



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

"SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE PERSONAS
PARA UN ROBOT MÓVIL DE SERVICIO"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA
(COMPUTACIÓN)

P R E S E N T A:

MARCO ANTONIO BECERRA PEDRAZA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JESÚS SAVAGE CARMONA

MÉXICO, D.F.

2012.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A mamá y a papá

A mis hermanos Itzel y Daniel

A mi esposa e hijos (*...ya vendrán*)

A la memoria de mis abuelos

Agradecimientos

Gracias a mis padres (Antonio Becerra y Araceli Pedraza) y hermanos (Itzel y Daniel) por todo el cariño y apoyo incondicional durante toda mi vida. Gracias también a mis tíos y primos.

Gracias al Dr. Jesús Savage Carmona por darme la oportunidad de trabajar con él en el Laboratorio de Biorobótica y permitirme formar parte del equipo PUMAS @Home. Gracias por la confianza y el apoyo puesto en mí.

Gracias a los compañeros y amigos del Laboratorio de Biorobótica con los cuales tuve el privilegio de trabajar, convivir y aprender todos los días algo nuevo. De forma especial agradezco a David Esparza, Israel Figueroa, Marco Negrete y Abel Pacheco que pusieron un gran esfuerzo para que este trabajo pudiera realizarse.

Gracias a todos los profesores que he tenido en mi vida, cada uno ha contribuido en este trabajo. Especialmente agradezco a mis profesores en el IIMAS por compartir su experiencia y conocimientos conmigo.

Gracias al CONACyT por apoyar mis estudios de maestría con una beca. También agradezco al proyecto PAPIIT-DGAPA, que con el financiamiento IN-107609 apoyó las actividades del Laboratorio de Biorobótica.

Gracias a la UNAM y al IPN por abrirme sus puertas y haberme cobijado durante mi formación académica. Gracias al pueblo de México que con esfuerzo y sacrificio hizo posible mi formación académica.

Gracias a todas aquellas que me han brindado su amistad. Una parte importante la forman mis compañeros en el IIMAS, Cinvestav, UPIITA, CECyT 1, etc. De forma especial agradezco a Rocío Salazar, Omar Martínez, Rubén Camacho, Miguel Basilio, Luis Ayala, Josué Arellano, Fernando Urzúa, Jaime Urzúa, Manuel Teodoro, Jorge Otero y Lino González por todo su apoyo.

Por último, pero de forma muy especial, gracias *Justina*, fue todo un placer y un honor trabajar contigo.

Marco Antonio Becerra Pedraza
marcobecerrap@gmail.com

Resumen

La tecnología emergente en robótica busca lograr que los robots compartan espacios con la gente. Esta nueva generación de robots *sociales* deben poseer capacidades suficientes para desenvolverse en un mundo en cambio constante y poco estructurado; uno de estos requerimientos es la habilidad de interactuar con personas.

El seguimiento es una capacidad de interacción importante, consiste en acompañar el desplazamiento de otro agente. El seguimiento se encuentra presente en el comportamiento de personas y de animales, por lo tanto, es importante abordarlo desde el punto de vista de la robótica con el fin de que un robot sea capaz de interactuar con otros agentes, principalmente personas.

Este trabajo se centra en el seguimiento de una persona (operador) con un robot de servicio. El robot cuenta con un escáner láser para la etapa de sensado de personas y para desplazarse cuenta con una base móvil con ruedas en configuración diferencial. El entorno de trabajo consiste en un ambiente doméstico cotidiano con muebles, paredes y una cantidad moderada de personas.

El problema de seguimiento de personas puede ser descrito como un ciclo percepción-acción; primero se debe sensar el entorno para detectar obstáculos y encontrar al operador, después habrá que desplazarse de forma segura hacia él. Dentro de este ciclo ocurren tres tareas computacionales: 1) reconocimiento de personas, 2) rastreo y 3) planeación de movimiento.

El seguimiento presenta algunas dificultades, como no conocer *a priori* la ruta del operador, así como ruido e inexactitudes del hardware; además existe incertidumbre inherente a la prueba de seguimiento (e.g. perder al operador al doblar una esquina).

A lo largo de este trabajo se hace una revisión del problema y se adopta una solución, la cual se describe a detalle en el escrito. El sistema de seguimiento propuesto consta de tres partes: reconocimiento, rastreo y navegación.

Cómo técnica de reconocimiento de personas se utiliza la búsqueda de patrones de piernas con un escáner láser. El enfoque utilizado es una búsqueda de patrones de flanco y después hacer una validación antropométrica.

La técnica de rastreo utilizada es un filtro que toma en cuenta la historia temporal. Como parte de este trabajo se desarrollaron y probaron algunas técnicas de rastreo sencillas para lidiar con la incertidumbre del problema y con los datos provenientes de diferentes fuentes. La técnica de rastreo utilizada probó ser suficientemente efectiva durante las pruebas realizadas; no obstante,

es importante aclarar que esta técnica ha sido desarrollada y adoptada por fines prácticos y cuenta con poco sustento teórico que le respalde. Aún así, se aporta robustez al sistema y se mejora su desempeño.

Finalmente, el sistema de navegación empleado utiliza campos potenciales para alcanzar al operador y al mismo tiempo evitar los obstáculos del entorno.

El sistema ha sido implementado con el simulador Player/Stage y con el robot de servicio Justina de la UNAM. El sistema se probó en ambientes realistas con paredes, personas y muebles. El robot fue capaz de navegar la mayoría de las veces sin problema, siempre y cuando el ambiente no fuera demasiado complejo (demasiados objetos en el ambiente) y el operador mantuviera una velocidad baja. El sistema también demostró ser robusto a oclusiones, permitiendo el ocultamiento parcial del operador por un objeto u otra persona siempre que este fuera breve.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Descripción del problema	2
1.3. Objetivos	4
1.4. Estructura del documento	4
2. Antecedentes	7
2.1. Seguimiento de personas	7
2.1.1. Primeros Sistemas (1940s - 1980s)	7
2.1.2. Sistemas recientes (1990s - presente)	9
3. Seguimiento de personas	15
3.1. Descripción del problema	15
3.1.1. Clasificación del problema	17
3.2. Metodología	17
3.2.1. Reconocimiento de personas	18
3.2.2. Rastreo	19
3.2.3. Planeación de movimientos	19
3.3. Requisitos de hardware para el seguimiento de personas	20
3.3.1. Sensores	20
3.3.1.1. Cámara Digital	20
3.3.1.2. Escáner Láser	22
3.3.1.3. Sensores 3D	22
3.3.1.4. Sonar	23
3.3.1.5. Micrófonos	24
3.3.2. Plataforma móvil	25
3.3.2.1. Vehículos con ruedas	26
3.3.2.2. Locomoción mediante patas	27
3.3.2.3. Otras configuraciones	28
4. Reconocimiento de personas	29
4.1. Sensado de personas	29
4.2. Sensado de personas con escáner láser	30
4.3. Reconocedor de piernas basado en flancos	32

4.3.1.	Acondicionamiento	33
4.3.2.	Detección de flancos	34
4.3.3.	Extracción de patrones de piernas	35
4.3.4.	Validación biométrica	35
4.3.5.	Eliminación de patrones	36
4.3.6.	Obtención de pose	36
5.	Rastreo	37
5.1.	Introducción	37
5.2.	Técnicas de rastreo	38
5.2.1.	Promedio	38
5.2.2.	Promedio con historia temporal	39
5.2.3.	Promedio ponderado	39
5.2.4.	Promedio ponderado con parámetro de certidumbre	40
5.2.5.	Ejemplo	41
5.2.5.1.	Promedio	42
5.2.5.2.	Promedio con historia temporal	43
5.2.5.3.	Promedio ponderado	43
5.2.5.4.	Promedio ponderado con parámetro de certidum- bre	44
6.	Planeación de movimiento	47
6.1.	Planeación de movimiento	47
6.2.	Navegación	47
6.2.1.	Detección de obstáculos	49
6.2.2.	Campos potenciales	49
6.2.2.1.	Implementación	50
6.3.	Cinemática inversa	51
6.3.1.	Implementación	53
7.	Implementación y resultados	55
7.1.	Introducción	55
7.2.	Experimentos con el simulador Player/Stage	56
7.2.1.	Simulador Player/Stage/Gazebo	56
7.2.2.	Descripción de la implementación	57
7.2.3.	Metodología	60
7.2.4.	Experimento 1 [Ambiente 01] - Línea recta	61
7.2.4.1.	Prueba 1	61
7.2.4.2.	Prueba 2	63
7.2.4.3.	Prueba 3	64
7.2.5.	Experimento 2 [Ambiente 01] - Ocho	66
7.2.5.1.	Prueba 1	67
7.2.5.2.	Prueba 2	68
7.2.5.3.	Prueba 3	70
7.2.6.	Experimento 3 [Ambiente 01] - Seguimiento de pared	71

7.2.6.1.	Prueba 1	72
7.2.6.2.	Prueba 2	74
7.2.6.3.	Prueba 3	75
7.2.7.	Experimento 4 [Ambiente 02] - Recorrido pasillo	77
7.2.7.1.	Prueba 1	78
7.2.7.2.	Prueba 2	79
7.2.7.3.	Prueba 3	81
7.2.8.	Experimento 5 [Ambiente 03] - Recorrido habitación	83
7.2.8.1.	Prueba 1	84
7.2.8.2.	Prueba 2	86
7.2.8.3.	Prueba 3	87
7.3.	Robot Justina	89
7.3.1.	Descripción	90
7.3.1.1.	Sistema de seguimiento de personas para Justina	92
7.3.2.	Pruebas	93
7.3.2.1.	Experimento 1 - Seguimiento Reactivo	93
7.3.2.2.	Experimento 2 - Seguimiento (base móvil + escáner láser)	94
7.3.2.3.	Experimento 3 - Seguimiento (base móvil + escáner láser + Kinect)	96
8.	Conclusiones y trabajo futuro	99
8.1.	Conclusiones	99
8.1.1.	Reconocimiento de personas	99
8.1.2.	Rastreo	100
8.1.3.	Planeación de Movimientos	100
8.2.	Experiencias	101
A.	Reglamento de la prueba de seguimiento de personas del Robocup @Home	103
A.1.	Prueba <i>Follow Me!</i>	103
A.1.1.	Objetivo	103
A.1.2.	Descripción de la prueba	103
A.1.3.	Observaciones	104
A.1.4.	Instrucciones a los árbitros	105
A.1.5.	Evaluación	105
B.	Glosario	107
	Bibliografía	111

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La robótica es la ciencia de percibir y manipular el mundo físico a través de artefactos controlados por computadora [50]. A lo largo de sus 60 años de existencia se ha establecido como un sector estratégico para el desarrollo de la sociedad. Sin embargo, durante este tiempo el campo de aplicación de la robótica se ha visto restringido en gran medida a tareas de manipulación y manufactura dentro del sector industrial. Esto se ha debido, en parte, a las limitaciones del hardware y de las técnicas computacionales disponibles.

A finales de la década de 1970s despegó una nueva revolución tecnológica gracias a la introducción de la computadora personal y del Internet. Estas tecnologías tuvieron un impacto muy importante al poner la computación al alcance de la población y ayudar a fortalecer las comunicaciones. Esto impulsó el desarrollo tecnológico y dio lugar a cambios en los hábitos de la sociedad.

La robótica también sufrió cambios importantes. A pesar de que los primeros sistemas móviles se desarrollaron durante la primera mitad del siglo XX, estos eran principalmente sistemas reactivos. Fue en los años 1970s y 1980s que aparecieron los primeros robots *inteligentes*¹ [35, 33, 25] que contaban con computadores internos capaces de implementar técnicas de inteligencia artificial para resolver problemas complejos. Estos sistemas sentaron las bases de los robots inteligentes actuales, sin embargo, estos sistemas resultaban muy costosos y lentos, sus capacidades aún no eran suficientes como para permitirles desenvolverse en el mundo cotidiano de las personas.

Actualmente, la tecnología emergente en robótica busca lograr que los robots compartan espacios con las personas. Se cree que el hardware y las técnicas

¹ El adjetivo *inteligente* se ha ocupado aquí con libertad para hablar de los robots que pretenden serlo o cuyo objetivo principal ha sido el estudio de la inteligencia artificial, con ello no se pretende afirmar que en verdad sean inteligentes. De hecho, no existe una definición totalmente convincente sobre el concepto de la inteligencia, que permita decidir cuando un ente es o no es inteligente.

computacionales disponibles permitirán en poco tiempo una nueva revolución tecnológica protagonizada por la robótica y la inteligencia artificial [23]. No obstante, aún faltan desarrollar habilidades que permitan a los robots desenvolverse plenamente en el mundo poco estructurado y en constante cambio de las personas. Cabe destacar la necesidad de dotar a los robots de capacidades para interactuar con personas y con otros agentes.

El seguimiento es una capacidad de interacción importante, se presenta tanto entre personas como entre animales (fig. 1.1). A través del seguimiento los grupos sociales establecen relaciones, se comunican y se fortalece la cooperación en tareas comunes [48]. Por ello, resulta importante abordar el seguimiento como una capacidad necesaria para un robot de servicio, especialmente el seguimiento de personas.



(a) Seguimiento entre personas (© Apple Records).



(b) Seguimiento entre animales

Figura 1.1: El seguimiento es una habilidad de interacción importante, tanto para las personas (a), como para los animales (b).

1.2. Descripción del problema

El seguimiento consiste en acompañar el desplazamiento de otro agente. Este trabajo se centra en el seguimiento de una persona (operador) con un robot de servicio en entornos cotidianos poco estructurados.

El entorno de trabajo propuesto es el ambiente doméstico. Este tiene la particularidad de contar con muebles, paredes y una cantidad moderada de personas. Esta descripción coincide con otros entornos como museos, centros comerciales, escuelas, oficinas, restaurantes, etc. Un entorno de este tipo es dinámico, poco estructurado e impredecible.

El robot de servicio propuesto consiste en una base móvil, como medio de actuación (desplazamiento dentro del ambiente), y de un escáner láser como medio principal para sensar el entorno² (fig. 1.2).

