



# Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

---

---

Facultad de Ciencias de la Computación

“Navegación segura de robots móviles:  
Exploración, localización y construcción de mapas”

Tesis Profesional

Para obtener el título de:  
Ingeniero en Ciencias de la Computación

Presenta  
Viridiana Rubí Calzada Navarrete

Asesor  
Dr. Abraham Sánchez López

Puebla, Pue.

Enero 2010



## Resumen

Esta tesis estudia el problema de la localización de un Vehículo Autónomo Guiado (AGV) a través de un ambiente desconocido. En este problema, el AGV tiene la doble tarea de modelar el ambiente al mismo tiempo que, simultáneamente localiza su posición dentro de éste.

Para su respectiva solución se presenta una formulación matemática del problema de localización en función de la generación simultánea del mapa de ambiente. El problema de localización, es definido como el problema de la determinación de la posición y orientación, de un vehículo que evoluciona dentro de un ambiente, basándose en las observaciones del ambiente obtenidas de manera relativa al vehículo. La técnica particular tomada para resolver el problema es formular una estimación probabilística de la posición del vehículo. Dicha estimación será formulada usando el algoritmo del Filtro de Kalman.

Examinaremos la aplicación del filtro de Kalman al problema de generación de mapas y localización simultánea (SLAM). Una solución a este problema permitiría a un vehículo comenzar desde una localización desconocida y en un ambiente desconocido y a partir de ahí construir un mapa en el cual localizarse a si mismo; con el fin de conseguir un comportamiento de navegación autónomo.

El mapeo y la localización simultáneas es un problema fundamental y complejo en la investigación de robótica móvil. En este problema, un robot móvil y sus sentidos exploran una región desconocida, construye un mapa y se localiza en el mapa.

La robótica de exploración es otra área de investigación relacionada con la predicción de la región inexplorada. La exploración es la tarea de guiar un vehículo en el mapa, que cubre el ambiente con sus sensores, es decir, el robot móvil tiene que decidir el próximo objetivo de exploración que ofrece el beneficio más importante de una región inexplorada. A partir de este concepto, el método de navegación basado en la frontera se utiliza ampliamente en la exploración de los robots móviles. Muchas estrategias de exploración eligen la siguiente acción basándose en los criterios anteriores.

El paradigma de la exploración integrada requiere una evaluación equilibrada de las acciones alternativas propuestas desde el punto de vista de obtener información, la calidad de la localización y el costo de navegación.

Un método aleatorio para la exploración integrada se basa en la generación incremental aleatoria de una estructura de datos llamada árbol aleatorio de exploración usando sensores (SRT), un procedimiento de localización continua basada en las características naturales de la región segura, como lo es el filtro de Kalman, se integró en el método, es decir, la información el potencial de ganancia y la localización son considerados cuando se evalúa el algoritmo de configuraciones de candidatos para la exploración.



# Contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>3</b>
<b>Contenido.....</b>	<b>5</b>
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Introducción.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Motivación.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2. Estado del Arte.....</b>	<b>9</b>
<b>1.3. Planteamiento de la problemática .....</b>	<b>13</b>
<b>1.4. Objetivo.....</b>	<b>16</b>
<b>1.5. Características y restricciones del sistema .....</b>	<b>17</b>
<b>1.6. Aportaciones de la investigación.....</b>	<b>18</b>
<b>1.7. Descripción del documento.....</b>	<b>18</b>
<b>Capítulo 2</b>	
<b>Navegación Autónoma del Vehículo.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1. Introducción.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2. Sistemas de percepción .....</b>	<b>20</b>
2.2.1. Introducción .....	20
2.2.2. Las cámaras de video .....	22
2.2.3. Los telémetros .....	23
2.2.3.1. Ultrasonidos.....	23
2.2.3.2. Telémetros láser.....	24
2.2.3.2.1 Clasificación de los telémetros láser.....	25
2.2.3.2.2 Características de los telémetros.....	26
2.2.3.3. Los radares .....	28
<b>2.3. Sistemas de localización.....</b>	<b>28</b>
2.3.1. Introducción .....	28
2.3.2. Mediciones de posición relativa .....	29
2.3.2.1. Navegación inercial.....	29
2.3.2.2. Odometría.....	29
2.3.3. Mediciones de posición absoluta.....	30
2.2.3.1. Principio general.....	30
2.3.4. Métodos de localización .....	32
2.3.4.1. Primeros sistemas de localización .....	32
2.3.4.2. Posicionamiento de señales activas .....	34
2.3.4.3. Mapas .....	37
2.3.4.3.1. Localización con un mapa ‘a priori’ .....	37
2.3.4.3.2. Construcción del propio mapa .....	38
2.3.4.4. Localización mediante índices visuales.....	40
2.3.4.5. Tipo de sensor e índice usado.....	41
2.3.4.6. Localización basada en filtros .....	42
<b>Capítulo 3</b>	
<b>Exploración integrada basada en SRT-EKF.....</b>	<b>45</b>

<b>3.1 Exploración integrada .....</b>	<b>45</b>
<b>3.2. Método SRT para ambientes desconocidos .....</b>	<b>46</b>
3.2.1. Algoritmo SRT-EKF.....	48
<b>3.3 El filtro de Kalman extendido .....</b>	<b>48</b>
<b>3.4 Algoritmo exploración integrada.....</b>	<b>52</b>
 <b>Capítulo 4</b>	
<b><i>Simulación y resultados experimentales.....</i></b>	<b><i>56</i></b>
<b>4.1. Proceso de creación del sistema .....</b>	<b>56</b>
4.1.1. ¿Qué es? .....	56
4.1.2. ¿Qué hace? .....	56
4.1.3. ¿Cómo está hecho?.....	56
4.1.4. ¿Cómo funciona?.....	57
<b>4.2. Resultados experimentales.....</b>	<b>62</b>
<b><i>Conclusiones y trabajos futuros.....</i></b>	<b><i>67</i></b>
<b><i>Referencias.....</i></b>	<b><i>68</i></b>

# Capítulo 1

## Introducción

El estudio de la navegación de robots móviles es el medio que nos permite conocer las formas de desplazar un vehículo de una posición inicial a una posición final. Esta acción, pese a su sencillez inicial, necesita de un gran número de detalles, especificaciones, requerimientos y tareas a llevar a cabo, como son: el modelado del ambiente, la percepción, la localización y la planificación de caminos, para los cuales hay que establecer soluciones a priori. La presente tesis aborda parte de esta problemática:

- 1) El modelado del ambiente en función del estudio de los datos del ambiente, percibidos mediante elementos específicamente dedicados a ello.
- 2) La localización simultánea del vehículo dentro de ese ambiente modelado a partir de datos percibidos.

En este capítulo introducimos al lector en la problemática tratada, así como en la motivación e interés por el desarrollo de este trabajo. Finalmente se presenta una breve descripción de cada capítulo con el fin de mostrar la organización del mismo.

### 1.1. Motivación

La introducción de la movilidad dentro de la robótica ha sido un elemento muy importante para muchas aplicaciones y tareas humanas. Un robot móvil puede ahora sustituir al hombre en trabajos tediosos, fatigantes, peligrosos o irrealizables por los humanos. Revisando la bibliografía podemos citar la intervención de robots en lugares hostiles donde el aire es irrespirable, en centrales nucleares, en el espacio, en los océanos, o en ciertos trabajos repetitivos en donde no se requieren las capacidades intelectuales de un operador humano. El estudio de esta área suena interesante y vasto, al ver que en muchas de las aplicaciones que ocupan a la navegación, se requiere dotar de ciertas capacidades al robot para que éste pueda seguir con precisión una trayectoria definida parcial o totalmente, evitar obstáculos imprevistos, acercarse a una estación para recargar su batería o para descargar el material transportado, generar un mapa general del entorno en el que trabaja, en el caso de que no lo conozca y localizarse con respecto a él, etc., haciendo así, intervenir lo menos posible al operador humano.

La navegación es una tarea sumamente importante dentro de la robótica móvil, ésta constituye un elemento esencial para el control de la función de movilidad. Ésta le permite al robot, por ejemplo, pasar o no por un lugar preciso, en función de los datos calculados a priori. Un robot deberá navegar de alguna manera dentro de un ambiente dado para ejecutar una tarea encomendada. Para el logro de esta tarea se necesita que los niveles de decisión del robot tengan a su disposición suficientes elementos del ambiente (primitivas), provistos por subsistemas de percepción.

La complejidad de la navegación se deriva de un sin número de variantes relacionadas con las características del propio vehículo, los medios de percepción a emplear, el tipo de tarea a ejecutar y hasta el tipo de ambiente en el que se va a evolucionar. Aunque todos estos factores tienen un compromiso para el desarrollo exitoso de un sistema de navegación, el ambiente es sin duda el elemento determinante. Muchos de los sistemas hasta la fecha desarrollados se basan en ambientes bien conocidos y poco variantes o que varían de una manera conocida. Sin embargo mientras más abierto es el ambiente, el robot debe tener mayor capacidad y robustez en su sistema para hacer intervenir lo menos posible al hombre. Esto es y ha sido hasta la fecha un interesante reto para quienes desarrollan sistemas de navegación para robots móviles.

Una de las tareas claves de la navegación es la localización (i.e. conocimiento de su posición global y seguimiento de su posición local).

Un sistema de robótica móvil requiere para la navegación tener conocimiento de su localización y un conocimiento preciso del ambiente. Es por esto que en todo sistema de navegación se incluye un módulo de localización y otro de percepción, con esta estructura el módulo de localización provee una estimación fiable de la posición del vehículo usando el conocimiento del ambiente.

El desplazamiento de robots móviles es un entorno de estudio que se encuentra actualmente en pleno apogeo. Tanto si se estudian algoritmos para el desplazamiento de éstos en ambientes conocidos o desconocidos. En ambos casos, el uso de técnicas de simulación tanto del robot como de los sensores que éste utilice, nos permiten estimar el comportamiento a priori del robot, antes de realizar pruebas en robots físicos. En el caso de la segunda opción, es decir, desplazamiento de ambientes desconocidos, los expertos se enfrentan a dos problemas: la generación del mapa de ambiente donde el robot se mueve y la localización de éste dentro de dicho ambiente. Para solucionar este problema, nos servimos de lo que conocemos como Técnicas SLAM.

La localización del robot móvil es el problema de estimar la postura de un robot (la posición, la orientación) en relación con su ambiente. El problema de localización es un problema clave en la robótica móvil. Ocasionalmente, esto se ha mencionado como "el problema más fundamental para proveer a un robot móvil de capacidades autónomas".

El problema SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) responde a las capacidades autónomas de un robot, es posible para un vehículo autónomo, comenzar en un posición desconocida, en un ambiente desconocido y luego ir construyendo un mapa de este ambiente mientras simultáneamente se usa éste mapa para calcular la posición absoluta del vehículo y permitirle al robot la navegación.

Así la ventaja principal del SLAM es que elimina la necesidad de infraestructuras artificiales o del conocimiento topológico a priori del ambiente. Una solución al problema del SLAM sería de valor inestimable en una gama de usos donde es inalcanzable la posición absoluta o la información exacta del mapa del ambiente, incluyendo, entre otras,

exploración planetaria autónoma, los vehículos autónomos submarinos, los vehículos autónomos de aerotransporte, y los vehículos todo terreno autónomos en tareas tales como minar y construcción. En este trabajo se desarrollará una interfaz para la simulación de la construcción de mapas que explotan la topología del espacio libre del robot, al mismo tiempo permite su localización sobre el mapa parcialmente construido, mediante la introducción de las características físicas del robot así como de los datos sensoriales.

El objetivo principal de este trabajo es llevar a cabo un análisis de los factores que intervienen en las tareas de generación de mapas de ambientes desconocidos por el robot en función de los datos perceptivos y localización del mismo dentro de éste, y en base a ello, presentar un conjunto de propuestas de solución sabiendo que estas problemáticas son hasta la fecha tareas complejas e importantes, y por lo tanto constituyen un caso de estudio abierto.

## 1.2. Estado del Arte

### **Hacia una navegación autónoma y segura**

Los trabajos de investigación efectuados en el área de la robótica móvil de interiores, desde la aparición del primer robot móvil Shakey, convergen hacia un objetivo común: “dotar al robot móvil de funcionalidades tales que el pueda efectuar sus tareas de manera eficaz, evolucionando de manera autónoma y segura en ambientes desconocidos a priori, complejos y dinámicos” Entre estas funciones requeridas por un sistema robótico móvil para alcanzar este objetivo, ciertas son primordiales [18]:

**Percepción y modelización del ambiente:** El robot móvil debe poseer un sistema de percepción capaz de proporcionar informaciones precisas sobre el estado del ambiente que lo circunda, con el fin de poder identificar y reagrupar los elementos útiles para una representación confiable y consistente de este ambiente. El conocimiento sobre el ambiente y su gestión en el transcurso del tiempo, juega un rol preponderante sobre todo el proceso decisional concerniente al movimiento del robot.

**Localización:** El éxito en la ejecución de una tarea asociada a un desplazamiento esta directamente ligado a la capacidad del robot móvil a posicionarse en relación a su ambiente. Esta localización debe ser lo más precisa posible, y depende de la fiabilidad de la representación del ambiente construido por el sistema de percepción del robot.

**Control de la ejecución de movimientos:** El robot móvil debe ser capaz de desplazarse de manera segura a través del espacio libre del ambiente a una velocidad constante satisfactoria, tomando en cuenta la presencia de eventuales obstáculos estáticos y móviles. La robustez en la ejecución del movimiento será en función de la capacidad que tendrá el robot móvil de controlar su interacción con su ambiente próximo. El control de esta interacción Robot/Ambiente dependerá de las características y del desempeño del sistema de percepción del robot.

**Planificación:** Un robot que se encuentra en un ambiente largo y complejo debe disponer de un cierto nivel de planificación de acciones. La planificación interviene en el nivel reactivo local y concierne al control de la ejecución del movimiento, y en el nivel decisional global concierne la navegación a largo término. El nivel reactivo local es función de la percepción común del ambiente alrededor del robot, mientras que el nivel decisional global está asociado a la representación del ambiente construido en el transcurso del desplazamiento del robot.

Estas funciones no son independientes. Podemos notar evidentemente que la percepción del ambiente interviene en todo., y, por ejemplo, la representación del ambiente es necesaria en la etapa de planificación así como también en la metodología de planificación del robot. Se acostumbra llamar a esta problemática general: “La navegación autónoma y segura”.

### **Navegación deliberativa contra comportamiento reactivo**

La problemática de la navegación en robótica móvil ha evolucionado, como se podía prever en función de la disponibilidad de las nuevas tecnologías notablemente en lo que respecta a las arquitecturas de percepción embarcadas (FPGA's). La elección en el nivel de percepción influye de una manera determinante en la concepción de todas las capas de una aplicación de navegación autónoma. La tendencia de los trabajos que se han presentado en los últimos años es de poner en marcha modelos de percepción cada vez más ricos fusionando diferentes modalidades sensoriales y tomando en cuenta los modelos de incertidumbre adaptados a las tareas robóticas y técnicas robustas de estimación capaces de rechazar las medidas aberrantes.

En ciertos sistemas de navegación pioneros, los datos resultantes de la percepción son utilizados únicamente en la construcción de un modelo representativo del ambiente; éste modelo sirve a la planificación de trayectorias de referencia destinadas a ser ejecutadas por el robot. Estas representaciones del ambiente están construidas a partir de medidas inciertas proporcionadas por los sensores, y no representan más que modelos aproximados y simplificados del ambiente real. Durante la realización de estas trayectorias, el desplazamiento del robot es controlado ya sea en ciclo abierto, o en ciclo cerrado sobre los datos proporcionados por los sensores **propioceptivos** (odometría o sensores inerciales). Podemos notar que los desplazamientos realizados son poco seguros ya que están basados sobre modelos inciertos con una hipótesis fuerte que supone que el ambiente es estacionario y no puede tomar en cuenta una modificación de éste durante la fase de desplazamiento. Estos enfoques no son absolutamente reactivos a los eventos ya que pueden sobrevenir durante la navegación entre dos actualizaciones de la representación del ambiente.

Para disminuir esta limitación, un nuevo enfoque, introducido por R. Brooks, apareció a mediados de los años 80's. Este enfoque denominado comportamental o reactivo, no presupone mas la construcción y el mantenimiento de un modelo del ambiente como soporte a la planificación pero una navegación basada sobre el control de

las interacciones entre el robot y su ambiente inmediatamente percibido a través de los sensores exteroceptivos. De esta manera, los aspectos de decisión en el sistema de navegación no son mas establecidos sobre modelos del ambiente, mas bien directamente a partir de los datos perceptuales [48]. Las metodologías propuestas sitúan a la percepción del ambiente en el centro del sistema de decisión, de tal manera que el robot reaccione a las estimulaciones percibidas desde la salida de los sensores. Esta nueva manera de orientar el problema de la navegación es un paso hacia la problemática asociada a la navegación autónoma y segura, en el sentido de la importancia de la percepción del ambiente durante la ejecución de la tarea. Sin embargo este comportamiento puramente reactivo, no puede responder a las funcionalidades requeridas en el contexto de una navegación autónoma y segura, notoriamente debido al hecho de la ausencia de un modelo que hacen imposible la definición de estrategias de desplazamiento apoyadas sobre un razonamiento geométrico.

Un compromiso entre los dos enfoques: deliberativo y comportamental, es a menudo indispensable. Las metodologías de navegación han evolucionado en el sentido de un complemento entre los beneficios de una representación del ambiente en la planificación de largos desplazamientos y la robustez de una navegación basada sobre los datos de percepción local [18]. Los métodos recientes explotan la dependencia que existe entre las diferentes funciones requeridas para la navegación autónoma y segura, por ejemplo la modelización del ambiente y la localización del robot se hacen de una manera simultanea, La planificación y la ejecución del movimiento son estudiadas en el formalismo unificado de la navegación usando sensores.

### **Localización y modelización del ambiente**

Un robot móvil que evoluciona en un ambiente desconocido a priori, debe de ser capaz de extraer, a partir de los **sensores exteroceptivos**, elementos de percepción particulares que permiten crear y mantener una representación del ambiente. Es igualmente indispensable en un contexto de navegación autónoma poder localizar al robot en relación a su ambiente. Los enfoques recientes proponen abordar estos dos problemas en un estudio único. La modelización del ambiente y la determinación de la posición del robot son entonces directamente influenciados por la incertidumbre inherente a los desplazamientos del robot y a la percepción del ambiente. Los métodos de localización y de modelización simultáneos pueden ser reagrupados en dos categorías, en función del tipo de representación utilizada:

- Las representaciones métricas: Están basadas sobre una percepción geométrica del ambiente a través de sensores tales como la telemetría láser o la visión.
- Las representaciones topológicas: Estas se apoyan sobre una descripción simbólica de los lugares, piezas, pasillos, y de las relaciones de accesibilidad entre ellas.

Los modelos métricos y topológicos pueden ser explotados conjuntamente en una representación mixta o híbrida.

### **La representación métrica**

La modelización métrica está generalmente asociada a los sensores que proporcionan una medida de distancia entre el robot y los objetos del ambiente, como los ultrasónicos, los sistemas de telemetría óptica, los sistemas de visión estereoscópica o una combinación de diferentes sensores. Dos enfoques se han desarrollado en paralelo dado que la modelización se apoya sobre una representación por primitivas geométricas o una representación por rejillas de ocupación. En el primer enfoque, el modelo del ambiente es construido a partir de la geometría de los elementos que la componen [26,40]. En el segundo enfoque, el soporte a la representación del ambiente es una rejilla discreta sobre la cual se evalúa a partir de los datos sensoriales, para cada una de las células, la probabilidad de que la célula pertenezca a un obstáculo o al espacio navegable [78]. La representación métrica del ambiente se afina de una manera incremental basándose sobre las observaciones sucesivas del ambiente efectuadas durante el desplazamiento del robot. De este hecho la fiabilidad y la confianza acordes a la representación dependen de los modelos de incertidumbre asociados al desplazamiento del robot y a las observaciones del ambiente.

### **La representación por primitivas geométricas**

La construcción y la actualización de una representación (carta) métrica basada sobre las primitivas geométricas consta de tres etapas: la elección de primitivas geométricas que constituirán los elementos característicos de base de la representación, la caracterización de estos elementos en la observación común y la actualización de la carta global durante el transcurso de la construcción integrando los elementos de observación local común. Para que este proceso funcione, es necesario que en cada observación local, exista un conjunto **novicio** de elementos característicos correspondientes a los elementos físicos de la escena ya observados y presentes en la carta global común. A estos elementos característicos se les asocia un modelo de incertidumbre que es función de las características del sensor y del proceso de medida. Después de un desplazamiento elemental de la base móvil (una predicción del desplazamiento relativo es generalmente proporcionado por un sistema **odométrico** de sensores **propioceptivos**), un nuevo conjunto se extrae de la observación local. Los dos conjuntos son correlacionados buscando las primitivas que representan los mismos objetos de la escena por el sesgo de una función de similaridad. La localización del robot se efectúa a partir de una *fusión*, de manera probabilista, entre el resultado de la correlación y la información disponible sobre el desplazamiento relativo del robot. La representación métrica del ambiente en el transcurso de construcción, es igualmente actualizada. Estas dos etapas son frecuentemente expresadas en términos del problema de estimación no lineal y resueltas utilizando un **filtro de Kalman extendido**. Esta dualidad localización/modelización del ambiente es la base de una clase de métodos reagrupados bajo el término de localización y mapeo simultáneos, del inglés SLAM (Simultaneous Localization And Mapping). Los diferentes trabajos sobre la localización y la cartografía simultáneos se diferencian por: i) el tipo de **sensor exteroceptivo** y la naturaleza de las primitivas geométricas utilizadas, ii) El modelo de incertidumbre asociado a las medidas exteroceptivas y a las medidas **propioceptivas** sobre el movimiento de la base móvil, iii)

La metodología utilizada en la fusión entre la observación del ambiente y la predicción del desplazamiento relativo del robot.

### 1.3. Planteamiento de la problemática

Hay muchas razones por las que los robots deben navegar. Por un lado, los robots móviles son plataformas de investigación con el propósito de estudiar la inclusión de máquinas inteligentes y su interacción con el ambiente. Por otro lado, el siguiente nivel de automatización en las sociedades industrializadas requerirán de movilidad autónoma.

