

# Índice general

<b>1. Motivación, objetivos, y organización de esta tesis</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.3. Organización de la tesis . . . . .	5
<b>2. Introducción a la localización de robots móviles</b>	<b>9</b>
2.1. Sensorización en robótica móvil . . . . .	11
2.1.1. Codificador rotativo. . . . .	12
2.1.2. Sensores de ultrasonido . . . . .	13
2.1.3. Sensor de infrarrojos . . . . .	16
2.1.4. Compás . . . . .	17
2.2. Fusión sensorial . . . . .	18
2.2.1. Fusión Bayesiana . . . . .	20
2.2.2. Fusión basada en la teoria de Dempster - Shafer . . . . .	23
2.2.3. Fusión mediante Filtros de Kalman . . . . .	26
2.3. Representación del entorno. . . . .	27
2.3.1. Mapas topológicos. . . . .	28
2.3.2. Mapas de características geométricas. . . . .	29
2.3.3. Mapas de Ocupación . . . . .	31
2.4. Localización relativa mediante medidas <i>propioceptivas</i> . . . . .	32
2.5. Localización absoluta basada en Hitos o <i>Landmark</i> . . . . .	33
2.6. Localización basada en mapas . . . . .	37
2.6.1. Localización con mapas métricos . . . . .	38
2.6.2. Localización con mapas topológicos . . . . .	38
2.6.3. Localización usando mapas de alta densidad de muestreo . . . . .	39
2.7. Localización y Mapeado: enfoque probabilístico . . . . .	40
2.8. Localización Bayesiana o localización de Markov . . . . .	42
2.8.1. Implementación de la localización Bayesiana o de Markov . . . . .	44
2.8.1.1. Enfoque métrico . . . . .	46
2.8.1.2. Enfoque topológico . . . . .	47
<b>3. Modelado cinemático y localización odométrica del robot diferencial</b>	<b>51</b>
3.1. Modelado cinemático de robot diferenciales . . . . .	52

## ÍNDICE GENERAL

---

3.2.	Análisis de los principales errores de la localización odométrica en un robot diferencial . . . . .	58
3.2.1.	Errores sistemáticos . . . . .	59
3.2.1.1.	Incertidumbre en el diámetro de las ruedas . . . . .	59
3.2.1.2.	Incertidumbre en la distancia entre los puntos de apoyo de ruedas . . . . .	60
3.2.1.3.	Sensor virtual de estado completo basado en codificadores opticos rotativos . . . . .	61
3.2.2.	Errores no sistemáticos . . . . .	64
3.3.	Identificación de los parámetros cinemáticos de un robot diferencial	64
3.3.1.	Determinación de la sensibilidad odométrica . . . . .	65
3.3.2.	Determinación de la base de giro de un robot diferencial . .	68
3.3.3.	Resultados experimentales en el robot YAIR . . . . .	72
3.3.3.1.	Identificación y calibración de parámetros del modelo cinemático . . . . .	72
3.3.3.2.	Resultados para la localización mediante sensores de odometría . . . . .	76
3.4.	Un método automatico para la identificación y calibración multisensorial directa de la cinemática de un robot diferencial. . . . .	79
3.4.1.	Técnica multisensorial de identificación y calibración automática de la odometria en robot diferenciales . . . . .	81
3.4.1.1.	Fundamentos geométricos del movimiento de un robot diferencial . . . . .	82
3.4.1.2.	Esquema y procedimiento experimental del proceso de identificación sensibilidad odometrica . . . . .	83
3.4.1.3.	Esquema y procedimiento experimental del proceso de identificación de la base de giro . . . . .	86
3.4.1.4.	Procedimiento experimental del proceso de calibración . . . . .	86
3.4.1.5.	Detección de valores atípicos. . . . .	88
3.4.2.	Resultados experimentales . . . . .	89
3.4.2.1.	Resultados proceso de identificación . . . . .	90
3.4.2.2.	Resultados en el proceso de calibración odometrica y detección de valores atipicos . . . . .	92
3.4.2.3.	Comparación de resultados autocalibración multisensorial directa vs UMBmark . . . . .	94
<b>4.</b>	<b>Percepción, fusión sensorial y contrucción de mapas</b>	<b>97</b>
4.1.	Construcción de mapas de ocupación mediante datos de ultrasonidos	98
4.1.1.	El SONAR . . . . .	99
4.1.2.	Principales problemas de la medición con SONAR . . . . .	99
4.1.3.	Modelado del SONAR tipo rotativo . . . . .	101
4.1.4.	Modelo probabilista del SONAR . . . . .	104
4.1.5.	Modelo posibilista del SONAR . . . . .	111
4.1.6.	Mejoras al mapeado ultrasónico aplicando máscaras en las esquinas . . . . .	113
4.1.7.	Construcción de mapas de ocupación mediante fusion sensorial.	117

