

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



DEPARTAMENTO DE
AUTOMÁTICA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

División de Ingeniería de Sistemas
y Automática (DISAM)

Sistema de navegación de un robot móvil

AUTOR: Paloma de la Puente Yusty

TUTOR: Diego Rodríguez-Losada González

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS INDUSTRIALES
José Gutiérrez Abascal, 2
28006 Madrid

Madrid, noviembre de 2007

Copyright ©2007 by Paloma de la Puente Yusty

Índice general

I	Preliminares	1
1	Introducción	2
1.1	Preámbulo	2
1.2	Antecedentes	5
1.2.1	Proyectos previos	5
1.2.2	Robots	10
1.3	Marco del proyecto	12
1.4	Objetivos del proyecto	12
1.5	Alcance del proyecto	12
A	Transformaciones relativas	14
B	EKF para medidas de distancia	16
C	Hardware utilizado	19
C.1	Plataforma móvil B21r	19
C.2	Plataforma móvil Pioneer P3-AT de MobileRobots/ActivMedia Robotics	22
C.3	Escáner láser LMS200	24

Índice de figuras

1.1	Robot cortacésped Automower Husqvarna	3
1.2	Robot aspirador RoboMaxx	4
1.3	Rover sobre la superficie de Marte	4
1.4	Proyecto Panorama	5
1.5	Proyecto RM-III	6
1.6	Proyecto EVS	7
1.7	Proyecto MobiNet	7
1.8	Proyecto Blacky	8
1.9	Proyecto WebFair	8
1.10	Proyecto Guido	9
1.11	Proyecto Urbano	9
1.12	Robot ROBUTER	10
1.13	Robot BLACKY	11
1.14	Robot Urbano	11
1.15	Robot Guido	12
A.1	Composición de transformaciones relativas	14
A.2	Inversión de una transformación relativa	15
B.1	Corrección de la posición en un movimiento circular uniforme mediante medidas de distancia a las observaciones	17
B.2	Corrección de la posición en un movimiento circular uniforme mediante las coordenadas de las observaciones	18
C.1	Plataforma móvil B21r de iRobot	19
C.2	Plataforma móvil Pioneer P3-AT	22
C.3	Panel de control	22
C.4	Láser LMS200 de SICK	24

Parte I

Preliminares

Capítulo 1

Introducción

1.1 Preámbulo

La robótica móvil es un campo de investigación relativamente reciente que actualmente ocupa importantes líneas de trabajo en laboratorios y centros técnicos de todo el mundo. Su desarrollo supone la integración de numerosas disciplinas entre las que se encuentran la automática, la electrónica, la ingeniería mecánica, la informática, la inteligencia artificial, la estadística . . .

Para ser considerado como tal, un robot móvil precisa de un sistema de locomoción que le permita desplazarse. Existen numerosas posibilidades al respecto, ya que podemos encontrar robots que andan, saltan, reptan o se mueven sobre ruedas y también robots aéreos o submarinos cuyo sistema motriz se basa en impulsión fluidomecánica. La mayor parte de estos mecanismos de locomoción surge como imitación de los modos de movimiento que se pueden observar en la naturaleza. La principal excepción es la rueda, ampliamente utilizada por sus buenas características sobre suelo plano.

Dentro de los robots móviles, los robots autónomos son aquellos que no necesitan la intervención humana para mantener el sentido de la orientación y la capacidad de navegación. Como indica **Smithers**, la idea principal del concepto de autonomía se obtiene de su etimología: *auto* (propio) y *nomos* (ley o regla). Los sistemas automáticos se autorregulan pero no son capaces de generar las leyes que deben tratar de seguir sus reguladores. A diferencia de ellos, los sistemas autónomos han de poder determinar sus estrategias, o leyes, de conducta y modificar sus pautas de comportamiento al mismo tiempo que operan en el entorno. Por lo tanto, queda claro que la autonomía añade requisitos sobre el concepto de automatismo.

Los robots autónomos deben ser capaces de adquirir información sobre el entorno. Para ello han de contar con sensores que proporcionen las medidas

y datos necesarios. Aunque no son estrictamente imprescindibles, los robots móviles suelen incorporar sensores propioceptivos que suministran medidas relativas a su estado: velocidad, incremento de posición y aceleraciones. Los encoders situados en las ruedas del robot, por ejemplo, registran el número de revoluciones de las mismas y permiten obtener la llamada posición odométrica a partir de la estimación del movimiento relativo incremental. Aunque esta aproximación presenta una buena precisión a corto plazo, la acumulación de errores a medida que aumenta el recorrido causa grandes diferencias con la posición real. Por este y otros motivos hace falta disponer de sensores estereoeceptivos para percibir los aspectos externos al robot. Los sensores de este tipo más comunes en robótica móvil avanzada son los de ultrasonidos, infrarrojos, los láseres y las cámaras. Asimismo, el robot ha de poseer computadores o microprocesadores para el procesamiento de la información y la ejecución de los algoritmos de control del sistema de navegación.