² A lo largo del trabajo se ocuparon otro tipo de sensores (cámaras) y técnicas de reconocimiento de personas basadas en visión computacional, sin embargo, estos módulos no fueron desarrollados como parte de este trabajo y únicamente se utilizan como módulos de reconocimiento adicionales en la etapa de rastreo, sec. 5.

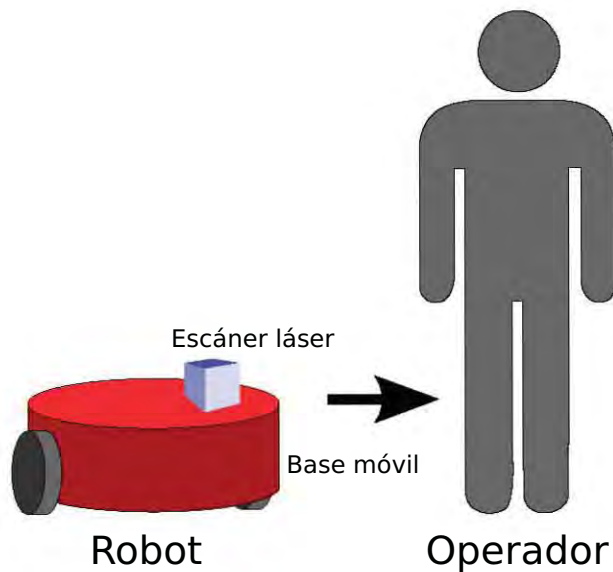


Figura 1.2: Sistema de seguimiento de personas

El problema de seguir a una persona puede ser descrito dentro de un ciclo percepción-acción. Primero se debe sensar (percepción) el entorno para detectar obstáculos y localizar al operador, para después desplazarse (acción) de forma segura hacia él. Dentro del ciclo ocurren tres tareas computacionales:

- a. **Reconocimiento de personas** *¿Dónde está el operador?*
- b. **Rastreo** *¿Cuál es la pose del operador?*
- c. **Planeación de movimiento** *¿Cuál es la mejor forma de aproximarse al operador?*

Cada una de estas tareas representa un problema aislado que puede abordarse de diferentes maneras. El desempeño del sistema de seguimiento dependerá en gran medida de la calidad del hardware y de las técnicas seleccionadas para abordar el problema.

En este trabajo se hace una revisión del problema y de las técnicas que se han utilizado en él; posteriormente, se adopta una solución para ser implementada. El sistema resultante se ha probado en un ambiente simulado (Player/Stage/Gazebo) y en el robot de servicio Justina del Laboratorio de Biorrobótica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

1.3. Objetivos

1. Describir el problema de seguimiento de personas con un robot móvil.
2. Proponer una solución al problema haciendo énfasis en la utilización de un escáner láser para la etapa de sensado.
3. Implementar la solución adoptada en un robot y reportar resultados.

1.4. Estructura del documento

El primer capítulo corresponde a una introducción y planteamiento del presente trabajo.

El capítulo 2 consiste en una revisión bibliográfica sobre el trabajo relacionado directa e indirectamente con el seguimiento de personas con un robot móvil. Este es un problema reciente en el campo de la robótica, sin embargo, muchas de las herramientas que utiliza son tan antiguas como la robótica misma (e.g. los primeros sistemas de seguimiento automático de los años 1940s para radares). Este capítulo revisa la historia del problema y de las herramientas empleadas para resolverlo.

El capítulo 3 realiza un diagnóstico detallado del problema de seguimiento de personas con un robot. Se revisan las tres partes en que se compone el problema: a) reconocimiento de personas, b) rastreo y c) navegación. También se analiza el hardware necesario para la tarea.

El capítulo 4 aborda el problema de reconocimiento de personas aplicado al problema de seguimiento (i.e. encontrar al operador en el entorno). Este capítulo se enfoca en la utilización de un escáner láser para la etapa de sensado y se revisan las técnicas de detección de piernas propuestas en la literatura. En la segunda parte del capítulo se explica la técnica adoptada para la detección de piernas. Este reconocedor se basa en la búsqueda de patrones de flancos en la señal de barrido del escáner láser, fue desarrollada por Bellotto y Hu [6, 8].

El capítulo 5 se centra en el rastreo de la pose del operador; esto es, en obtener su vector de estado (pose) a partir de los datos obtenidos en la etapa de reconocimiento y de la historia temporal. El rastreo debe ser lo suficientemente robusto para lidiar con inexactitudes del hardware e incertidumbre dentro de la prueba. En este capítulo se explican las técnicas desarrolladas y utilizadas en este trabajo.

El capítulo 6 aborda la planeación de movimientos del robot que se compone de la etapa de navegación y el cálculo de cinemática inversa. La navegación consiste en encontrar una trayectoria segura hacia el operador; la técnica adoptada es navegación por campos potenciales. Finalmente, la cinemática inversa consiste en el cálculo de las velocidades en los actuadores para ejecutar el movimiento planeado; aquí se presentan las ecuaciones para el vehículo con ruedas con configuración diferencial utilizado en este trabajo.

El capítulo 7 presenta los resultados experimentales y experiencias obtenidos después de implementar el sistema propuesto, primero en un ambiente simulado

(Player/Stage), y después en el robot de servicio Justina del laboratorio de Biorobótica de la UNAM.

El capítulo 8 presenta las conclusiones y el trabajo futuro. También se presentan las contribuciones fruto de este trabajo.

Al final se incluyen los apéndices, el primero consiste en una traducción del reglamento de la prueba *Follow Me!* para la competencia RoboCup @Home 2011. Luego se ofrece un glosario de términos y finalmente la bibliografía.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Seguimiento de personas

El problema de seguir a una persona con un robot móvil está íntimamente relacionado con los problemas de interacción hombre-máquina, reconocimiento de objetos y personas, rastreo y planeación de movimiento. El reto de lograr que los robots compartan espacios con las personas e interactúen con ellos de forma autónoma ha sido una de las metas principales para la robótica y la inteligencia artificial desde sus inicios. No obstante, es hasta la actualidad que estos sistemas parecen rentables [23, 46], tanto económicamente como tecnológicamente.

Los sistemas de seguimiento de personas con robots móviles son relativamente recientes (1990s - presente), sin embargo los problemas constitutivos como la detección de objetos, rastreo y planeación de movimientos, se han trabajado desde los inicios de la robótica.

2.1.1. Primeros Sistemas (1940s - 1980s)

El primer robot móvil con capacidades de seguimiento del que se tiene registro [10, 18] fue *Electric dog* (fig. 2.1). Fue desarrollado en Estados Unidos en 1912 por John Hammonf Jr. y Benjamin Miessner. *Electric dog* era capaz de seguir una luz usando para ello dos celdas fotovoltaicas que regulaban su dirección. *Electric dog* fue ideado con intenciones militares.

El siguiente paso importante se llevó a cabo con *Elmer* y *Elsie* (fig. 2.2) también conocidos como las tortugas de Walter, los cuales son aceptados como los primeros robots autónomos con capacidades de interacción social [3, 21]. Fueron desarrollados por Gray Walter a finales de la década de 1940s en Bristol, Inglaterra. El objetivo de estos robots fue el estudio del funcionamiento del cerebro emulando mecánicamente sistemas reguladores retroalimentados, i.e. cibernética.

Las tortugas de Walter poseían sensores de luz y proximidad, y de forma analógica implementaban comportamientos reactivos simples (acercarse o huir

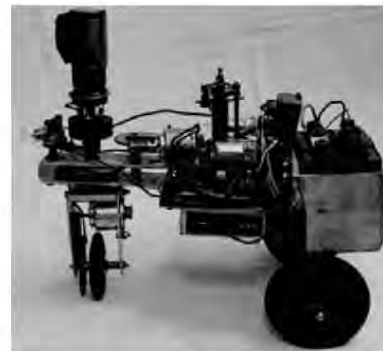


Figura 2.1: *Electric Dog* (© David Buckley).

de una luz u obstáculo, empujar un objeto, recarga de baterías). A partir de encadenarlos podían ejecutar comportamientos más complejos, por ejemplo, seguir un patrón luminoso para salir de una habitación sin chocar. Las tortugas de Walter podían funcionar en pareja y realizar actividades juntos, entre ellas, seguimiento.



(a) Walter Grey con una de sus tortugas



(b) *Elsie*

Figura 2.2: Las tortugas de Walter, *Elmer* y *Elsie* (© Reuben Hoggett).

A principios de la década de 1960s se construyó *Beast* (fig. 2.3) en la Universidad Johns Hopkins. *Beast* era un robot con capacidad para navegar por pasillos y corredores sin chocar [27, 54]. Además podía recargarse automáticamente, para ello navegaba en busca de una clavija de electricidad y se conectaba a sí mismo a la toma de corriente. El comportamiento también era reactivo.

En 1966 se construye *Shakey* (fig. 2.4) el primer robot móvil autónomo no reactivo [35, 36]. Fue desarrollado en la Universidad de Stanford. Poseía un sistema de planeación de acciones, así como uno de los primeros sistemas de visión artificial. Podía ejecutar tareas sencillas de reconocimiento de objetos,



Figura 2.3: *Beast* (© Reuben Hoggett).

manipulación y navegación.

Ya para finales de los 1970s aparece *HILARE* (fig. 2.5) desarrollado en Toulouse, Francia. *HILARE* contaba con una cámara monocromática, catorce sonares y un escáner láser [3], la cámara y el escáner estaban montadas sobre una base Pan-Tilt funcionando como una cámara con noción de profundidad. Este proyecto hizo énfasis en la integración de sistemas, navegación con varios sensores y planeación de movimientos [25].

2.1.2. Sistemas recientes (1990s - presente)

En la década de los 1980s se desarrolló masivamente el cómputo personal y el Internet, y ya para los 1990s se habían consolidado como algo cotidiano. La robótica se benefició con el abaratamiento de hardware y expansión de la investigación en el campo. Pronto existieron miles de centros de investigación y congresos sobre robótica alrededor del mundo. Durante este periodo (1990-2010) han sucedido varios eventos que han ayudado a atraer la atención y consolidar las áreas de inteligencia artificial y de la robótica, por nombrar algunos de los más importantes:

1996 El computador Deep Blue derrota en ajedrez a Gary Kasparov.

1996 Honda devela su robot humanoide Asimo.

1997 Se lleva a cabo la primera competencia de futbol con robots RoboCup en Nagoya, Japón con la meta de que para el año 2050 un equipo de robots sea capaz de vencer al campeón FIFA.

2001 Se presenta el robot mascota Aibo de Sony

2002 Se presenta el robot aspirador Roomba de iRobots



Figura 2.4: *Shakey* (© SRI International).

2004 Se lleva a cabo la primera competencia DARPA Grand Challenge, con el objetivo de desarrollar vehículos de navegación autónoma.

A lo largo de este periodo se ha establecido un creciente interés en las aplicaciones que interactúen con personas y que compartan espacios cotidianos con ellos, estos robots han sido agrupados con el término de robots de servicio. De acuerdo con la Federación Internacional de Robótica (IFR), se puede definir a un robot de servicio como [37]:

Un robot de servicio es aquel que opera de manera parcial o totalmente autónoma, desarrollando servicios útiles para el bienestar de los humanos y equipos, excluyendo tareas de manufactura. Pueden ser móviles y con capacidad de manipulación.

En este contexto se puede mencionar el trabajo con los robots Rhino y Minerva (fig. 2.6) realizado por Burgard et al [12, 11], como uno de los trabajos pioneros en el área. En 1997 ambos robots fueron colocados en museos de Alemania y Estados Unidos respectivamente, para convivir y dar asistencia a los visitantes. En este trabajo se pudieron verificar técnicas de navegación y localización en ambientes no estructurados, reconocedores de personas, sistemas de puesta en marcha y sobre todo la interacción con personas. Cada uno de éstos robots se valían de un par de escáneres láser tanto para rastrear personas como para construir mapas del entorno y localizar al robot[45, 46]. El sistema utilizaba



Figura 2.5: *ILLARE* (© Reuben Hoggott).

los datos de los dos escáneres láser para rastrear a varias personas, para ello se utilizaron una combinación de filtros de partículas y asociación de datos probabilística.



(a) *Rhino* (© Wolfram Burgard *et al.*).



(b) *Minerva* (© Sebastian Thrun *et al.*).

Figura 2.6: Los robots *Rhino* (a) y *Minerva* (b) realizaron tours e interactuaron con los visitantes de dos museos de forma autónoma.

En los últimos años se han desarrollado varias técnicas y sistemas de detección y seguimiento de personas [49, 2]. Algunos de estos sistemas no utilizan un robot y se encuentran montados sobre el entorno (e.g. un sistema de seguridad en un banco), otros son más permisibles y permiten el uso de marcas visuales para personas o de dispositivos portables (e.g. celulares, PDAs¹) para su detección. Estos sistemas varían principalmente al tipo de sensores y técnicas que

¹ *Personal Digital Assistant*

utilizan. Los sensores más utilizados son los escáneres láser y las cámaras de video.

Uno de los campos de aplicación de interés para el seguimiento de personas es la vigilancia. Un ejemplo es el sistema implementado por Liu *et al* [30], donde un robot se encarga de rastrear posibles intrusos en un área restringida y, en caso de validarse la información, avisa al personal de seguridad.

Lindström y Eklundh [29] utilizan un escáner láser para seguir a una persona con un robot móvil. El sistema detecta únicamente objetos en movimiento y mantiene el rastreo de ellos con un algoritmo heurístico. Sin embargo, el sistema requiere que el robot permanezca estático o se mueva muy despacio.

En Zadjel *et al* [55] se explica un sistema de visión artificial para la detección y rastreo de personas; se implementa una red bayesiana dinámica para manejar múltiples personas objetivo. Sin embargo, las personas sólo pueden detectarse cuando se mueven. Otro problema es que el rango de trabajo está limitado al ángulo de visión de la cámara utilizada, por lo que se complica la detección de dos o más personas al mismo tiempo.

