hace la descripción. Ejemplo: varios, más o menos, muy posible, está muy frío, parcialmente nublado, etc. En un sentido estricto, es un sistema lógico extensión de una lógica multivalor. En un sentido más amplio, es prácticamente sinónima de la teoría de conjuntos difusos, donde los límites son borrosos o difusos y donde la pertenencia de un objeto a uno de estos conjuntos es más bien un *grado de pertenencia* (The MathWorks, Inc., 2006).

El concepto primordial detrás de la lógica difusa es el empleo de variables lingüísticas, variables cuyos valores son palabras en vez de números. Se puede ver como una metodología de computación con palabras en vez

de números. Esto tiene ciertas propiedades interesantes, como la imprecisión propia de las palabras, pero también su relación más estrecha con la intuición humana.

Otro concepto básico en la lógica difusa es el empleo de **reglas difusas** basadas en frases de tipo “**si . . . , entonces,**”. En lógica difusa, el empleo de este mecanismo basado en reglas, aunque presente también en otros métodos de inteligencia artificial, se diferencia de ellos por el manejo de los conceptos de **antecedentes difusos** y **consecuentes difusos**.

El cálculo de las reglas difusas sirve de base para lo que puede ser llamado **Lenguaje de comandos y dependencia difusa** (FDCL, de sus siglas en inglés). En muchas aplicaciones de lógica difusa, una solución consiste en la traducción del lenguaje humano a FDCL.

Volviendo al concepto intuitivo de lógica difusa, esta se vale de la importancia relativa de la precisión: cuán importante es conocer exactamente la respuesta de algo, cuando una aproximación sirve también?. El balance entre el **significado** y la **precisión** es un proceso humano que se lleva a cabo en la vida diaria de las personas.

Se dice de Lotfi Zadeh¹ que es el padre del concepto de lógica difusa (Zadeh, 1965), quien una vez dijo que la mayoría de las aplicaciones de la lógica difusa pueden ser resueltas de otra manera, pero emplear lógica difusa puede resultar más rápido y económico.

Entre las observaciones más relevantes que se hacen acerca de la lógica

¹Lotfi Asker Zadeh. Matemático azerbaiyano profesor de la Universidad de Berkeley. Es famoso por introducir en 1965 la teoría de conjuntos difusos o lógica difusa. Nació en 1921 en Bakú, una ciudad en el mar Caspio de la antigua República Soviética de Azerbaiyán. Después de emigrar a Irán, y estudiar en la Universidad de Teherán, llegó a Estados Unidos en donde continuó sus estudios en el M.I.T., en la Universidad de Columbia y finalmente en la Universidad de Berkeley. Puede leerse una breve biografía en su página oficial, <http://www.cs.berkeley.edu/zadeh/scv.html>

difusa se encuentra que:

- Es un concepto fácil de comprender. La matemática detrás del razonamiento difuso es simple.
- Es una aproximación más intuitiva al problema.
- Es una herramienta flexible, con la que resulta fácil agregar nuevas funcionalidades al proceso sin necesidad de rediseñar todo desde el principio.
- Es tolerante a la imprecisión de los datos, puesto que cualquier medida es imprecisa si se le mira suficientemente cerca.
- Se puede crear un sistema de lógica difusa que modele funciones no-lineales de complejidad arbitraria.

La lógica difusa puede ser construida con base en el conocimiento de una persona experta. Contrario al mecanismo típico de las redes neuronales, por ejemplo, donde se genera un modelo impenetrable por medio de los datos de entrenamiento, la lógica difusa permite basar los modelos en la experiencia de la gente que entiende el problema planteado. Esto es consecuencia directa de la premisa de que la lógica difusa se construye mediante la descripción cualitativa, empleando lenguaje de uso común, siendo fácil de comprender por humanos.