Los robots móviles presentan la gran ventaja de poder emplear sus habilidades particulares allí donde sea necesario. Esta es la clave de su creciente demanda comercial. En los últimos años se han multiplicado sus aplicaciones en entornos industriales, militares, domésticos y de seguridad [2].

Algunos ejemplos de robots de este tipo son los cortacésped, los robots aspiradora, los *Rovers* de Marte, los robots guía ...

Los robots cortacésped (figura 1.1) suelen utilizar algún medio que delimite la superficie a recorrer (como puede ser un cable que sirva de frontera para cerrar un recinto). Una vez señalada el área de césped a cortar, hacen un barrido irregular de toda la superficie.



Figura 1.1: Robot cortacésped Automower Husqvarna

Los robots aspiradores (figura 1.2) son capaces de realizar la limpieza de todo tipo de suelos. Suelen constar de dos ruedas traseras motrices y una rueda delantera directriz. Hay modelos básicos que se mueven de forma aleatoria, sin cubrir normalmente la totalidad del espacio a limpiar, y modelos avanzados que incorporan las últimas técnicas de mapeo para lograr una alta eficiencia de funcionamiento.

Los *rovers* constan de un cuerpo central que se desplaza sobre seis ruedas



Figura 1.2: Robot aspirador RoboMaxx

y tienen una cabeza y un cuello para que las cámaras puedan tener una mejor perspectiva (figura 1.3). Estas cámaras se utilizan para la construcción de mapas que les permitan guiarse por el territorio así como para enviar imágenes a la Tierra. Estos robots también cuentan con un brazo robótico y un gran número de sistemas térmicos, además de los sistemas de baterías y de comunicaciones.



Figura 1.3: Rover sobre la superficie de Marte

Los rovers *Spirit* y su "gemelo" *Opportunity* aterrizaron en el planeta rojo el 4 y el 25 de enero de 2004, respectivamente. Tienen una capacidad de movilidad mucho mayor que su antecesor el rover *Pathfinder*.

Los robots guía son un tipo de robots móviles que han de tener amplio conocimiento sobre su entorno. Sus requisitos primordiales están orientados a la interacción con las personas, pero también es imprescindible en ellos un buen sistema de navegación que les permita desplazarse de forma autónoma en exposiciones, ferias y museos. Uno de estos robots es *Urbano* (ver los

apartados 1.2.1, página 8, y 1.2.2, página 10, así como el Anexo C), un robot inteligente que ha sido empleado en el presente proyecto.

1.2 Antecedentes

En el grupo de Control Inteligente de la Universidad Politécnica de Madrid, en el cual se ha realizado este proyecto, trabaja un equipo de profesores e ingenieros con elevada experiencia en el campo de los robots móviles.

1.2.1 Proyectos previos

Los proyectos dentro de esta área que más significativamente han contribuido al nivel alcanzado se describen a continuación por orden de antigüedad. En la siguiente sección se describirá el hardware de los robots empleados.

Panorama (1989-1993)

Financiado por la Unión Europea (Proyecto ESPRIT 2483), consiste en la elaboración de un sistema avanzado de percepción y navegación para vehículos industriales dentro de entornos parcialmente estructurados y parcialmente conocidos. El proyecto estuvo orientado a demostrar la viabilidad de sistemas de transporte autónomos que pudieran sustituir a vehículos controlados por conductor en un amplio rango de aplicaciones (figura 1.4).



Figura 1.4: Proyecto Panorama

RM-III (1994-1996)

Sistema central de control para un sistema industrial de transporte basado en múltiples robots móviles autónomos dotados de inteligencia (figura 1.5). Los

vehículos tienen un alto grado de autonomía que les permite evitar obstáculos y buscar en cada caso el mejor camino a seguir. Los obstáculos pueden ser tanto fijos como móviles, con lo que la dificultad aumenta. Un componente adicional en la autonomía de los vehículos lo constituye su capacidad para gestionar el nivel de carga de sus baterías, trasladándose y conectándose automáticamente a los puntos de suministro de energía al considerarlo conveniente. Este proyecto fue financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología y contó con la participación de UPM-DISAM y de la Universidad Carlos III.



Figura 1.5: Proyecto RM-III

EVS (1996-1999)

Desarrollo de un entorno de ingeniería para facilitar el diseño y la implementación de sistemas autónomos distribuidos con aplicación en robótica móvil y en procesos continuos. Este entorno proporciona herramientas para el prototipado rápido y la experimentación, por medio de un sistema de realidad virtual que modela el sistema en desarrollo y su entorno (figura 1.6).