El robot descrito en Luo *et al* [31] utiliza un escáner láser tilt (ver sec. 3.3.1.3) para extraer características del cuerpo, las cuales son relacionadas con el rostro detectado con la cámara. Esta solución es útil para seguir a una persona parada frente al robot; sin embargo, la extracción de características del cuerpo a partir de la nube de puntos resulta costosa computacionalmente y limita el campo de aplicación para seguir a más personas.

Otras implementaciones también ocupan la combinación de detección de rostros con una cámara y detección de piernas con un escáner láser [22, 44]. Sin embargo, estos métodos carecen de un modelo de movimiento, por lo cual es difícil lidiar con las situaciones donde una persona se encuentra temporalmente ocluida.

El trabajo realizado por Chakravarty y Jarvis [14] realiza la detección y rastreo de múltiples personas desde un robot estático utilizando una cámara panorámica y un escáner láser. Se utilizan filtros de partículas para rastrear personas con el escáner láser y sustracción de fondo para mantener un modelo del color de las personas rastreadas.

En Cielniak [17] se utiliza un sistema de visión con una cámara PZT y una cámara térmica. El espectro térmico de la escena ayuda a segmentar la silueta de la persona. Para el rastreo se utiliza un filtro de partículas.

El trabajo realizado por Bellotto y Hu [8] utiliza un par de escáneres láser y una cámara para seguir personas. Se han implementado varios métodos para las etapas de reconocimiento y rastreo. Para el reconocimiento de piernas con escáner láser se ha utilizado búsqueda de mínimos [4] y un reconocedor de piernas muy eficiente que busca patrones de flancos. El reconocimiento del operador con la cámara parte de una etapa de entrenamiento donde las personas miran al robot, se guarda su rostro y el patrón de su camisa. En la etapa de rastreo se han implementado diferentes técnicas [7] para evaluar el desempeño de estas, al final se adopta un filtro de Kalman UKF (*Unscented Kalman Filter*). Al ejecutar la prueba se obtiene la pose (posición y orientación) de las personas en escena y se modela el movimiento de estas. El robot puede seguir a cualquier persona por

el laboratorio.

Finalmente, cabe mencionar que, debido a la importancia del problema de seguimiento de personas, la competencia RoboCup @Home, especializada en el desarrollo de robots de servicio [52], ha implementado en todas sus ediciones (2004 - ~) una prueba *ad hoc* (fig. 2.7) para evaluar la capacidad que tienen los robots participantes de seguir a una persona en entornos domésticos [19]. La prueba ha variado año con año. En su edición de 2011 incluyó módulos de oclusión, espera y reconocimiento de operador.



Figura 2.7: *Cosero* de la Universidad de Bonn, durante la prueba *Follow Me!* en la competencia RoboCup @Home, Turquía 2011 (© equipo NimbRo).

Capítulo 3

Seguimiento de personas

3.1. Descripción del problema

Seguir a una persona es una capacidad de interacción social importante, tanto para las personas como para los robots. A grandes rasgos, el problema consiste en definir una persona a seguir (operador) y acompañar el desplazamiento de esta de forma segura y sin perderla a lo largo de un recorrido desconocido.

El problema es complicado, aún para las personas, ya que pueden existir circunstancias que obstruyan de forma significativa la tarea. Por ejemplo, un terreno difícil (e.g. seguir a un escalador que sube el Everest), percepción disminuida o engañosa (e.g. seguir a una persona teniendo los ojos vendados o dentro de una casa de espejos), adversidades (e.g. seguir a una persona entre una multitud), falsos positivos (e.g. seguir a un soldado uniformado entre sus compañeros). Es claro que estos casos ocurren con poca frecuencia, sin embargo, dejan al descubierto la dificultad del problema y la necesidad de acotarlo.

El caso más sencillo consiste en un ambiente plano y libre de obstáculos. El único elemento en el entorno es el operador, así que es muy fácil seguirlo, sólo hace falta detectar la pose del obstáculo más cercano y encaminar al robot en esa dirección, un comportamiento reactivo es suficiente. Este caso también ocurre con poca frecuencia, sin embargo, exhibe un límite inferior de simplicidad para el problema y también una solución sencilla.

Un caso intermedio más útil, se presenta en situaciones cotidianas donde las personas se desenvuelven con mayor frecuencia, por ejemplo una casa (fig. 3.1).

Una casa tiene algunos elementos básicos, tiene una superficie plana, habitaciones, muebles y personas. Estos elementos también forman parte de otros espacios de uso común para las personas, por ejemplo: escuelas, oficinas, hospitales y supermercados.

Seguir a una persona en estos entornos tiene un gran número de aplicaciones. Un robot podría asistir a una persona a llevar mercancías por un centro comercial o en un hospital, podría recibir un tour por el lugar mientras realiza un mapa del mismo [51], podría transportar personas con discapacidad [26], o sim-



Figura 3.1: Ambiente cotidiano en una casa

plemente desplazarse junto con una persona a otro sitio mientras interactúa con ella (e.g. recibir instrucciones).

El número de personas en estos espacios se puede acotar a una cantidad moderada (1-5 personas) que no constituya una multitud u obstrucción importante. Al hablar de una superficie plana se restringe el espacio, pero se simplifican los mecanismos de locomoción del robot.

En el ambiente hay paredes, muebles y tal vez otros objetos; la posición de algunos de estos elementos puede variar, por lo que un mapa del entorno no constituye una solución final para navegar de forma segura; además, en muchas situaciones no será posible hacer un mapa del entorno *a priori*.

Otro punto a considerar es el comportamiento de las personas en el entorno, por simplicidad se asume que estas mantienen una conducta de respeto con el robot, sin embargo, se ha demostrado en algunos robots de servicio [12, 11] que las personas pueden llegar a actuar de forma malintencionada y obstruir su funcionamiento.

El desplazamiento de las personas también puede ser restringido a un andar normal, sin ir demasiado rápido ni ejecutar cambios muy bruscos. El desplazamiento de las personas al caminar es de 1.25 m/s en promedio [13], sin embargo, puede variar dependiendo de factores como la edad y talla.

3.1.1. Clasificación del problema

El problema de seguimiento de personas con un robot de servicio en ambientes no estructurados se puede clasificar de la siguiente manera:

Parcialmente observable El operador puede llegar a desaparecer de la vista de los sensores debido a fallas de hardware o a circunstancias de la prueba (e.g. al doblar una esquina o entrar en una habitación).

Estocástico Existen factores aleatorios en el ambiente. No se conoce la trayectoria del operador *a priori* y pueden suceder situaciones inesperadas (e.g. nuevas personas en escena, muebles fuera de lugar). Se debe lidiar con información incompleta del entorno.

Secuencial La decisión que se tome en cada instante afectará al estado siguiente (e.g. girar en cierta dirección, aumentar la velocidad).

Dinámico El entorno y la pose del robot y del operador se encuentran en constante cambio.

Continuo La actuación del robot (desplazamiento) en el entorno es continua.

Multiagente Existen al menos dos agentes en el entorno: robot y operador; y puede llegar a haber más personas en escena.

Antagónico En un principio se puede asumir que nadie impide al robot cumplir su tarea. Sin embargo, tampoco es favorecido y las personas pueden obstruir consciente o inconscientemente al robot [12]. Además el ambiente tiene obstáculos a considerar en la planificación para garantizar la seguridad del robot, del entorno y de los demás agentes presentes.

3.2. Metodología

El problema de seguir a una persona puede ser descrito en un ciclo percepción-acción (fig. 3.2):

Percepción (*sensores*) Sensar el entorno para detectar obstáculos y encontrar al operador.

Acción (*actuadores*) Desplazar el robot hacia el operador de forma segura.

Este ciclo a su vez, encierra al menos tres tareas computacionales a realizar:

1. Reconocimiento de personas
2. Rastreo
3. Planeación de movimientos

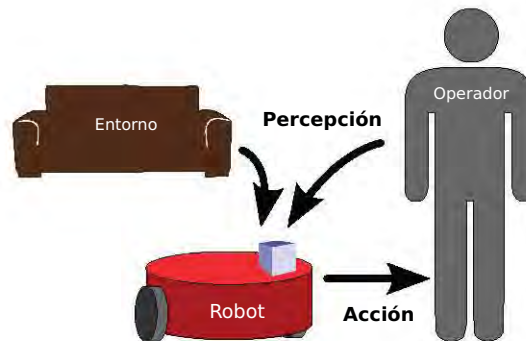


Figura 3.2: Ciclo percepción-acción del seguimiento de personas.

3.2.1. Reconocimiento de personas

Esta etapa consiste en la detección de personas en el ambiente y en la localización del operador en el entorno usando los datos recolectados por los sensores. Para ello se aplican técnicas computacionales apropiadas que permitan buscar personas y estimar su pose, dependiendo también del tipo de sensores disponibles.

El reconocimiento de personas puede consistir en varias tareas de diferente complejidad [49], estas son:

Detección de personas Consiste en detectar si existen personas o no dentro del ambiente sensed. Únicamente se devuelve una respuesta booleana¹.

Conteo de personas Se trata de determinar el número de personas en el entorno. Se devuelve un entero con el número de personas encontradas por los sensores.

Localización Consiste en encontrar la pose de todas las personas en el entorno. Se devuelve un arreglo de vectores, cada uno con la pose de un individuo.

Rastreo Además de encontrar la pose de las personas en el entorno, busca dar seguimiento al movimiento de estas; esto implica, tener conocimiento del vector de estado de las personas (pose, orientación y velocidad) para poder anticipar su trayectoria.

Identificación Se busca la detección de individuos y el reconocimiento de cada uno. Para ello se recurre a las características particulares de cada individuo (e.g. rostro, ropa, talla, voz).

Con excepción de la última tarea (identificación), el resto se presenta en orden ascendente en complejidad. En cuando a la identificación, puede o no darse con personas en movimiento.

¹ Verdadero o falso.

3.2.2. Rastreo

El rastreo consiste en dar seguimiento al movimiento del operador basándose en los datos proporcionados en la etapa de reconocimiento y en el registro histórico del desplazamiento para el operador.

Debido a que puede existir más de un módulo de reconocimiento (e.g. cámaras digitales, escáner láser, micrófonos) se deben aplicar técnicas de filtrado y fusión de datos para obtener una estimación de la pose del operador que tome en cuenta toda la información y que busque minimizar la incertidumbre.

El rastreo también busca lidiar con la incertidumbre del problema. Esta puede ser ocasionada por fallas de hardware (i.e. se reportan datos erróneos) o por situaciones de la prueba misma (e.g. se pierde al operador por un breve periodo de tiempo). El sistema de rastreo debe ser robusto para proponer una estimación adecuada basándose en la información disponible en ese instante y con la historia temporal.

3.2.3. Planeación de movimientos

La planeación de movimientos consiste en el cálculo de la cinemática para que el robot ejecute una tarea específica. Para el problema de seguimiento de personas el módulo de planeación de movimiento debe realizar dos tareas: navegación y cálculo de cinemática inversa.

La navegación consiste en el desplazamiento seguro del robot desde un estado a otro, dentro del espacio de configuración. Para un robot móvil, este desplazamiento de estado consiste en un cambio de posición, orientación y velocidad con respecto a un estado inicial.

La navegación se involucra en la etapa de sensado para encontrar obstáculos en potencia dentro del entorno. Después se debe estimar una trayectoria segura (i.e. que evite los obstáculos).

La segunda parte consiste en el cálculo de la cinemática inversa, es decir, las velocidades necesarias en los actuadores del mecanismo de locomoción para realizar un movimiento dado, en este caso, la trayectoria encontrada para navegar.

Como se mencionó al inicio de esta sección, el problema de seguimiento puede ser descrito por un ciclo percepción-acción. El robot sigue al operador en base al desplazamiento inmediato de este, de modo que la parte de planeación de movimiento no requiere un tratamiento extenso sino local, el operador y el robot mantendrán una distancia corta (1 a 2 metros), así que sólo se toman en cuenta los obstáculos inmediatos.

3.3. Requisitos de hardware para el seguimiento de personas

Para realizar el seguimiento de personas con un robot, es necesario que este cumpla algunos requerimientos mínimos de hardware. Al plantear el problema como un ciclo percepción-acción, sec. 3.2, se pueden establecer los papeles de las etapas de sensado y actuación.

Los sensores necesarios son aquellos que sirvan para la detección de obstáculos y para el reconocimiento de personas.

En cuanto a la etapa de actuación, el requerimiento principal es el poder desplazarse a libertad en el entorno. Existen diferentes mecanismos de locomoción para este propósito. La elección dependerá de las condiciones del entorno y de los recursos de hardware disponibles. Lo importante será que el mecanismo ofrezca un soporte estable al robot y que, de ser posible, sea sencillo de controlar.

El robot ejecutará dos tareas que involucran a los sensores y actuadores: reconocimiento de personas y planeación de movimientos.

Reconocimiento de personas El robot debe ser capaz de extraer características del entorno que le permitan percibir la presencia de personas y la pose de estas. Además, es deseable que también incorpore una etapa de identificación de personas a partir de la extracción de características biométricas (e.g. rostro, talla, voz) y ambientales (color de ropa).

Planeación de movimientos El robot debe ser capaz de sensar el entorno para percibir objetos y agentes que obstaculicen su desplazamiento, esta información será ocupada para planear una trayectoria segura hacia el operador. También, el cálculo de la cinemática inversa dependerá del mecanismo de locomoción empleado, mientras más complejo sea este, más difícil será la obtención de las variables articulares necesarias para ejecutar un movimiento en el robot.

3.3.1. Sensores

La tarea de los sensores en el robot será para percibir al operador y detectar obstáculos. Además, es muy importante que proporcionen información de rango (i.e. distancia) de estos con respecto del robot. Algunos de los sensores más populares se describen a continuación.

3.3.1.1. Cámara Digital

Las cámaras digitales (fig. 3.3) son uno de los sensores más comunes usados en robótica. La relación costo-beneficio es adecuada. No obstante, se requieren capacidades de hardware considerables y las técnicas computacionales para el manejo de imágenes no son triviales.

Por medio de las cámaras digitales se busca emular el sentido de la vista. Este sentido es la principal fuente de información perceptual para la mayoría

de los animales, por ello se justifica la intención por dotar de visión a los robots utilizando cámaras.