La movilidad implica percepción la cual implica ruido y ambigüedad en la información sensorial. Los modelos de sensor probabilístico son puntos iniciales para la representación, propagación y reducción de la incertidumbre en los siguientes estados de percepción, estimación y decisión tomados [2].

El éxito de la navegación radica en el éxito de cuatro bloques básicos [72]:

- **La percepción;** el robot debe interpretar sus sensores para extraer datos importantes,
- **La localización;** el robot debe determinar su posición en el ambiente,
- **La cognición;** el robot debe decidir como actuar para realizar sus objetivos, y
- **El control del movimiento;** el robot debe modular el funcionamiento de sus motores para lograr la trayectoria deseada.

Analicemos cuáles son los problemas que conlleva el éxito de la percepción y la localización, ya que son bloques de interés para nuestro trabajo.

¿Qué implica el éxito de la percepción y la localización?, implica un compromiso entre los elementos de los que se dispone (dispositivos, metodologías y herramientas, entre otros.), y las características del problema que se tiene (tipo de ambiente, tipo de tarea, etc.). Este compromiso involucra el análisis de un sin número de factores, los cuales para ser resueltos deben estudiarse y ensamblarse de manera que exista una buena coordinación entre ellos. Nuestra discusión entonces se centrará en dichos factores.

La localización se desarrolla haciendo uso de dos tipos de mediciones, las mediciones de posición relativa y las informaciones de posición absoluta [13]. Esto involucra dos problemáticas: que tipo de sensor usar para recabar dicha información y cómo hacer uso de esa información para resolver la tarea de posicionamiento.

La elección del sensor de posición relativa tal vez no sea tan compleja. Para casi todas las aplicaciones de la navegación podemos siempre encontrar una combinación apropiada de sensores relativos que pueden ser usados para obtener una razonable estimación de la localización del vehículo. En este caso, más que la elección del sensor plantearíamos como problema la incertidumbre en las mediciones. Todo dispositivo de

percepción tiene imprecisiones al realizar sus mediciones. Estas imperfecciones se pueden traducir como errores en los datos. Podemos considerar dos tipos de errores [58]:

- **Sistemáticos.** Este tipo de errores pueden de alguna manera ser determinados, como por ejemplo diferente diámetro en las llantas o mala alineación, resolución finita de los codificadores, etc. El problema con estos errores es que son acumulativos.
- **No Sistemáticos.** Los errores no sistemáticos son más difíciles de modelar ya que estos aparecen inesperadamente (por ejemplo, cuando el robot atraviesa una superficie irregular o se atraviesa un objeto inesperado sobre el piso, un deslizamiento de la llanta por no tener punto de contacto con el suelo, etc.), y pueden causar grandes errores de posición [13].

En cuanto a los sensores para mediciones de posición absoluta el problema es más complicado. Según Guivart y colaboradores [37], plantean que aunque existen diversos tipos de sensores externos sólo unos pocos pueden ser usados en aplicaciones específicas y su fiabilidad dependerá del ambiente de operación. En la navegación podemos apenas mencionar cuatro sensores que son los potencialmente explotados: las cámaras, los ultrasonidos, el láser y los radares. Cada uno de estos sensores tiene sus propias carencias y potencialidades. Es importante hacer un análisis de ellos y evaluar con respecto al ambiente de operación cual puede darnos un mejor rendimiento bajo esas condiciones operacionales dadas. Por ejemplo, implementaciones con sistemas GPS han demostrado tener una gran precisión en la localización de vehículos, sin embargo esta precisión puede no ser garantizada en la mayoría de ambientes donde la oclusión satelital y las múltiples desviaciones de la medición pueden impedir la operación normal del receptor del sistema [37].

Una vez seleccionado el sensor podemos hablar de otro problema importante: ¿Cómo tratar los datos que obtendremos del ambiente? El sensor nos brinda una lista de mediciones las cuales por si solas pueden no arrojar información relevante, o contrariamente, arrojar excesiva información lo cual nos dificulta su entendimiento e interpretación; aunado a esto, sabemos que la información es corrupta debido a las imprecisiones del sensor en el proceso de captura.

Trabajar con todos los datos en bruto puede generar un proceso lento y resultados poco fiables. Los datos adquiridos deben seguir un proceso de tratamiento con el objetivo de lograr una información más robusta y compacta del ambiente, facilitando por ende una interpretación adecuada.

Un proceso general de tratamiento puede estar basado en los siguientes procesos [13]:

- **Limpieza de los datos**, debido al ruido que estos contienen,
- **Detección de regiones**, para encontrar áreas de interés en los datos,
- **Extracción de características**, para representar con datos simplificados (generalmente numéricos) las regiones de interés con el objetivo de agilizar el

proceso, e

- **Interpretación de los datos**, para encontrar lo buscado.

Siegwart [72], por su parte, considera cuatro factores como esenciales en la resolución de la extracción de características; nosotros los tomamos considerando que pueden extenderse a todas las etapas mencionadas:

**Ambiente de operación.** Para que las características geométricas sean útiles estas deben ser representativas del ambiente. Por ejemplo, la extracción de líneas pueden ser de gran utilidad para representar ambientes tipo oficina en donde un sin número de objetos pueden describirse mediante ellas (segmentos de pared rectos, escritorios, archiveros, etc.). Estas características, por ejemplo, serían poco útiles en ambientes naturales exteriores.

**Sensores disponibles.** El tipo de sensor a usar, considerando el tipo de dato que nos proporciona y el tipo de errores que involucra. Por ejemplo, con la utilización de un telémetro láser se puede explotar la información geométrica que es posible obtener directamente de ellos. Con la utilización de este dispositivo se pueden extraer características geométricas, como la extracción de esquinas, dada su alta calidad angular y su resolución en la medición de la profundidad. En contraste, un sonar no sería apropiado para la extracción de este tipo de característica.

**Poder computacional.** Los procesos empleados pueden requerir un gran costo computacional. Para la navegación en tiempo real, por ejemplo, la rapidez en los procesos es fundamental, ya que los tiempos de respuesta requeridos son cortos considerando que el robot debe tomar una decisión a lo largo de su desplazamiento.

**Representación del ambiente.** En ocasiones la navegación puede valerse de simples primitivas geométricas y en otras puede requerir de una descripción más precisa del ambiente. En este último caso la interpretación tal vez requiera reconocer un objeto o generar un mapa del ambiente.

Finalmente otro problema característico es cómo hacer uso de la información cuando ésta proviene de diferentes fuentes y en tiempos distintos. Este problema está relacionado con la utilización de filtros generalmente estadísticos, los cuales deben ser estudiados para determinar su desempeño en función de los factores ya mencionados.

En los últimos años, un gran número de investigadores se han esforzado en buscar solución al problema de las incertidumbres en robótica, un problema de gran importancia puesto que es el núcleo de muchas cuestiones, como son el modelado y automatización de las tareas de manipulación, datos multisensor, representación de ambientes a partir de una serie de datos obtenidos, etc. Los últimos problemas encontrados se han centrado en la movilidad autónoma de los robots. Además, sea cual sea la técnica de percepción (estereovisión, combinación de sensores...), la misma cuestión tiene que ser resuelta: ¿Cómo construir una representación del ambiente incrementalmente, mientras se localiza el robot móvil en él?, ambas tareas, relacionadas con los datos de los sensores, con la

tarea específica del robot y principalmente con la tarea de navegación.

Una cosa más a tener en mente, como ya hemos dicho anteriormente, son los errores y en el caso de no ser tomados en cuenta, podrán dar lugar a modelos inconsistentes. Es necesario dotar a los robots con la capacidad de representación y manipulación de errores ocurridos durante la fase de percepción por cualquiera que sea el dispositivo que desempeñe tal tarea, además de algoritmos de representación. También, es necesario dotar al robot de la capacidad concurrente de desarrollar el ambiente al mismo tiempo que este se desplaza, lo que hace más complicado su localización constante.

Todo ello, no es más que el comienzo, como hemos ya mencionado, frente a un problema mayor; el problema de la fusión de los datos multisensores en su aspecto temporal y espacial.

## 1.4. Objetivo

Esta tesis examina el problema de la localización de un vehículo móvil dentro de un entorno inexplorado previamente. El problema es atacado usando el vehículo en sí para la construcción del mapa y simultáneamente usando ese mapa para localizarse dentro de él. Se adoptó la idea de agregar al método SRT (exploración de ambientes desconocidos) un módulo de localización, con lo cual obtenemos una solución más eficiente que el mismo SLAM. Es decir, se considera dentro de la estrategia, el control de movimiento.

Derivado de éste objetivo general se plantean los siguientes objetivos:

- Establecer las bases teóricas para el entendimiento del problema de Exploración Integrada, especificando como una solución puede ser formulada.
- Identificar cualquier característica significativa de la solución teórica, en particular cualquier evento inesperado que pueda ocurrir o si existen límites en la creación del mapas y localización del vehículo.
- Presentar ciertas soluciones al problema de Exploración Integrada.
- Evaluar estas posibles soluciones
- Implementar una solución práctica mediante un sistema software apoyada sobre los conocimientos teóricos y que corrobore la veracidad de lo presentado.

El objetivo general de esta investigación es el de realizar un estudio en profundidad sobre el llamado problema SLAM, dando su precisa descripción, así como la de todos los factores que intervienen en él y los problemas que lo convierten en un problema de mayor índole, así como cada uno de los problemas en los que deriva. Se analizarán cada uno de los elementos que de alguna manera intervienen en él, tanto del ambiente como del robot y sus sistemas de navegación, incluyendo sistemas de percepción, y localización, dando un completo detalle y explicación de cada uno de ellos; especificaciones, utilización, problemáticas...

También se realizará un estudio de las posibles soluciones a dicho problema, así como un análisis de cada uno de los requerimientos que son necesarios para solventar cada uno de los problemas a los que nos enfrentamos al abordar el problema SLAM.

Y por último, toda la explicación teórica de esta tesis quedará plasmada y demostrada mediante una herramienta software, implementada con técnicas planteadas para dar solución al problema SLAM, previamente estudiadas en esta tesis, como es el caso del Filtrado de Kalman, que permitirá la simulación del desplazamiento de robots móviles en ambientes desconocidos, construyendo y graficando el mapa de ambiente y localizando el vehículo dentro de éste, mediante la utilización de datos obtenidos de distintos tipos de sensores.

## **1.5. Características y restricciones del sistema**

La mayoría de los ambientes del mundo real proporcionan objetos los cuales son muy útiles para la navegación y cuyos datos pueden ser extraídos y transformados en datos útiles por un sensor.

La navegación en ambientes conocidos y especialmente, en ambientes desconocidos, sobre los que nosotros trabajamos, cubre un amplio rango de problemas, en el caso de los sensores; errores de sensado, tratado o evaluación de los datos del sensor, así como el problema de la evaluación de los múltiples sensores del robot, como combinar esos datos, tratarlos y obtener una información útil para la navegación del robot.

La movilidad de un robot requiere del conocimiento de la posición de él mismo dentro del ambiente. La localización precisa y robusta de un robot con un bajo costo computacional es la principal motivación para aquellos que eligen trabajar sobre este problema. La localización es una de las tareas más importantes, donde el tiempo juega un rol importante, particularmente cuando continuamente se actualiza la posición del robot durante el desplazamiento en tiempo real.

La movilidad requiere un mapa del ambiente en el cual el robot, supuestamente, se encuentra trabajando. Dada una información sensorial en forma de objetos geométricos, el robot puede empezar a construir su mapa de ambiente de manera autónoma, desde un previo desconocimiento completo del lugar. Aquellos mapas que han sido construidos de manera manual, a menudo son costosos y de cuestionable calidad. Esto motiva a la necesidad de un estudio de técnicas SLAM o siendo más precisos, de una exploración integrada.

La movilidad implica tener en cuenta ciertos detalles que se pueden presentar a la hora de comenzar la navegación del robot, estamos hablando por ejemplo de ruidos e impredecibles eventos aleatorios. Años atrás, durante los primeros días de la robótica móvil, se contemplaba estudiar o trabajar con trayectorias de muchos metros de longitud, pero hoy en día el progreso requiere una validación empírica más extensa. Los

experimentos en laboratorios bajo condiciones controladas cuidadosamente han llegado a ser importantes pero nunca se ha podido llegar más allá de la creación de un método de delimitación de regiones. Si lo que buscamos es que los robots sean capaces de abandonar el laboratorio para entrar al mundo real, es necesario un conjunto de estudios a larga escala de un gran número de elementos que intervienen en la navegación autónoma del robot [2].

La solución al problema de generación de mapas y localización simultánea, es en muchos aspectos, el principal “punto problemático” de la comunidad de investigación del mundo de la robótica móvil. La habilidad para colocar un robot móvil en una localización desconocida y hacer que este cumpla con su tarea específica mediante la construcción de su propia información y a partir de ésta realizar esta tarea de manera “autónoma”, es algo que hasta hoy tiene bloqueados en ciertos aspectos a los investigadores. Esta tesis no pretende otra cosa que compactar toda la información necesaria para el entendimiento de este problema y sus posibles soluciones, describiendo su estructura y propiedades.

## **1.6. Aportaciones de la investigación**

Las contribuciones más importantes de esta tesis son:

- En primer lugar, un detallado estudio los diferentes elementos del robot que intervienen en el problema de Exploración Integrada, como son, elementos de percepción, elementos de localización...
- En segundo lugar, una inicialización en el problema de la Navegación del Vehículo.
- Un estudio en profundidad acerca del problema de Exploración Integrada, teoría, elementos, problemas y soluciones, así como detalles acerca de la evolución del mapa y límites teóricos de la creación de mapas y localización del vehículo.
- Y por último, las contribuciones teóricas de esta tesis están demostradas mediante una herramienta software, implementada con técnicas de solución del problema de Exploración Integrada, previamente estudiadas en esta tesis, como es el caso del Filtrado de Kalman, que permitirá la simulación del desplazamiento de robots móviles en ambientes desconocidos, construyendo y graficando el mapa de ambiente y localizando el vehículo dentro de éste, mediante la utilización de distintos tipos de sensores.

## **1.7. Descripción del documento**

La descripción de este trabajo queda organizada en 4 diferentes capítulos.

Los 2 primeros capítulos tienen el objetivo de familiarizar al lector con los conceptos y las metodologías planteadas. Se lleva a cabo una revisión del estado del arte que nos permite visualizar la aplicación de herramientas de interés para nuestro trabajo. Finalmente se ubica la investigación en el contexto teórico revisado.

El capítulo 2, está dedicado al concepto de navegación autónoma del vehículo, en la que se define dicho concepto y se realiza una pequeña reseña histórica sobre la localización autónoma de dispositivos móviles a lo largo de la historia hasta nuestros días, también se definen los diferentes elementos que intervienen en la navegación del robot así como las diferentes formas de localización teniendo en cuenta dichos elementos, repasa las bases teóricas relacionadas con los sistemas de percepción del robot. Proporciona al lector una completa explicación de los diferentes tipos de dispositivos que pueden ser usados por un robot móvil para obtener datos del ambiente, así como presenta una serie de técnicas de visión 3D, las cuales se utilizan para realizar una medición de distancia sobre un punto en el espacio.

También se introduce al lector en la terminología del concepto de localización, explicando de manera detallada los diferentes medios de localización, tipos de mediciones y métodos de localización.

El problema de la Localización Integrada es presentado y ampliamente discutido en el capítulo 3. En él, el lector queda completamente informado acerca del concepto, tras una introducción que especificará cada uno de los detalles y conceptos que intervienen en el mencionado problema.

Se presentará la solución a dicho problema, en concreto, se prestará gran atención el Filtro Extendido de Kalman, detallando cada uno de los elementos y terminologías que de este modelo derivan, y quedando claramente explicado y detallado. Se ponen de manifiesto los conceptos de la construcción del mapa y la localización simultánea, así como el algoritmo que permite la realización de la herramienta de simulación.

Los resultados obtenidos con las experimentaciones en simulación se presentan en el capítulo 4. Así mismo se describen las herramientas computacionales.

Finalmente, se presentan las conclusiones haciendo una recapitulación del trabajo realizado y un análisis de la técnica propuesta planteando las posibles mejoras para trabajos futuros y posibles ampliaciones del proyecto. Y la bibliografía completa sobre la que se apoya la tesis.

## Capítulo 2

### Navegación Autónoma del Vehículo

#### 2.1. Introducción

Un requerimiento fundamental de un robot móvil, o un Vehículo Autónomo Guiado (AGV), es la habilidad de que éste conozca su posición propia en cada instante de tiempo.

Todas las acciones que un AGV sea capaz de realizar dependerá de esto. Por ejemplo, planear y ejecutar una tarea en un ambiente requiere del conocimiento continuo de la localización del vehículo. En ciertas aplicaciones, como en una exploración bajo el agua, la desorientación del vehículo y su mala localización puede dar lugar a la pérdida del mismo.

La importancia de la navegación de los AGV's ha sido reconocida durante mucho tiempo, y en la última década muchos de los esfuerzos de los investigadores se han volcado sobre la navegación autónoma.

#### 2.2. Sistemas de percepción

##### *2.2.1. Introducción*

La percepción y la localización son dos tareas claves en la navegación de robots móviles. Su estrecha relación queda de manifiesto al hacer un análisis de estos dos conceptos. Se le llama percepción a la disciplina que se encarga de dotar al robot con capacidades sensoriales que le permitan extraer la información necesaria de su mundo exterior. Esta información es requerida para modelar el ambiente y para localizar al robot dentro de éste. La localización por su parte, permite determinar el lugar que ocupa el robot en el medio ambiente donde se desenvuelve.

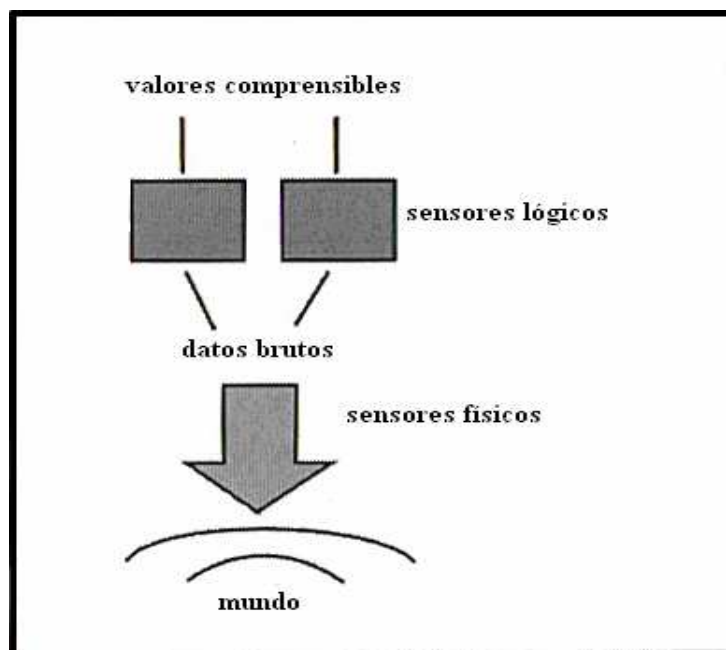
Lo anterior significa que el robot, como agente inteligente que se pretende que sea, debe tener una noción del espacio que lo rodea y de la posición que ocupa dentro de ese espacio con respecto a los elementos importantes que puedan coexistir con él, tales como paredes, objetos, puertas, etc. Para que el robot pueda cumplir con esta tarea es necesario que conozca su ambiente, para lo cual deberá poseer capacidades sensoriales.

En las siguientes secciones de este capítulo se lleva a cabo una revisión de los principales medios de percepción usados para la navegación de robots móviles. Se presentan los medios de percepción describiendo en un inicio los dispositivos más

comunes como son las cámaras, los ultrasonidos y los telémetros.

Cabe mencionar que algunas técnicas han sido desarrolladas con mayor profundidad, refiriendo al lector a la literatura complementaria en el caso de revisiones no profundizadas.

El proceso de percepción tiene su origen en lo que se conoce como sensores. Los medios de los cuales se vale la percepción para realizar su tarea son los sensores. El término sensor es generalmente asociado al dispositivo físico que permite extraer la información del mundo real. Sin embargo, también se asocia a todos aquellos tratamientos que se aplican a los datos brutos (obtenidos por el dispositivo físico), para ser transformados en información comprensible por el sistema. Así, dos conceptos diferentes son introducidos; los sensores físicos que hacen referencia a los dispositivos, y los sensores lógicos asociados a los tratamientos (extracción de líneas, puntos o cartografía, etc.). La figura 2.1, presentada en [10], nos ejemplifica de manera gráfica estos dos conceptos.



**Figura 2.1** Sensores lógicos y físicos

Los sensores físicos son divididos en dos categorías [72], [7]: propioceptivos y exteroceptivos, descritos también como sensores internos y externos. Los primeros clasifican a aquellos que proporcionan información propia del robot como la medición de desplazamientos, de velocidades y de fuerzas aplicadas o desarrolladas por este mismo. Dentro de los más utilizados en la robótica tenemos los odómetros y los sensores

inerciales [13].

Los sensores exteroceptivos, por su parte, brindan al sistema la información entre el robot y su mundo externo. Por la naturaleza de la información extraída podemos diferenciar entre un sensor 2D, el cual realiza una proyección del espacio tridimensional sobre un plano, o un sensor 3D, que guarda de cierta manera las tres dimensiones de un punto en el espacio.

Otra clasificación hecha a estos sensores es en base al tipo de energía empleada. Por un lado tenemos los sensores activos, que aplican energía al ambiente mediante una fuente del sensor mismo, como los ultrasonidos, o algunos otros basados en una emisión de luz, como los telémetros láser. Por otro lado, tenemos los llamados sensores pasivos, que generalmente se valen de la energía propia de los elementos en la escena. Un ejemplo pueden ser las cámaras de video que no emplean una fuente de luz adicional cuando usan la luz natural.

En las siguientes secciones se detallarán de manera particular algunos de los sensores comúnmente utilizados en los equipos de robótica.

### ***2.2.2. Las cámaras de video***

Uno de los tipos de sensores exteroceptivos 2D mas utilizados son sin duda las cámaras [10]. Esencialmente podemos mencionar dos tipos de cámaras empleadas como medio de visión. En primer lugar tenemos las cámaras tradicionales basadas en tecnología de tubos al vacío (tubos vidicón). Éstas, muy difundidas en cierta época dado su bajo costo, resultan en la actualidad poco utilizadas. En segundo lugar se tienen las cámaras de estado sólido compactas y ligeras, estas vienen actualmente a ser las más atractivas para el campo de la robótica. La mayor parte de estas cámaras están basadas en el principio de transferencia de cargas en dispositivos semiconductores de cargas acopladas, de aquí que se les llame cámaras CCD (Charge Coupled Device).