Mobinet (1996-2000)

Trabajo científico de un amplio conjunto de investigadores europeos en el diseño de un prototipo de robot móvil inteligente y completamente autónomo, con alta capacidad de maniobrabilidad y manipulación (figura 1.7). Destinado a servir de ayuda a personas discapacitadas, la interacción con el usuario se lleva a cabo a través de comandos de muy alto nivel. El proyecto fue financiado por la Unión Europea bajo programa TMR (Training and Mobility of Researchers).



Figura 1.6: Proyecto EVS



Figura 1.7: Proyecto MobiNet

Blacky (2000-2001)

Diseño de un prototipo de robot móvil para navegación en entornos parcialmente estructurados y con un elevado número de personas (figura 1.8). El objetivo del proyecto es desarrollar un robot capaz de moverse en entornos complicados, tipo recintos feriales, e interactuar con las personas que allí se encuentren. Desde el punto de vista del control reactivo, los obstáculos no sólo no son fijos, sino que su movimiento es totalmente imprevisible. Desde el punto de vista de la localización, se empleaba un sistema de marcas fijas en las paredes. El robot se encuentra con bastante frecuencia totalmente rodeado por personas, lo que complicaba la determinación de su posicionamiento.

WebFair (2001-2004)

Proyecto Europeo Ref: IST-2000-29456.

Desarrollo y validación de un sistema de tele-presencia basado en robots móviles, capaz de facilitar el acceso de individuos a grandes exhibiciones y



Figura 1.8: Proyecto Blacky

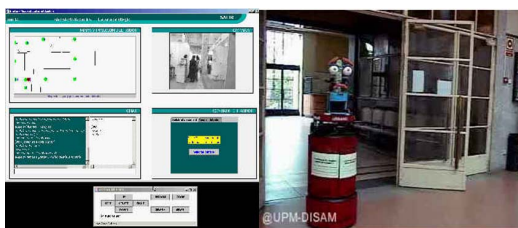


Figura 1.9: Proyecto WebFair

ferias comerciales a través de Internet. La construcción de mapas y demás pruebas se realizaron en el Castillo de Belgioso, Italia, dedicado a la celebración de exposiciones (figura 1.9).

Guido (2004)

Sistema de navegación robusto para un robot de la empresa Haptica que sirva de ayuda a la movilidad de personas débiles o con problemas de visión (figura 1.10). Un punto a destacar entre las mejoras introducidas es la utilización de la información proporcionada por los bordes de segmentos del mapa, lo cual evita redundancias y permite así disminuir el coste computacional [3]. Muy buenos resultados en casos reales empleando un ordenador portátil auxiliar.

Urbano(2001-2004)

Proyecto de investigación nacional Ref: DPI2001-3652C0201.

Proyecto financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y supervisado por la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia (CACSA), donde el robot se ha probado con éxito (figura 1.11). El módulo de navegación fue



Figura 1.10: Proyecto Guido



Figura 1.11: Proyecto Urbano

desarrollado por Diego Rodríguez-Losada en el marco de su Tesis Doctoral [4].

RobInt (2004-2007)

Ref: DOI 2004-007908C0201.

Modelado, diseño de una tecnología de diseño e implementación de comportamientos inteligentes en robots guía. Se trata de un proyecto financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología que da continuidad al proyecto Urbano introduciendo mejoras en los módulos de navegación, consciencia y emociones, conocimiento y diálogo.

1.2.2 Robots

ROBUTER

Fabricado por Robosoft, consiste en una plataforma con elevada capacidad sensorial pensada para trabajo de experimentación (figura 1.12). El modo de locomoción es diferencial y cuenta con un computador principal de Motorola con sistema operativo Albatros. Tiene también un computador secundario Sun Sparc. Los sensores de proximidad que posee son 24 sensores de ultrasonidos. También presenta capacidad de visión y Wireless Ethernet. Este robot se utilizó en los proyectos RM-III y EVS.



Figura 1.12: Robot ROBUTER

BLACKY

Plataforma MRV-4 de Denning Branch Int. Robotics dotada de un PC Pentium con sistema operativo Linux y un láser rotatorio para la localización con balizas reflectantes. También posee 24 sensores de ultrasonidos y Ethernet Wireless radio. Es el robot utilizado en el proyecto del mismo nombre (figura 1.13).

URBANO

Plataforma B21r del fabricante iRobot (figura 1.14). El computador base es un PC Pentium con sistema operativo Linux; el computador secundario es un PC Pentium con Windows. Dispone de un láser SICK LMS200 para la localización. También posee 24 sensores de ultrasonidos e infrarrojos y Ethernet Wireless radio. En DISAM-UPM se han desarrollado una cabeza y un brazo con los que el robot puede hacer gestos e interactuar con personas. Este robot se ha empleado en los proyectos WebFair, Urbano y RobInt.