El funcionamiento es muy similar al de las cámaras fotográficas convencionales, sólo que la imagen no se recoge en una película fotosensible, sino en un sensor CCD (*Charge Coupled Device*). El sensor CCD digitaliza varias imágenes (*frames*) por segundo, y los almacena en forma de matriz bidimensional de píxeles; cada píxel posee la información visual de un *punto* dentro de la escena (e.g. componentes de color, iluminación).

Después de contar con la imagen digital, esta se envía a una computadora para ser procesada. En esta etapa se extraerán las características que se necesiten de la imagen (e.g. reconocimiento de personas u objetos, segmentación).

En realidad, la dificultad del uso de una cámara digital como sensor de un robot no está ni en el sensor ni en la adquisición de datos, sino en la etapa computacional. Debido a que una imagen se representa por una matriz bidimensional, todas las técnicas de procesamiento de imágenes tienen una complejidad al menos del orden² $\theta(m \times n)$, lo cual no es tan costoso computacionalmente hablando; pero se complica dependiendo de la técnica a implementar, la calidad de imágenes a analizar y además que el procesamiento debe realizarse en tiempo real.

A través de las cámaras digitales es posible percibir formas y colores a distancia; esto permite reconocer objetos, personas y elementos visuales dentro del entorno (e.g. marcas visuales, señalizaciones, clima). Incluso, por este medio, es posible dotar a un agente artificial de la capacidad de leer. Por otra parte, con el uso de cámaras especiales, es posible extender el sentido de la vista como se conoce en los seres vivos, a otros contextos útiles para un robot (e.g. zoom, visión nocturna, visión térmica).



Figura 3.3: Cámara digital *Sony PS3-eye* (© Sony).

La visión es también muy importante a la hora de sensor personas. De todas las características usadas para percibir personas, la gran mayoría son de tipo visual (e.g. rostro, silueta, talla, altura, color de ropa).

² Se requiere al menos $\theta(m \times n)$ para recorrer una matriz $M_{m \times n}$ y hacer alguna operación sencilla en cada elemento.

No obstante todas sus ventajas, las cámaras digitales poseen algunas desventajas, la principal es la demanda elevada en capacidad de cómputo con respecto a otros sensores.

También, las cámaras poseen la limitante de la percepción en profundidad, para poder extraer la profundidad de los objetos en escena se requieren sensores especializados (ver sec. 3.3.1.3). Otra limitante de las cámaras es su sensibilidad al tipo de iluminación y a las vibraciones.

3.3.1.2. Escáner Láser

Un escáner láser (fig. 3.4a), también conocido como *lidar (Light Detection and Ranging)*, es un sensor activo de rango para medir distancias de forma radial sobre un plano.

El principio que utiliza es muy parecido al del radar, sólo que, en lugar de ondas de radio, un escáner láser utiliza una señal luminosa (láser) de propagación. Un haz de luz se dispara en una dirección y si este ha incidido sobre algún objeto, se recibe el reflejo del haz. Dependiendo de la distancia y la superficie de incidencia será posible recibir la señal de rebote. Esta señal es casi idéntica a la que se envió, sólo presenta cambios en la amplitud (debida a la atenuación) y un desfaseamiento (debido al tiempo que tardó en ir y venir). En base a la medición de este retraso, es posible estimar la distancia hacia un objeto en la dirección del haz. Un espejo gira dentro del escáner láser para dirigir el haz en diferentes direcciones de forma radial, y el ángulo se mide con un encoder interno.

Lo que resulta es una aproximación bastante precisa de la silueta del entorno alrededor del sensor (fig. 3.4b).

Los escáneres láser son sensores relativamente caros³, sin embargo, por el momento son la forma más precisa y con mejor resolución de medir distancias (precisión milimétrica) para un robot. Son ideales para detección de obstáculos en el ambiente y para detectar movimiento.

El reconocimiento de los objetos puede realizarse a partir de la identificación de su silueta característica. También es posible montar el escáner en un mecanismo tilt para tomar mediciones 3D, sec. 3.3.1.3.

La principal desventaja de los escáneres láser es que requieren que el haz de luz sea reflejado apropiadamente, lo cual no siempre es posible, dependiendo la naturaleza del material en el que incida el haz. El radio de acción del sensor puede variar desde distancias cortas (4 a 12 metros), hasta rangos más extensos (100 metros).

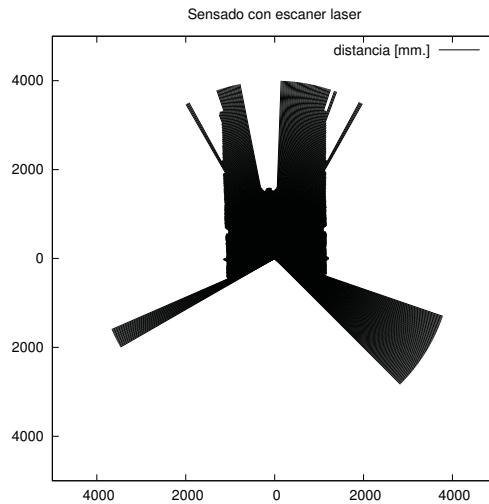
3.3.1.3. Sensores 3D

Los sensores 3D buscan construir un modelo tridimensional de la escena en el entorno. Su funcionamiento está basado principalmente en el uso de cámaras y sensores de rango. Todos entregan un conjunto de puntos con tres dimensiones relativos al marco del sensor (nube de puntos), cada uno de estos puntos

³ El precio del modelo más económico de Hokuyo (URG-04LX-UG01) es de \$1200 USD en Roboshop (dic. 2011).



(a) Escáner Láser URG-04LX-UG01 (© Hokuyo).



(b) Imagen del barrido de un escáner láser en un pasillo

Figura 3.4: Escáner láser (a) y una gráfica de barrido (b).

representa parte de la superficie de la escena. Algunos sensores 3D también proporcionan la información de color de cada punto.

Cámara Estereo Consiste en un sistema formado por dos cámaras digitales colocadas de forma paralela y a una distancia conocida (fig. 3.5a). Su funcionamiento se basa en el análisis de las imágenes tomadas por cada una de las cámaras. Cada cámara reportará la misma escena pero desde diferentes ángulos de perspectiva, de manera similar a como opera la visión humana. Haciendo la comparación pertinente, es posible aproximar la profundidad de los objetos en escena.

Cámara RGB+d Consiste en un dispositivo con dos sensores, una cámara digital y un sensor de rango. La cámara digital realiza una captura de la escena mientras el sensor de rango barre la misma con un haz discreto y registra las distancias. El resultado es una señal de video de la cual se conoce la profundidad de la escena. El sensor Kinect de Microsoft (fig. 3.5b) es un sensor de este tipo.

Escáner Láser Tilt Consiste en un escáner láser convencional montado sobre un mecanismo tilt de manera que es posible obtener diferentes planos de barrido (fig. 3.5c) y con ello una cobertura espacial del entorno.

3.3.1.4. Sonar

El sonar es un sensor de rango basado en el funcionamiento del radar. Utiliza el principio de ecolocalización, el cual consiste en emitir una señal de audio en



(a) Cámara Estéreo, *Minoru 3D* (© Promotion and Display Technology).



(b) Cámara RGB-d, *Kinect* (© Microsoft).



(c) Escáner Láser tilt del robot *PR2* (© Willow Garage).

Figura 3.5: Sensores 3D

la dirección objetivo para luego recibir en un micrófono el reflejo de esta señal. A partir de la duración de retardo entre la señal emitida y su reflejo, es posible estimar la distancia de los objetos sobre los cuales incidió.

Un sonar permite medir distancias de forma muy precisa; sin embargo, las principales desventajas son la disipación en la señal emitida (que limita el rango de sensado a unos cuantos metros) y la resolución del sensado (debido a que una señal auditiva se propaga en el espacio en todas direcciones). De esta forma es difícil construir siluetas detalladas del entorno a partir de las lecturas del sonar; sin embargo, es un sensor barato.

3.3.1.5. Micrófonos

Los micrófonos son sensores de audio, y permiten a un robot conocer su entorno acústico.

Con un micrófono es posible medir distancias utilizando el principio del sonar, sec. 3.3.1.4, no obstante, también juega un papel importante en la interacción con personas u otros agentes. En un robot resulta especialmente útil como oído para recibir instrucciones de forma oral.

También son útiles a la hora de estimar la ubicación de un parlante; para



Figura 3.6: Arreglo de sonares del robot *Peoplebot* (© Adept Mobile Robots).

ello existen dos formas de hacerlo.

La primera coloca un micrófono direccional sobre un mecanismo pan-tilt para hacer un barrido local hasta optimizar el volumen de audio; sin embargo, esto resulta complicado debido a las variaciones de intensidad en las fuentes de audio naturales (e.g. una conversación).

La segunda solución, con mejor desempeño, es utilizar un arreglo de micrófonos (similar al oído biaural de los animales) de forma que la comparación entre las señales de audio permita estimar la dirección en la que se encuentra la fuente de sonido.

La principal desventaja de los micrófonos es el filtrado de la señal de audio para separar las componentes esperadas del ruido ambiental.



Figura 3.7: Micrófono direccional *MKH 416* (© Sennheiser).

3.3.2. Plataforma móvil

Para el problema de seguimiento de personas se requiere que el robot sea móvil. Así, la actuación necesaria para el robot la constituye algún mecanismo de locomoción que le permita desplazarse por el entorno lo suficientemente libre como para poder acompañar el desplazamiento del operador.

Existen varias alternativas para la locomoción de un robot. La elección dependerá del tipo de entorno y de la tarea a realizar. En este caso, el entorno es un espacio cerrado plano con paredes, personas y muebles. La tarea de seguimiento no pone ninguna restricción explícita, sin embargo, es deseable que el robot tenga un movimiento estable y sin mucha vibración. También es importante que para desplazarse el robot no cambie demasiado su orientación, esto para mantener cierta continuidad en las lecturas de los sensores.

3.3.2.1. Vehículos con ruedas

Los vehículos con ruedas son la solución más simple y eficiente para conseguir movilidad en terrenos suficientemente duros y libres de obstáculos, permitiendo conseguir velocidades relativamente altas [38].

Este tipo de locomoción es ideal para superficies planas o con poca pendiente. Es una forma muy simple de locomoción, requiere que se coordinen dos acciones (tracción y dirección), y esto es posible con un mínimo de dos motores en la base (e.g. configuraciones Ackerman, triciclo y diferencial).

Las configuraciones más complicadas (síncrona y omnidireccional) obtienen ventajas en la maniobrabilidad del vehículo permitiendo un desplazamiento omnidireccional que permite variar la posición y orientación del robot en todo momento (no hay restricciones).

La limitación más importante de los vehículos con ruedas es el deslizamiento de estas durante la tracción. Ello hace imposible ocupar únicamente la medición del desplazamiento en las ruedas (odometría) para localizar al robot y validar la navegación, para ello se requieren técnicas más complejas.

Ackerman (fig. 3.8a) Consiste en un vehículo de cuatro ruedas donde las dos delanteras sirven para dar dirección. Es la configuración utilizada en los automóviles de cuatro ruedas convencionales. La tracción y dirección se encuentran desacopladas.

Triciclo (fig. 3.8b) Utiliza tres ruedas a modo de triciclo. La rueda delantera se encarga de la dirección, mientras que la tracción bien puede ir en ella o en el eje trasero. La tracción y dirección se encuentran desacopladas.

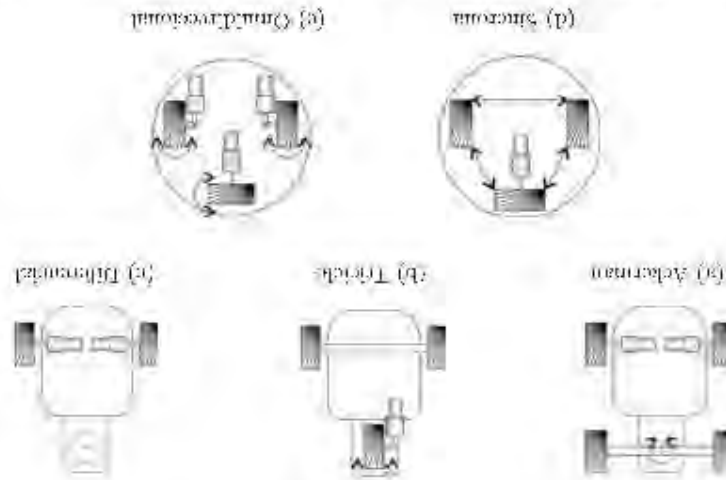
Diferencial (fig. 3.8c) Consiste en un vehículo simétrico con dos ruedas coaxiales con tracción independiente; también puede o no llevar más ruedas locas tipo castor o de balón. La maniobrabilidad de este vehículo se obtiene con el movimiento coordinado de las ruedas con tracción. Una ventaja de esta configuración sobre las anteriores es la posibilidad del vehículo de girar sobre su propio eje, lo que permite manipular los cambios de posición y de orientación de forma independiente.

Síncrona (fig. 3.8d) Consiste en la actuación simultánea y coordinada de todas las ruedas que giran de forma síncrona. Cada rueda posee dirección y tracción independiente. La configuración síncrona tradicional es de tres ruedas. La principal ventaja de este mecanismo es la de poder realizar

Las patas permiten también la omnidireccionalidad. Un robot con patas puede desplazarse a libertad en su entorno. Además, el desplazamiento con las patas es mucho mayor. Cada pata representa un manipulador invertido con una o más articulaciones. Los vehículos con patas están principalmente en su forma de prototipo mecánica. Las desventajas de los vehículos con patas es que el desplazamiento con patas es mucho mayor. Las patas permiten también la omnidireccionalidad. Un robot con patas puede desplazarse a libertad en su entorno. Además, el desplazamiento con las patas es mucho mayor. Cada pata representa un manipulador invertido con una o más articulaciones. Los vehículos con patas están principalmente en su forma de prototipo mecánica. Las desventajas de los vehículos con patas es que el desplazamiento con patas es mucho mayor.