4.1.7.1.	Construcción de mapas mediante fusion bayesiana	118
4.1.7.2.	Construcción de mapas mediante la teoria evidencial	120
4.2.	Construcción de mapas mediante el sensor infrarrojo	122
4.2.1.	Medición de distancias basados en infrarrojos	124
4.2.2.	Modelado de los reflectores extraídos mediante el sensor de infrarrojos	128
4.2.3.	Representación paramétrica del entorno mediante segmentos de líneas	131
4.2.4.	Extracción de líneas mediante métodos recursivos	132
4.2.5.	Construcción incremental de mapas de líneas mediante fusión de datos de infrarrojos	136
4.2.5.1.	Detección e iniciación de los segmentos de línea	137
4.2.5.2.	Agrupación de puntos y segmentación de líneas	139
4.2.5.3.	Correspondencia entre segmentos de línea	141
4.2.5.4.	Mecanismos de fusión de segmentos de línea	143
4.2.6.	Experimentos	144
4.2.6.1.	Configuración experimental	144
4.2.6.2.	Resultados	145
<b>5.</b>	<b>Manejo de la incertidumbre en el sistema, en la medición y en la representación</b>	<b>147</b>
5.1.	Introducción	147
5.2.	Modelo cinemático estocástico de un vehículo de tracción diferencial	149
5.2.1.	Modelo de ruido de un vehículo diferencial	150
5.2.2.	Estimación del error de estado	151
5.2.3.	Modelado de la varianza en los sensores de odometría	154
5.2.4.	Estrategía experimental para determinar la varianza en sensores de odometría	155
5.2.5.	Resultados experimentales en la determinación de la varianza en los sensores de odometría	158
5.3.	Modelo estocástico del sensor de ultrasonidos	160
5.3.1.	Clasificación y extracción de landmark a partir de datos de ultrasonidos	161
5.3.2.	Modelo ideal de un SONAR tipo rotativo	162
5.3.3.	Modelo de ruido del SONAR tipo rotativo	163
5.3.4.	Resultados experimentales en la determinación del ruido sensorial	164
5.4.	Representación del entorno mediante hitos o <i>Landmarks</i>	167
5.4.1.	Modelado de esquinas como landmarks puntuales	168
5.4.1.1.	Sistemas coordenados de referencia	169
5.4.1.2.	El modelo de representación: Transformación de hitos puntuales y propagación de su covarianza al marco Global	171
5.4.1.3.	El modelo de Observación: Transformación de hitos puntuales y propagación de su covarianza al marco Robot	172