Figura 1.13: Robot BLACKY



Figura 1.14: Robot Urbano

Dado que este robot ha sido asimismo utilizado en el desarrollo de este proyecto, puede consultarse más información sobre él en el Anexo C.

GUIDO

Guido (figura 1.15) es un robot de cuatro ruedas con dos motores para hacer girar las dos delanteras, pero ha de ser empujado para moverse [5]. Tiene un sensor láser para percibir el entorno y en el manillar hay un sensor de medida de fuerza para detectar el comando de giro. El computador de a bordo es un PC104 300 MHz Geode con 32 MB de disco duro y 32 MB de RAM, con sistema operativo Haptica-TinyDCLinux. Tiene disponible un puerto Ethernet para las comunicaciones y se alimenta a 24V suministrados por cuatro baterías.

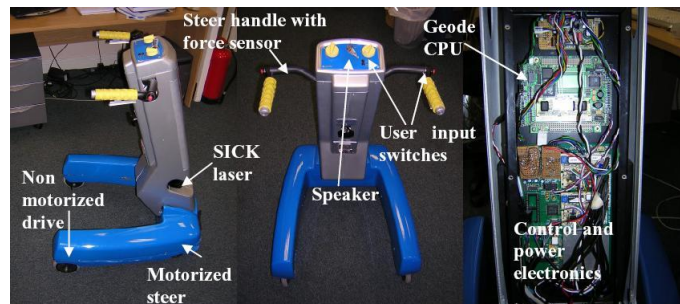


Figura 1.15: Robot Guido

1.3 Marco del proyecto

Este proyecto se ha llevado a cabo bajo beca de colaboración concedida por el Ministerio de Educación y Ciencia en el Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, dentro del grupo de Control Inteligente.

1.4 Objetivos del proyecto

El objetivo del proyecto consiste en la realización de un sistema de navegación para un robot móvil. La eficiencia de este sistema y el grado de conocimiento del entorno que proporcione han de permitir que el robot lleve a cabo sus tareas con precisión y flexibilidad. Se ha trabajado en control de movimiento, planificación de trayectorias, control reactivo, localización y construcción de mapas.

1.5 Alcance del proyecto

Los principales elementos de trabajo en este proyecto son los siguientes:

- **Formación previa.** En primer lugar se requería un asentamiento de conocimientos sobre programación y algorítmica, el aprendizaje de C++ y Visual C++. Posteriormente fue necesaria la comprensión de la base de software de navegación existente. Otra parte importante era la puesta en funcionamiento del robot Pioneer P3AT y el estudio de las librerías de la distribución Aria.
- **Desarrollo del control de movimiento.** Programación de un regulador proporcional con planificación de ganancia, empleando tanto los

parámetros de Urbano como los correspondientes al Pioneer. Generación de una trayectoria suave en los puntos de paso de una trayectoria definida. Algoritmo para evitar desviaciones sobre la trayectoria programada. Control reactivo: deformación de la trayectoria por la presencia de obstáculos y paredes cercanas al camino inicial a seguir por el robot.

- **Localización y construcción de mapas.** Estudio del filtro de Kalman y del filtro extendido de Kalman (EKF). Aplicación a la localización del robot a partir de los puntos de medida proporcionados por el láser. Modificación del modelo para el caso de disponer únicamente de medidas de distancia, que no se utiliza debido a su peor comportamiento. Programación de las fases de predicción y corrección del algoritmo. Análisis del coste computacional y reducción del tiempo de procesamiento. Obtención y actualización de mapas de puntos a partir de los datos registrados por el láser. Utilización de mapas ya realizados para efectuar la localización. Borrado de los puntos correspondientes a obstáculos dinámicos del mapa que se encuentren cercanos a la posición del robot en cada momento. Con el Pioneer sólo se ha empleado hasta el momento la parte del proyecto relativa al control de movimiento y planificación de trayectorias ya que al no poderse utilizar el láser no era posible realizar tareas de localización.
- **Integración.** Funcionamiento conjunto e intercambio de información entre los componentes anteriormente indicados.
- **Pruebas.** Pruebas de funcionamiento en modo simulación y con los robots reales. Corrección, depuración y posibles mejoras a partir de los resultados de dichas pruebas.

Paralelamente se iba desarrollando un cuadro de diálogo para facilitar la ejecución y la selección de opciones en la misma.

La estructura de descomposición del proyecto (EDP), la programación temporal seguida para llevar a cabo las tareas correspondientes a las distintas fases del mismo así como la estimación del presupuesto se incluyen en los apéndices.