Las cámaras, con respecto a otros sensores resultan accesibles desde el punto de vista costo, pero caras desde el punto de vista tiempo de proceso. Las técnicas de tratamiento de imágenes hasta ahora reportadas, aunque rápidas, resultan todavía para algunos sistemas, incompatibles con el tiempo de respuesta deseado. Esto puede resultar crítico si consideramos que un sistema de visión para un robot móvil deberá tener un tiempo de respuesta acorde a la velocidad con que éste se desplace. Por otro lado, la eficiencia de este tipo de sensores está fuertemente ligada a las condiciones del ambiente. Suponiendo que el robot se desplaza en un ambiente externo donde las condiciones climatográficas son variantes (nublado, neblina, exceso de luz solar, etc.), en este caso se encontrará que la información recopilada será difícil, y en ocasiones imposible, de procesar.

A pesar de estas limitaciones, las cámaras siguen siendo hasta nuestros días

potencialmente la fuente de información más poderosa de entre todos los sensores utilizados en robótica [13]. Estas han servido ampliamente en tareas donde una descripción detallada de los objetos es requerida: análisis de texturas, clasificación de objetos, reconocimiento de patrones, etc.

El número de cámaras empleadas en un sistema puede variar. El sistema más simple se apoya en el empleo de una sola cámara, el cual es conocido como visión monocular. Esta técnica ha sido ampliamente usada en problemas de detección, reconocimiento y clasificación de objetos. En los sistemas de robótica, una cámara de video es usada para realizar la visión dinámica (varias tomas a instantes diferentes de una misma escena durante el desplazamiento del robot), el análisis de la secuencia de imágenes así generada nos permite localizar el robot, detectar obstáculos, hacer un seguimiento de obstáculos, o reconstruir mapas del espacio tridimensional. El uso de dos o más cámaras es común y será analizado dentro de las técnicas de extracción de datos 3D.

### ***2.2.3. Los telémetros***

Los sensores 3D que han alcanzado más popularidad dentro de la robótica móvil son los telémetros. Estos permiten medir la distancia entre un emisor y un punto de impacto en el espacio. De aquí que sus datos resultantes sean de distancia y no de intensidad (algunos telémetros pueden obtener los dos tipos de imágenes, simultáneamente). Un telémetro puede estar basado en diferentes tipos de onda: los radares basados en ondas electromagnéticas, los ultrasonidos basados en ondas sonoras y los telémetros láser basados en la emisión de luz.

Dentro de la literatura clásica donde se presenta un análisis profundo sobre sensores y técnicas 3D tenemos a Jarvis [41] y a Best [9].

#### ***2.2.3.1. Ultrasonidos***

Los sensores ultrasónicos han probado ser de gran utilidad para la navegación de robots en interiores siendo menos utilizados en exteriores debido a las limitaciones de alcance del sonido por el aire. El interés por ellos reside en su bajo costo y en su capacidad por abarcar grandes áreas. Desafortunadamente, como todos los sensores, el buen funcionamiento de los ultrasonidos es afectado por problemas inherentes a su principio de funcionamiento y por condiciones del ambiente (temperatura, humedad, materia de los objetos a detectar, etc.).

Los sensores ultrasónicos están constituidos por una pastilla, la cual juega el papel de emisor/receptor a la vez. Su modelo asume una onda sonora, la cual se propaga al interior de un cono de emisión. La medición se considera en dirección al eje central del

cono, el cual es perpendicular a la superficie del sensor. La precisión de la medida es función de la amplitud del cono: entre más cerrado sea el ángulo de propagación de la onda, mejor será la resolución angular y más exacta será la medida. Por otro lado, si la abertura del lóbulo es grande, el sensor cubre más espacio y la probabilidad de detectar un obstáculo es más grande, pero en este caso, la resolución angular será débil y la precisión sobre la posición del objeto detectado será inexacta. Las familias más conocidas de sensores ultrasónico son las producidas por la compañía Polaroid; el ángulo de abertura de un sistema de alcance ultrasónico POLAROID (*Polaroid ultrasonic ranging system*) es de aproximadamente  $30^\circ$  [24], [66]. Generalmente, el problema de la resolución es disminuido utilizando un mayor número de sensores con un lóbulo más pequeño; aquí el problema a resolver será la fusión multisensor [61].

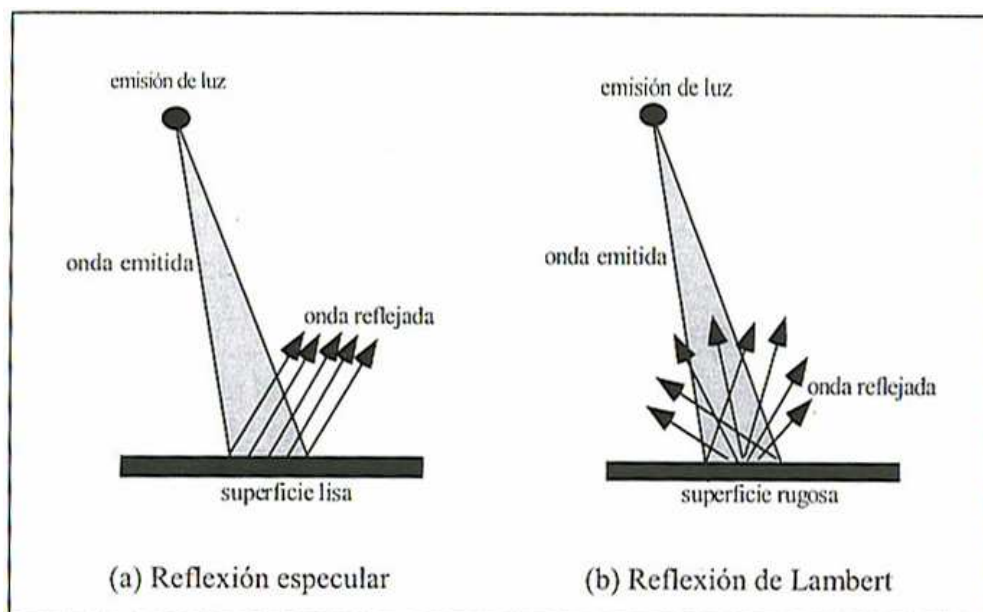
Otro problema inherente a los ultrasonidos es la reflexión. Cuando una onda sonora incide sobre la superficie de un objeto, ésta será reflejada según la textura de la superficie de impacto y según la longitud de la onda. Cuando una onda incidente encuentra una superficie pulida o lisa tal como un espejo, esta se refleja de una forma bien definida; decimos entonces que la reflexión es especular (Figura 2.2a). Por el contrario, si la superficie es irregular cada pequeña porción saliente proyectará la onda en direcciones diferentes provocando una reflexión difusa o de Lambert (Figura 2.2b). Como consecuencia de estos fenómenos, una medición puede llegar a ser totalmente falsa. Por ejemplo, en el caso de la especularidad, una medición será correcta solo si la superficie enfocada es aproximadamente normal al rayo incidente; de otra manera, la distancia resultante puede ser producto de una reflexión múltiple.

Debido a la baja resolución angular (divergencia) y a su limitado alcance, los ultrasonidos son considerados como sensores de proximidad dentro de la robótica móvil.

Una de las técnicas desarrolladas con este tipo de sensores para la navegación de los robots móviles es la de seguimiento de pared [42].

### ***2.2.3.2. Telémetros láser***

Los sistemas basados en una fuente láser, son sensores físicos activos, que miden las distancias del sensor a los objetos que integran la escena de manera directa. Estos sensores pueden ser considerados semi-activos si se apoyan en otro tipo de sensores, generalmente pasivos como lo son las cámaras, para complementar su mecanismo de adquisición de datos.



**Figura 2.2** Reflexión de una onda

Después de los ultrasonidos y las cámaras, estos sistemas láser constituyen el medio de percepción más usado en la navegación, sobre todo para tareas en ambientes exteriores. El principio de funcionamiento de un sensor láser activo o telémetro láser, se basa en el análisis del trayecto recorrido de una señal luminosa emitida por una fuente láser, la cual es reflejada por algún objeto de la escena observada. Una vez que la señal es captada por el receptor, es tratada para obtener la distancia hacia el punto de rebote.

Las ventajas de estos sensores se derivan de las propiedades naturales de las fuentes láser. Rayos angularmente finos pueden ser obtenidos con pequeñas lentes de emisión, lo que es posible gracias a las pequeñas longitudes de onda alcanzadas por un rayo láser, pudiendo lograr una buena resolución angular. Además, las longitudes de onda corta facilitan un comportamiento reflexivo difuso lo que nos permite obtener con mayor probabilidad, una proyección del rayo a partir de cualquier ángulo de incidencia. Por otro lado, la coherencia espacial del rayo nos permite reducir la difracción de éste.

### ***2.2.3.2.1 Clasificación de los telémetros láser***

Los telémetros láser pueden ser clasificados en cuatro grupos según el tipo de proyección utilizada [51]:

- 1) **Puntual:** Este tipo de sistemas mide un solo punto del espacio a lo largo de un solo rayo emitido por el sensor. Para realizar la exploración completa de una escena, el sensor cuenta generalmente con un sistema de barrido. Este sistema desplaza el rayo horizontal y verticalmente cubriendo un espacio igual a su

campo de visión. Este mecanismo permite obtener una imagen completa 3D de la escena. Otra forma de realizar la exploración si no se cuenta con un mecanismo de barrido, es proyectar el rayo en una dirección fija; en este caso el objeto deberá moverse en ambas direcciones frente al punto proyectado. En estos casos el tiempo de barrido puede ser un factor clave ya que dependerá de la eficiencia del sistema de barrido y/o del número de puntos a censar.

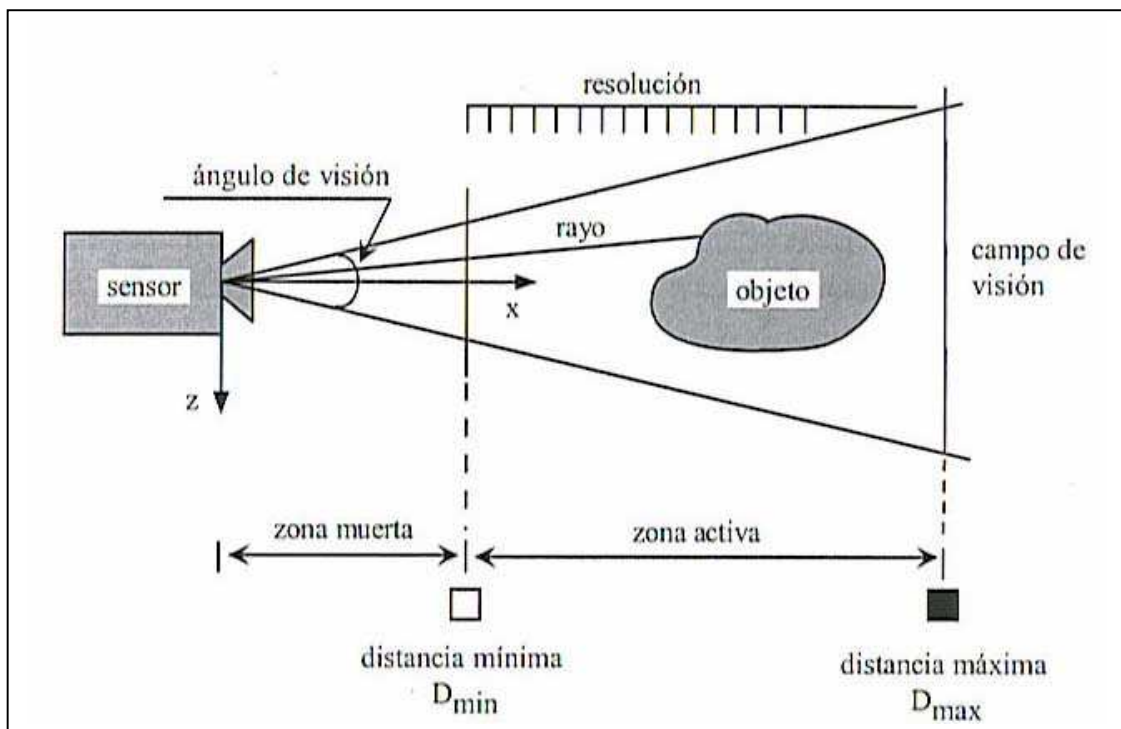
- 2) **De Línea:** El principio de este mecanismo es el de proyectar sobre los objetos de la escena una línea, la cual se convierte en un plano luminoso. Este mecanismo es generalmente acoplado a una cámara, la que capta la línea proyectada sobre los objetos de la escena. La captura de una imagen completa se logra con las mismas opciones que con un rayo puntual (mediante un mecanismo de barrido o mediante el desplazamiento del objeto). La información de relieve puede entonces determinarse mediante técnicas de triangulación o bien mediante luz estructurada.
- 3) **Planar:** Este sistema mide la distancia de varios puntos del espacio a la vez provenientes de la emisión de un conjunto de rayos. La dirección del sensor, que no requiere un sistema de barrido esta ligada al movimiento del robot. Estos sensores son mucho más rápidos que los anteriores, pues la adquisición de la imagen es de manera directa, sin embargo son complejos y costosos.
- 4) **Panorámico orientable:** Este sensor es de tipo línea pero con la diferencia que tiene un ángulo de rotación de  $360^\circ$  (sensor con movimiento de rotación continua).

#### *2.2.3.2.2 Características de los telémetros*

Un sistema de telemetría láser puntual puede ser descrito en base a cierto número de características, las cuales marcan la eficiencia y el rendimiento de un sistema. Los conceptos más importantes que definen estas características son los siguientes (ver Figura 2.3):

- **Alcance.** Todo sistema posee un alcance mínimo y un máximo, de aquí que se tienen tres zonas. La zona comprendida entre el alcance mínimo y el máximo es la zona nombrada “activa” del sensor y todo objeto visto en ella será detectado. Por el contrario, los objetos a distancias inferiores al alcance mínimo caen dentro de la zona muerta del sensor y por tanto, no son detectados. Así mismo, los objetos a distancias mayores del alcance máximo no serán vistos por el sistema.
- **Campo de visión.** El campo de visión está dado por los ángulos de azimut y de elevación, los cuales definen la abertura máxima tanto horizontal como vertical del rayo respectivamente.
- **Frame.** Esta palabra de origen inglés es usada para definir el tamaño de la imagen. Este parámetro esta dado en pixeles, decimos por ejemplo, que un sensor genera una frame de  $M \times N$  pixeles. Generalmente imagen y frame son usados sin diferencia alguna.

- **Frecuencia.** La frecuencia habla del tiempo en el cual una medición puede ser realizada. Este concepto va a marcar la velocidad a la cual el telémetro captura una imagen, ésta va a depender de la eficiencia de cada sensor en particular. Generalmente está dada en pixeles por segundo (p/s).
- **Resolución.** La calidad de una imagen generalmente se mide con respecto a la resolución, esto es cierto, dado que una buena resolución da un alto grado de detalle sobre la escena que se está captando. En el caso de las imágenes de profundidad diremos que la resolución está dada por el cambio de distancia más pequeño que el sensor es capaz de medir.



**Figura 2.3** Características de un telémetro láser.

Históricamente hablando, el primer telémetro láser que sirvió para la navegación de un robot es el ERIM, construido por el Instituto de Investigación Ambiental de Michigan (*Environmental Research Institute of Michigan*), a quien debe su nombre. Fue construido para el robot ALV [32], y ha sido utilizado en innumerables investigaciones para la navegación de robots móviles en laboratorios de Estados Unidos.

Actualmente los telémetros láser SICK, de SICK Inc., de Alemania, han adquirido gran popularidad dentro de la robótica [72].

### ***2.2.3.3. Los radares***

Los radares constituyen una buena opción entre los sensores 3D para la robótica [10], sin embargo no han sido muy explotados. Con respecto a los láseres, los radares de microondas se benefician de un mejor alcance debido a una mayor sensibilidad de detección. Sus mayores inconvenientes son, como para los ultrasónicos, la pobreza de la resolución angular y la especularidad de los objetos.

A pesar de su pobre resolución angular los radares son considerados eficientes para la percepción 3D a distancias medianas (10m – 300m), ya que son suficientemente rápidos en tareas de percepción en tiempo real y no presentan ningún problema con la seguridad ocular del humano. Su mayor utilización se encuentra en el campo militar (localización de misiles, de aviones, etc.) y en aplicaciones civiles como la supervisión de tráfico de vehículos.

## **2.3. Sistemas de localización**

### ***2.3.1. Introducción***

La localización permite determinar el lugar que ocupa el robot en el medio ambiente donde se desenvuelve.

En las siguientes secciones se revisan los medios y métodos de localización, en donde se lleva a cabo un análisis del estado del arte sobre los trabajos relacionados a estos temas.

La primera etapa en la navegación de un robot móvil es ubicar al robot dentro de su espacio de trabajo. La necesidad de localizar a un robot en su ambiente se manifiesta en diferentes circunstancias. Un robot no puede alcanzar un objetivo definido a partir de sus propias coordenadas en un sistema relativo a su ambiente si él no conoce sus propias coordenadas respecto a este ambiente.

Ciertas decisiones no pueden ser tomadas sin un conocimiento de la localización del robot. Si un robot ejecuta un movimiento en el cual un obstáculo imprevisto aparece, el robot para tomar una decisión de movimiento o enviar una señal de alerta al operador debe tener conocimiento de su localización respecto a éste. Con mayor explicites el robot debe responderse: ¿Cuál es mi posición respecto a dicho objeto? Con este conocimiento el robot o el humano podrán entonces tomar una decisión de giro, alto o continuar según las circunstancias.

En la literatura se manejan dos grandes familias que agrupan los diferentes medios de localización. La localización basada en mediciones de posición relativa y la localización basada en mediciones de posición absoluta [13].

A diferencia de las mediciones de posición relativa, con los métodos de mediciones absolutas se pretende determinar la posición del robot con respecto a una referencia universal previamente establecida. Los métodos más conocidos son las señales activas (active beacons), reconocimiento de marcas artificiales, reconocimiento de marcas naturales y correspondencia de modelos [13].

### ***2.3.2. Mediciones de posición relativa***

Las mediciones de posición relativa son proporcionadas por sensores propioceptivos (ver secciones anteriores) y son mediciones de movimientos relativos a un sistema de referencia interno del vehículo. La odometría y la navegación inercial basada en compases y giroscopios son dos técnicas ampliamente utilizadas en la localización de robots [13].

Referimos al lector al libro de Borenstein y colaboradores [13] para una información más completa sobre los diversos métodos de posición relativa.

#### ***2.3.2.1. Navegación inercial***

La navegación inercial es una forma de *dead reckoning* ya que es un sistema propioceptivo dado que éste no cuenta con referencias externas, excepto para la calibración [7]. El término de navegación inercial (NI) pura, corresponde a una solución utilizando giroscopios y algunas veces acelerómetros para medir porcentaje de rotación y aceleración. Las mediciones son integradas una o dos veces para obtener la posición en un sistema de referencia inercial.

Everett [30] reporta una precisión en estos sistemas de 0.1 % sobre la distancia viajada. Este tipo de navegación presenta un enorme interés para los sistemas autónomos desde el punto de vista que pueden ser casi independientes a las condiciones del ambiente.

El alto costo de los sistemas de navegación inercial para obtener precisiones razonables es uno de sus mayores inconvenientes el cual limita su uso frecuente en la navegación de robots terrestres [7]. Estos sistemas han sido primordialmente explotados en aviones, submarinos y misiles.

#### ***2.3.2.2. Odometría***

Los métodos de posicionamiento basados en odometría utilizan codificadores para medir la rotación y/u orientación de las ruedas. La ventaja de la odometría es que es capaz de proporcionar un estimado de la posición siempre que se requiera, además de que

está totalmente contenida a bordo del robot. El fundamento de los métodos de posicionamiento que usan odómetros, es un simple procedimiento matemático que consiste en determinar la localización actual del móvil que se ha desplazado a partir de una posición previa, a través del tiempo, lo cual produce inevitablemente acumulación de errores. La desventaja es que el error en la posición crece sin límites (error acumulado), a menos que se utilice una referencia independiente para reducir dicho error.

Los odómetros por su accesibilidad son muy populares, incluso en algunos casos llegan a ser la única fuente de información del estado de navegación disponible cuando, por ejemplo, otros sensores fallan o cuando las circunstancias no permiten el uso de algún dispositivo en especial [13].

La odometría, a pesar de sus limitaciones, es utilizada casi en todos los robots móviles, ya que los datos que proporciona pueden ser fusionados con información de mediciones de posición absoluta y proveer así una mejor y más confiable estimación de la posición.

Los dispositivos más comúnmente utilizados para proporcionar información odométrica son los codificadores ópticos. Su funcionamiento se basa en el siguiente principio: Cuando un haz de luz enfocado, que apunta a un fotodetector preestablecido, es periódicamente interrumpido por un patrón de tipo opaco/transparente codificado sobre un disco, que está directamente unido al sistema de tracción (rueda o motor de interés), el código generado por el foto detector asociado puede ser usado para determinar las características del movimiento descrito por esa rueda o motor.

Existen dos tipos de codificadores ópticos: los incrementales y los absolutos [13], [7]. Los codificadores ópticos incrementales miden la velocidad de rotación y pueden inferir la posición relativa, mientras que los codificadores ópticos absolutos miden la posición angular para definir la velocidad. En ciertas situaciones, los codificadores incrementales son mucho más fáciles de implementar y pueden proporcionar una resolución igual a la de los codificadores absolutos a un costo mucho menor.

### ***2.3.3. Mediciones de posición absoluta***

#### ***2.2.3.1. Principio general***

Independientemente de la técnica empleada para localizar al robot mediante información proveniente del mundo externo, podemos considerar los siguientes pasos como el principio básico de los métodos basados en mediciones de posición absoluta [64]:

1. Un determinado número de elementos o referencias visuales identificables por el sistema y de posición conocida son ubicados en el ambiente del robot para que éste pueda localizarse. Un elemento o referencia se entenderá como un objeto del ambiente llámese baliza, marca (natural o artificial), objeto, o algún índice

visual utilizado en el ambiente como referencia externa para el sistema de navegación.