5.4.2.	Modelado de paredes y estructuras planas como landmark tipo línea . . . . .	173
5.4.2.1.	Transformación de coordenadas para el modelo Hessiano de línea infinita . . . . .	174
5.4.2.2.	El modelo de observación para líneas Hessiana . . . . .	176
5.5.	Métodos de correspondencia . . . . .	177
5.5.1.	Correspondencia entre landmark tipo puntuales . . . . .	178
5.5.2.	Correspondencia entre líneas . . . . .	180
<b>6.</b>	<b>Construcción de Mapas y Localización Estocástica</b>	<b>183</b>
6.1.	Introducción al enfoque estocástico en la robótica móvil . . . . .	183
6.2.	Construcción de mapas de esquinas . . . . .	186
6.2.1.	El algoritmo de mapeado mediante el Filtro de Kalman Extendido . . . . .	187
6.2.2.	Resultados experimentales extracción y correspondencia de landmark puntuales en la construcción de mapas de esquinas.	189
6.3.	Localización probabilística mediante landmark naturales tipo puntuales . . . . .	193
6.3.1.	El algoritmo de localización mediante hitos tipo puntuales usando el Filtro Extendido de Kalman . . . . .	195
6.3.1.1.	Etapas de predicción. Modelado de la cinemática del vehículo . . . . .	196
6.3.1.2.	Etapas de medición y correspondencia. Modelado de la función de observación . . . . .	198
6.3.1.3.	Etapas de corrección y actualización. Cálculo de la ganancia de Kalman . . . . .	198
6.3.2.	Resultados experimentales en la localización usando esquinas extraídas con un SONAR rotativo. . . . .	199
6.4.	Localización basada en mapas de líneas usando un SONAR y el EKF	205
6.4.1.	Predicción de la posición del vehículo . . . . .	206
6.4.2.	Observación . . . . .	206
6.4.3.	Predicción de las observaciones . . . . .	207
6.4.4.	Correspondencia o asociación de datos . . . . .	207
6.4.5.	Corrección del estado . . . . .	210
6.4.6.	Experimentos . . . . .	210
6.4.7.	Resultados y discusión . . . . .	211
6.5.	Localización y mapeado simultaneo basado en Datos de ultrasonido	213
6.5.1.	El algoritmo de SLAM basado en el Filtro de Kalman Extendido . . . . .	213
6.5.1.1.	El vector de estado . . . . .	215
6.5.1.2.	Predicción del estado . . . . .	215
6.5.1.3.	La observación . . . . .	217
6.5.1.4.	La corrección del estado . . . . .	217
6.5.1.5.	Integración de objetos al mapa . . . . .	218
6.5.2.	SLAM basado en hitos puntuales extraídos con un sensor de ultrasonidos . . . . .	220
6.5.2.1.	Predicción del estado aumentado y de su covarianza	220

6.5.2.2.	Representación del entorno . . . . .	222
6.5.2.3.	Asociación de datos o correspondencia entre hitos puntuales . . . . .	224
6.5.2.4.	Objeto nuevo: incorporación al vector de estado aumentado . . . . .	224
6.5.2.5.	Objeto existente: Corrección del estado estimado del vehículo . . . . .	226
6.5.3.	Resultados experimentales del SLAM usando esquinas como hitos puntuales . . . . .	228
<b>7.</b>	<b>Conclusiones, trabajos futuros, y publicaciones</b>	<b>235</b>
7.1.	Sumario y Conclusiones . . . . .	235
7.2.	Trabajos futuros . . . . .	241
7.3.	Publicaciones relacionadas a esta tesis . . . . .	243
<b>A.</b>	<b>Localización de Markov</b>	<b>249</b>
A.1.	Certidumbre o Confianza ( <i>Belief</i> ) . . . . .	249
A.2.	Modelo probabilístico de actuación del robot . . . . .	250
A.3.	Modelo probabilístico de medición . . . . .	251
A.4.	Algoritmo de Localización de Markov . . . . .	251
A.4.1.	Confianza inicial . . . . .	252
A.4.2.	Predicción de la certidumbre . . . . .	252
A.4.3.	Corrección de la confianza . . . . .	254
A.4.4.	Fórmula de localización de Markov . . . . .	255
<b>B.</b>	<b>Filtro de Kalman</b>	<b>257</b>
B.1.	Conceptos y asunciones básicas del Filtro de Kalman . . . . .	258
B.2.	Algoritmo del Filtro del Kalman lineal . . . . .	259
B.2.1.	Predicción . . . . .	260
B.2.2.	Corrección . . . . .	260
B.2.3.	Actualización de la covarianza . . . . .	261
B.2.4.	Parámetros y ajuste del Filtro de Kalman . . . . .	262
B.3.	Filtro de Kalman Extendido - EKF . . . . .	262
<b>C.</b>	<b>Estimación de parámetros mediante Mínimos Cuadrados</b>	<b>265</b>
C.1.	Mínimos Cuadrados Generalizados . . . . .	266
C.2.	Mínimos Cuadrados Recursivos . . . . .	268