Apéndice A

Transformaciones relativas

La transformación relativa entre el sistema de referencia i y el sistema de referencia j viene dado por

$$\vec{x}_{ij} = [x_{ij} y_{ij} \theta_{ij}]^T \quad (A.1)$$

El operador composición \oplus entre dos transformaciones relativas se define como:

$$\vec{x}_{ik} = \vec{x}_{ij} \oplus \vec{x}_{jk} = \begin{pmatrix} x_{ij} + x_{jk} \cos \theta_{ij} - y_{jk} \sin \theta_{ij} \\ y_{ij} + x_{jk} \sin \theta_{ij} + y_{jk} \cos \theta_{ij} \\ \theta_{ij} + \theta_{jk} \end{pmatrix} \quad (A.2)$$

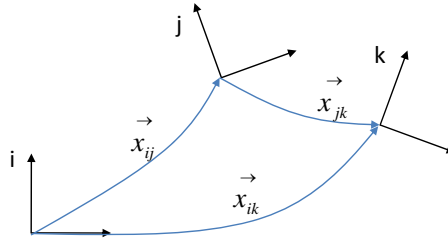


Figura A.1: Composición de transformaciones relativas

Si se calcula su jacobiana respecto de la primera transformación se obtiene:

$$F1(x_{ij}, x_{jk}) = \frac{\delta x_{ik}}{\delta x_{ij}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -x_{jk} \sin \theta_{ij} - y_{jk} \cos \theta_{ij} \\ 0 & 1 & x_{jk} \cos \theta_{ij} - y_{jk} \sin \theta_{ij} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (A.3)$$

La jacobiana respecto a la segunda transformación será:

$$F2(x_{ij}, x_{jk}) = \frac{\delta x_{ik}}{\delta x_{jk}} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{ij} & -\sin\theta_{ij} & 0 \\ \sin\theta_{ij} & \cos\theta_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

El operador inversión \ominus de la transformación relativa entre el sistema de coordenadas i y el sistema de coordenadas j se define como:

$$\vec{x}_{ji} = \ominus \vec{x}_{ij} = \begin{pmatrix} -x_{ij}\cos\theta_{ij} - y_{ij}\sin\theta_{ij} \\ x_{ij}\sin\theta_{ij} - y_{ij}\cos\theta_{ij} \\ -\theta_{ij} \end{pmatrix} \quad (\text{A.5})$$

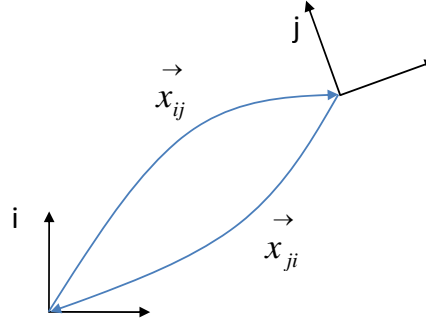


Figura A.2: Inversión de una transformación relativa

Si x_{ij} , x_{jk} y x_{ik} son tres transformaciones relativas tales que $x_{ik} = x_{ij} \oplus x_{jk}$ entonces se verifican las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} x_{ik} &\neq x_{jk} \oplus x_{ij} \\ x_{ij} &= x_{ik} \ominus x_{jk} \\ x_{jk} &= \ominus x_{ij} \oplus x_{ik} \\ \ominus x_{ik} &= \ominus(x_{ij} \oplus x_{jk}) = \ominus x_{ij} \oplus (\ominus x_{jk}) \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Apéndice B

EKF para medidas de distancia

En el caso de utilizar solamente medidas de distancia a los puntos del mapa, sin que se conozca su orientación respecto a la posición del robot, la ecuación de medida del EKF es unidimensional en lugar de tener dos componentes:

$$h_{ij} = \sqrt{(x_R - x_{lj})^2 + (y_R - y_{lj})^2} - d_i = 0, \quad (\text{B.1})$$

donde d_i es cada medida de distancia dada por algún sensor estereoceptico. Se omiten nuevamente los subíndices correspondientes al número de iteración para simplificar la notación.

De este modo, las matrices $H_{x_{ij}}$ y $H_{z_{ij}}$ quedan:

$$H_{x_{ij}} = \left[\frac{x - x_{lj}}{\sqrt{(x - x_{lj})^2}}, \frac{y - y_{lj}}{\sqrt{(y - y_{lj})^2}}, 0 \right]^T \quad H_{z_{ij}} = -1$$

La covarianza de una innovación individual quedará:

$$s_{ij} = H_{x_{ij}}^T \tilde{P} H_{x_{ij}} + H_{z_{ij}}^2 \sigma_d^2 \quad (\text{B.2})$$

con σ_d^2 como varianza en las medidas de distancia. Puede apreciarse que la dimensión de este producto es 1. De este modo, las asociaciones se realizarán minimizando la distancia de Mahalannobis, que en este caso resulta ser $\frac{h_{ij}^2}{s}$.