2. El robot, provisto del equipo adecuado (sistema de percepción) efectúa un cierto número de mediciones respecto a dichos elementos que se encuentran en su campo visual, y adquiere un cierto número de información transmitida por la baliza o extraída de la información disponible en los datos capturados.
3. A partir de esta información, el sistema, mediante tratamientos y cálculos, determina su posición con respecto a los elementos del ambiente utilizados.
4. Finalmente conociendo la posición de los elementos en el sistema de referencia del mundo, el robot, es entonces capaz de calcular su propia posición en este sistema global.

Peyret menciona que a partir de este principio muchas variantes pueden existir y varias tecnologías pueden ser utilizadas, con los siguientes factores discriminantes:

- La naturaleza de las referencias.
- El tipo y el número de factores o datos medidos.
- La naturaleza de la onda que sirve de vector a la medición

Según su naturaleza, las referencias visuales pueden ser activas o pasivas. Se les llama activas cuando estas emiten una onda la cual es captada por el equipo de medición. Esta onda puede ser emitida en continuo o activarse por una orden proveniente del equipo embarcado sobre el robot móvil.

En el segundo caso las referencias sólo reflejan una onda proveniente del sistema de medición (ejemplo ondas luminosas, ondas sonoras) o proveniente de algún otro medio ajeno a la referencia misma (por ejemplo, del ambiente en el caso de cámaras).

Los métodos basados en referencias pasivas son de uso más general, ya que una referencia puede ser desde una marca específicamente elaborada, hasta los objetos mismos del ambiente.

Los factores o datos medidos son la información que se extrae del ambiente. Estos datos son las características que lo describen y que sirven de referencia en el proceso de localización. De estos datos depende que el sistema sea ágil o pesado, computacionalmente hablando, simple o complejo, en cuanto al proceso y débil o preciso en cuanto al resultado.

Las características del ambiente en donde el robot va a evolucionar pueden ser determinantes en la selección de las primitivas a emplear. Por ejemplo, en ambientes de oficina, en donde comúnmente los objetos presentan formas regulares y son geoméricamente lineales, pueden considerarse líneas, puntos, objetos repetitivos (escritorios, mesas, botes de basura, regiones de color, etc.) como referencias seguras, lo que puede no ser aplicable en ambientes externos.

En el campo del tratamiento de datos las características a extraer pueden ser

clasificadas como de alto nivel o de bajo nivel, según la simplicidad del dato. Podemos decir que los datos de bajo nivel son datos brutos basados en que son datos simples, esto es, un píxel, una línea, polígonos, etc., es decir, son primitivas geométricas simples. Por otro lado, los datos de alto nivel son objetos, es decir, primitivas más definidas como mesas, botes de basura, escritorios, etc. La desventaja de estos datos es que a diferencia de los datos de bajos nivel, su proceso de extracción es complejo, la ventaja es que estos facilitan el proceso de correspondencia en el seguimiento.

La naturaleza de la onda depende del sensor de medición a utilizar, estas pueden ser ondas ultra sonoras, ondas luminosas o de hiperfrecuencia [65].

### ***2.3.4. Métodos de localización***

En esta sección se hace una revisión bibliográfica de los trabajos actuales que nos permitan conocer el desarrollo de técnicas y de cómo estas han sido aplicadas a los problemas de la localización. En esta revisión, se plantean trabajos que llevan implícitas las variantes anteriormente mencionadas.

#### ***2.3.4.1. Primeros sistemas de localización***

Un diagrama evolutivo de la navegación de los AGV's es dado en la Fig. 4. En ella se muestran a los robots guiados (*Line following*) como posiblemente los primeros sistemas de navegación de AGV's. Este guiado es un proceso que permite desplazar el AGV a través de un camino determinado usando una serie de guías que el AGV puede identificar y seguir. Estamos hablando de una navegación simple que requiere sólo un poco procesamiento y sensibilidad. Es una manera sencilla de resolver el problema de la navegación ya que los problemas de localización y de percepción son totalmente reducidos al mostrar al robot la ruta a seguir. Los elementos más utilizados para la conducción son las vías férreas o cables magnéticos, o bien trazos de líneas de pintura característica por el suelo que indican el trayecto, estas líneas son fácilmente detectadas por un sensor especial montado en el robot para ello. Las condiciones para este tipo de navegación es un ambiente totalmente adecuado para una navegación segura y libre de colisiones. Estas técnicas simples resuelven problemas industriales, aunque el costo puede llegar a ser elevado.

La demanda de estos sistemas ha disminuido debido a su limitado rango de aplicación considerando que se debe de trabajar en ambientes restringidos y/o muy preparados, y en tareas muy específicas sin posibilidad de variantes.

Tsumura [80], por ejemplo, presenta un estudio acerca de los robots guiados en empresas japonesas en 1986. Según Tsumura, alrededor del 90% de los AGV's que se encontraban en las empresas japonesas en 1986, eran guiados por cables enterrados en el

suelo de la fabrica. Los cables conducían diferentes cargas y el robot seguía el cable usando una bobina de inducción. Varias formas de guiado son estudiadas por los investigadores hoy en día. Deveza [24] y Russel [69] describen un robot guiado por olores, y un robot guiado por el calor es descrito en [70].

Estos métodos han sido también implementados para largas distancias. Un ejemplo es RALPH (*Rapidly adapting Lateral Position Handler*) de *Carnegie Mellon University* [67], el cual usa calles y bordillos para mantener al robot dentro del camino. Este sistema ha guiado satisfactoriamente un vehiculo desde Nueva York hasta Los Angeles.

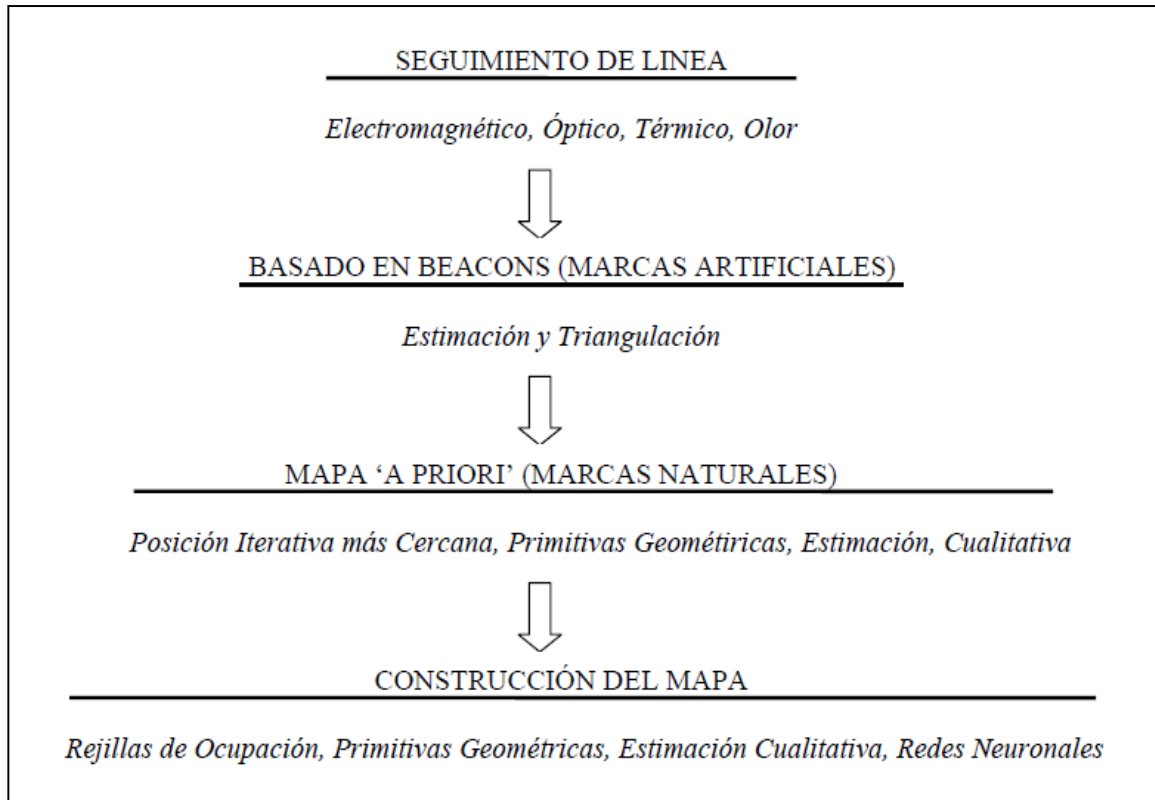
Sin embargo, este método de navegación tiene significantes desventajas. La mayor desventaja es que el AGV puede solo seguir una línea, y su operación está severamente restringida. Otra gran desventaja es la de que el AGV no conocerá su posición actual a lo largo del camino. Una posible solución a este problema es colocar marcas posicionales a lo largo de la guía [80], pero esto sólo permite la localización en una serie de puntos específicos a lo largo de la guía. Generalmente, las capacidades navegacionales de un sistema de seguimiento de líneas son extremadamente limitadas.

Otro problema que encontramos en este tipo de estrategias es el costo y tiempo necesario para colocar las guías del AGV. En algunos casos, esta estrategia es incluso imposible de implementar, por ejemplo en condiciones en las que el suelo no permite colocar estas guías [29]. En otros casos, es posible que los caminos de los robots se vean obligados a cruzarse, confundiendo la guía que debe seguir el AGV.

El sistema de guiado es también inflexible desde el punto de vista de las modificaciones. Es necesario invertir capital y tiempo en la modificación y mantenimiento del camino del vehiculo. Además estas guías suelen ser en ocasiones muy frágiles. Si el vehículo pierde el contacto con la guía, no existe manera alguna de navegación.

Los métodos alternativos de navegación que no sufren de estos problemas dependen de los sistemas de localización. La localización difiere de los sistemas de seguimiento en que éstos especifican en cada instante la posición y orientación del vehículo dentro del ambiente. De esta manera el robot no se encuentra limitado en su movimiento a través del camino, puesto que, sea cual sea su posición dentro del ambiente, ésta es permitida.

Una forma de localización en este tipo de sistemas, es lo que conocemos como odometría y que ya hemos explicado en secciones anteriores o un sistema de navegación inercial (INS) [50]. La odometría, basada en la revolución de las ruedas y el INS, que mide las fuerzas durante las aceleraciones, permiten al vehiculo localizarse por deducción en función de sus movimientos. Dato curioso, es que la odometría fue ya estudiada por los romanos y los dibujos de odómetros fueron ya realizados primero por Leonardo Da Vinci [19]. Sin embargo, ambos, tanto la odometría como los sistemas INS sufren de la acumulación de errores durante sus operaciones, y además no permiten la localización de dichos errores [14].



**Figura 2.4** Evolución de la navegación autónoma

### ***2.3.4.2. Posicionamiento de señales activas***

En función a las variantes anteriormente mencionadas se han desarrollado diversos métodos de localización. En cuanto al tipo de referencia exterior, podemos hablar de los sistemas basado en posicionamiento de señales (positioning beacon o beacon based) los cuales utilizan balizas activas. Una forma sencilla de entender este método es haciendo una analogía con el ser humano. Supongamos que una persona perdida en el bosque trata de ubicar a un helicóptero que quiere rescatarla, si la persona cuenta con una linterna, enviará reflejos de luz u ondeará algún trozo de tela de color o prenderá fuego (señal visual) o gritará si la búsqueda fuera por tierra (sonido). Estas acciones ayudaran a las personas que realizan la búsqueda a ubicarse y llegar a su objetivo, estamos hablando entonces de la navegación basada en señales.

Precisando su aplicación en la navegación podemos decir que el principio básico de esta técnica es colocar en el ambiente algún tipo de transmisor, basado ya sea en luz (láser), sonido (ultrasonido) o radio frecuencia (radar), que permita enviar señales al móvil y que éste pueda recibir y por medio de las cuales puede localizarse en el ambiente. Dichas señales se encontraran en lugares conocidos del ambiente de tal forma que el AGV, equipado con un sensor que permite observar dichas señales, utilice como sistema

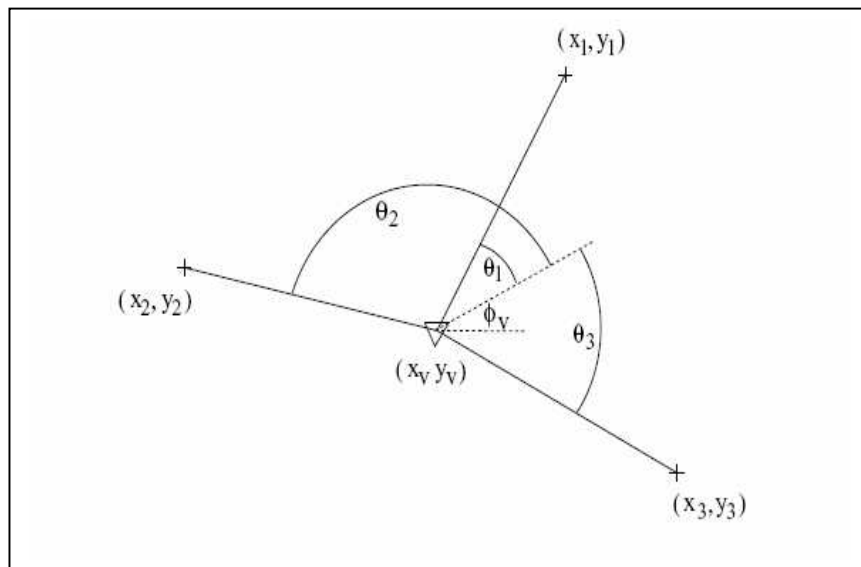
navegacional estas observaciones y el conocimiento de la posición de las señales para localizar su posición. A diferencia de la odometría y de los sistemas INS, la utilización de este tipo de localización no se deteriora con el tiempo. Es decir, el sensor proporciona información de la posición del robot, no de la movilidad, y además no está sujeto a la acumulación de los llamados “errores integrados”. Su uso tradicional ha sido en la localización de aviones y barcos siendo actualmente muy utilizadas en aplicaciones industriales y militares.

Este tipo de sistemas se puede categorizar en función del tipo de señal del sensor, el cual está relacionado con las características de las señales, y acorde con el tipo de información de procesamiento empleada por el sistema.

Los principales tipos de señales usados por sistemas de localización basados en señales suelen ser, el láser de infrarrojos, ultrasonidos y radares de onda milimétrica. Siendo el láser el más utilizado por aquellos usuarios (compañías en su mayoría) que implementan este tipo de sistemas. El segundo más común es el ultrasonido. Éste es fácilmente reflectante sobre la mayoría de los objetos. El tercer tipo de señales es el radar de onda milimétrica (MMWR). La señal del MMWR es reflejada por señales metálicas colocadas en localizaciones conocidas del ambiente y el radar emisor/receptor proporciona tanto el rango como la orientación de las señales.

Dos categorías principales pueden ser identificadas de acuerdo con el tipo de información de procesamiento empleada por el sistema. Estas son: la triangulación y la estimación.

La triangulación envuelve una combinación de observaciones de orientación para deducir la posición del robot, la posición del vehículo no cambia durante las observaciones. El número de medidas necesarias para determinar de manera inequívoca la posición del vehículo depende del número de grados de libertad de la posición. Para la posición de un vehículo definida en términos de posición  $(x, y)$  y una orientación  $\theta$ , tres observaciones  $\theta_1, \theta_2$  y  $\theta_3$  son necesarias para establecer su posición, como se muestra en la figura 2.5.



**Figura 2.5** Triangulación de tres observaciones.

La triangulación es el método más extendido usado en la localización de un AGV.

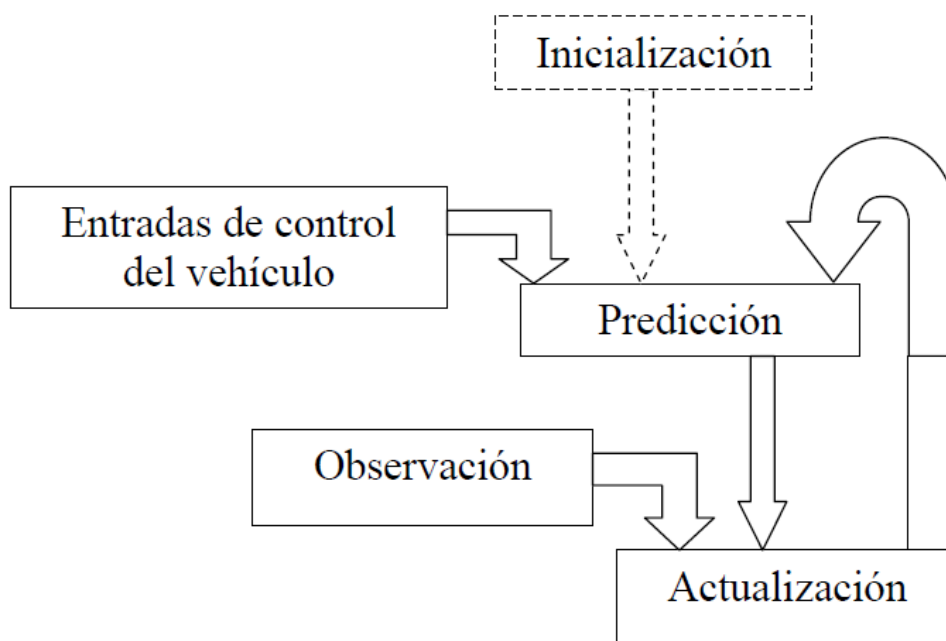
Una alternativa a la triangulación es estimar la posición del vehículo. La estimación depende de un modelo del vehículo y del sensor. La estimación es actualizada cada vez que una nueva observación es hecha, y el vehículo es localizado de observación en observación usando una predicción de la posición del vehículo basada en las entradas de control del vehículo, observe la Figura.6

El Filtro de Kalman [59,44,45] es comúnmente usado para realizar una estimación probabilística de la posición de un AGV, acorde con la teoría de la Estimación Bayesiana, en términos de la media y la covarianza de la estimación.

El GPS (Global Positioning System) [20,32] es una forma de localización basada en señales usando señales activas. La localización basada en GPS se lleva a cabo mediante la recepción de señales emitidas por distintos satélites GPS. Las señales contienen información que permite identificar la satélite que emite la señal y también cuenta el tiempo de retraso. Conociendo la posición de los satélites y usando de tiempo de retardo de la señal al viajar por el medio, la posición del GPS receptor que se encuentra en el robot, y por tanto la del robot, es determinada. La ventaja de usar este tipo de localización en robots reales es que las señales ya se encuentran colocadas y por tanto el costo y tiempo de desarrollo es menor. Además este sistema es menos susceptible de daños puesto que los satélites, las señales del GPS, no son fácilmente accesibles.

Sin embargo, las señales de al menos 4 satélites son necesarios para calcular la posición completamente, pero a menudo esto no es posible debido a la topología del terreno como montañas, edificios o densa vegetación.

Otro sistema propuesto por Tesch y Zimmer [77] consiste en emitir señales de sonido a cada cierto tiempo y almacenar los registros de las frecuencias de rebote emitidas en un recorrido. Estos registros son agrupados (almacenados) junto con la ubicación del lugar a la que pertenece ese registro de frecuencias, de tal forma que en los siguientes recorridos se pueda identificar en que lugar se encuentra el robot comparando la frecuencia actual con los registros de frecuencia almacenados en los primeros recorridos. Esto, en cierta forma tiene sus desventajas ya que pueden existir dos o más lugares distintos con frecuencias muy parecidas, dando lugar a ambigüedades. Además, al modificar la estructura de alguno de los lugares, las frecuencias obtenidas pueden ser diferentes del primer registro que se haya hecho del mismo lugar.



**Figura 2.6** El proceso de estimación

### ***2.3.4.3. Mapas***

#### ***2.3.4.3.1. Localización con un mapa ‘a priori’***

Una ventaja significativa con respecto a lo costoso y poco flexible de los métodos de localización basados en señales, es la de usar marcas naturales como señales. Usando éste tipo de marcas naturales se elimina el costo de la instalación de señales. La identificación de éstas, refiriéndonos a la extracción de los objetos, ha sido el tópicó de investigación durante mucho tiempo.

La navegación usando marcas naturales ha encontrado también aplicación en el guiado de misiles. La Agencia Americana de Misiles usa la imagen del terreno adquirida a priori con la misión de guiar los misiles. Muchas de las naves poseen mapas marítimos que los submarinos usan para navegar mientras están sumergidos y bases cartográficas están disponibles para distintas áreas del mundo [39]. Más recientemente, una de las sondas de la NASA lanzadas a Marte en Julio de 1997 uso navegación terrestre, usando este tipo de técnicas.

Parte de las estructuras existentes pueden servir como marcas naturales. Ebihara describe un robot móvil el cual navega dentro de un reactor nuclear usando los elementos que ocurren naturalmente dentro de ese reactor como señales.

Los objetos pueden a veces proporcionar más información que un simple rango. Baeg [5] mide la orientación de los objetos y usa esta medida para mejorar la localización del robot.

Los investigadores han examinado también como seleccionar las marcas para facilitar la localización.

La estimación de la posición del vehículo usando el filtro de Kalman ha sido también usada mediante un método basado en marcas naturales. Si las marcas pueden ser identificadas, pueden ser tratadas como señales. Estas marcas normalmente son seleccionadas e identificadas de manera geométrica. Este método es muy popular y puede ser seguido en [54,22,82].

Todos estos ejemplos de localización están dados sobre un concepto importante: el ambiente es conocido por el AGV. Como consecuencia, el AGV está limitado a operar dentro de ese ambiente conocido. A parte de esta restricción, otra desventaja es que el ambiente tiene que ser mapeado antes de que el AGV pueda operar. Si se desea ampliar el ambiente de operación, nuevas áreas deben ser mapeadas. Además es necesario tener en cuenta el posible cambio del ambiente y contar con soluciones para ello.

Sobre todos estos problemas, los investigadores han investigado la posibilidad de que los AGV's puedan generar el mapa de ambiente por donde navegan y localizarse dentro de él de manera simultánea.

#### ***2.3.4.3.2. Construcción del propio mapa***

La idea principal de la localización basada en la construcción del propio mapa es que el robot valiéndose de sus sensores construya un mapa de su medio ambiente para conocerlo, y a partir de éste, localizarse.

La clave de la técnica basada en construcción de mapas es el buen sentido del ambiente y la capacidad del sistema para construir una buena representación de éste.