El funcionamiento de un sistema de lógica difusa consiste en mapear un espacio de entrada a un espacio de salida por medio de una serie de reglas de tipo **si . . . entonces**, donde estas reglas se evalúan en paralelo y el orden de evaluación no es importante. Antes de construir un sistema que interprete reglas, se deben definir todos los términos y adjetivos que los describen.

G.1. Conceptos fundamentales

Es necesario comprender 4 conceptos fundamentales que permiten establecer las bases de funcionamiento de la lógica difusa:

1. Conjuntos difusos.
2. Funciones de pertenencia.
3. Operadores lógicos.
4. Reglas de tipo **si ... entonces**.

G.1.1. Conjuntos difusos

Un conjunto difuso es aquel que no posee fronteras o límites claramente definidos. Puede contener elementos de manera **parcial**.

Una forma sencilla de comprender la definición de un conjunto difuso, sería contrastarlo con los conjuntos clásicos. Un conjunto clásico contiene a un elemento, o no lo contiene, pero no hay consideraciones intermedias al respecto. Por ejemplo, el conjunto de los días de la semana contiene, sin duda alguna, al día lunes. De igual manera, sin duda alguna, este conjunto no contiene una manzana.

Si tomamos como ejemplo ahora al conjunto de los números enteros positivos “cercaños a cero”, entra en consideración lo que se entienda por “cercaño” en el contexto del problema. Si se definiera como “todo valor menor que 10”, se puede ver que el empleo de límites precisos deja de ser útil cuando, según la percepción del problema, se cambia el significado de “cercaño”. Si habláramos de la cantidad de accidentes mortales en las carreteras durante el fin de semana, tendría sentido decir que hubo “una cantidad cercaña a cero” habiendo ocurrido 9 accidentes?. Otro ejemplo interesante

sería la definición de salida de voltaje cero de un sensor electrónico dado. Cuándo tiene sentido tomar en cuenta el décimo decimal de la lectura de voltaje del sensor para decidir si su salida es cero o no?. Puede considerarse como salida cero si presenta un valor de 0.0000001? Una respuesta típica de los expertos sería que esa decisión depende del rango de salida del sensor.

En la lógica difusa, entonces, la **verdad** de un planteamiento es más un **grado de verdad** que un valor binario “SI” o “NO”. Esto permite responder a una pregunta de tipo verdadero-falso con una respuesta de tipo “ni tan verdadero, ni tan falso”. Los humanos operamos con este tipo de respuesta mucho más a menudo que con respuestas precisas; sin embargo, en el razonamiento computacional se emplea mucho más el manejo preciso de la información. En la lógica difusa se busca generalizar el concepto Booleano de las respuestas de tipo verdadero-falso.

Si en la lógica Booleana se asigna un valor de 1 a algo verdadero, y un valor de 0 a algo falso, en la lógica difusa se permite también manejar valores intermedios como 0.3 y 0.8.

Consideremos el siguiente ejemplo:

- Pregunta: ¿Es el sábado un día del fin de semana?. Respuesta: 1, o verdadero.
- Pregunta: ¿Es el jueves un día del fin de semana?. Respuesta: 0, o falso.
- Pregunta: ¿Es el viernes un día del fin de semana?. Respuesta: 0.8, o verdadero, la mayor parte del día puede considerarse como fin de semana, pero no todo.
- Pregunta: ¿Es el domingo un día del fin de semana?. Respuesta: 0.95, o verdadero, pero no tanto como lo es el sábado.

La función que definiría la cualidad de “fin de semana” en el tiempo es

una función que asocia el espacio de entrada (tiempo de la semana) con el espacio de salida (cualidad de “fin de semana”). En particular, esta función se denomina **Función de pertenencia**.

G.1.2. Función de pertenencia

Una función de pertenencia, o **MF** por las siglas en inglés de *Membership Function*, es una curva que define cómo cada punto del espacio de entrada es mapeado a un valor de pertenencia (o grado de pertenencia) entre 0 y 1. El espacio de entrada suele denominarse **universo de discurso**.