La matriz h estará formada por aquellos valores de h_{ij} que hayan minimizado esa distancia para cada observación. Si el número de observaciones asociadas es t , tendrá dimensiones $(t \times 1)$. La matriz H_x tendrá como filas las matrices H_{x_i} correspondientes a cada asociación realizada. Sus dimensiones serán $(t \times 3)$. La matriz H_z será la opuesta de la matriz identidad de dimensión $(t \times t)$. La matriz R también será diagonal, con elementos iguales a σ_d^2 .

Así, la matriz S tendrá dimensiones $(t \times t)$ y K , $(3 \times t)$.

Por último, quedará:

$$\hat{x} = \tilde{x} - Kh \quad (\text{B.3})$$

$$\hat{P} = (I - KH_x)\tilde{P} \quad (\text{B.4})$$

Estas ecuaciones fueron implementadas en Matlab sobre una base de código elaborado por Diego Rodríguez-Losada para ver los resultados proporcionados en la localización del robot a partir de un fichero con datos de observaciones. En la figura B.1 se muestra en color verde la trayectoria odométrica correspondiente a un movimiento circular teórico (mostrado en color azul). En rojo se representa la trayectoria corregida mediante esta aplicación del EKF. Puede verse que la información proporcionada por la distancia a los puntos resulta insuficiente para corregir los errores acumulados por la odometría y, al cabo de un cierto tiempo, el robot terminaría perdido.

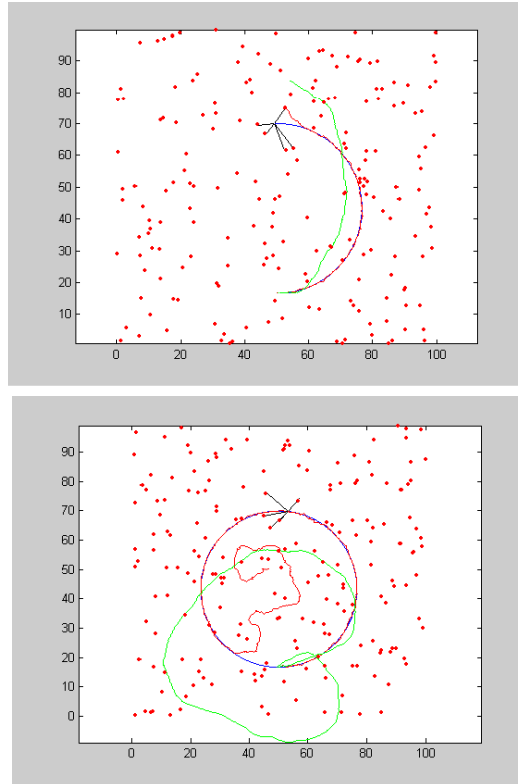


Figura B.1: Corrección de la posición en un movimiento circular uniforme mediante medidas de distancia a las observaciones

Con la información completa de las coordenadas de los puntos observados la asociación de datos se realiza correctamente y esto no sucede, como se

puede apreciar en la figura B.2. Se concluye por este motivo que no resulta conveniente utilizar la simplificación desarrollada aquí, aunque podría haber sido de utilidad y, en cualquier caso, sirvió para asentar conocimientos sobre el EKF.

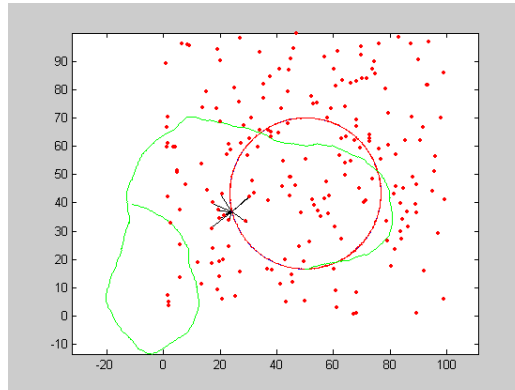


Figura B.2: Corrección de la posición en un movimiento circular uniforme mediante las coordenadas de las observaciones

Apéndice C

Hardware utilizado

Aunque ya se han introducido algunas descripciones del hardware empleado, a continuación se añade algo más de información sobre sus características.

C.1 Plataforma móvil B21r

La plataforma más usada en los experimentos del proyecto corresponde al modelo B21r de la empresa iRobot. Se trata de una plataforma holonómica cuyo sistema motriz es de tipo synchro-drive con cuatro ruedas directrices y motrices. Los sensores de infrarrojos y de ultrasonidos que posee no se han utilizado por su menor precisión, fiabilidad y rango respecto al escáner láser LMS200 (sección C.3).



Figura C.1: Plataforma móvil B21r de iRobot

En la parte superior del robot hay dos pulsadores rojos que sirven para activar los frenos del robot en caso necesario. Pueden quitarse pulsando nuevamente alguno de estos botones o a través del panel de control del robot girando el botón negro situado junto a él.