La creación de mapas y localización simultánea (SLAM) es actualmente uno de los puntos más importantes a investigar en la navegación de AGV. Resolver este problema podría permitir desplegar un AGV fácilmente, con una mínima preparación inicial. El AGV sería también flexible, capaz de soportar modificaciones en el ambiente. Un robot que soporta el problema SLAM se puede llamar ya verdaderamente “autónomo”.

Dentro del problema de la localización del robot basada en mapas, la construcción del mapa de ambiente es solo el principio. La localización y la construcción del mapa, no deben ser vistas como dos tareas separadas, sin embargo, muchos investigadores en el pasado han considerado la construcción de mapas como un problema separado de la localización. Esto ha dado lugar a soluciones inconsistentes del problema SLAM.

Elfes describe una técnica de construcción de mapas basada en la utilización de delimitadores. Estos delimitadores dividen el ambiente dentro de celdas individuales. Inicialmente cada celda es marcada como ‘desconocida’. A medida que el AGV explora el ambiente, éste le asigna nuevas marcas, como ‘vacía’ o ‘ocupada’, acorde con sus investigaciones. Esta técnica es todavía muy popular hoy en día. Un problema del uso de delimitadores es que a medida que el ambiente es más grande, más delimitadores son necesarios.

Las primitivas geométricas también han sido usadas para modelar el ambiente, por ejemplo por Ayache [4], donde los objetos lineales y planos son extraídos de una imagen de video y usada para dicho modelado. Ayache usa el filtro de Kalman para estimar la varianza de las primitivas basadas en la varianza de las observaciones y la varianza de las diferencias entre los originales y las observaciones.

También pueden usarse redes neuronales para la construcción de un mapa topológico del ambiente. [15,38].

El problema de la mayoría de ellos es que ignoran los problemas del SLAM. La primera solución consistente al problema SLAM fue publicada por Smith, Self y Cheeseman [76]. Aunque ellos no examinaron los problemas del SLAM, su solución proporcionó un tratamiento para ellos. Smith y sus compañeros emplearon la estimación y el filtro de Kalman. Para ellos, el problema de la construcción del mapa es considerado una extensión de la tarea de localización. Su técnica es muy importante ya que aplican métodos de estimación rigurosa al problema SLAM. Ciertas modificaciones han sido diseñadas y publicadas [11] y dicha técnica ha sido también implementada, por ejemplo por Moutarlier.

Uno de los elementos fundamentales a tener en cuenta en la construcción de mapas y localización simultánea es entre otros, las correlaciones entre los errores en el vehículo y los objetos estimados. Estas correlaciones son la esencia del problema SLAM.

#### 2.3.4.4. Localización mediante índices visuales

Diversas propuestas y soluciones para SLAM se encuentran en la literatura, sin embargo existen casos en la navegación donde puede no requerirse la construcción de un mapa. Estas técnicas solo se basan en el seguimiento de elementos o índices visuales del ambiente como son marcas artificiales o naturales, códigos, objetos, etc., pero sin llegar a construir un mapa del ambiente. Un trabajo ejemplo puede ser el de Sim y Dudek, [84]. Donde proponen un sistema de aprendizaje de marcas visuales naturales para la estimación de la posición del robot.

Un proceso basado en seguimiento de índices visuales puede ser descrito mediante el esquema de la Figura 2.7.

Las características son extraídas de la imagen o de los datos sensados mediante métodos de detección. Los parámetros de las características componen los índices visuales. Estos índices pueden aparecer y desaparecer del campo de visión del robot durante su desplazamiento, por lo que es importante realizar un seguimiento de ellos en una secuencia de movimientos. El sistema de seguimiento debe analizar la evolución de estos índices en la secuencia. El seguimiento es realizado mediante un mapeo entre los índices que varían en forma y en posición, con los índices visualizados con anterioridad. Finalmente, el sistema de seguimiento comprende una regla de evolución que permite la actualización de las primitivas de referencia en cada imagen.

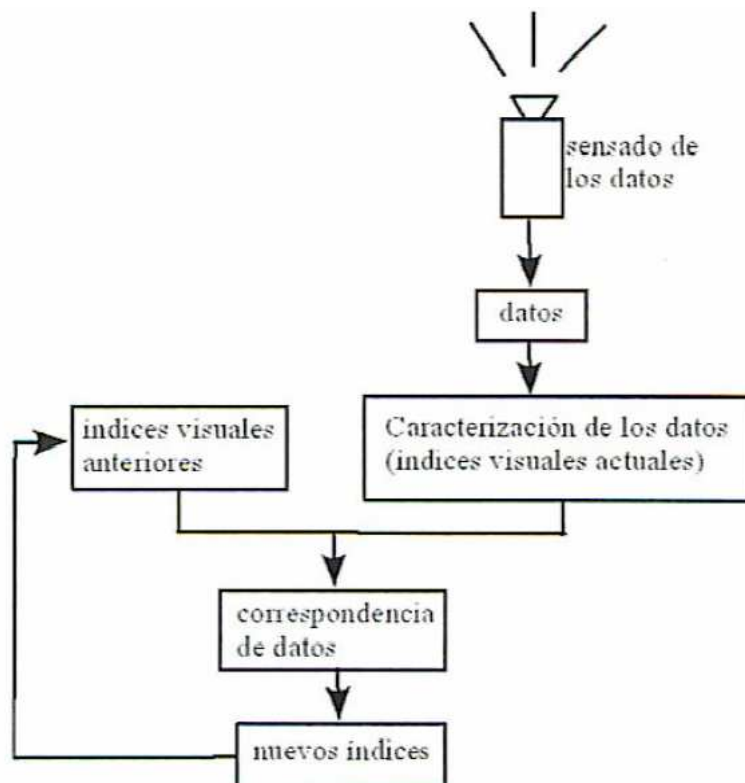


Fig. 2.7 Proceso básico para el seguimiento de índices visuales.

En un proceso, el tipo de índice visual a utilizar varía dependiendo de las necesidades y los requerimientos del problema a resolver. Esta decisión también involucra la selección del sensor, ya que éste también participa en la selección de los parámetros característicos. Enseguida citamos a manera de ejemplo sistemas destacando la preferencia del dispositivo de percepción y el tipo de índice usado.

#### ***2.3.4.5. Tipo de sensor e índice usado***

El clásico sensor usado para medir la distancia y la orientación de las marcas con respecto al robot son los anillos de sonares [62] y más frecuentemente los telémetros [26]. Una solución basada en una cabeza binocular activa, la cual estima la distancia y la orientación de la marca visual se propuso en [21]. El mismo autor propone más recientemente una solución en tiempo real basada en una sola cámara. Una desventaja de esta solución es la necesidad de una calibración manual: ambas, la posición y la orientación del robot con respecto a una marca predefinida de talla conocida deben ser exactamente determinadas.

Dependiendo del sensor o de la técnica de sensado empleada, los datos extraídos pueden ser 2D o 3D. [55], [12], [17] extraen datos 2D a partir de una imagen. En estas investigaciones son usados algoritmos de segmentación para separar los espacios peligrosos de los espacios seguros. Por ejemplo Maja et al. Usan un método de umbralización mejorado para segmentar e implementan dicho método en un sistema real de navegación. En otros trabajos se extraen características 3D basándose en sistemas de visión mediante técnicas como la estereovisión, la luz estructurada, o el flujo ópticos (optical flow), el cual utiliza una secuencia de imágenes tomadas a partir de una sola cámara.

Las primitivas extraídas de estas técnicas pueden variar. Por ejemplo [6] extraen líneas y bordes de las imágenes y usan esta información para asignar un modelo geométrico a cada imagen de referencia. A partir de aquí, determinan una débil estimación de la posición del robot aplicando transformaciones geométricas para ajustar los datos extraídos de la imagen más reciente al modelo asignado a la imagen de referencia. [28], [73] utilizan una red neuronal para aprender la posición del robot dada una imagen de referencia. Una ventaja de esta técnica es la interpolación entre las diferentes posiciones a partir de las cuales las imágenes de referencia fueron tomadas. [46] extraen de las imágenes líneas verticales y combinan esta información con los datos obtenidos de sensores ultrasónicos para estimar la posición del robot. [64], [83] consideran trayectorias en el espacio propio de características invariantes en escala para estimar la posición del robot en un pequeño rango operacional. Otros trabajos utilizan técnicas que se aplican a recuperación de imágenes (image retrieval [75]) para identificar la posición actual del robot [47], [81]. Mientras todos estos métodos usan técnicas sofisticadas de mapeo de características, no aplican ninguna técnica de filtrado para

representar la estimación de la posición actual del robot y la actualización de dicha posición cuando nuevas mediciones y nuevos desplazamientos son realizados.

#### ***2.3.4.6. Localización basada en filtros***

La utilización de filtros en la localización de robots permite tener sistemas más robustos, ya que estos permiten combinar información proveniente de varios sensores para lograr estimaciones más certeras a cada desplazamiento.

La combinación de sensores propioceptivos y exteroceptivos constituyen los sistemas de percepción para la navegación de robots móviles. La información proveniente de ellos (información relativa e información absoluta), es complementaria, por esto, generalmente se utiliza una combinación de ambas, con el objetivo de fortalecer las debilidades de una con las ventajas de la otra. El principal interés de un sistema híbrido de navegación, como se le puede llamar, es el de poder reducir los principales inconvenientes de cada subsistema tomado de manera individual y obtener así los mejores resultados conservando sus ventajas o ampliándolas si es posible. Varias técnicas de hibridación han sido planteadas.

En muchos trabajos se han preocupado por mejorar la localización llamada “dead reckoning”, como también se le llama a los sistemas de localización basados en información de posición relativa. Dudek y Jenkin [27] definen que la determinación de la trayectoria o del camino recorrido mediante la observación de parámetros internos sin ninguna referencia al mundo externo, es conocida como dead reckoning.

La odometría, como ya lo hemos mencionado es uno de los sistemas de percepción más ampliamente utilizado en este tipo de localización. El principio de localización se basa en la suposición que las mediciones del movimiento de las ruedas pueden ser traducidas en mediciones del movimiento del vehículo usando el modelo cinemático de éste. Esta suposición es muy limitada, ya que hay muchas razones por las que pueden aparecer imprecisiones en la odometría. Las mayores causas de fuente de error son: deslizamiento de ruedas, inexactitud en los parámetros requeridos (radio de las ruedas, base de las ruedas...), mala alineación de las ruedas, resolución limitada de los codificadores y la frecuencia de muestreo. Los errores originados por los codificadores pueden muchas veces ser ignorados debido a la excelente resolución de estos y a la alta frecuencia de muestreo. Si el robot ha sido bien ensamblado, la desalineación de las ruedas puede ser ignorada comparada con otros de los errores. Los errores de deslizamiento no pueden ser estimados por los codificadores y por lo tanto no pueden ser compensados.

Caltabiano et al. [16] mencionan que los errores causados por la imprecisión en los parámetros de los odómetros pueden ser reducidos si una buena calibración es realizada. El problema de la autocalibración es tratada en varios trabajos. Larsen y sus colaboradores [49] propone un algoritmo que utiliza los sensores del robot para su

calibración automática cuando este está en operación. Particularmente, se introduce un filtro aumentado de Kalman que estima simultáneamente la configuración del robot y los parámetros que caracterizan los errores sistemáticos de la odometría. como entradas utiliza lecturas de codificadores y observaciones visuales mediante visión. Otro trabajo similar es presentado en [16], donde datos provenientes de un DGPS (Differential Global Positioning System) y dos sensores ópticos son fusionados mediante un filtro de Kalman extendido con el propósito de calcular la posición absoluta del robot y estimar los valores de los parámetros usados mediante odometría. Martinelli y Siegwart [58] tienen el mismo propósito que los trabajos anteriores, solo que las mediciones están basadas en codificadores y telémetros láser.

Para complementar la estimación de la posición del robot proveniente de dead reckoning mediante referencias externas se han planteado técnicas probabilísticas las cuales han mostrado ser robustas. Estas técnicas explícitamente identifican las probabilidades de las posiciones del robot y consideran los cambios relativos entre varias posibles posiciones. Esto no es posible en otros primeros métodos geométricos planteados.

El filtro Extendido de Kalman (EKF) [84] y el método Monte-Carlo (MC) [72] o filtro basado en partículas (PF-particle filter) son sin duda los sistemas probabilísticos más explotados en cuanto a la localización se refiere. El objetivo de estos filtros es combinar datos provenientes de múltiples fuentes para obtener una estimación estadística. El filtro de Kalman se basa en un modelo estocástico en el cual los errores asociados a la posición del robot y a la posición de las referencias externas son independientes y pueden ser modelados como un ruido blanco de distribución Gaussiana. Cuando estas suposiciones no se aplican, se puede proponer un esquema probabilístico usando una función de densidad de probabilidad arbitraria para representar la posición del robot, este es el caso del modelo MC. El PF, que tiene su base en el método MC, ha sido usado con gran éxito en diversos trabajos que tratan el problema de estimación del estado de un sistema. En estos trabajos podemos hablar de localización de robots, seguimiento visual, SLAM, entre muchos otros. Thrun y colaboradores por ejemplo, proponen un esquema probabilístico en el cual se determina la posición del robot que tiene la máxima probabilidad condicionada sobre todos los datos sensados pasados. La probabilidad es aproximada por un conjunto de muestras (partículas) y maximizada mediante la aplicación de un gradiente descendiente. Ababsa y sus colaboradores [1] proponen un método eficiente basado en un PF para resolver un problema no lineal/no Gaussiano de seguimiento en un sistema de realidad aumentada (augmented reality) que usa una interfase de cabeza (head mounted display). La problemática expuesta está relacionada con el problema de latencia que presentan los sistemas de realidad aumentada, esto es, el retardo que existe entre la interfase de la cabeza y el generador de la escena. Los autores proponen un método óptimo Bayesiano basado en un PF para integrar los subsistemas inercial y de visión prediciendo los movimientos de la cabeza y reduciendo así la latencia. Una aportación importante de este trabajo es el resultado de un análisis comparativo reportado, entre el estimador propuesto y un filtro de Kalman clásico implementado bajo las mismas condiciones.

Una información detallada del principio y aplicaciones del método de localización basado en esquemas MC es encontrada en [3], [72]. Un modelo de localización MC puede representar cualquier función de densidad de probabilidad sobre la posición del robot. Esta técnica es muy general, sin embargo, debido a esta generalidad, puede ser ineficiente.

El filtro de Kalman ha sido notablemente aplicado a problemas de localización y actualmente se ha extendido a trabajos más complejos como es el empleo de objetos en movimiento o el trabajo con múltiples robots. Incluso éste se ha visto optimizado, hablando en términos de tiempo computacional.

El filtro de Kalman es un mecanismo matemático que produce una estimación óptima del estado del sistema basado en el conocimiento del sistema y de las mediciones, la descripción del ruido del sistema y los errores de las mediciones y la incertidumbre en el modelo dinámico.

Como ya hemos mencionado, este filtro trabaja bajo las suposiciones de que el sistema es lineal y los errores del sistema y del sensor pueden ser modelados como un ruido Gaussiano; bajo estas condiciones el filtro de Kalman proporciona la mejor estimación basada en la corrección de cada medición individual.

El principio básico del filtro de Kalman es combinar las mediciones de  $n$  sensores para proveer tanto una estimación del estado actual del sistema como la predicción de un estado futuro.

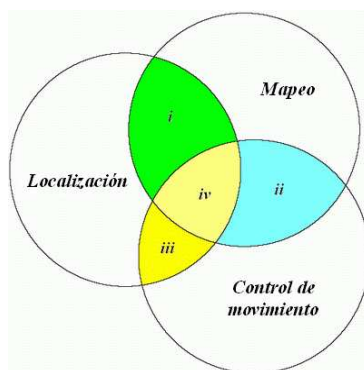
## Capítulo 3

### Exploración integrada basada en SRT-EKF

#### 3.1 Exploración integrada

Un robot móvil que operan en el mundo físico debe ser consciente de su entorno. Una gran parte de esta conciencia es saber en que lugar esta el robot (la tarea de localización) y donde ha estado (la tarea de mapeo). A falta de ayuda externa de localización, el robot debe ser capaz de construir un mapa y, al mismo tiempo, localizarse así mismos en el mapa parcialmente construido (en la literatura, este problema se denomina *simultaneous localization and map-building* o SLAM [11]).

A menudo la creación de mapas es considerado como un objetivo por derecho propio (tarea de exploración). Una estrategia de exploración es entonces necesaria para responder a la pregunta de a dónde ir, a fin de construir el mapa de manera eficiente. Nuestro enfoque para la exploración deberá considerar una evaluación equilibrada de alternativas de acciones de movimiento desde el punto de vista de la ganancia de la información, del costo de la navegación, y de la calidad de la localización. Las soluciones existentes logran diferentes grados de integración entre las tareas de localización, mapeo y control de movimiento. La figura 3.1, ilustra el campo de la exploración robótica con tres regiones que se superponen parcialmente. La región I representa gráficamente la integración de la localización y el mapeo implementada por varias familias de algoritmos SLAM [53, 79, 33, 26]. La región II representa la integración del control de movimiento y mapeo ejemplificada por prácticamente todas las estrategias de exploración [52, 85, 71, 74, 60]. La región III que integra localización y control de movimiento es el campo de la navegación activa [43, 35, 68] y la gestión de sensores [56]. La integración completa de los tres componentes [33,8] en la región IV es el objetivo de este trabajo y será referenciado como Exploración Integrada.



**Figura 3.1** El campo de la exploración robótica con las regiones de integración en relieve: (I) SLAM, (II) Exploración Clásico, (III) Localización Activa, (IV) Exploración Integrada.

**Exploración clásica (II).** Yamauchi [85] introdujo el ahora popular método frontera para exploración. Este trabajo se extiende en [71] para el uso de un método de localización mejorado y una representación del mapa mejor integrado, pero las tareas de localización y exploración permanecen totalmente desacopladas. La información de la estrategia impulsada por la exploración se extiende a múltiples fuentes de información en [60], pero la localización no se considera una parte integrante de la estrategia de exploración.

**SLAM y exploración (I & II).** En [74] múltiples robots exploran en forma cooperativa un ambiente interior usando cada uno un algoritmo de SLAM para localización y mapeo. La estrategia de exploración esta basada en el método de frontera pero no aborda la cuestión de la calidad de la localización.

**Localización activa (III).** A nivel local un algoritmo voraz se emplea en [43] para seleccionar acciones de control de movimiento que puedan reducir la incertidumbre de la localización. En la navegación costal, un método de planificación de trayectorias incrementa la robustez de la localización en espacios restringidos de gran tamaño, como se describe en [68]. La distribución de la métrica de localizabilidad se calcula fuera de línea usando un mapa de rejillas de ocupación a priori. La métrica de localizabilidad introducida en este artículo se puede extender para usarla en línea en el contexto del SLAM.

**SLAM y localización activa (I & III).** La localización estocástica activa es implementada en [35]. El algoritmo selecciona desde una lista de posibles acciones de movimiento por medio de pesos el resultado de la reducción en la incertidumbre de la localización contra el costo asociado. La tarea de exploración no es considerada.

**Exploración integrada (IV).** Feder et al. [33] es la obra más estrechamente relacionada. El vehículo crea un mapa y se localiza de forma simultánea y toma las decisiones locales del siguiente movimiento con el fin de minimizar el error en las estimaciones de la postura del vehículo y las marcas referenciadas. Este principio se aplica para el problema de la exploración submarina en [8]. El objetivo es minimizar la postura del vehículo y los errores del mapa se incorporan en un comportamiento general basado en la arquitectura. En ambos casos, la estrategia de exploración es espacialmente local y la métrica de localizabilidad se basa en un solo paso anticipado.

Las siguientes secciones presentan con detalle el enfoque adoptado para realizar la exploración integrada, la cual se basa en el filtro de Kalman Extendido y el método SRT

### 3.2. Método SRT para ambientes desconocidos

La exploración de ambientes desconocidos puede considerarse como un problema fundamental para los robots móviles, dado que involucra todas las capacidades

fundamentales de estos sistemas, por ejemplo, la percepción, la planificación, la localización y la navegación. Desde un punto de vista práctico, la exploración es una tarea central en aplicaciones tales como misiones planetarias, intervenciones en áreas hostiles, construcción automática de mapas, entre otras.

Una definición ampliamente aceptada sobre la exploración es la siguiente: “el acto de moverse a través de un ambiente desconocido mientras se construye un mapa que pueda utilizarse para subsecuentes navegaciones”. El rendimiento de las estrategias de exploración debe ser valorado en base a la calidad del mapa obtenido y del tiempo necesario para construirlo. Muchas de las técnicas existentes caen dentro de la clase de exploración basada en fronteras. La lógica de este enfoque es que el robot debe moverse hacia los límites (la frontera) de las áreas seguras exploradas y del territorio desconocido para maximizar la información obtenida a través de nuevas percepciones.

Es interesante adoptar una perspectiva más general dentro de la Inteligencia Artificial, de acuerdo con la cual, la exploración es “el proceso de seleccionar acciones en aprendizaje activo”. En el paradigma de aprendizaje activo, los datos de entrenamiento son obtenidos como resultado de las acciones del aprendiz. En particular, cuando el robot recopila información sobre su ambiente mediante movimiento y sensado, se considera como un caso de aprendizaje activo de orden-sensitivo, por que el flujo de datos es resultado de todas las acciones pasadas del robot. El problema central de la exploración es cómo seleccionar la siguiente acción. La exploración basada en fronteras se logra cuando el criterio es la maximización de la utilidad de las acciones. Sin embargo existe otra opción, es decir, usar un mecanismo de selección aleatoria (también llamado camino aleatorio). Las ventajas de esta elección son (1) simplicidad y (2) el hecho de que cualquier secuencia de acciones se ejecutará eventualmente. La última propiedad mencionada lleva a la completitud: se encontrará una solución cuando esta exista. Por otra parte, la selección de una acción puramente aleatoria puede ser muy ineficiente.

El enfoque del problema emana de las técnicas de planificación de movimientos aleatorios (PMA), las cuales construyen roadmaps en el espacio de configuraciones libre usando muestreo aleatorio y verificando las colisiones. En PMA, el problema planteado es de aprendizaje activo de orden-libre: lo que se observa del ambiente depende sólo de la última acción (búsqueda aleatoria), ya que el mapa del ambiente está disponible progresivamente y el robot se traslada para recopilar más información. Por lo cual, los planificadores aleatorios son considerados como estrategias de exploración orientadas a objetivos utilizando la selección aleatoria de acciones. Como ya se había mencionado, la completitud (probabilística) de estos planificadores es inherente a su naturaleza, además, se puede lograr una mayor eficiencia agregando algunas heurísticas al esquema aleatorio básico. El método RRT es un ejemplo típico.