Tomemos como ejemplo el conjunto borroso de la gente “alta”. En este caso, el universo de discurso lo conforman todas las posibles alturas de las personas; por ejemplo entre 0.5 m y 2.5 m, y la palabra (el adjetivo) “alto” correspondería a una curva que define el grado en que una persona es “alta”. En el caso de que este conjunto tuviera un límite claramente definido, por ejemplo 1.7 m, cualquier persona por encima de 1.7 m sería considerada sin duda como “alta”. Sin embargo, una definición así de nítida puede carecer de sentido en el caso de clasificar a una persona como alta y a otra como baja cuando la diferencia entre ellas es de 1 mm, por ejemplo.

La curva que asigna el grado de “alto” de una persona recibe el nombre de función de pertenencia. Esta curva define la transición desde “no-alto” hasta “alto”. Ambas personas son altas hasta cierto grado, pero una puede ser significativamente menos alta que la otra, por ejemplo.

Resumiendo, se puede decir que los conjuntos difusos describen conceptos vagos (corredor “rápido”, agua “caliente”, días del “fin de semana”, etc.), que admiten la posibilidad de **pertenencia parcial** al conjunto (el agua está más bien caliente, el corredor no es tan rápido, etc.). El grado en el que un elemento pertenece a un conjunto difuso se denomina valor de

pertenencia y es un valor entre 0 y 1 (viernes es un día del fin de semana en un grado de 0.7). Una función de pertenencia, asociada a un conjunto difuso dado, mapea un valor de entrada a su valor de pertenencia apropiado.

G.1.3. Operadores lógicos

La lógica difusa puede verse como un superconjunto de la lógica Booleana estándar. De esta manera, si se llevan los valores difusos a sus extremos, completamente verdadero (1) o completamente falso (0), las operaciones lógicas Booleanas estándar serán válidas.

Debido a que en la lógica difusa la verdad de un planteamiento es más bien un grado de verdad, hay que buscar la manera de extender el concepto de las **tablas de verdad** tradicionales. ¿Si los valores de entrada son números reales entre 0 y 1, qué función preserva los resultados de la función Booleana *AND* y además la extiende a todos los números reales entre 0 y 1? Una respuesta es la función *MIN*, definida como $q = \min(A, B)$. Por medio del mismo razonamiento, se puede reemplazar la función Booleana *OR* por la función *MAX* definida como $q = \max(A, B)$. La función Booleana *NOT*, finalmente, podría ser definida como $q = 1 - A$.

De forma más formal, se está definiendo de esta manera una correspondencia entre operadores lógicos bivalentes y multivalores para las operaciones *AND*, *OR* y *NOT*. Sin embargo, esta correspondencia no tiene por qué ser única. En este caso se ha definido lo que formalmente se conoce como intersección o conjunción difusa (*AND*) como $AND = \min()$, unión o disyunción difusa (*OR*) como $OR = \max()$ y complemento difuso (*NOT*) como $NOT = \text{complemento aditivo}$.

G.1.4. Reglas de tipo si . . . entonces

Se puede decir que los conjuntos difusos y los operadores difusos son los “sujetos” y los “verbos” de la lógica difusa. Las reglas de tipo **si . . . entonces** se usan para formular los planteamientos condicionales que componen la lógica difusa, con la forma: si x es A , entonces y es B ; donde A y B son valores lingüísticos definidos por conjuntos difusos de valores X e Y (universo de discurso), respectivamente.

En esta formulación, la parte “ x es A ” se denomina **antecedente** o **premis**a. La parte “ y es B ” se denomina **consecuente** o **conclusión**. La regla general sería “**si antecedente, entonces consecuente**”. Por ejemplo, se tiene el siguiente planteamiento: “**Si el servicio en el restaurante es bueno entonces la propina es promedio**”. El concepto “bueno” se representa en lógica difusa como un valor entre 0 y 1, por lo que el antecedente es una función de interpretación de “servicio” que devuelve un número entre 0 y 1. Por otro lado, la palabra “promedio” se representa con un conjunto difuso, así como el consecuente es una asignación de un conjunto difuso B a la salida de la variable y . Se observa, entonces, que en una regla difusa, el significado de la palabra “es” cambia según si aparece en el antecedente o en el consecuente.