Las principales características de este robot se presentan en la siguiente tabla:

Característica	B21r
Diámetro	52cm
Altura	106cm
Distancia al suelo	2.54cm
Peso	122.5kg
Capacidad de carga	90kg
Baterías	4x12V estancas plomo-ácido
Autonomía	6 h
Sistema Motriz	Synchro-drive 4 ruedas
Motores	4 servomotores 24V
Ruedas	Goma maciza
Diámetro ruedas	11cm
Ancho ruedas	3cm
Sistema de giro	Synchro-drive 4 ruedas
Radio máxima curvatura	0cm
Radio giro	0cm (robot holonómico)
Máxima velocidad avance	0.9m/seg.
Máxima velocidad de giro	167°/seg.
Terreno	Interiores planos y uniformes
Resolución avance	1mm
Resolución giro	0.35°

Cuadro C.1: Características del robot B21r de iRobot

El robot tiene un PC base con Red Hat Linux. También dispone de un PC secundario con sistema operativo Windows. El acceso de bajo nivel al hardware del robot lo llevan a cabo unos programas servidores incluidos en el software proporcionado por iRobot (denominado *Mobility* y basado en el estándar de programación distribuida CORBA). El único de estos servidores que se ha utilizado es el b21server (alias base), encargado del manejo de los motores y de la obtención de medidas de los sensores.

C.2 Plataforma móvil Pioneer P3-AT de MobileRobots/ActivMedia Robotics

Este robot no ha podido ser utilizado en la mayor parte de las pruebas por no disponer de sensor láser para detectar obstáculos, construir mapas y situarse correctamente en su entorno de operación. Sin embargo, la utilización del sistema implementado será prácticamente inmediata tan pronto como se tenga un láser instalado.

Se trata de una plataforma utilizable en todo tipo de terrenos (AT son las siglas de *All Terrain*) También permite un alto grado de carga. Posee tracción a las cuatro ruedas y la realización de giros se basa en el deslizamiento. Esto repercute en la estimación de la odometría, resultando ser bastante peor que la proporcionada por el B21r.



Figura C.2: Plataforma móvil Pioneer P3-AT

El cuerpo del robot es de aluminio y su parte delantera se puede desmontar con facilidad por medio de unos tornillos. En la plataforma superior del robot está situado el panel de control, que permite acceder al microcontrolador y dispone de algunos LEDs indicadores de estado. En él también se haya el puerto serie RS-232 utilizado para establecer la conexión con el equipo en el que se ejecuta el software de control desarrollado.

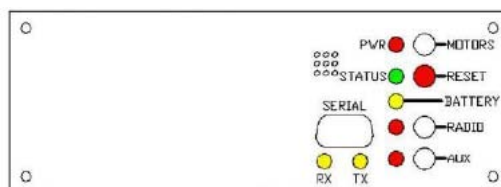


Figura C.3: Panel de control

C.2. PLATAFORMA MÓVIL PIONEER P3-AT DE MOBILEROBOTS/ACTIVMEDIA ROBOTICS

A continuación se resumen en una tabla las principales características de este robot:

Característica	Pioneer P3-AT
Largo	50cm
Ancho	49cm
Alto	26cm
Distancia al suelo	8cm
Peso	12kg
Carga útil	32kg
Cuerpo	1.6mm aluminio pintado h
Baterías	12V estanca, plomo-ácido
Autonomía	4-8 h
Sistema Motriz	4 ruedas motrices
Ruedas	Neumáticas nylon
Diámetro ruedas	21.5cm
Ancho ruedas	8.8cm
Sistema de giro	Deslizamiento diferencial
Radio máxima curvatura	40cm
Radio giro	0cm
Máxima velocidad avance	1.2m/seg.
Máximo escalón	10cm
Máximo hueco	15.2cm
Máxima pendiente	40
Terreno	Asfalto, tierra, césped, etc.
Encoders	500pulsos
Procesador	Hitachi H8S

Cuadro C.2: Características del robot Pioneer P3-AT de MobileRobots

C.3 Escáner láser LMS200

Este escáner láser se ha utilizado como único sensor estereoceptivo debido a sus elevadas prestaciones en comparación con las de los sensores de infrarrojos y ultrasonidos. Se encuentra instalado en la parte superior del robot Urbano (a 1.2m de altura), desplazado 16.8cm hacia delante con respecto al centro de la plataforma B21r. El fabricante es la empresa alemana SICK.



Figura C.4: Láser LMS200 de SICK

Utiliza un haz láser infrarrojo de clase I (inofensivo para el ojo humano incluso en tiempos de exposición prolongados) para la obtención de medidas de distancia con gran precisión y rapidez. El barrido es de 180° y las medidas tomadas son prácticamente independientes de la reflectancia de los objetos.

Presenta varias opciones de funcionamiento que permiten variar el alcance, la precisión y el número de medidas en cada barrido del láser.