El método de exploración implementado se basa en la generación aleatoria de configuraciones en un área segura local detectada por los sensores. Se crea una estructura de datos llamada árbol aleatorio de exploración usando sensores (SRT), el cual representa el roadmap del área explorada asociado a una región segura (RS). Cada nodo del SRT consiste de una configuración libre y su región segura local (RSL) asociada; la RS

es simplemente la unión de todas las RSLs pertenecientes al árbol. La RSL es una estimación del espacio libre circunvecino a una configuración dada del robot; en general, su forma dependerá de las características del sensor pero también puede reflejar diferentes posturas de percepción.

El método de exploración SRT, se presenta bajo la suposición de una perfecta localización del robot, provista por otro módulo. Esto puede suceder en ocasiones (por ejemplo, con un sistema GPS usado en misiones planetarias), pero no podemos omitir que tal suposición a menudo es ilógica en ambientes desconocidos y no estructurados.

Si realizamos pruebas experimentales con robots móviles, observaríamos que el algoritmo SRT no sería completamente operativo, esto se debe a la hipótesis de perfecta localización. Lo más recomendable es realizar una exploración integral (localización + exploración).

### ***3.2.1. Algoritmo SRT-EKF***

Este trabajo está basado en el método SRT y el filtro extendido de Kalman. Nuestro método es una estrategia basada en fronteras para la exploración integrada. Una característica importante de este tipo de método es que la optimización de la ganancia de la información y el costo de navegación se toma automáticamente en cuenta por la estrategia aleatorizada local (el planificador local del método SRT) la cual propone destinaciones candidatas. De hecho, en el trabajo de Judith Espinoza [23] Se extendió el método SRT a diferentes clases de robots móviles.

## **3.3 El filtro de Kalman extendido**

El filtro de Kalman aborda el problema general de tratar de estimar el estado  $x \in$

$R^n$  de un proceso controlado a tiempo discreto que se rige por una ecuación diferencial lineal estocásticas. Pero ¿qué sucede si el proceso a ser estimado y (o) la relación de medición para el proceso es no lineal? Algunas de las aplicaciones más interesantes y exitosas de filtro de Kalman han sido este tipo de situaciones.

Un filtro de Kalman que linealiza respecto a la media actual y la covarianza se conoce como un filtro de Kalman extendido o EKF [36].

Supongamos que nuestro proceso tiene un vector de estado  $x \in R^n$  pero que el proceso se rige por la ecuación diferencia no lineal estocásticos

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \quad (1)$$

con una medición  $z \in R^n$  que es

$$z_k = h(x_k, v_k), \quad (2)$$

donde las variables aleatorias  $w_k$  y  $v_k$  representan el proceso y la medición del ruido. En este caso, la función no lineal  $f$  en (1) corresponde al estado en el paso anterior  $k-1$  al estado en el paso de tiempo actual  $k$ . Se incluye como parámetros de cualquier función de conducción del  $u_{k-1}$  y la media cero del ruido del proceso  $w_k$ . La función no lineal  $h$  en la ecuación de medición (2) relaciona al estado  $x_k$  a la medición  $z_k$ . En la práctica, por supuesto no conocemos los valores individuales del ruido  $w_k$  y  $v_k$  en cada paso del tiempo. Sin embargo, se puede aproximar vector de estado y de medición sin ellos como:

$$\tilde{x}_k = f(\tilde{x}_{k-1}, u_{k-1}, 0) \quad (3)$$

y

$$\tilde{z}_k = h(\tilde{x}_k, 0) \quad (4)$$

donde  $\tilde{x}_k$  es un estimado a posteriori del estado (de un anterior paso del tiempo  $k$ ).

Es importante señalar que la falla fundamental del EKF es que las distribuciones (o densidades en los casos continuo) de las distintas variables aleatorias no son normales después de someterse a sus respectivas transformaciones no lineales.

La EKF es simple y ad hoc estimador de estado que sólo se aproxima a la optimización de la regla de Bayes de linealización.

Para estimar un proceso con diferencia que no es lineal y la medición de las relaciones, empezamos escribiendo nuevas ecuaciones que rigen linealizar y estiman que alrededor de (3) y (4).

$$x_k \approx \tilde{x}_k + A(x_{k-1} - \tilde{x}_{k-1}) + Ww_{k-1}, \quad (5)$$

$$z_k \approx \tilde{z}_k + H(x_k - \tilde{x}_k) + Vv_k, \quad (6)$$

Donde:

- $x_k$  y  $z_k$  son los vectores estado actual y medición.
- $\tilde{x}_k$  y  $\tilde{z}_k$  son los vectores aproximados estado y medición de (3) y (4),
- $\tilde{x}_k$  es una estimación a posteriori del estado en el paso  $k$ ,
- Las variables aleatorias  $w_k$  y  $v_k$  representan el proceso y la medición del ruido,
- $A$  es la matriz Jacobiana de derivadas parciales de  $f$  con respecto a  $x$ ,
- $W$  es la matriz Jacobiana de derivadas parciales de  $f$  con respecto a  $w$ ,
- $H$  es la matriz Jacobiana de derivadas parciales de  $h$  con respecto a  $x$ ,
- $V$  es la matriz Jacobiana de derivadas parciales de  $h$  con respecto a  $v$ ,

Por simplicidad, no se utilizará el subíndice del paso del tiempo  $k$  con el Jacobiano  $A$ ,  $W$ ,  $H$  y  $V$ , a pesar de que en realidad son diferentes en cada paso de tiempo.

Ahora se define una nueva notación para el error de predicción,

$$\tilde{e}_{x_k} \equiv x_k - \tilde{x}_k, \quad (7)$$

y la medición residual

$$\tilde{e}_{z_k} \equiv z_k - \tilde{z}_k, \quad (8)$$

En la práctica, no se tiene acceso a  $x_k$  en (7), es el vector de estado actual, es decir, la cantidad que se está tratando de estimar.

Por otra parte, no se tiene acceso a  $z_k$  en (8), es la medida actual que se está utilizando para estimar  $x_k$ . Usando (7) y (8), podemos escribir las ecuaciones que rigen para un proceso de error como

$$\tilde{e}_{x_k} \approx A(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1} + \varepsilon_k), \quad (9)$$

$$\tilde{e}_{z_k} \approx H(\tilde{e}_{x_k} + \eta_k), \quad (10)$$

donde  $\varepsilon_k$  y  $\eta_k$  representan nuevas variables aleatorias independientes que tienen media cero y matrices de covarianza  $WQW^T$  y  $VRV^T$ ,  $Q$  y  $R$  son la covarianza del proceso de ruido y la covarianza de medición del ruido, respectivamente.

Podemos observar que las ecuaciones (9) y (10) son lineales, esto nos motiva a utilizar la medición actual residual  $\tilde{e}_{z_k}$  en (8) y un segundo (hipotético) filtro de Kalman para estimar el error de predicción  $\tilde{e}_{x_k}$  dada por (9). Esta estimación, llamada  $\hat{e}_k$ , podría ser utilizado junto con (7) para obtener el estimado del estado candidato a posteriori para

el proceso no lineal original como

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + \hat{e}_k \quad (11)$$

Las variables aleatorias de (9) y (10) tienen aproximadamente la siguiente distribución:  $p(\tilde{e}_{x_k}) \sim N(0, E[\tilde{e}_{x_k} \tilde{e}_{x_k}^T])$ ,  $p(\varepsilon_k) \sim N(0, WQ_kW^T)$ ,  $p(\eta_k) \sim N(0, VR_kV^T)$ .

Dadas estas aproximaciones y tomando el valor predicho de  $\hat{e}_k$  como cero, la ecuación del filtro de Kalman para estimar  $\hat{e}_k$  es

$$\hat{e}_k = K_k \tilde{e}_{z_k} \quad (12)$$

Sustituyendo (12) de nuevo en (11) y haciendo uso de (8) vemos que en realidad no necesita el segundo (hipotético) filtro de Kalman:

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + K_k \tilde{e}_{z_k} = \tilde{x}_k + K_k(z_k - \tilde{z}_k) \quad (13)$$

La ecuación (13) ahora puede utilizarse para la actualización de medición en el filtro de Kalman extendido, con  $\tilde{x}_k$  y  $\tilde{z}_k$  procedentes de (3) y (4), y  $K_k$  es la ganancia de Kalman con la adecuada sustitución para la covarianza de error de medición.

El conjunto completo de ecuaciones EKF se muestra a continuación. Notemos que hemos sustituido  $\hat{x}_k^-$  por  $\tilde{x}_k$  para seguir siendo coherente con los principios de “super menos” una notación a priori, de la que ahora conectar el subíndice k al Jacobiano A, W, H y V para reforzar la idea de que son diferentes en (y por lo tanto debe ser calculado de nuevo) en cada paso de tiempo

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, 0) \quad (14)$$

$$P_k^- = A_k P_{k-1} A_k^T + W_k Q_{k-1} W_k^T \quad (15)$$

Al igual que con la base del filtro de Kalman discreto, las ecuaciones de tiempo de actualización (5, 6) proyecta el estado y la covarianza estimadas de los anteriores pasos de tiempo  $k-1$  con el paso de tiempo actual  $k$ .

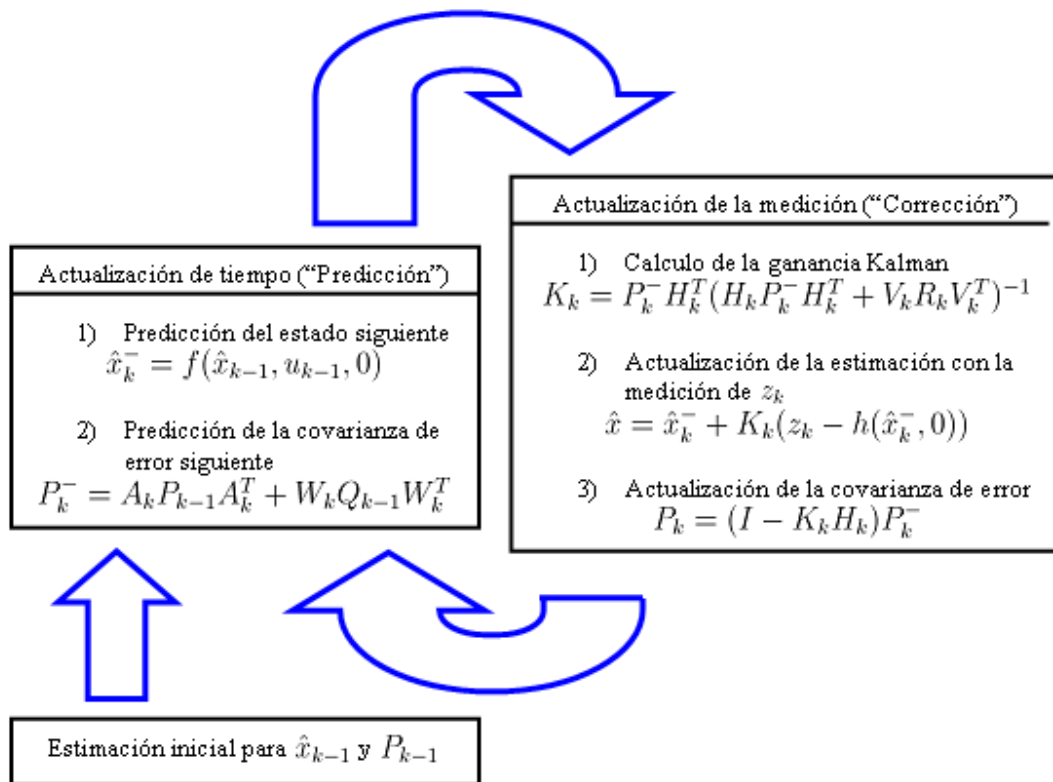
De nuevo  $f$  en (14) viene de (3),  $A_k$  y  $W_k$  son los procesos Jacobianos en el paso  $k$ , y  $Q_k$  es la covarianza del proceso de ruido en el paso  $k$ .

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + V_k R_k V_k^T)^{-1} \quad (16)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - h(\hat{x}_k^-, 0)) \quad (17)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (18)$$

Al igual que con la base del filtro de Kalman discreto, las ecuaciones de actualización de las mediciones (16, 17, 18) corrigen las estimaciones del estado y de covarianza con la medición  $z_k$ . Una vez más  $h$  en (17) viene de (4),  $H_k$  y la  $V$  son las mediciones de los Jacobianos en el paso  $k$ , y  $R_k$  es la covarianza de medición del ruido en el paso  $k$ . El subíndice de  $R$  cambia con cada medición. La figura 3.2 ofrece un panorama completo de la operación del EKF.



**Figura 3.2.** Un panorama completo de la operación del filtro de Kalman extendido.

### 3.4 Algoritmo exploración integrada

SLAM ha sido un área que atrae a muchos investigadores con el esfuerzo se centró principalmente en la obtención de la mejor estimación global para la localización y construcción del mapa. Más allá de esta actitud pasiva, una estrategia más integrada, donde el mapeo no es el único objetivo, podría facilitar el equilibrio entre la exploración y la precisión.

En la exploración integrada, el robot móvil crea un mapa y se localiza de forma

simultánea y toma las decisiones locales para el próximo movimiento con el fin de minimizar el error en las estimaciones de las posturas del móvil y la configuración de las referencias.

El método de la RST se basa en la construcción de una estructura de datos llamada árbol aleatorio de exploración usando sensores (SRT), el cual representa el roadmap del área explorada asociado a una región segura (SR). Cada nodo del árbol (T) consiste en una estimación odométrica  $\hat{q}$  de la configuración del robot con una región segura local asociada (LSR) S que se reconstruye por el sistema de percepción. Un Proceso continuo de localización basado en el filtro de Kalman extendido (EKF) corrige  $\hat{q}$  y sus LSR para obtener una consistencia global. T es incrementalmente construido para extender sus ramas hacia zonas aparentemente no exploradas.

```

Exploracion_Integrada( $q_{init}, K_{max}, l_{min}, I_{loc}$ )
1   if k=1 to  $K_{max}$ 
2        $\hat{q} \leftarrow$  ODOMETRIA;
3       S  $\leftarrow$  RSL;
4       ( $q_{act}, S$ )  $\leftarrow$  LOCALIZAR( $\hat{q}, S$ );
5       T  $\leftarrow$  AMPLIAR_ARBOL( $q_{act}, S$ );
6       F  $\leftarrow$  FRONTERA ( $q_{act}, S, T$ ) ;
7       i  $\leftarrow$  0
8       if F  $\neq$  0;
9           while l >  $l_{min}$ ;
10               $\theta_{rand} \leftarrow$  DIR_ALEATORIA (F);
11               $q_{cand} \leftarrow$  DEZPLAZAR ( $q_{act}, \theta_{rand}$ );
12              if i <  $I_{loc}$ 
13                  l  $\leftarrow$  LOCALIZABILIDAD ( $q_{act}, T$ );
14              else
15                  l  $\leftarrow$   $l_{min} + 1$ ;
16              end;
17              i  $\leftarrow$  i + 1;
18          end;
19          MOVER ( $q_{cand}$ );
20           $q_{act} \leftarrow q_{cand}$ ;
21      else
22          MOVER ( $q_{act.padre}$ );
23           $q_{act} \leftarrow q_{act.padre}$ ;
24      end;
25  end;
26  return T;

```

Figura 3.3. Algoritmo de Exploración Integrada basada en SRT

El algoritmo que implementa el método SRT es mostrado en la Figura 3.3. Mientras la estructura detallada de cada procedimiento será descrita en las secciones siguientes, abajo destacamos los pasos básicos del algoritmo.

En cada iteración del algoritmo, los procedimientos de ODOMETRIA y RSL son primero ejecutados: los datos de los sensores propioceptivos y exteroceptivos son recolectados y preparados para calcular  $\hat{q}$  y el área segura local. Las características relevantes de S son también identificadas para su posterior uso.

Un paso de localización basado en características es realizado en este punto. En particular, una asociación entre las características de S y las características anteriores de RSL's (contenidas en T) es realizada, con el fin de identificar cual de las características actuales ya han sido observadas desde otras posiciones. La estimación odométrica  $\hat{q}$  es entonces corregida hasta  $q_{act}$  "reajustando" la Región Segura Local de tal manera que las características asociadas se igualen lo mas posible. El árbol T es entonces actualizado añadiendo  $q_{act}$  y la S asociada, y procesada a fin de recobrar una representación consistente del ambiente. Por ejemplo cuando el robot completa una vuelta alrededor de un obstáculo, se realiza un reajuste global que consiste de todos las RSL's involucradas y sus rasgos.

El siguiente paso es el computo de la frontera local F, es decir, la porción del limite (boundary) de la región segura local S que lleva a áreas inexploradas. En general, F será una colección de arcos disjuntos. En este punto, el procedimiento DIR\_ALEATORIA selecciona primero uno de estos arcos en base al valor esperado de ganancia, y una dirección de exploración  $\theta_{rand}$  con el arco elegido. Una configuración candidata  $q_{cand}$  es entonces generada tomando un paso desde  $q_{act}$  en la dirección  $\theta_{rand}$ . El tamaño de paso es seleccionado como una fracción fija de la extensión de S, en esa dirección en particular; debido a la forma de S,  $q_{cand}$  será sin duda libre de colisión. Si no existen arcos frontera, el robot regresara al nodo padre de  $q_{act}$  y el ciclo de exploración iniciara de nuevo.

Antes de moverse al  $q_{cand}$ , el robot realizara un paso de validación basado en la función de localización (LOCALIZABILIDAD). Este estima la cantidad de información que  $q_{cand}$  puede proveer al paso de localización, esencialmente basado en el número de características ya observadas que serán visibles desde la nueva configuración. Si el potencial de localización es suficientemente grande, o si un número máximo de configuraciones candidatas han sido rechazadas, el robot se mueve a  $q_{cand}$  y el ciclo se repite.

Cuando todos los arcos frontera han sido visitados, el robot es forzado a regresar a la raíz del árbol (la configuración inicial), de este modo realiza un mecanismo automático de retorno. Tenga en cuenta los siguientes puntos, los cuales serán más explicados en el resto del documento.

- El método anterior es un paradigma general. Su rendimiento en la práctica dependerá de la exactitud de la localización y la reconstrucción de la RSL, y por lo tanto en la disposición sensorial del sistema.
- El árbol aleatorio basado en sensores  $T$  juega el papel de un mapa global en nuestro enfoque, y es entonces así llamado en lo que sigue. No obstante nótese que  $T$  es una simple colección de configuraciones con las regiones seguras locales asociadas (y las características), dándole consistencia por el proceso de localización. No realiza una “fusión” explícita de estas regiones por que este método no lo necesita.
- En comparación con otros métodos de exploración basada en fronteras, la frontera local  $F$  es un subconjunto del límite de la región segura local actual. De esta manera el robot realizara la exploración primero en profundidad tanto como sea posible. En otras aproximaciones, la frontera es globalmente definida y una penalización explícita deberá considerarse en la distancia recorrida con el fin de evitar conductas erróneas.

## Capítulo 4

### Simulación y resultados experimentales

#### 4.1. Proceso de creación del sistema

##### 4.1.1. *¿Qué es?*

Se ha implementado una herramienta software que permitirá la simulación de la navegación de robots móviles en ambientes desconocidos, resolviendo el problema de la exploración integrada, es decir, el sistema será capaz de generar un mapa de su ambiente de trabajo mediante los datos sensoriales y otro tipo de datos característicos de si mismo y de los sensores que utiliza, y que conocerá a priori, y a partir de dicho mapa, será capaz de localizarse dentro de él permitiendo por tanto la navegación autónoma del mismo. Este simulador, nos permitirá un estudio y entendimiento completo del problema.

##### 4.1.2. *¿Qué hace?*

El proceso principal de esta simulación esta narrado en el capitulo anterior, pues básicamente sigue el algoritmo de Localización\_Integrada.

Lo único que no hace el sistema es seleccionar la zona a explorar, debido a que tiene como opción escoger entre diferentes zonas la que se analizara. Cabe mencionar que aun que la zona que se elija sea la misma varias veces, el resultado arrojado por el proceso de localización no será el mismo siempre debido a que, como ya se menciona antes, el proceso de elección del siguiente punto a explorar es aleatorio, lo cual provocará que las los árboles de exploración no sean iguales.

##### 4.1.3. *¿Cómo está hecho?*

El sistema a fue diseñado sobre una plataforma que permite un alto nivel de computación a nivel matemático debido a las complicadas operaciones que la resolución del problema requiere. Para ello se dispuso de la herramienta de trabajo MATLAB. MATLAB es un lenguaje de alto nivel y un ambiente interactivo que permite el desarrollo de tareas computacionalmente intensivas de manera más rápida que otro lenguaje de programación tradicional como puede ser C, C++.

MATLAB puede ser usado en un amplio rango de aplicaciones, incluyendo señales y procesamiento de imágenes, comunicaciones, control de diseño, test y medidas,

modelado financiero y análisis, biología computacional, robótica... MATLAB permite ser extendido gracias a sus componentes ToolBoxes, que no son más que colecciones de funciones MATLAB de propósito especial, disponibles de manera separada, como es el caso de la toolbox que ha sido creada en este proyecto.

#### 4.1.4. ¿Cómo funciona?

El funcionamiento del sistema es básico, la interfaz está claramente definida, sin posibilidad de confusión. No hay datos a introducir y el proceso de ejecución está perfectamente señalado en los nombres de cada botón. Solo se tiene que elegir que zona es la que desea explorar.

Para iniciar el simulador solo se tiene que ir a MATLAB e iniciarlo, después se necesita abrir en él la carpeta que contiene el simulador, después escribir en el prompt el nombre de la herramienta “explorador” y enter. Mostrara una ventana donde se encuentran los controles del simulador (Figura 4.1).