Interpretar una regla de estas involucra dos pasos importantes: 1) evaluación de los antecedentes (asignar un grado de pertenencia a la entrada y aplicar los operadores lógicos difusos), y 2) aplicar este resultado al consecuente (conocido como *implicación*).

En el caso de lógica binaria, las reglas de tipo **si . . . entonces** se comportan de manera que si, por ejemplo, la premisa es verdadera entonces la conclusión es verdadera. Relajando la restricción de la lógica binaria (bivalente) permitiendo que el antecedente sea un planteamiento difuso, se

obtiene que, retomando el ejemplo anterior, si el antecedente es verdadero hasta cierto grado de pertenencia, entonces el consecuente es también verdadero hasta cierto grado.

Se puede decir que la interpretación de las reglas de tipo **si . . . entonces** consiste en un proceso de tres partes: 1) Fuzificación de entradas, 2) aplicación de los operadores difusos entre las partes del antecedente, 3) aplicar un método de implicación.

La fuzificación de entradas convierte todos los planteamientos difusos en el antecedente a un grado de pertenencia entre 0 y 1.

La aplicación de los operadores difusos entre las partes del antecedente convierte todo el planteamiento del antecedente a un número entre 0 y 1. Este número se denomina grado de soporte de la regla.

La aplicación del método de implicación emplea el grado de soporte de la regla para darle forma al conjunto difuso de salida. El consecuente de una regla difusa asigna un conjunto difuso a la salida, representado por una función de pertenencia que es escogida para indicar la cualidad del consecuente. Si el antecedente es solo parcialmente verdadero (por ejemplo, ha recibido un valor menor que 1), entonces la salida es un conjunto difuso truncado siguiendo la forma dispuesta por el método de implicación.

Generalmente una sola regla no es muy efectiva. Conviene emplearse varias reglas que tomen en cuenta las diferentes posibilidades de las entradas. La salida de cada regla es un conjunto difuso y las salidas de todas las reglas son combinadas en un único conjunto difuso. Este conjunto de salida, al tratarse de un conjunto difuso y no de un valor único, debe ser desfuzificado para obtener este valor.

G.2. Sistema de inferencia Difusa (FIS)

La inferencia difusa es el proceso de formulación de un mapeo entre una entrada dada y una salida por medio de lógica difusa. Este proceso involucra todas las partes antes mencionadas: funciones de pertenencia, operadores lógicos difusos y reglas de tipo *si . . . entonces*.

Dos de los modelos de sistemas de inferencia más comunes son los planteados por Mamdani y por Sugeno; modelos que lleven sus nombres. La diferencia primordial entre estos dos modelos radica en la forma de determinar las salidas.

Entre las aplicaciones en las que los sistemas de inferencia difusa han demostrado ser útiles se encuentran la clasificación de datos, el control automático, análisis de decisiones, sistemas expertos y visión por ordenador. En función de estas aplicaciones, los sistemas de inferencia difusa han recibido diferentes nombres, como sistemas basados en reglas difusas, sistemas expertos difusos, modelado difuso, memoria asociativa difusa, controladores de lógica difusa, y más generalmente sistemas difusos.

El sistema de tipo Mamdani fue empleado en uno de los primeros sistemas de control basado en conjuntos difusos, propuesto por Ebrahim Mamdani en 1975 y 1976 (Mamdani, 1976) como un intento de controlar una combinación de motor a vapor y evaporador por medio de un conjunto de reglas lingüísticas obtenidas de los operarios humanos experimentados. El esfuerzo de Mamdani se basó en el artículo de Lotfi Zadeh del año 1973, “*Fuzzy algorithms for complex systems and decision processes*”.