La siguiente tabla contiene sus principales características:

Característica	LMS-200
Resolución angular	1°/0.5°/0.25°
Tiempo de respuesta	13ms/26ms/53ms
Resolución	10mm
Error sistemático (modo mm)	±15mm
Error estadístico (1 Sigma)	5mm
Clase láser	1 (eye-safe)
Máxima distancia	80m
Interfase de datos	RS422/RS232
Velocidad transferencia	9.6/19.2/38.4/500 kBaud
Alimentación	24V DC ± 15 %
Consumo	20 W
Peso	4.5kg
Ancho	155mm
Alto	210mm
Profundo	156mm

Cuadro C.3: Características del láser SICK LMS-200

Bibliografía

- [1] Dieter Fox, Wolfram Burgard, and Sebastian Thrun. Markov localization for mobile robots in dynamic environments. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 11:391–427, 1999.
- [2] Alvaro Arranz, Jorge Baliñas, Sebastian Bronte, Josue Garcia, Daniel Gonzalez, Javier Gutierrez, Angel Llamazares, Fernando Rojas, and Victor Sanz. Aplicaciones de robots moviles. Technical report, Universidad de Alcala, 2006.
- [3] Diego Rodriguez-Losada, Fernando Matia, Agustin Jimenez, Ramon Galan, and Gerard Lacey. Implementing map based navigation in guido, the robotic smartwalker. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005.
- [4] Diego Rodriguez-Losada. *SLAM Geometrico en Tiempo Real para Robots Moviles en Interiores basado en EKF*. PhD thesis, Universidad Politecnica de Madrid, ETSI Industriales, 2004.
- [5] Diego Rodriguez-Losada, Fernando Matia, Agustin Jimenez, Ramon Galan, and Gerard Lacey. Guido, the robotic smartwalker for the frail visually impaired. In *First International Congress on Domotics, Robotics and Remote Assistance for All.DRT4ALL'05*, 2005.
- [6] Roland Siegwart and Illah R. Nourbakhsh. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. MIT Press, 2004.
- [7] W. Feiten, R.Bauer, and G. Lawitzky. Robust obstacle avoidance in unknown and cramped environments. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1994.
- [8] F. Lamiraux, D. Bonnafous, and O.Lefebvre. Reactive path deformation for nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 20(6):967–977, December 2004.

- [9] Javier Minguez and Luis Montano. Nearness diagram (nd) navigation: Collision avoidance in troublesome scenarios. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(1), February 2004.
- [10] Howie Choset and Keiji Nagatani. Topological simultaneous localization and mapping (SLAM): Toward exact localization without explicit localization. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(2):125–137, April 2001.
- [11] B. J. Kuipers and Y.T. Byun. A robot exploration and mapping strategy based on a semantic hierarchy of spatial representations. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 8:47–63, 1991.
- [12] R. Simmons and S. Koenig. Probabilistic robot navigation in partially observable environments. In *Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1995.
- [13] L.P. Kaelbling, A.R. Cassandra, and J.A. Kurien. Acting under uncertainty: Discrete bayesian models for mobile-robot navigation. In *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 1996.
- [14] Peter S. Maybeck. *Stochastic Models, Estimation, and Control*, volume 1. Academic Press, 1979.
- [15] Joris De Schutter, Jan De Geeter, Tine Lefebvre, and Herman Bruyninckx. *Kalman Filters: A Tutorial*, 1999.
- [16] Javier Minguez, Javier Osuna, and Luis Montano. A "divide and conquer" strategy based on situations to achieve reactive collision avoidance in troublesome scenarios. In *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2004.
- [17] Jesus Gonzalez. Simulacion y control de un robot movil. Proyecto fin de carrera, DISAM, 2004.
- [18] Brian W. Kernighan and Dennis M. Ritchie. *The C Programming Language*. Prentice Hall, 1988.
- [19] Helmut Kopka and Patrick W.Daly. *Guide to LaTeX*. Addison Wesley, 2004.
- [20] Teach yourself visual c++ in 21 days: <http://newdata.box.sk/bx/c>.
- [21] Mobilerobots.inc: <http://www.mobilerobots.com>.

- [22] Departamento de automatica de la etsii: <http://www.disam.upm.es>.
- [23] Ayuda oficial de microsoft para la programacion:
<http://www.msdn.microsoft.es>.
- [24] Player project: <http://www.playerstage.sourceforge.net>.

Programas empleados

- Microsoft Visual C++ 6.0 y Visual Studio .NET 2005 (Visual Studio 8) para el desarrollo del software.
- Editor de \LaTeX WinEdt para la elaboración del presente documento.
- Microsoft Project para la obtención de figuras y diagramas de planificación del proyecto.
- Microsoft Office PowerPoint para la creación de figuras y esquemas generales a incluir en esta documentación.
- Subversion como controlador de versiones.