3.3.2.2. Locomoción mediante patas

Figura 3.6: Configuraciones más comunes para vehículos con ruedas



El movimiento omnidireccional, es sin restricciones de movimiento, posee libre movilidad en el espacio y los cambios de posición y orientación son independientes. (Fig. 3.6c) Utilizan ruedas especiales (ej. ruedas suizas) que permiten conseguir movimiento fuera de la dirección de avance de la rueda. El movimiento resultante se obtiene a partir de la combinación en el giro de cada una de las ruedas. Como su nombre lo indica, y al igual que la configuración sincrona, este tipo de vehículos pueden desplazarse a libertad por el entorno sin ninguna restricción.

El movimiento omnidireccional, es sin restricciones de movimiento, posee libre movilidad en el espacio y los cambios de posición y orientación son independientes.



Figura 3.9: Robot hexápodo *Genghis* (© Rodney Brooks).

más grados de libertad. Esto dificulta el análisis y el control de cada una de las articulaciones, y presenta mayores costos.

Otras desventajas a tomar en cuenta son la velocidad que pueden alcanzar estos vehículos (la cual es muy inferior a la que se puede conseguir con ruedas), así como las vibraciones que pueden sufrir durante su locomoción.

3.3.2.3. Otras configuraciones

Las configuraciones con ruedas y con patas son las formas más comunes de locomoción para los robots móviles, no obstante, existen algunos otros mecanismos alternos a tomar en cuenta.

Orugas Consiste en la utilización de pistas de deslizamiento para el impulso del vehículo, como en los tanques militares. Este mecanismo es muy útil en terrenos irregulares. Puede ser tratado como un vehículo con ruedas de gran diámetro.

Configuraciones articuladas Las configuraciones articuladas son de interés para terrenos difíciles en los cuales debe adaptarse el cuerpo del robot (e.g. tuberías). La locomoción puede conseguirse de varias maneras, por ejemplo propagando una onda sobre una cadena cinemática (e.g. robots serpientes), o adaptando el cuerpo de acuerdo a la circunstancia a una configuración conocida (e.g. robots modulares autoconfigurables).

Robots aéreos y acuáticos Los robots aéreos y acuáticos presentan un medio de locomoción diferente. Es claro que los robots acuáticos sólo tendrían aplicación en el mar o en piscinas (tienen poco impacto en el seguimiento de personas). Los vehículos aéreos representan un caso similar, la mayoría de estos robots son modelos a escala de aviones dedicados a espacios abiertos; sin embargo, también existen robots aéreos en pequeña escala para uso en interiores, su funcionamiento está basado en helicópteros, quadrotores, insectos alados, ornitópteros e incluso modelos motorizados de semillas (e.g. semilla de maple). Algunos de estos robots pueden llevar cámaras y sensores de rango para realizar sensado en interiores.

Capítulo 4

Reconocimiento de personas

4.1. Sensado de personas

Sensar personas es una tarea necesaria para la mayoría de las tareas automáticas en que se interactúe con personas. El seguimiento de personas requiere la detección de al menos una persona (operador), para poder ejecutarse adecuadamente.

Las técnicas utilizadas para sensar personas dependerán en gran medida de los sensores disponibles y del entorno sobre el cual se encuentren. Algunos de los criterios utilizados para sensar personas son:

Tacto Con el uso de sensores de presión e interruptores es posible inferir la presencia de personas (e.g. un tapete sensible). Una desventaja es la necesidad de establecer contacto con la persona.

Proximidad Con ayuda de los sensores de rango es posible medir la distancia a objetos y establecer su patrón de desplazamiento cuando estos se mueven. Dentro de un ambiente suficientemente controlado, una persona es un agente extraño que puede ser detectado a distancia por estos sensores. (e.g. sensado de personas en una puerta automática de un supermercado). De igual forma, cuando se utiliza un arreglo de sensores de rango es posible construir formas en el ambiente.

Rostro Esta es una característica biométrica particular a cada persona. Es posible detectar los patrones constitutivos de un rostro (ojos + nariz + boca) para detectar la presencia de personas, y revisar las características particulares del rostro para identificar una persona de otra. La principal desventaja es la necesidad de que la persona mire hacia el sensor.

Silueta Una persona tiene un conjunto de siluetas características que pueden servir para detectar la presencia de personas. Algunas de las más utilizadas son el cuerpo (cuatro extremidades + torso + cabeza), las piernas (dos objetos circulares de dimensiones proporcionales) y las manos (dorso

palmar + falanges). Por medio de la silueta es posible inferir presencia, movimiento y estado (e.g. individuo sentado, caminando).

Voz La voz también es una característica biométrica intrínseca a cada persona. Por medio de la voz es posible establecer comunicación de alto nivel; además, por medio de ella es posible identificar a una persona. También, a partir de los sonidos se puede estimar la pose de la fuente, ya sea esta voz u otro sonido provocado por la persona (e.g. ruido de los pasos al andar). Una desventaja es la necesidad de que la persona establezca contacto sonoro con un micrófono, de igual forma, la distancia afecta la calidad del sentido.

Calor La temperatura es otra característica útil para detectar personas. La temperatura de una persona es de 37.5°C en promedio. Con el uso de los sensores apropiados o de cámaras térmicas es posible establecer la presencia de cuerpos con temperatura similar a la de una persona, e incluso poder reconstruir su silueta.

Otros La mayoría de los métodos populares para sensar personas ya se han mencionado, sin embargo existen otras aproximaciones como los químicos (e.g. esencia), incidencia de ondas (e.g. ultrasonido, tomografía), movimiento interno (e.g. vibraciones del corazón o respiración) por nombrar algunos. De igual forma es común utilizar propiedades de dispositivos portables, por ejemplo: marcas visuales, redes inalámbricas, marcas IR.

Este trabajo se centra en la detección de personas con un escáner láser. Se utiliza una técnica de reconocimiento de piernas para detectar presencia de una persona e inferir su pose relativa al robot.

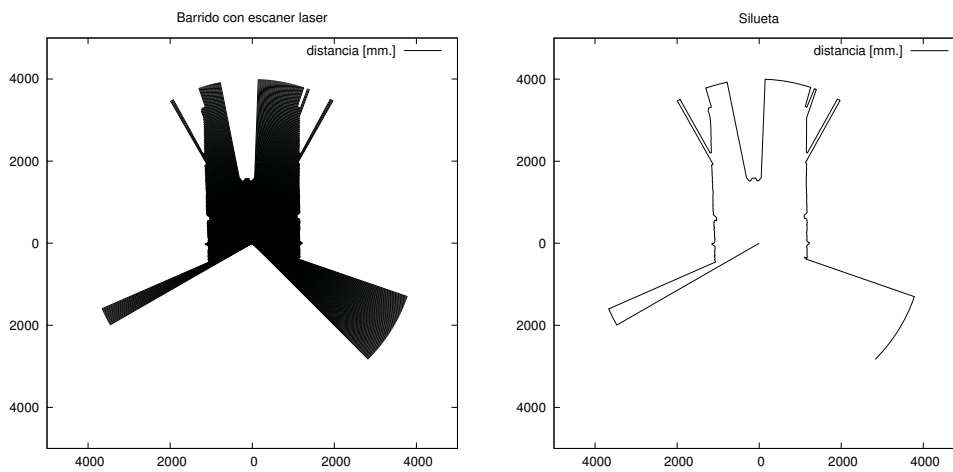
4.2. Sensado de personas con escáner láser

Un escáner láser es un sensor activo de rango que mide distancias de forma radial sobre un plano (fig. 4.1). Es un sensor muy preciso con errores de apenas unos cuantos milímetros. El sensor principal se encuentra fijo, y un espejo giratorio dirige un haz de luz en diferentes direcciones para barrer el entorno.

Un barrido completo con un escáner láser almacena varios puntos en el espacio expresados en coordenadas polares. Cada punto representa la distancia al obstáculo más cercano. El barrido es discreto, se toman muestras en ángulos bien definidos por un encóder conectado al espejo giratorio.

El sensado de personas con un escáner láser es limitado. De todas las características utilizadas para sensar personas, sec. 4.1, sólo la proximidad y reconstrucción de siluetas son utilizables.

En este trabajo se utiliza un escáner láser fijo en el robot, el cual, no posee movimientos adicionales (tilt) por lo que su rango de acción únicamente es el plano horizontal de barrido. Es posible variar la altura del plano pudiéndose sensar la cabeza, torso y piernas; de todos ellos el criterio más descriptivo son las piernas, debido que la altura de los otros dos elementos variará conforme a la



(a) Imagen del barrido de un pasillo con escáner láser

(b) Silueta obtenida por interpolación

Figura 4.1: Sensado con un escáner láser en un pasillo: imagen de barrido (a) y silueta interpolada (b).

talla, edad, estatura u origen étnico de la persona. Para sensar las piernas basta colocar el escáner láser a una altura entre 10 y 30 centímetros para abarcar la mayoría de los casos posibles (niños, adolescentes y adultos).

Un primer enfoque consiste en la búsqueda de mínimos locales [22, 4] para reportar la presencia de una persona. Esto funciona bien sólo para ambientes simples (e.g. habitación vacía, corredor) y requiere que al menos una pierna sea visible en todo momento [20].

Otro enfoque consiste en detectar a las personas a partir del movimiento de estas [29, 14]. La técnica consiste en comparar una secuencia de lecturas de barrido en busca de grupos de puntos (*clusters*) que cambien su posición de forma grupal. Sin embargo, el problema principal de este enfoque es que requiere que el robot se encuentre estático o se desplace a velocidades muy pequeñas, cuando el robot se desplaza todo el entorno se *mueve* con él.

Las piernas son bastante descriptivas, el patrón base que se busca lo constituyen dos mínimos muy cercanos (fig. 4.2). Este es el mejor caso posible ya que es muy certero (existen poco objetos en un entorno doméstico con una silueta similar a dos piernas separadas).

Una limitante del reconocimiento de personas por patrones de piernas es que sólo es posible cuando la persona las tiene suficientemente visibles al sensor, por ello, una persona con vestido amplio o en silla de ruedas no se podría reconocer por este medio.

También los patrones restringen el número de mínimos a lo más a dos, entonces una persona con bastón o con andadera también sería difícil de reconocer pues poseen más de dos mínimos en su silueta. Estas limitantes en los patrones podrían arreglarse incluyendo una etapa previa al seguimiento donde se aprenda

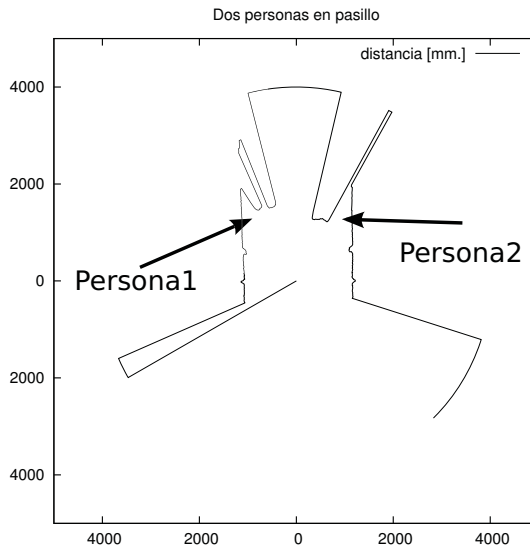


Figura 4.2: Dos personas paradas frente al robot en un pasillo

el patrón a seguir.

También resulta importante tomar en cuenta que el operador se encuentra en movimiento, principalmente caminando. Durante el andar, la pose de las piernas cambia constantemente (fig. 4.3). La distancia entre las piernas varía constantemente y la silueta no siempre exhibe el patrón de dos piernas separadas. De hecho hay al menos otros dos patrones a considerar: piernas juntas y piernas desfasadas (una delante de la otra).

Las técnicas de reconocimiento de piernas deben tomar en cuenta los patrones que ocurren con más frecuencia al andar. La búsqueda por mínimos resulta costosa debido que la silueta de barrido no representa una función suave y además el número de puntos que formen parte del patrón variará. Una alternativa eficiente es utilizar reconocimiento de piernas basado en flancos.

4.3. Reconocedor de piernas basado en flancos

Este reconocedor de piernas fue propuesto por Nicola Bellotto y Huosheng Hu [8]. Utiliza una única lectura de barrido del escáner para extraer la información necesaria para detectar personas, sin importar si estas o el robot se encuentran en movimiento.

En contraste con los métodos de búsqueda de mínimos locales o detección de movimiento, esta técnica busca patrones típicos de piernas basándose en los flancos (cambios bruscos) dentro de un barrido con el escáner.

Los patrones de piernas que interesan son aquellos representativos de una persona en movimiento (caminando) o estática (de pie). Éstos patrones (fig. 4.4) se pueden agrupar de la siguiente manera:

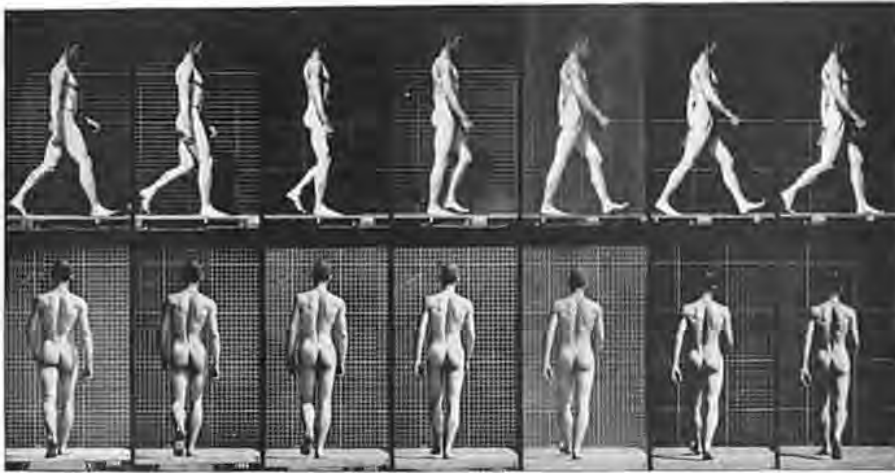


Figura 4.3: Atleta caminando (© E. Muybridge, Dover Publications [34]).

LA (*Legs Apart*) Piernas separadas. Dos patrones de piernas con un espacio de separación.