En la inferencia de tipo Mamdani, se tiene como salidas a funciones de pertenencia que devuelven conjuntos difusos. Después del proceso de combinación de los conjuntos de salida, se obtiene un único conjunto que necesita desfuzificación para obtener un único valor numérico.

Suele ser más eficiente computacionalmente emplear una función de pertenencia en la salida con forma de impulso en vez de un conjunto distribuido. Este tipo de conjunto se denomina función de pertenencia de salida de tipo *singleton*, que puede ser vista como un conjunto de salida pre-desfuzificado, simplificando el proceso de desfuzificación en el que generalmente se busca el centroide de una distribución bidimensional. Entonces, en vez de integrar a lo largo de una función bidimensional buscando el centroide, se emplea un promedio ponderado de algunos puntos, que es computacionalmente mucho más eficiente. De manera general, el sistema de tipo Sugeno soporta este tipo de modelos, pudiendo implementar sistemas de inferencia en los que las funciones de pertenencia de la salida pueden ser de tipo lineal o constantes.

G.3. Pasos para aplicar un FIS

Fuzificación de entradas El primer paso consiste en tomar las entradas y determinar el grado en el cual ellas pertenecen a cada uno de los conjuntos difusos, por medio de las funciones de pertenencia. Esta asignación del grado de pertenencia (función de pertenencia) se logra por medio de una tabla de valores (*lookup table*) o de la evaluación de una función matemática.

Aplicación de operadores difusos Después de asignar un grado de pertenencia a las entradas, se conoce el grado de “satisfacción” o “verdad” que cada parte del antecedente tiene para cada regla. Cuando una regla tiene más de una parte en el antecedente, se aplican los operadores difusos para obtener un valor único para el antecedente de esa regla. Este valor es a continuación aplicado a la función de salida. En otras palabras, las entradas a los operadores difusos son los dos o más valores de pertenencia de los valores “fuzificados” de las entradas, y la

salida es un valor simple de “verdad”.

Aplicación del método de implicación Antes de aplicar el método de implicación, se determina el peso de cada regla. El peso se indica mediante un número asignado a cada regla y que multiplica su salida. Si todas las reglas presentan el mismo peso, el resultado de una regla no tendrá mayor influencia sobre el resultado que otra regla.

Un **consecuente** es un conjunto difuso representado por una función de pertenencia que representa las características lingüísticamente descritas que le son atribuidas. El consecuente es reformado usando la función asociada con el antecedente (un único número). La entrada al proceso de implicación es un número simple dado por el antecedente, y la salida es un conjunto difuso. La implicación se implementa para cada regla.

Combinación de todas las salidas Puesto que las decisiones se toman en función de las pruebas llevadas a cabo por todas las reglas de un FIS, las reglas deben ser combinadas de cierta manera para tomar la decisión. La combinación consiste en obtener un único conjunto difuso de salida dadas las salidas de todas las reglas, y ocurre una sola vez para cada variable de salida, justo antes del último paso, la “defuzificación”. La entrada al proceso de combinación es la lista de funciones de salida truncadas entregadas por el proceso de implicación de cada regla. Por lo general la combinación es acumulativa, por lo que el orden en el que las reglas son examinadas no es importante.

Defuzificación La entrada a este último paso es un conjunto difuso (el conjunto de la salida combinada de las reglas) y la salida es un número único. Así como suele ser conveniente la característica de conjunto difuso que se aprovecha en las reglas, se suele apreciar obtener un valor único como salida. Sin embargo, la combinación de varios conjuntos

difusos es otro conjunto difuso que debe ser desfuzificado para obtener un valor simple. Uno de los métodos más populares para desfuzificar es el cálculo del centroide, entregando como salida el valor del centro del área bajo la curva de la función resultante de la combinación en el paso anterior.