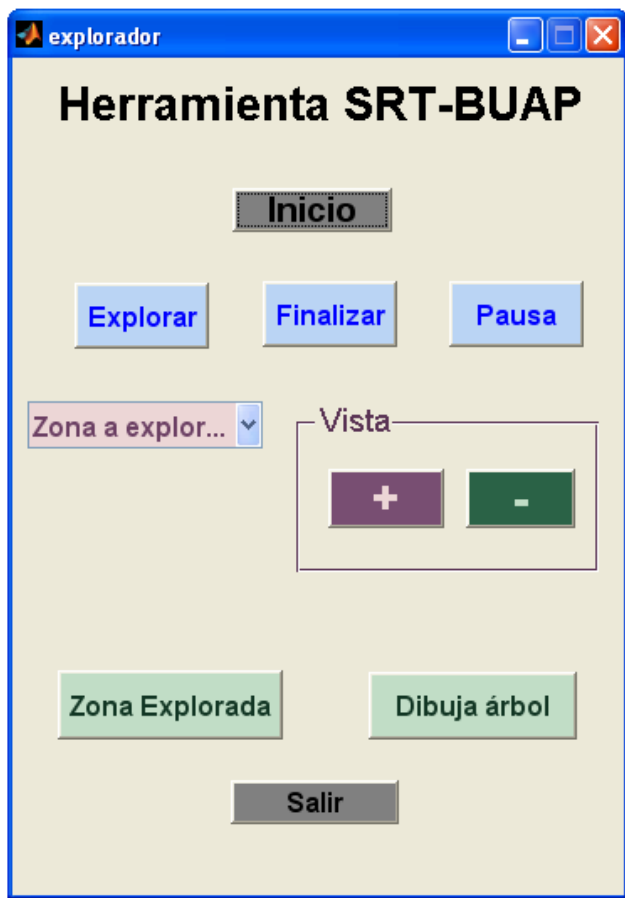
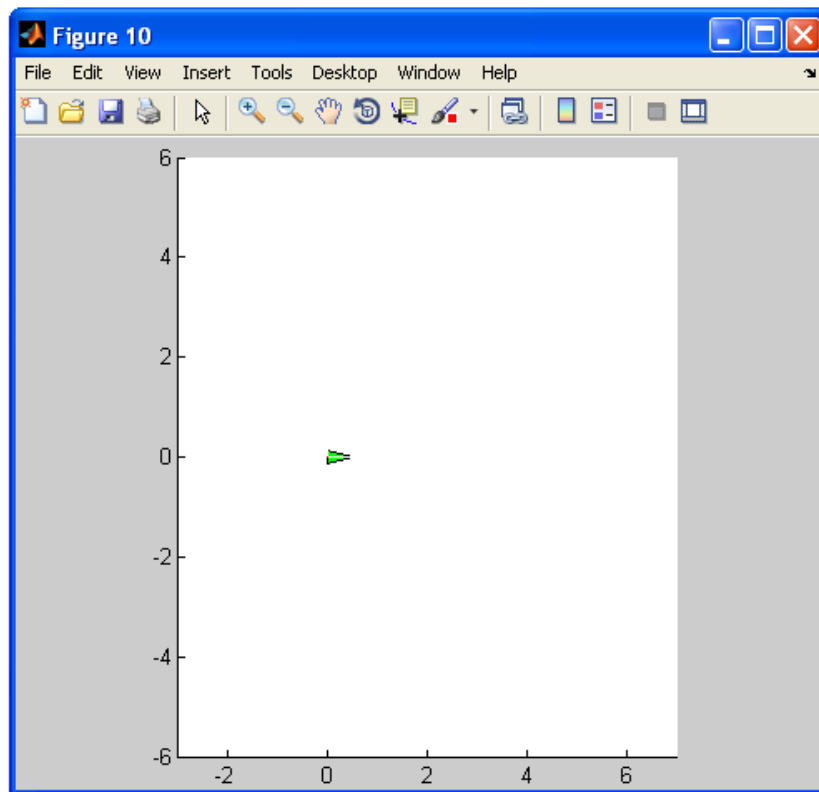


Figura 4.1 Control del Simulador

Para poder iniciar el proceso de simulación es necesario oprimir el botón “Inicio”, ya que su proceso será inicializar las variables o limpiarlas en caso de que se requiera una nueva localización, así como cerrar las ventanas que se necesiten reutilizar para no tener conflicto con los procesos anteriores si es que los hubo.

Como resultado de oprimir dicho botón, nos mostrara la venta de donde se verá la simulación de la localización, en el centro se podrá observar un triangulo pequeño que representara al robot móvil (Figura 4.2).



**Figura 4.2** Área de simulación

Ahora bien el siguiente paso es elegir la zona a explora (Figura 4.3), se tienen 3 opciones. Al momento de elegir la zona, esta será mostrada en la ventana del área de simulación (Figura 4.4).



Figura 4.3 Elección de la zona a explorar en el control del simulador

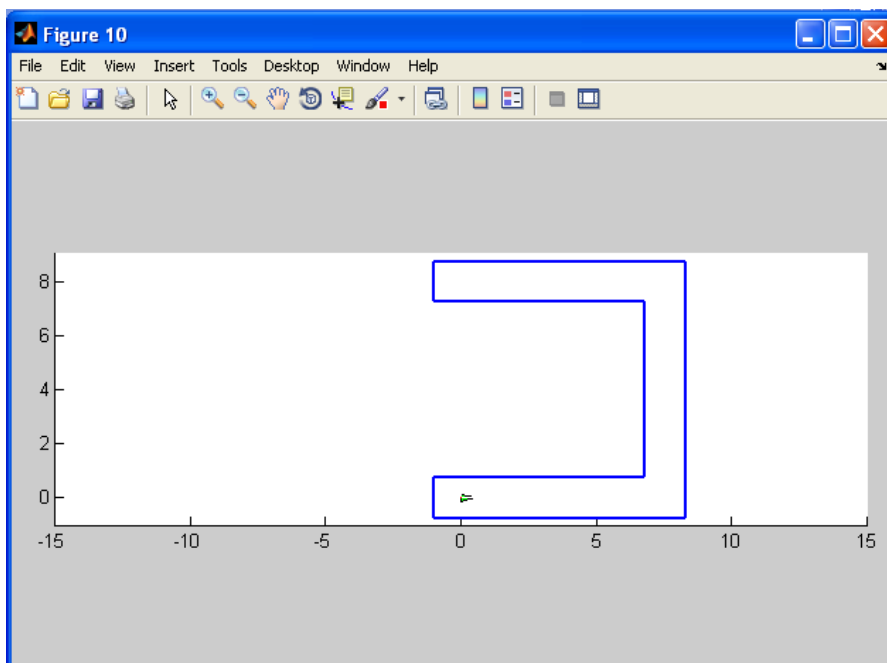
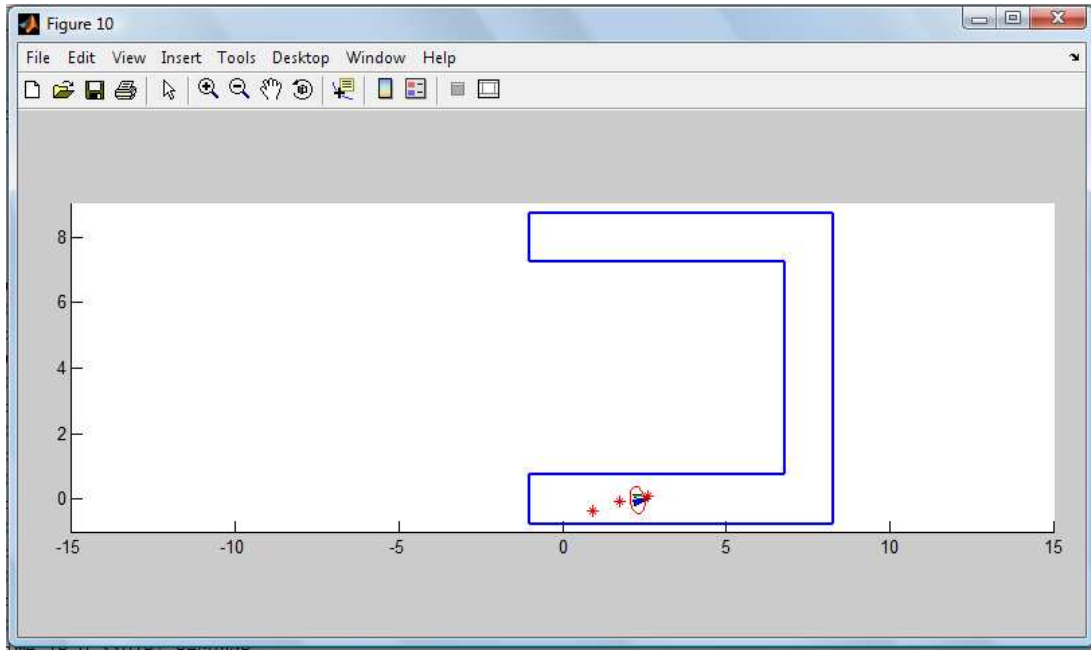


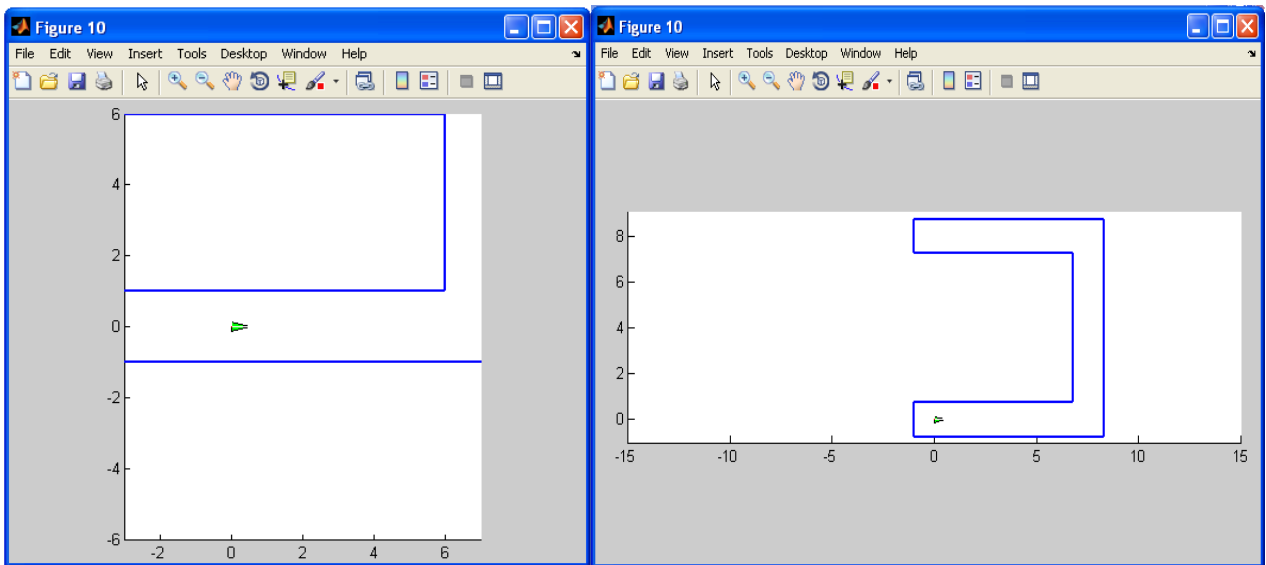
Figura 4.4 Área de simulación que muestra el robot móvil y la forma del zona a explorar

Ya que obtenemos la zona, se debe presionar el botón “Explorar” y se mostrar la simulación de la localización integrada (Figura 4.5). El botón “Pausa” sirve para detenerla simulación pero al presionar “Explorar” continuara el proceso en donde se quedo, pero si se presiona el botón “Finalizar”, se dará por terminada la simulación aun cuando la localización no lo haga.



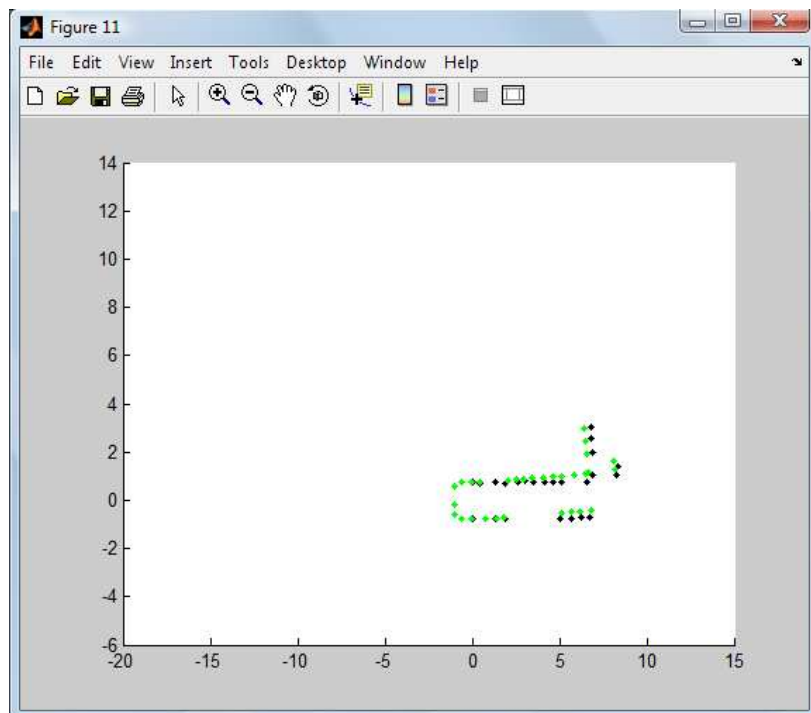
**Figura 4.5** Área de simulación que muestra el proceso de localización y mapeo

Los botones que se encuentran en el recuadro de vista en la ventana del control del simulador, sirven para visualizar desde dos perspectivas el movimiento del “robot”. El botón con el símbolo + es para observar mas cerca al “robot”, en un recuadro de +/-3 del punto en el que se encuentra y el del símbolo - es para visualizar todo el mapa que esta explorando.



**Figura 4.6** Vistas del área de simulación. La imagen de la izquierda es el resultado del botón + y la de la derecha del botón –

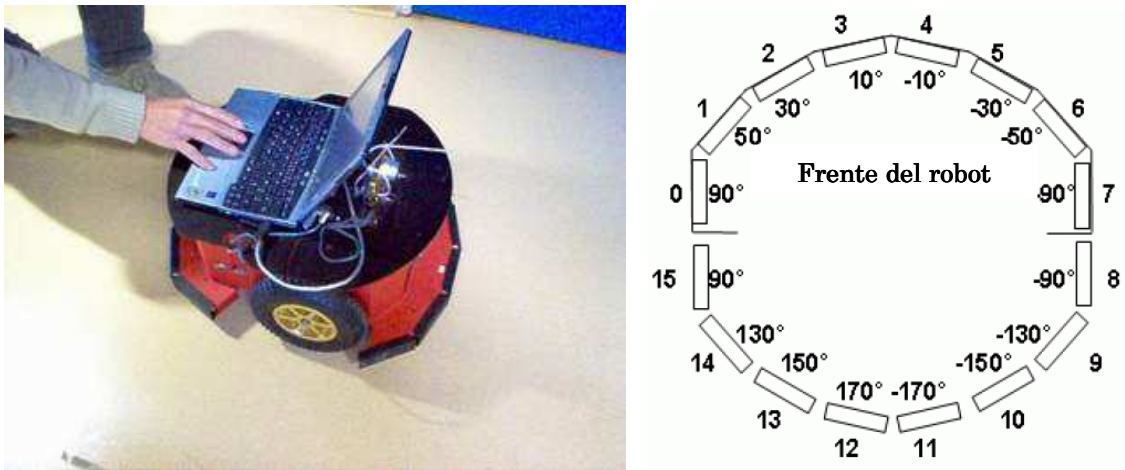
Por último tenemos que al dar por terminada la exploración, ya sea por decisión propia o porque el proceso de exploración a llegado a su fin, se presiona el botón “Zona Explorada” para visualizar el mapa que a creado nuestro robot (figura 4.7).



**Figura 4.6** Zona explorada por el robot. Los puntos negros muestran la zona real, mientras que los puntos verdes nos indican la zona sin corrección.

## 4.2. Resultados experimentales

Para nuestros experimentos preliminares que estamos utilizando tanto simulados y reales del robot Pioneer P3DX equipado con un anillo de sensores ultrasónicos frontales y traseros (8 en cada lado), y sensores de contacto al frente y atrás, como se muestra en la figura 4.7. El robot Pioneer es un robot P3DX de tipo unicycle. La palabra unicycle caracteriza a todos los tipos de robots accionados por dos ruedas independientes y que tienen una o más ruedas flotantes que permitan garantizar su estabilidad.



**Figure 4.7** El robot P3DX pionero. Sonar y las posiciones angulares en el robot.

La exploración integrada basada SRT-EKF se ha implementado en nuestra plataforma de software desarrollada en la FCC-BUAP y dedicada a la planificación de movimientos y SLAM, ver figura 4.8.

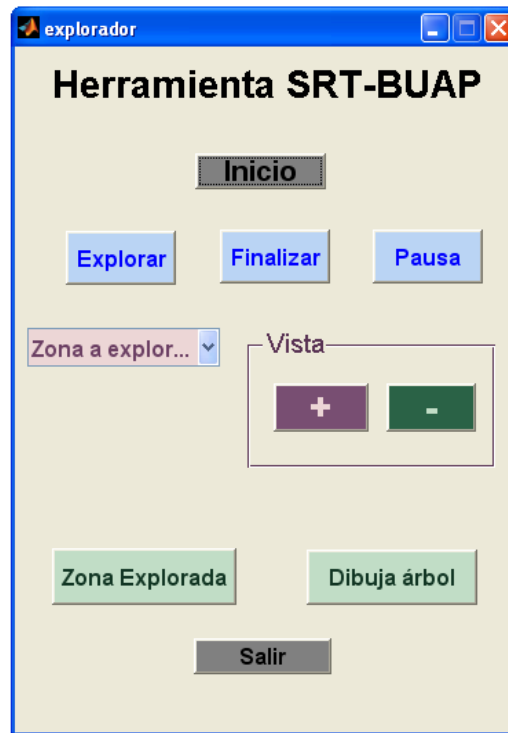
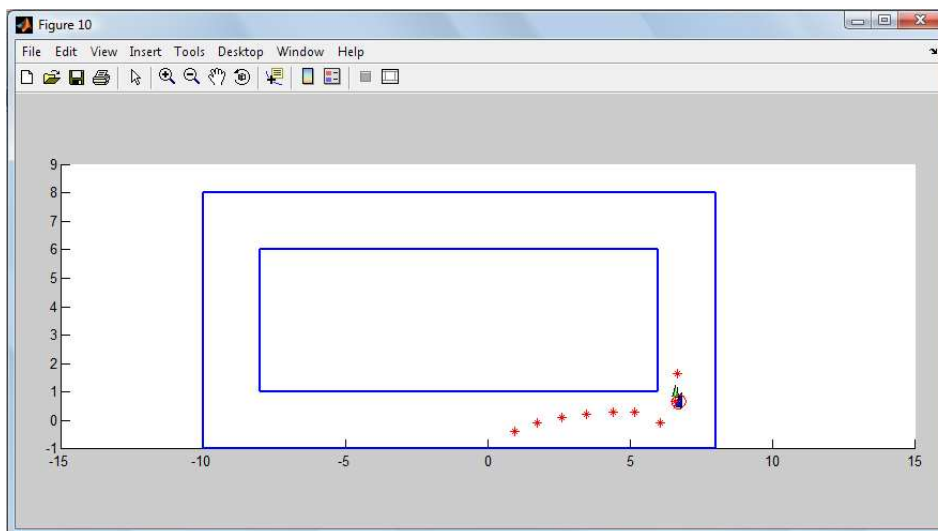
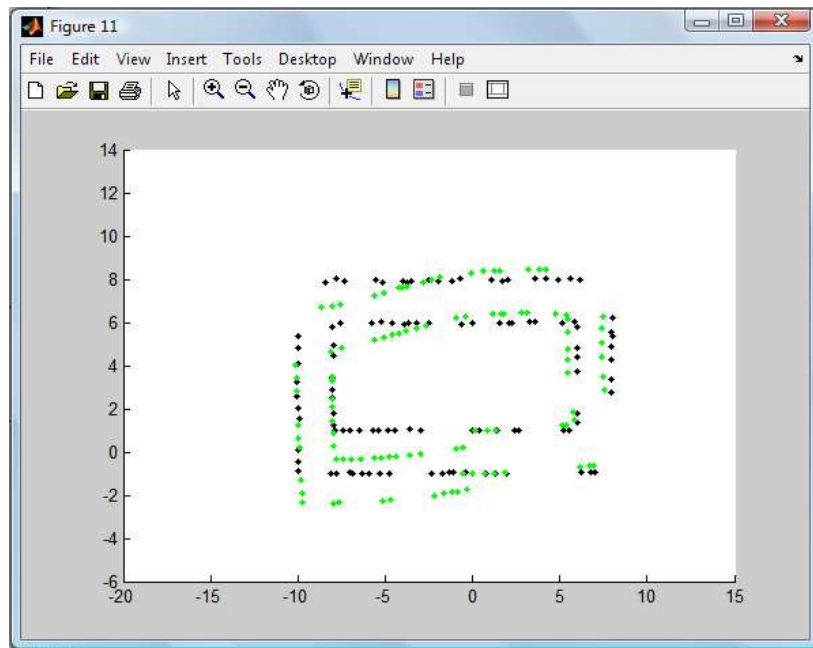


Figura 4.8 Interfaz gráfica del simulador.

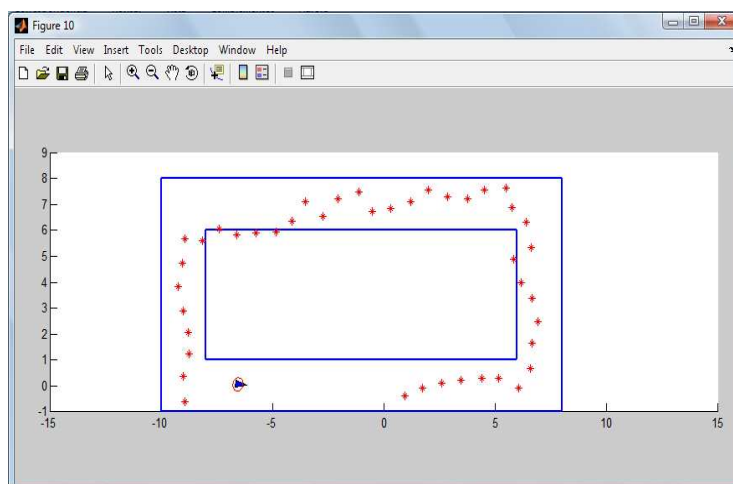
El ambiente simulado se muestra en la figura 4.9, que contiene varios pasillos. La figura también muestra el mapa final (es decir, el mapa obtenido usando la exploración SRT-EKF integrada), y el mapa obtenido, sin localización.