FS (*Forward Straddle*) Pierna adelantada. Dos patrones de piernas juntos (sin espacio de separación), con una pierna adelante de la otra, el patrón resultante es escalonado.

SL (*Single Leg*) Pierna aislada. Únicamente se aprecia una pierna.

El primer patrón (LA) ocurre cuando la persona está parada mirando al robot con las piernas abiertas, el segundo (FS) ocurre cuando hay una pierna más cerca al robot y aparece cuando frecuentemente durante el andar, el último patrón (SL) es característico de una persona con las piernas juntas. Los primeros dos patrones son muy representativos; sin embargo, el tercero es muy fácil de confundir ya que otros objetos cotidianos tienen la misma silueta (e.g. botes de basura, macetas, árboles).

El método completo incluye una etapa de acondicionamiento (filtrado) y otra de validación biométrica para verificar que los patrones encontrados poseen dimensiones similares a las de una persona estándar.

4.3.1. Acondicionamiento

Comienza con la recepción de la nube de puntos dada por el escáner láser. A estos datos se les aplica una etapa de filtrado, esto es importante para eliminar posibles errores en la etapa de sensado debidos a manchas o rayones en la superficie del escáner láser o a superficies de incidencia muy pequeñas (e.g. un cable). El filtrado se encargará de suavizar la silueta del entorno y mantendrá sus componentes más representativas, se minimizará la presencia de puntos que no sean similares a sus vecinos (*outliers*).

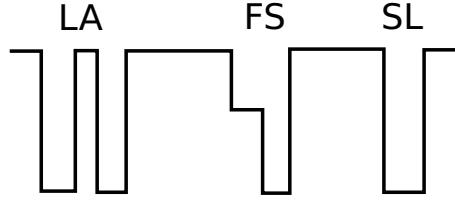


Figura 4.4: Patrones de piernas: *LA* (piernas abiertas), *FS* (pierna adelante y atrás) y *SL* (firmes)

El filtro utilizado en este trabajo es un promedio de vecinos, construido de la siguiente manera:

$$r_i = \frac{\left(\sum_{k=i-\frac{s}{2}}^{i+\frac{s}{2}} p_k \right)}{t+1} \quad (4.1)$$

De la ecuación 4.1, r_i es un punto en el barrido ya filtrado, p_i es un punto del barrido sin filtrar y s es el número de muestras aledañas a ser tomadas en cuenta en el promedio. En este trabajo se utilizó un valor de $s = 4$. El resultado es una señal filtrada donde los cambios abruptos aislados se han suavizado y sólo sobreviven los flancos más representativos.

4.3.2. Detección de flancos

Esta etapa consiste en encontrar los flancos dentro del barrido filtrado.

Un flanco es un cambio abrupto en la señal de barrido y puede ser de subida S o de bajada B (fig. 4.5) dependiendo el sentido en que se esté revisando la señal del escáner¹. Además, un flanco puede estar formado por dos o más puntos como resultado del filtrado.

La forma de detectar un flanco es revisar si entre dos puntos del barrido (r_i, r_{i+1}) existe una distancia mayor a cierto umbral U . De acuerdo con la convención establecida, si se cumple $|r_i, r_{i+1}| \geq U$, los puntos (r_i, r_{i+1}) forman un flanco; si $r_i > r_{i+1}$ se trata de un flanco de subida S o en caso contrario si $r_i < r_{i+1}$ se trata de un flanco de bajada B , y se les etiquetará como S_i o B_i según corresponda. Para cada flanco se deben guardar los puntos que lo componen.

Es posible que un flanco esté formado por más de dos puntos. Esto es fácil de verificar si existen dos flancos del mismo tipo consecutivos. En este caso todos los flancos consecutivos deben fusionarse en uno solo y únicamente se almacenarán los puntos inicial y final. Por ejemplo, si sucede S_i y S_{i+r} , estos dos flancos se fusionarán en uno solo S_i formado por los puntos (r_i, r_{i+r+1}) . Todos los flancos consecutivos deben fusionarse para minimizar el número de flancos presentes en el barrido.

¹ En este trabajo se considera que los datos en el escáner vienen ordenados en sentido horario (mano izquierda).

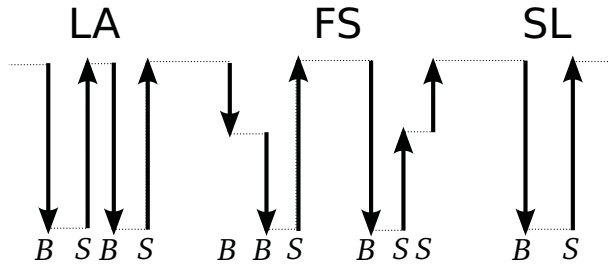


Figura 4.5: Patrones de piernas con sus flancos y su cadena descriptora

4.3.3. Extracción de patrones de piernas

El resultado del proceso anterior genera una lista de flancos. Esta lista también puede ser vista como una cadena de S s y B s (e.g. ' $BSBBSBSSBSB$ ').

Ahora, cada patrón de piernas (LA, FS y SL) puede simplificarse para ser descrito como una cadena de flancos (fig. 4.5). Como puede observarse, para cada patrón de piernas corresponde una cadena de flanco. Para FA corresponde ' $BSBS$ ', para FS corresponden ' BSS ' y ' BBS ', y para SL corresponde ' BS '.

El siguiente paso es hacer la búsqueda de las subcadenas para cada patrón dentro de la cadena de todo el barrido. Se debe buscar cada uno de los patrones por separado, inclusive se deben de tomar en cuenta los traslapes (e.g. la cadena ' $BSBSBS$ ' contiene tres veces la subcadena ' $BSBS$ ' del patrón LA).

Con esta búsqueda deben construirse tres listas (L_{LA} , L_{FS} y L_{SL}), una para cada patrón de piernas encontrado. Nótese que por cada patrón LA se encontrarán dos SL, y por cada FS se encontrará un SL. Cada vez que se encuentra un nuevo patrón en la cadena de flanco, se agregan un descriptor de este a la lista correspondiente. Al final de la búsqueda todos los patrones se encuentran en la lista correcta.

4.3.4. Validación biométrica

El siguiente paso es realizar la validación de cada uno de los patrones para verificar que las dimensiones correspondan a las de una persona promedio. para ello se utilizan tres variables.

La variable a representa el ancho de una pierna, b equivale al espacio libre entre dos piernas (piernas separadas o al andar) y c representa la distancia que miden dos piernas juntas o una de perfil (fig. 4.6).

De acuerdo con [8], los mejores resultados se presentan con los siguientes rangos: el ancho de una pierna $10 < a < 20cm$, la distancia de paso máximo $b < 40cm$ y el ancho de dos piernas juntas $10 < c < 40cm$. Estos resultados también son congruentes con las dimensiones de una persona estándar latinoamericana [15].

Cada patrón cuyas dimensiones biométricas no cumplan con los rangos establecidos será eliminado.

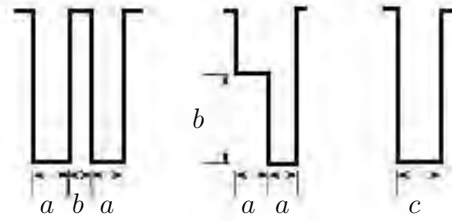


Figura 4.6: Variables biométricas en los patrones de piernas

4.3.5. Eliminación de patrones

Una vez realizada la validación biométrica se prosigue a eliminar los patrones traslapados. Por ejemplo, cada patrón LA puede traslaparse con dos patrones FS (uno por cada pierna). Para ello se construyeron las tres listas, ya que es necesaria una jerarquización.

El patrón LA es más representativo de una persona que el FS, y a su vez estos dos son más representativos que un patrón SL. Existen pocos objetos que se puedan confundir con un patrón LA (e.g. dos patas de una mesa) o FS, pero existe una gran cantidad de objetos con forma SL (e.g. respaldo de una silla, bote de basura, maceta).

Así, se revisa si algún patrón SL está contenido en un LA o FS, en caso de que así sea, se eliminará el patrón.

4.3.6. Obtención de pose

Una vez que se ha obtenido la lista de patrones válidos, ya sólo queda estimar la pose de la persona. Para ello, por cada patrón se promedian todos los puntos contenidos entre flancos $B - S$, $S - S$ o $B - B$ (fig. 4.7). Estos puntos son aquellos donde el haz ha incidido en la persona, al promediarlos se obtiene el centroide que se reporta como la pose de la persona.

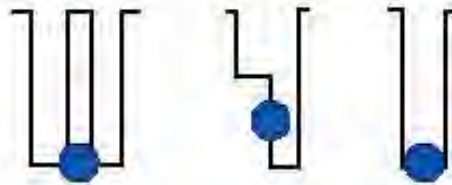


Figura 4.7: Pose de la persona en base al patrón que exhibe

Para elegir cual patrón corresponde al operador entre todos los encontrados, se calcula el error de posición de cada persona encontrada con respecto a la pose anterior del operador y se reporta aquel patrón con el error menor. Si el error es muy grande ($e > 0,5m$), no se reporta ningún patrón como válido, esto debido a que se asume una velocidad promedio ($1,4 m/s$) o menor para el andar del operador.

Capítulo 5

Rastreo

5.1. Introducción

El rastreo¹ se refiere al proceso de extraer la descripción de movimiento de un objeto en escena, en este caso el operador, a partir de los datos reportados por la etapa de reconocimiento y de la historia temporal inmediata [49].

Dentro de la etapa de reconocimiento es posible que se utilicen diferentes tipos de sensores (e.g. escáner láser, cámaras, etc.). Esto es deseable ya que se añade redundancia al sistema, si alguno de los sensores falla o reporta datos erróneos, el reconocimiento puede continuar utilizando la información reportada por el resto de los sensores disponibles. Sin embargo, al usar varios sensores se requieren diferentes módulos de reconocimiento y surge la dificultad de fusionar la información de todos para generar una conclusión única y lo más certera posible.

Este trabajo se centra en el seguimiento de personas con un robot móvil. El reconocimiento desarrollado utiliza un escáner láser (cap. 4), sin embargo, también se han hecho pruebas con otros módulos de reconocimiento con cámaras y con un sensor kinect² para ofrecer diferentes fuentes de sensado y añadir redundancia al sistema. Por este motivo las técnicas de rastreo descritas en este capítulo toman en cuenta más de un módulo de reconocimiento de personas.

Es importante dejar claro que las técnicas descritas en este capítulo han sido desarrolladas *ex professo* para el presente trabajo. Se han desarrollado siguiendo la necesidad de un módulo con capacidad de rastreo y fusión sensorial. Sin embargo, carecen del rigor teórico que las respalde, por ello se hace la recomendación de utilizar técnicas más sólidas (e.g. Filtro de Kalman, Filtro de Partículas).

¹ Traducido del inglés *tracking*.

² El desarrollo e implementación de otras etapas de reconocimiento para el operador (e.g. kinect, visión, etc.) aparte del reconocedor de piernas con escáner láser fue realizada por otros compañeros del laboratorio, por lo cual sólo se reportan las experiencias obtenidas al utilizar varios reconocedores.

5.2. Técnicas de rastreo

El objetivo principal del rastreo es estimar el vector de estado del objeto en movimiento (operador). Esto implica realizar la actualización pertinente de forma periódica utilizando la información de los módulos de reconocimiento y el registro histórico temporal. El rastreo debe ser suficientemente robusto como para lidiar con la incertidumbre del problema e inexactitudes del hardware. Esta etapa debe concluir una estimación aceptable de la pose del operador dada la información de reconocimiento y del registro histórico temporal.

También al utilizar únicamente un solo sensor es importante implementar una etapa de rastreo. Esto debido a que el sensor utilizado puede arrojar ocasionalmente datos erróneos, y en algunas circunstancias podría dejar de detectar al operador (e.g. al doblar una esquina). Estos casos representan situaciones breves de alta incertidumbre, si no se cuenta con un mecanismo de rastreo para lidiar con ella, el robot simplemente reportará que ha perdido al operador. Aquí la solución consiste en recurrir al registro histórico temporal de la pose del operador (i.e. *¿Dónde estaba antes el operador y hacia dónde se dirigía?*), con ello es posible plantear una hipótesis de la trayectoria que ha seguido el operador e ir tras él.

En este trabajo se utilizaron varias técnicas de rastreo para el seguimiento del operador, en todas se asume que el robot puede contar con más de un solo módulo de reconocimiento. Aquí se reportan las técnicas utilizadas.

5.2.1. Promedio

Esta implementación es la más sencilla, obtiene el vector de estado global (pose) $X[t]$ del operador en el tiempo t promediando la información de todos los m módulos de reconocimiento disponibles en ese instante. Cada módulo reportará la pose del operador X_s que obtuvo.

$$X[t] = \frac{X_{s1}[t] + X_{s2}[t] + \dots + X_{sm}[t]}{m} \quad (5.1)$$

Calculado el promedio (ec. 5.1) se obtiene el centroide (media) de todos los datos. Esto es útil siempre y cuando los datos reportados no sean tan dispersos (i.e. tengan poca desviación estándar).

La ventaja de este enfoque es que es muy simple y toma en cuenta los datos de cada uno de los reconocedores disponibles. De esta forma se filtra la estimación para descartar los valores errados, sin embargo, si algunos términos (X_s) tienen un error considerablemente mayor al resto (*outliers*), estos elementos perjudicarán el cálculo en lugar de contribuir a una buena estimación.

Otro problema existe por la sincronización de los módulos. No todos los sensores trabajan con la misma velocidad y puede suceder que en algunos instantes la estimación de pose para el operador dependa únicamente de un sensor. Si en algún instante no existe algún módulo de reconocimiento que reporte, el rastreo no tendrá forma de calcular la pose del operador y el robot será detenido.

Por ejemplo, en el presente trabajo se hicieron pruebas reconociendo al operador con dos sensores diferentes: escáner láser y kinect. El módulo de reconocimiento de piernas con el escáner láser reportaba la pose del operador aproximadamente cada 0.2 segundos, mientras que el reconocedor de esqueleto con el sensor Kinect reportaba cada 2 segundos. Es decir, el 90 % de las estimaciones de pose para el operador dependían únicamente del reconocimiento de piernas con el escáner láser. Si este llegaba a confundirse con algún otro mueble o dejaba de percibir al operador, el robot perdía al operador o se detenía.

