

## Capítulo 7

# Conclusiones

En esta tesis se ha realizado un estudio en profundidad de los problemas de localización y mapeado de robots móviles en entornos de oficina, basándonos en el enfoque bayesiano. Este enfoque ha demostrado ser de gran utilidad para formalizar correctamente distintos aspectos de estos problemas, como son los conceptos de *posición más probable*, *mapa que mejor se adapta a unas observaciones* o *trayectoria más probable*. Todos estos conceptos se manejaban habitualmente en la literatura sin tener una contrapartida formal.

El enfoque bayesiano ha demostrado también ser muy fértil en cuanto a las técnicas que se pueden derivar de él. En concreto, en los últimos años se ha utilizado para resolver el problema de la localización mediante técnicas basadas en el filtro de Kalman, en las redes bayesianas o en las rejillas de probabilidad. A estas técnicas hay que añadir la que hemos propuesto en esta tesis: los *filtros de partículas*.

El enfoque de los filtros de partículas, consistente en representar una distribución de probabilidad mediante un conjunto de muestras, es totalmente novedoso en el campo de la robótica móvil y es previsible la aparición de múltiples aplicaciones y algoritmos basados en el mismo. Un ejemplo es la propuesta de algoritmo de *estimación-maximización* que se realiza en la tesis para estimar el mejor mapa del entorno.

Esta tesis presenta, en concreto, las siguientes aportaciones, desde el punto de vista de modelos.

1. *Formulación bayesiana que integra los problemas de localización y mapeado*: se presenta una formulación bayesiana de los problemas de localización y mapeado que generaliza muchas propuestas y que presenta un marco desde el que derivar interesantes modelos, técnicas e implementaciones.
2. *Modelo del sensor de ultrasonidos*: se propone un modelo estocástico que define una función de verosimilitud multimodal de las lecturas de sonar. Este modelo es muy

realista, funciona correctamente y contempla tipos de lecturas de los sonares que hasta el momento no se habían modelado (*dobles rebotes*).

3. *Modelo de observación*: presentamos un modelo de observación para la localización del robot que contempla tanto la posibilidad de ruido aleatorio como la de obstáculos no modelados. Esta formulación lo hace especialmente robusto y eficiente, en contraposición con modelos más sencillos utilizados en la literatura.
4. *Mapas paramétricos*: los modelos de mapas de entorno que proponemos son modelos métricos parametrizables mediante las posiciones de vértices de polígonos. Este tipo de parametrización permite definir de una forma sencilla y con pocos parámetros modelos con restricciones geométricas elaboradas. Esto hará que los algoritmos de mapeado sean más rápidos y exactos.

En cuanto a técnicas y algoritmos, en la tesis hemos planteado de forma novedosa la aplicación de una serie de algoritmos a problemas de localización y mapeado:

1. *Filtro bootstrap*: se aporta la aplicación del filtro *bootstrap* al problema de la detección de características topológicas, de la localización global y del seguimiento de posiciones. El algoritmo ha localizado correctamente las características topológicas y la posición del robot, utilizando tanto datos simulados como datos reales.
2. *Algoritmo de Kitagawa*: proponemos la aplicación del algoritmo de Kitagawa a la corrección de la localización de una serie temporal completa. El algoritmo funciona correctamente con datos del simulador y datos reales.
3. *Algoritmo EM*: presentamos la formulación de un algoritmo EM basada en partículas y en técnicas de búsqueda adaptativa, así como la aplicación del algoritmo EM al problema del mapeado. Se ha comprobado la corrección del algoritmo en datos obtenidos con el simulador.

Como líneas futuras de desarrollo de esta investigación proponemos las siguientes:

1. *Problemas prácticos*: se deben solucionar problemas prácticos, como es el tiempo de computo de los algoritmos de simulación y de *bootstrap*. Se debe mejorar su eficiencia para que sean aplicables en tiempo real.
2. *Colapso del filtro bootstrap*: uno de los problemas fundamentales del filtro *bootstrap* es su colapso en situaciones de multimodalidad. Es necesario la aportación de soluciones teóricas y prácticas de este problema.

3. *Distinguibilidad de las posiciones*: profundización en los problemas teóricos de distinguibilidad de las posiciones, dado un modelo de entorno y un modelos de observación. Existen posiciones de los entornos que tienen una alta distinguibilidad. Sería interesante utilizar estas posiciones como *landmarks* naturales en los que el robot se va a relocalizar correctamente. Esta línea lleva a una teoría de la localización activa que pasa por un uso obligado de la teoría de la información.
4. *Extensión a localización por visión*: la extensión de la propuesta a visión pasa por formular la verosimilitud utilizando como datos percibidos por el robot las imágenes obtenidas por el robot. Se debería comparar esta imagen con la que el robot vería en las posiciones candidatas. Para ello es necesario formular un modelo del entorno que permita generar vistas desde posiciones arbitrarias.