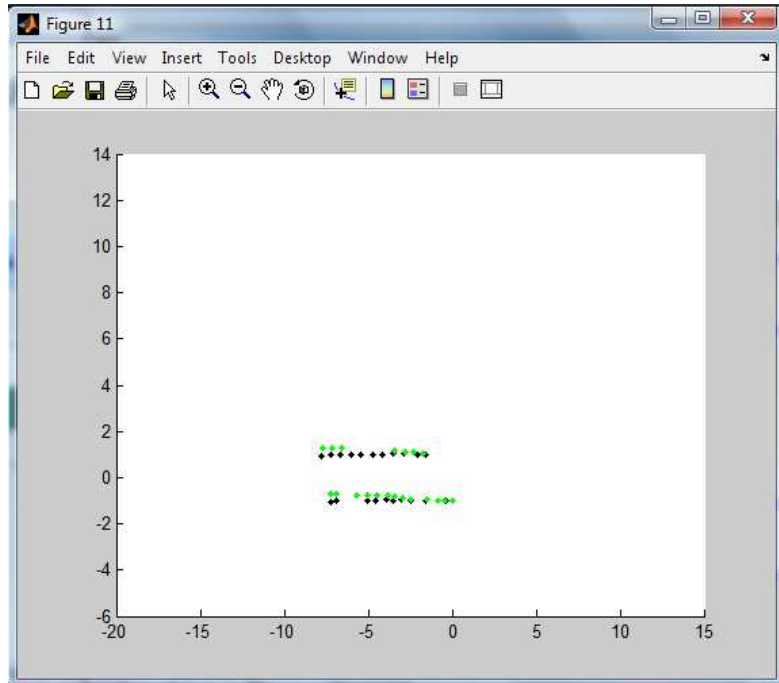


**Figura 4.9** Zona a explorar y mapa definitivo, abajo con puntos verdes el mapa obtenido sin localización (sólo con las estimaciones odométrica) y en puntos negros el mapa obtenido con la estrategia propuesta.

Los resultados experimentales se muestran en las figuras 4.10 y 4.11. El robot Pioneer es impulsado por dos ruedas independientes, es ágil, versátil, inteligente, es una plataforma robótica móvil actualizada. Tiene un anillo de 8 sonares hacia adelante y 8 atrás. Los potentes motores 3-DX y ruedas de 19 cm puede alcanzar una velocidad de 1.6 metros por segundo y llevar una carga útil de hasta 23 kg. En la figura 4.10 se muestra el mapa final obtenido sin localización. Podemos mencionar, además, que cuando el robot no utiliza el proceso de localización, choca a menudo con los obstáculos como se puede apreciar en la imagen. La figura 4.11 muestra la construcción de mapas y el proceso de localización. Podemos observar que la LSR se ha realineado al mapa después del proceso de localización.



**Figura 4.10** El mapa final obtenido con la SRT-EKF basada en la integración de la exploración y el mapa obtenido sólo con la estimación odométrica.



**Figura 4.11** La RSL actual que se percibe es colocada de acuerdo a la estimación odométrica y la RSL se ha adaptado a la hoja después del proceso de localización.

El filtro de Kalman (KF) es una técnica de la teoría de estimación que combina la información de diferentes fuentes de incertidumbre para obtener los valores de las variables de interés. El filtro ha sido aplicado con éxito en muchas aplicaciones, como las misiones a Marte, y sistemas de guiado automático de misiles. Aunque el concepto del filtro es relativamente fácil de comprender, las ventajas y las deficiencias sólo se pueden entender bien con el conocimiento de lo más básico y con experiencia.

El EKF ha demostrado tener éxito en muchas aplicaciones prácticas de sistemas no lineales. Puede, ser usado en particular, en aplicaciones donde el modelo del sistema está bien descrito por un modelo lineal, pero en el que hay algunos parámetros inciertos en el sistema de medición y modelos. Al tratar a estos parámetros como variables de estado el problema se vuelve no lineal; los parámetros entonces pueden estimarse en línea.

Podemos utilizar EKF's hacer el seguimiento de la posición, de localización global, y resolver el problema del robot secuestrado. Utilizando un sistema de conducción único, el EKF puede realizar el seguimiento de la posición de predicción. La trayectoria estimada es la trayectoria libre de ruido dada por la función del sistema, y la incertidumbre en las estimaciones del estado crece sin límites. La selección de los niveles de ruido del sistema debe hacerse con cuidado, a fin de obtener estimaciones del estado útiles. Si el modelo de sistema es significativamente no lineal, las estimaciones de estado pueden tener errores de estimación fuera de los intervalos de confianza. Esto puede suceder con facilidad con el

ruido grande en la orientación de la localización. Usando un estado completo del sensor se pueden corregir las predicciones que el seguimiento de la posición predicha hace para obtener estimaciones del estado que son mucho más precisas, junto con la incertidumbre limitada en las estimaciones de estados. Dependiendo del nivel de antes y la incertidumbre de medición del ruido, la ganancia de Kalman determina qué cantidad de residuos a medida incluye en la estimación del estado. Esto lo hace independiente de la medida real y la medición de la predicción. Con el sistema fijo y la medición del ruido y las medidas de frecuencia, la incertidumbre en las estimaciones del estado converge. Con unas medidas poco frecuentes, aumenta la incertidumbre hasta que llegue una medición, resultando en una disminución de la incertidumbre general.

## Conclusiones y trabajos futuros

Para que un robot agregue sus percepciones a un mapa, necesita saber su ubicación, pero para que un robot determine su ubicación, muchas veces se necesita un mapa. Este es un dilema central en la exploración robótica. Los robots utilizan a menudo la estima para calcular su posición, sin un mapa, pero las ruedas de deslizamiento y de vínculos internos pueden ser imprecisas. Estos errores se acumulan con el tiempo, y estimar la posición del robot se vuelve cada vez más impreciso.

Con frecuencia, la creación de mapas es considerado un objetivo por derecho propio (la tarea de exploración). Una estrategia de exploración es entonces necesaria para responder a la pregunta de a dónde ir, a fin de construir el mapa de manera eficiente. Nuestro enfoque de exploración clama contar con una evaluación equilibrada de las acciones de movimientos alternativos desde el punto de vista de la ganancia de la información, el costo de navegación, y la calidad de la localización. Las soluciones existentes alcanzan diversos grados de integración entre las tareas de localización, mapeo y control de movimiento.

Hemos presentado una extensión interesante del método aleatorio para la exploración integrada propuesto en [34]. El método crea una estructura de datos a través de generaciones aleatorias de configuraciones. El SRT representa un roadmap de la zona explorada con una región segura asociadas, una estimación del espacio libre tal como lo percibe el robot durante la exploración. Un procedimiento de localización continua basada en el filtro de Kalman extendido de la región segura se ha integrado en la propuesta. La ganancia de la información y el potencial de localización son considerados cuando se evalúa la estrategia de configuraciones candidato para la exploración. Resultados experimentales y simulaciones en el robot P3DX Pioneer se han presentado en este trabajo.

Asimismo, consideramos que el proceso de localización es robusto, pero una forma de verificar esta afirmación es comparar nuestros resultados con la propuesta realizada por los autores en [34].

Como futuro trabajo se han considerado varios retos: una extensión de nuestra propuesta para el caso de la exploración integrada con múltiples robots, que nos llevará a la búsqueda de una solución al problema de localización multi-robot, un análisis comparativo con el esquema de localización continua basada en características.

## Referencias

- [1] Ababsa F., Mallem M., and Roussel D., "Comparison Between Particle Filter Approach and Kalman Filter-Based Technique For Head Tracking in Augmented Reality Systems", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, New Orleans, LA, Abril, 2004
- [2] K.O. Arras, "Feature-Based Robot Navigation in Known and Unknown Environments", École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2003.
- [3] Arulampalam S., Maskell S., Gordon N., Clapp T., "A tutorial on particle filters for on-line non-linear/non-gaussian Bayesian tracking", IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 50, no.2, Febrero, 2002.
- [4] N. Ayache and O.D. Faugeras. Maintaining representations of the environment of a mobile robot. In I.J. Cox and G.T. Wilfon, editors, *Autonomous Robot Vehicles*, pages 205-220. Springer-Verlag, 1990.
- [5] M. Baeg, H. Hashimoto, F. Harashima, and J.B. Moore. Pose estimation of quadratic surface using surface fitting technique. In Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 204-209, August 1995.
- [6] Basri R. and Rivling E., "Localization and Homing using combinations of model views". *Artificial Intelligence*, 78(1-2), 1995.
- [7] Bekey George A., "Autonomous Robots From Biological Inspiration to Implementation and Control", MIT Press Cambridge, Massachusetts, Londres Inglaterra, 2005.
- [8] A. Bennett and J.J. Leonard. A behavior-based approach to adaptive feature mapping with autonomous underwater vehicles. *IEEE J. of Oceanic Engineering*, 25(2):213-226, 2000.
- [9] Besl P. J., "Active, optical range imaging sensors", *Machine Vision and applications*, Springer-Verlag, New York Inc., 1988.
- [10] Berge V., "SEPIA, System evolutif de perception pour un robot mobile", Tesis de Doctorado de la Universidad de Tecnología de Compiegne, Francia 1992.
- [11] S. Betge-Brezet, P. Hebert, R. Chatila, and M. Devy. Uncertain map making in natural environments. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1048-1053, Minneapolis, Minnesota, April 1996.
- [12] Bidlack C., Hampapur A., Katakere A., "Visual Robot Navigation using Flat Earth Obstacle Projection", IEEE Proceedings International Conference on Robotics and Automation, San Diego, May 1994
- [13] Borenstein J., Everett H.R., Feng L., "Where I am?" Sensors and methods for mobile robot positioning, Editado y Compilado por J. Borenstein.
- [14] Borenstein J. and L. Feng. Gyrodometry: A new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 423-428, Minneapolis, Minnesota, April 1996.

- [15]M. Brendt. *Neural Networks: An Introduction*. Springer-Verlag, 1990.
- [16]Caltabiano D., Muscato G., Russo F., “Localization and Self Calibration of a Robot for Volcano Exploration”, *IEEE Proceedings on International Conference on Robotics and Autonomous*, Nueva Orleans, L.C., 2004.
- [17]Chao M. T., Brauni T. and Zaknisch A., “Visually-Guided Obstacle Avoidance in office environments”, *Proceedings of the 6th International Conference on Neural Information Processing*, Perth, Australia, 16-20th November, 1999.
- [18]Chatila, R. “Deliberation and reactivity in autonomous mobile robots”, *Robotics an Autonomous Systems*, vol. 16, pp. 197-211, 1995.
- [19]I.J. Cox and G.T. Wilfong, editors. *Autonomous Robot Vehicles*. Springer-Verlag, USA, 1990.
- [20]S.C. Crow and F.L. Manning. Differential GPS control of starcar 2. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 39(4):383-405, Winter 1992-93.
- [21]Davison A. J. and Kita N., “3D Simultaneous Localisation and Map-Building using Active Vision for a Robot Moving on Undulated Terrain”, *IEEE Int. Conf. of Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1, 2002.
- [22]A. de la Escalera, L. Moreno, M.A. Salichs, and J.M. Armigol. Continuous Mobile robot localization using structured light and a geometric map. *International Journal of Systems Science*, 27(8):771-782, August 1996.
- [23]Espinoza León Judith, Abril 2006, “Estrategias para la exploración de ambientes desconocidos en robótica móvil”, Tesis Maestría, Maestro en Ciencias de la Computación, FCC-BUAP México.
- [24]R. Deveza, D. Thiel, R.A. Russel, and A. Mackay-Sim. Odour sensing for robot guidance. *International Journal of Robotics Research*, 13(3):232-239, June 1994.
- [25]Dirk B., “Map Building for Mobile Robots by High-Resolution Ultrasonic Sensing”, *Proceedings of ICAR 2003, The 11th International Conference on Advanced Robotics*, Coimbra, Portugal, Julio, 2003.
- [26]M.W.M G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark. “A Solution to the Simultaneous Localization and Map Building (SLAM) Problem”, *Proc. of the IEEE Transaction on Robotics and Automation*, pp 229-241, June 2001.
- [27]Dudek G., Jenkin M., “Computational principles of mobile robotics”, Cambridge University Press, 2000.
- [28]Dudek G., Zhang C., “Vision-based robot localization without explicit object models”, *Proc. Of IEEE International Conferenceon Robotics & Automation*, 1996.
- [29]H.F. Durrant-Whyte. An autonomous guided vehicle for cargo handling applications. *International Journal of Robotics Research*, 15(5):407-440, October 1996.
- [30]A. Elfes. Robot navigation: Integrating perception, environmental constraints and task execution within a probabilistic framework. In *Reasoning with Uncertainty in Robotics. International Workshop (RUR '95)*, pages 93–129, Amsterdam, Netherlands, 1995.
- [31]Everett H. R., “Sensor for mobile robots: Theory and Application”, A.K. Peters, Ltd, Wellesley, MA., 1995

- [32]H. Evers and G. Kasties. Differential GPS in a real-time land vehicle environment— satellite based van carrier location system. *IEEE Aerospace and Electrical Systems Magazine*, 9(8):26-32, August 1994.
- [33]H.J.S. Feder, J.J. Leonard, and C.M. Smith. Adaptive mobile robot navigation and mapping. *International J. of Robotics Research*, 18(7):650–668, 1999.
- [34]L. Freda, F. Loiudice and G. Oriolo., “A randomized method for integrated exploration”, *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2457-2464, 2006.
- [35]D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun. Active Markov localization for mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 1998.
- [36]M. S. Grewal and A. P. Andrews, “Kalman filtering: Theory and practice using Matlab”, *John Wiley & Sons, Inc.*, third edition, 2008.
- [37]Guivant J, Nebot E., Baiker S., “Autonomous navigation and map building using range sensor in outdoor applications”, *Journal of Robotic Systems*, Vol.17, No. 10, Octobre, 2000.
- [38]S.S. Haykin. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. MaxwellMacmillan International, 1994.
- [39]S.K. Honey and M.S. White. Cartographic databases. In I.J. Cox and G.T. Wilfon, editors, *Autonomous Robot Vehicles*, pages 250-258. Springer-Verlag, 1990.
- [40]Howie Choset, Keiji Nagatani, “Topological Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Toward Exact Localization without Explicit Localization”, *Proc. of the IEEE Transaction on Robotics and Automation*, pp 125-137, April 2001.
- [41]Jarvis R. A., “A perspective on range finding techniques for computer vision”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach Intelligent*, PAMI-5, No. 2, 1983, p. 122-139.
- [42]Jones, J., Roth, D., “Robot Programming : A Practical Guide to Behavior-Based Robotics”, McGraw-Hill/TAB Electronics, 1 edition, December, 2003.
- [43]L.P. Kaelbling, A.R. Cassandra, and J.A. Kurien. Acting under uncertainty: Discrete bayesian models for mobile robot navigation. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1996.
- [44]R.E. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME Journal of Basic Engineering*, pages 35{45, March 1960.
- [45]R.E. Kalman and R.S. Bucy. New results in linear filtering and prediction theory. *Transactions of the ASME Journal of Basic Engineering*, pages 95{108, March 1961.
- [46]Kortenkamp D. and Weymouth T., “Topological mapping for mobile robots using a combination of sonar and vision sensing”, *Proc. Of the National Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*, 1994.
- [47]Kröse B. and R. Bunschoten R. “Probabilistic localization by appearance models and active vision”, *Proc. Of the International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, 1999.
- [48]E. Kruse, R. Gutsche, F. M. Wahl. “Efficient, iterative, sensor-based 3-D map building using rating functions in configuration space”, *Proc. of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 1067-1072, 1996.

- [49]Larsen T. D., Bak M., Andersen N.A. and Ravn O. “Location Estimation for Autonomously Guided Vehicle using an Augmented Kalman filter to Autocalibrate the Odometry”, FUSION98 Spie Conference Las Vegas, EU; Julio, 1998.
- [50]A. Lawrence. Modern Inertial Technology. Springer-Verlag, 93.
- [51]Lecoeur-Taibi I., Ballard P., Vacherand F., Fua P., Zhang Z., Hotz B., “Perception et modeles du sol”, Programme VAP du CNES, DSYS/SETIA/160192/B016VAP/ILT/JP, Reporte de actividades fase 4 Versión 1.1, 1992.
- [52]D. Lee. *The Map-Building and Exploration Strategies of a Simple Sonar-Equipped Robot : An Experimental, Quantitative Evaluation*. Distinguished Dissertations in Computer Science. Cambridge University Press, Cambridge ; New York, 1996.
- [53]J.J. Leonard and H.F. Durrant-Whyte. Simultaneous map building and localisation for an autonomous robot. In *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS '91)*, pages 1442–1447, Osaka, Japan, 1991.
- [54]J.J. Leonard and H.F. Durrant-Whyte. Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [55]Maja J. M., Takahashi Z.D., Nakano W. E., “Real Time Obstacle Avoidance for Visual Navigation”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotos and Systems, Las Vegas, N., 2000.
- [56]J. Manyika and H.F. Durrant-Whyte. *Data Fusion and Sensor Management: A Decentralized Information-Theoretic Approach*. Ellis Horwood Series in Electrical and Electronic Engineering. Ellis Horwood, 1994.
- [57]Maravall D., Gómez-Allende, “Reconocimiento de formas y vision aritificial”, ed. Addison Wesley, 1994.
- [58]Martinelli A. and Siegwart R., “Estimating the Odometry Error of a Mobile Robo during Navigation”, European Conference on Mobile Robots (ECMR 2003), varsovia, Polonia, Septiembre, 2003
- [59]P.S. Maybeck. Stochastic Models, Estimation, and Control, volume 1. Academic Press, 1979
- [60]S. Moorehead, R. Simmons, and W.R.L. Whittaker. Autonomous exploration using multiple sources of information. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '01)*, 2001.
- [61]Moutarlier P., Chatila R., “Stochastic Multisensory Data Fusion for Mobile Robot Location and Environment Modelling”
- [62]Newman P., Leonard J., Tardos J.D. and Neira J., “Explore and Return: Experimental Validation of Real-Time Concurrent Mapping and Localization”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Washington, DC, Mayo, 2002.
- [63]G. Oriolo, M. Venditelli, L. Freda, and G. Troso. The SRT method: Randomized strategies for exploration. Proceedings of the IEEE, Internacional Conference on Robotics & Automation, 2004.
- [64]Paletta L., Frintrop S., and Hertzberg J., “Robust localization using context in omnidirectional imaging”, In Proc. Of the International Conference on Robotics & Automation, Seoul, Korea, 2001.

- [65]Peyret F., “Robotique Mobile”, coordinado por Fargeon C., Quin J.P., Editorial Teknea, Toulouse, Francia, 1993, pp.76.
- [66]Polaroid Corporation, Commercial Battery Division Ultrasonic Ranging System, 1984.
- [67]Pomerlau. Ralph: Rapidly adapting lateral position handler. In Proceedings of the International Symposium on Robotics Research, Detroit, 1995.
- [68]N. Roy, W. Burgard, D. Fox, and S. Thrun. Coastal navigation - mobile robot navigation with uncertainty in dynamic environments. In *the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '99)*, volume 1, Detroit, MI, USA, 1999.
- [69]R.A. Russel, D. Thiel, and A. Mackay-Sim. Sensing odour trails for mobile robot navigation. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 2672- 2677, San Diego, CA, May 1994.
- [70]R.A. Russel. Mobile robot guidance using a short lived heat trail. *Robotica*, 11(5):427-431,1993.
- [71]A. Schultz, W. Adams, and B. Yamauchi. Integrating exploration, localization, navigation and planning with a common representation. *Autonomous Robots*, 6(3):293–308, 1999.
- [72]Siegwart R. and Nourbakhsh I.R., “Introduction to Autonomous Mobile Robots”, MIT Press, Cambridge Massachusetts, Londres, Inglaterra, 2004.
- [73]Sim R., Dudek G. 1999, “Learning and evaluating visual features for pose estimation”, (ICCV) Proceedings of the Seventh International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Grecia, 1999.
- [74]R.G. Simmons, D. Apfelbaum, W. Burgard, D. Fox, M. Moors, S. Thrun, and H. Younes. Coordination for multi-robot exploration and mapping. In *AAAI National Conference on Artificial Intelligence*, pages 852–858, Austin, TX, USA, 2000.
- [75]Singh K., Ma, M., Park D.-W., “Histogram Approach for Content-based Image Retrieval”, Visualization, Imaging, and Image Processing, Benalmádena, España, 2003.
- [76]R. Smith, M. Self, and P. Cheeseman. Estimating uncertain spatial relationships in robotics. In I.J. Cox and G.T. Wilfon, editors, *Autonomous Robot Vehicles*, pages 167-193. Springer-Verlag, 1990.
- [77]Tesch G, Zimmer U.R., “Acoustic-Based Room Discrimination for the Navigation of Autonomous Mobile Robots”, CIRA IEEE Proceedings on International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Monterey, E.U., 1999.
- [78]S. Thrun, F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard,. “Robust Monte Carlo localization for mobile robots”, Proc. of the IEEE Transaction on Robotics and Automation, pp 99-102, 134-138., April 2000.
- [79]S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox. A probabilistic approach to concurrent mapping and localization for mobile robots. *Machine Learning and Autonomous Robots*, 31(1-3):29–53, 1998.
- [80]T. Tsumura. Survey of autonomous guided vehicles in japanese factory. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1329-1334, San Fransisco, CA, April 1986.
- [81]Ulrich I. and Nourbakhsh I. “Appearance-based place recognition for topological localization”, Proc. Of the International Conference on Robotics & Automation, 2000.

- [82]J. Vandorpe, H. Xu, H. van Brussel, and E. Aertbelien. Positioning of the Mobile robot lias using natural landmarks and a 2d range\_nder. In Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pages 257-264, Washington, DC, 1996.
- [83]Winters, N., Gaspar, J., Lacey, G., and Santos-Victor, J., “Omnidirectional vision for robot navigation”. In Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, South Carolina, 2000.
- [84]Welch G., Bishop G., “An Introduction to the kalman filter”, UNC-Chapel Hill, TR 95-041, Abril, 2004.
- [85]B. Yamauchi. A frontier based approach for autonomous exploration. In *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Monterey, CA, USA, 1997