La tasa de reporte de los sensores es un parámetro que depende del hardware y de la implementación de los reconocedores. En la práctica será muy difícil lograr la sincronización adecuada con todos los módulos.

5.2.2. Promedio con historia temporal

Este enfoque es similar al anterior, implementa un promedio de los sensores disponibles junto con parte de la historia temporal (los k valores anteriores), ec. 5.2. Con este enfoque se hace la suposición que la posición del operador no variará de forma brusca, y esto sucede siempre y cuando el operador mantenga un ritmo de andar moderado.

$$X[t] = \frac{X_{s1}[t] + X_{s2}[t] + \dots + X_{sm}[t] + X[t-1] + X[t-2] + \dots + X[t-k]}{m+k} \quad (5.2)$$

Al tomar en cuenta las estimaciones anteriores se añade robustez al sistema. La principal ventaja de contar con una parte de la historia temporal anterior es que se puede discernir de los módulos de reconocimiento breves periodos de tiempo. Además, la pose del operador no puede variar de forma brusca, así que si los módulos de reconocimiento registran cambios bruscos, estos tendrán un impacto menor. Esto será útil cuando ninguno de los sensores pueda detectar al operador (e.g. al doblar una esquina) y será posible dar una estimación a partir únicamente de la historia anterior (i.e. el operador se encuentra en esa dirección).

La principal desventaja de este enfoque es que se disminuye la contribución de los módulos de reconocimiento. Los sensores aportarán la información más confiable para poder estimar la pose actual del operador, si la historia temporal que se toma es muy larga se minimiza el impacto de la información proveniente de los sensores y se hace la estimación utilizando principalmente la historia temporal. Por lo tanto, es importante restringir a longitud de la historia temporal. En este trabajo se encontró un funcionamiento moderadamente aceptable con $k = 5$.

5.2.3. Promedio ponderado

La principal desventaja del método anterior es que disminuye la contribución de los sensores si la historia temporal es muy larga, los sensores deben tener un papel preferencial para esta tarea pues poseen la información más actual

y confiable (excepto por las fallas o inexactitudes que puedan ocurrir). Así, la siguiente mejora es ponderar la historia temporal para minimizar su impacto y dar preferencia a la etapa de reconocimiento.

$$X[t] = \frac{\left(\frac{X_{s1}[t]+X_{s2}[t]+\dots+X_{sm}[t]}{m}\right) + \alpha \left(\frac{X[t-1]+X[t-2]+\dots+X[t-k]}{k}\right)}{1 + \alpha} \quad (5.3)$$

La ecuación 5.3 realiza primero los promedios de los reconocedores y de la historia temporal por separado. Después se pondera el término de la historia temporal de forma que $\alpha < 1$ para que la información de los sensores tenga mayor relevancia que la de la historia. Esto ocasiona un mejor desempeño, sin embargo, aún queda el problema de encontrar una constante α adecuada. En este trabajo se utilizaron dos sensores (escáner láser y kinect), y constantes $k = 5$, $\alpha = 0,7$ con resultados aceptables.

Un problema de este enfoque es que se da una igual importancia a los valores inmediatos y a los más lejanos, temporalmente hablando. Tiene un impacto igual el valor $X[t-k]$ que el valor inmediato anterior $X[t-1]$, lo cual no es correcto, se asume que $X[t]$ será más similar a $X[t-1]$ que a $X[t-k]$, por lo que hay ponderar también temporalmente para que las estimaciones más lejanas disipen su contribución.

Otro problema surge cuando todos los módulos de reconocimiento dejan de percibir al operador, entonces sólo se ocupa la información del registro histórico temporal, el cual se irá disipando poco a poco. El rastreo debe terminarse unas pocas iteraciones después ya que esto será interpretado por el robot como si se estuviera aproximando al operador, lo cual no es cierto.

Finalmente, también existe el problema de la confiabilidad de cada sensor, algunos de ellos reportan información más certera o más precisa. Por ejemplo, si el escáner láser deja de ver patrones claros de piernas (LA y FS) y sólo ve patrones simples (SL), no hay garantía que el objeto detectado sea una persona o una maceta, sería necesario esperar la validación por parte de otro sensor más robusto (kinect o cámara), por esto también sería deseable poder ponderar la estimación realizada por un módulo de reconocimiento.

5.2.4. Promedio ponderado con parámetro de certidumbre

Este enfoque pondera la historia temporal para dar mayor preferencia a los valores más inmediatos que a los más lejanos. También pondera los vectores obtenidos por cada uno de los reconocedores; esto debido a que algún módulo de reconocimiento puede sufrir algún fallo detectable (e.g. el sensor deja de funcionar) o en la técnica que implemente (e.g. patrones de piernas SL son menos certeros que los patrones FS y LA), o simplemente no reporta a tiempo el vector $X_s[t]$. Previendo estas situaciones se propone un parámetro de ponderación $C_{si}[t] \in [0, 1]$ (abreviado C_{si}) para saber si el módulo de reconocimiento i ha reportado correctamente la pose ($C_{si} = 1$) del operador o no ($C_{si} = 0$), si se tiene

poca certidumbre del valor reportado se puede disminuir el valor de C_{si} para disminuir la contribución de este término con respecto a los demás.

$$X[t] = \frac{C_{s1}X_{s1}[t] + \dots + C_{sm}X_{sm}[t] + \alpha X[t-1] + \dots + \alpha^k X[t-k]}{C_{s1} + \dots + C_{sm} + \alpha + \dots + \alpha^k} \quad (5.4)$$

$$X[t] = \frac{(\sum_{i=1}^m C_{si}X_{si}[t]) + (\sum_{i=1}^k \alpha^i X[t-i])}{(\sum_{i=1}^m C_{si}) + (\sum_{i=1}^k \alpha^i)} \quad (5.5)$$

Ahora, también se calcula un parámetro de certidumbre $C[t]$ global para el estado $X[t]$, ec. 5.6, de esta forma se tiene un término para medir la veracidad de la estimación actual. El valor de $C[t]$ se mantiene acotado dentro del rango $[0, 1)$, su valor también depende del número de módulos de reconocimiento que estén presentes en ese instante, a menor cantidad de módulos de reconocimiento el valor de C comienza a bajar con el tiempo, pero no llega a cero sino hasta después de que desaparecen todos los módulos de reconocimiento y la historia temporal se ha disipado completamente, entonces se puede concluir que el robot ha perdido al operador.

$$C[t] = \frac{(\sum_{i=1}^m C_{si}) + (\sum_{i=1}^k \alpha^i C[t-i])}{m + (\sum_{i=1}^k \alpha^i)} \quad (5.6)$$

Con esta técnica se obtienen varias ventajas. La historia temporal se disipa en el tiempo y en ausencia de módulos de reconocimiento deja de contribuir después de algunas iteraciones. Esto permite que después de haber perdido al operador se construya un *fantasma* de este, el cual comenzará a disiparse hasta que algún módulo de reconocimiento vuelva a encontrarlo. Este fantasma sobrevivirá por un periodo breve y actuará como una memoria a corto plazo que almacene la presencia inmediata del operador; se espera que durante este periodo, los sensores recuperen nuevamente la percepción del operador.

Por otro lado, el parámetro $C[t]$ sirve como bandera para avisar cuando se ha perdido al operador. Entonces debería ejecutarse alguna rutina de búsqueda del operador (e.g. girar en varias direcciones, dar una vuelta con el robot, etc.).

5.2.5. Ejemplo

A continuación se muestra un ejemplo al que se aplicarán las cuatro técnicas de rastreo descritas para compararlas e ilustrar ventajas y debilidades.

El ejercicio consiste en recrear el rastreo de un objeto que se mueve en forma sinusoidal durante 10 segundos sobre una recta. Este caso puede pensarse como un objeto con movimiento armónico, como se mueve sobre una recta, se ocupa sólo una variable. El objeto sigue la trayectoria de la fig. 5.1.

Para sensar la pose del objeto se ocupan dos módulos de reconocimiento R_A y R_B , ambos módulos reportan cada 0,1s. El módulo R_A tiene una precisión

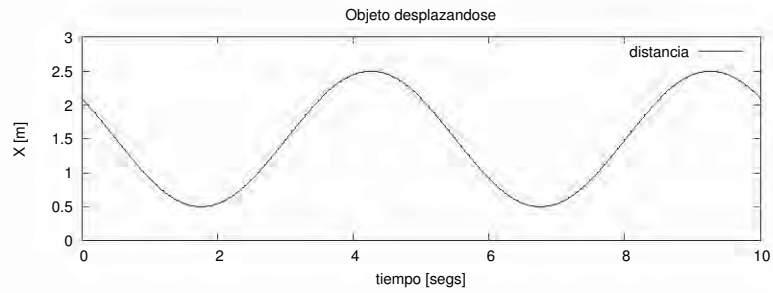


Figura 5.1: Desplazamiento en el tiempo de un objeto sobre una variable

de $\pm 0,1m$ y es más preciso que el módulo R_B con una precisión de $\pm 0,3m$. Además, ambos módulos reportan fallas: R_A fallará en el intervalo $t = (3, 4,5)s$ y a partir de $t = (8, \sim)s$, R_B fallará en el intervalo $t = (4, 5)s$ y también a partir de $t = (8, \sim)s$. Se puede observar que ambos sensores fallarán en $t = (4, 4,5)s$ y después a partir de $t = (8, \sim)s$. La información de sensado se muestra en la fig. 5.2. Con estos datos de entrada se han probado las cuatro técnicas de rastreo.

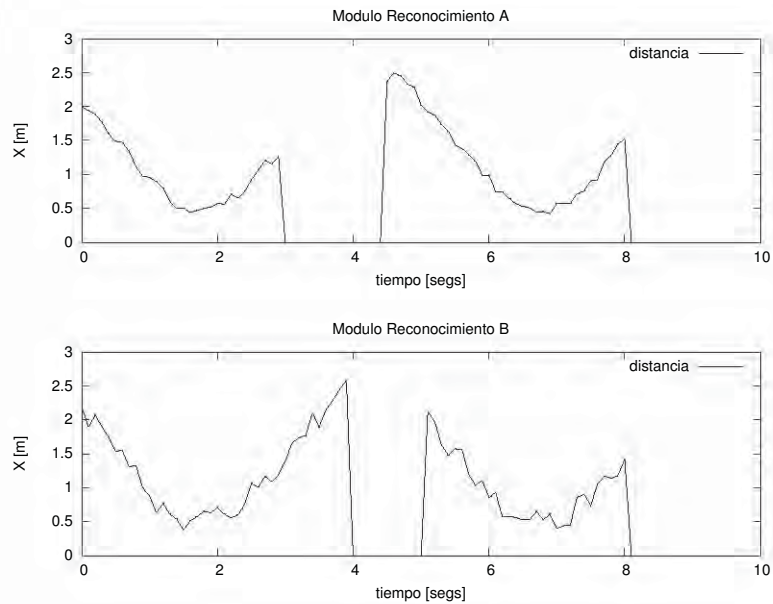


Figura 5.2: Módulos de reconocimiento

5.2.5.1. Promedio

Aquí se ha hecho el promedio con los reconocedores disponibles, si sólo había un reconocedor disponible solo se ocupa este. El resultado puede apreciarse en la fig. 5.3.

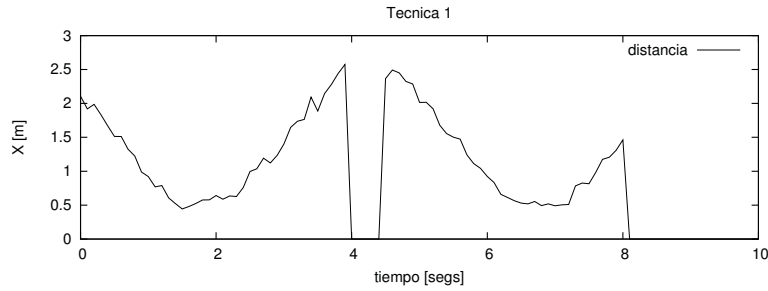


Figura 5.3: Técnica 1 - Promedio

Se puede observar que en los intervalos donde no hay ningún módulo de reconocimiento, la pose del operador se pierde, esto es porque durante estos periodos de tiempo se deja de percibir al operador.

5.2.5.2. Promedio con historia temporal

En este método se realiza el promedio de los datos de reconocimiento disponibles y con la historia temporal. Se ha empleado $k = 5$. El resultado puede apreciarse en la fig. 5.4.

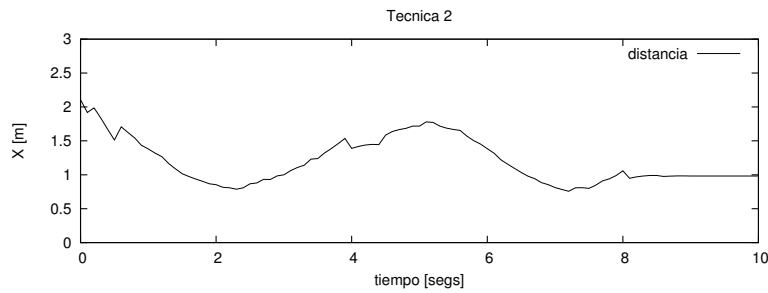


Figura 5.4: Técnica 2 - Promedio con historia temporal

Esta técnica presenta una estimación más suave, aún cuando el operador deja de ser visto, la estimación persiste. Esto funciona bien en intervalos cortos, como en $t = (4, 4.5)s$, sin embargo, a partir de $t = 8s$ no se recupera la pose del operador y se sigue reportando una pose, lo cual es erróneo.

5.2.5.3. Promedio ponderado

Aquí se ha hecho el promedio por separado de los datos de reconocimiento y con la historia temporal, después se hace un promedio ponderado entre estos dos términos. Se ha empleado $k = 5$ y $\alpha = 0.7$. El resultado puede apreciarse en la fig. 5.5.

Este caso no es tan suave como el anterior, sin embargo, cuando el objetivo deja de ser visto persiste por breves momentos una estimación con la informa-

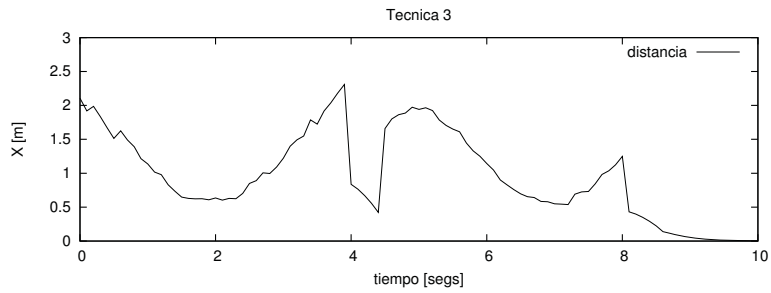


Figura 5.5: Técnica 3 - Promedio ponderado

ción pasada, esta se disipa poco a poco; cuando se llega a cero se ha perdido completamente al objetivo.

5.2.5.4. Promedio ponderado con parámetro de certidumbre

Con esta técnica se ha hecho el promedio ponderado de los módulos de reconocimiento disponibles y de la historia temporal, la cual se ha disipado a una tasa α . Se ha empleado $k = 5$ y $\alpha = 0,7$. También se ha calculado el parámetro de certidumbre global C . Los resultados pueden apreciarse en la fig. 5.6.

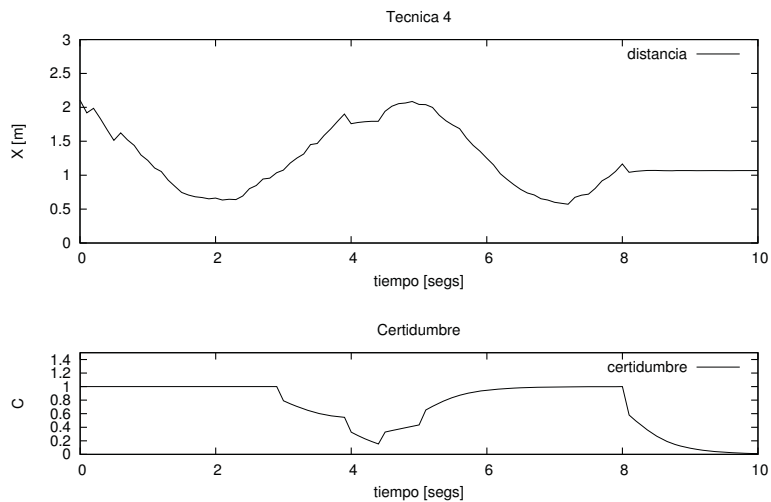


Figura 5.6: Técnica 4 - Parámetro de certidumbre y ponderación temporal

Aquí puede observarse una estimación más suave, donde hay persistencia temporal aún cuando los módulos de reconocimiento dejan de reconocer, en estos casos la estimación se hace únicamente con la historia temporal.

Para decidir la veracidad de la estimación se tiene un parámetro de certidumbre (gráfica inferior). Si alguno de los módulos deja de funcionar, este parámetro comienza a decrecer. Si todos los módulos dejan de funcionar, el parámetro de certidumbre disminuye hasta 0, entonces se ha perdido al operador y la estimación carece de sentido.

Capítulo 6

Planeación de movimiento

6.1. Planeación de movimiento

La planeación de movimiento tiene que ver con el cálculo de una trayectoria adecuada para que el robot ejecute una tarea. En el caso del seguimiento de personas tiene que ver con acompañar el desplazamiento del operador de forma segura (sin chocar). Una vez obtenida la trayectoria adecuada se deben calcular las velocidades necesarias en el mecanismo de locomoción para ejecutar la trayectoria. De esta manera, la planeación de movimiento en este trabajo consta de dos partes: navegación y cinemática inversa.

El problema de la navegación de un robot consiste en encontrar una trayectoria libre de colisiones hacia un objetivo. En el caso del seguimiento de personas el punto objetivo al que se quiere llegar es el operador, sin embargo, el entorno tiene muebles, paredes y otros agentes ajenos a la prueba que funcionan como obstáculos y que hacen necesario el tener un módulo de navegación.

La segunda parte tiene que ver con el cálculo de la cinemática inversa, esta se refiere al cálculo de las velocidades necesarias en los actuadores (mecanismo locomotor) para ejecutar el movimiento deseado. La cinemática inversa será dependiente del mecanismo de locomoción empleado y de su geometría, por lo que en este trabajo el análisis se refiere a un vehículo con ruedas de configuración diferencial.

6.2. Navegación

La navegación trata el problema de encontrar un movimiento libre de colisiones para que el robot cambie de un estado a otro dentro del espacio de configuración [16] (fig. 6.1). Para un robot móvil, su estado consiste principalmente en una posición y orientación posible dentro de su espacio de tarea (entorno de trabajo).

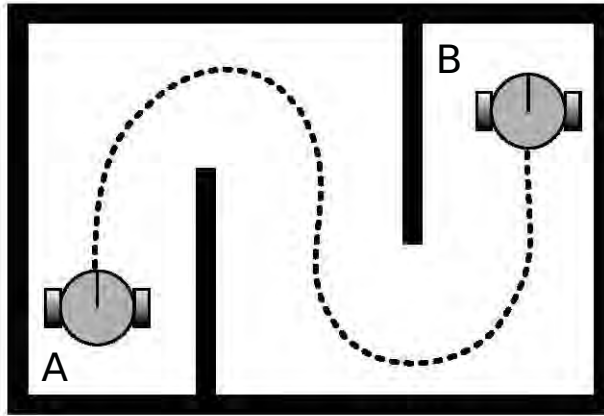


Figura 6.1: Problema de la navegación con un robot móvil: encontrar una trayectoria libre de colisiones desde *A* a *B*.

La navegación debe lidiar con las restricciones y obstáculos del entorno y con las restricciones geométricas y de movilidad del robot mismo (e.g. límites de velocidad, moverse por la derecha).

Para robots móviles el problema general se plantea con el problema de *la mudanza del piano*, que consiste en la planeación necesaria de movimientos para mover un piano de cola dentro de una casa amueblada y entre varias habitaciones. La navegación es complicada en el caso general, sin embargo, dependiendo del problema en cuestión se puede llegar a simplificar con algunas suposiciones, por ejemplo tomar el robot como una partícula o con forma circular, o también al suponer que no tiene restricciones de movimiento (i.e. locomoción omnidireccional).

En el caso de seguimiento de personas la navegación consiste en planear la locomoción segura hacia el operador, no es necesario llegar hasta él pero sí mantener un rango de distancia suficiente para no perderlo.

El estado deseado en el robot es una configuración *cercana* al operador de forma que también le esté *mirando*; esto último también es muy importante para que los sensores puedan detectar al operador la mayor parte del tiempo, por lo cual es deseable mantener al robot orientado hacia el operador.

La distancia entre el operador y el robot no será demasiada (2 o 3 metros a lo más), por lo cual las trayectorias a considerar son cortas, con pocos obstáculos. De hecho, el operador permanecerá al alcance del robot casi en todo momento, salvo por periodos cortos y en circunstancias particulares (e.g. doblar una esquina). Por ello, no es necesario contar con un mapa completo del entorno; una estrategia de navegación local es en principio suficiente.

6.2.1. Detección de obstáculos

La navegación requiere de sensores para detectar obstáculos, principalmente sensores de rango que le reporten la distancia a un obstáculo. Todo objeto que se encuentre en el ambiente es considerado como obstáculo (también el operador) ya que el robot no debe colisionar con ningún objeto u agente para garantizar su seguridad y la de los demás elementos del entorno.

El operador funciona como objetivo y genera un campo atractor y otro repulso, este criterio sirve para que el robot no choque con él.

Un escáner láser provee información muy precisa sobre el entorno del robot y los objetos que hay en él, particularmente distancias. Esto es adecuado para establecer una estrategia de navegación local siempre y cuando los obstáculos sean detectados. Esto no siempre es posible, ya que el escáner realiza un barrido sobre un plano horizontal, si el obstáculo no es atravesado por ese plano, no será detectado. Esta deficiencia podría subsanarse si se puede elegir la altura a la que se encontrará el escáner, pero esto no siempre es posible, el caso ideal es poder contar con información tridimensional del entorno.

6.2.2. Campos potenciales

Una de las estrategias de navegación más simple es la navegación por campos potenciales. Es una técnica de planeación que trata al robot como una partícula bajo la influencia de un campo potencial artificial (U) cuyas variaciones locales reflejan la estructura del espacio de movimiento libre [28].

La función de campo potencial U es usualmente definida (pero no necesariamente) como la suma de un campo atractor cuyo objetivo es empujar al robot hacia la configuración deseada y un campo repulsor que aleja al robot de los obstáculos.

En cada iteración, una fuerza artificial $\vec{F} = -\vec{\nabla}U$ es calculada con la función de campo potencial a partir de la configuración del robot actual. La resultante es un vector de fuerza que representa la dirección e intensidad del movimiento más prometedor para que el robot alcance su meta (fig. 6.2).

La técnica de campos potenciales puede ser vista con una analogía de una canica cayendo sobre un paisaje irregular (con crestas y valles); la canica representa al robot y el mínimo global del paisaje representa el estado deseado. Debido a la acción de la fuerza gravitacional la canica tratará de alcanzar un punto de equilibrio ($\sum \vec{F} = 0$) estable en algún valle (punto mínimo), aunque este sea local.

La analogía anterior también ilustra uno de los problemas principales de los campos potenciales, la posible existencia de mínimos locales. Si se utiliza únicamente el gradiente para moverse sobre la función potencial se corre el riesgo de quedar atascado en un mínimo local, lo cual implica que el robot no ha llegado a su meta. Existen algunas técnicas que buscan sortear los mínimos locales, sin embargo, casi siempre es necesario tener conocimiento *a priori* del entorno (e.g. un mapa), lo cual no siempre es posible ni práctico ya que los entornos realistas cambian constantemente.

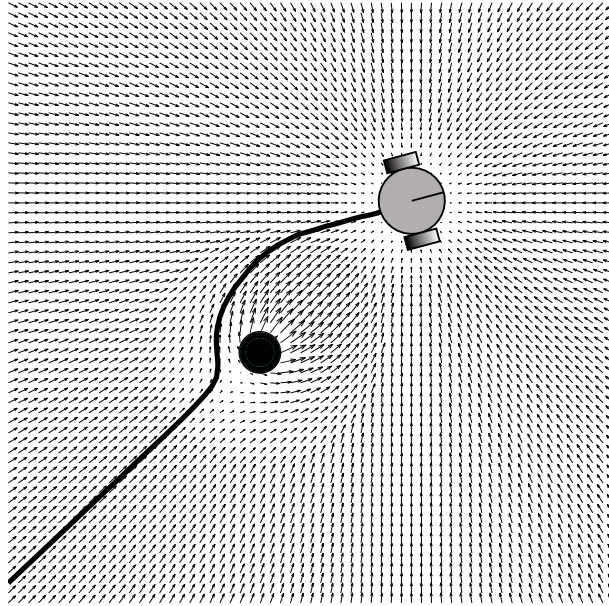


Figura 6.2: Navegación por campos potenciales con un robot móvil

6.2.2.1. Implementación

El uso de campos potenciales está bien justificado en el problema de seguimiento de personas con un robot al suponer que la distancia entre el robot y el operador es corta (2-3 metros máximo) y que esta se mantendrá la mayor parte del tiempo. Estas condiciones implican la planeación de una trayectoria corta dentro del entorno local del robot.

Se requiere tener las posiciones relativas al robot del operador y de los obstáculos, para ello se establecen marcos de referencia sobre el robot (fig. 6.3).

En el presente trabajo se han adoptado funciones exponenciales para trabajar los campos potenciales. Las fuerzas de atracción y repulsión se calculan tomando en cuenta la posición del operador y del obstáculo más cercano respectivamente.

$$F_a = (-k_a \exp(-\alpha_a * \rho_{operador}) + 1) \quad (6.1)$$

$$F_r = k_r \exp(-\alpha_r * \rho_{obstaculo}) \quad (6.2)$$

$$\theta_a = \theta_{operador} \quad (6.3)$$

$$\theta_r = \theta_{obstaculo} + \pi \quad (6.4)$$

El comportamiento de estas funciones se aprecia en la fig. 6.4. Las fuerzas tienen un comportamiento exponencial, creciente para la fuerza de atracción

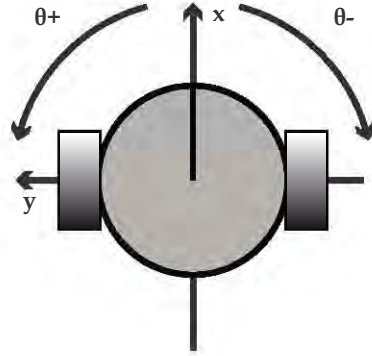


Figura 6.3: Marcos de referencia sobre el robot

y decreciente para la fuerza de repulsión conforme se aumenta la distancia al operador o a un obstáculo respectivamente. La dirección de la fuerza de atracción es la misma que la del operador, y para la fuerza de repulsión la dirección es contraria a la del obstáculo más cercano. Estas ecuaciones mantienen acotadas la magnitud de las fuerzas y permiten modificar su comportamiento con los parámetros k_a y k_r (magnitud) y α_a y α_r (tasa de crecimiento exponencial).

Una vez que se han calculado las fuerzas de atracción (F_a) y repulsión (F_r), así como sus direcciones (θ_a y θ_r). Es posible hacer una suma vectorial para calcular una fuerza resultante ecuación 6.5.

$$\vec{F} = \vec{F}_a + \vec{F}_r \quad (6.5)$$

La fuerza resultante reflejará la dirección más adecuada para continuar el movimiento, así como su intensidad. Es importante la función F tenga un rango normalizado $[0, 1]$ para poder escalar el valor de F de acuerdo a la cinemáticas de un robot particular.

Conviene recordar que, como se mencionó antes, el operador es atractor y repulsor al mismo tiempo. Es importante tener esto en cuenta a la hora de elegir los parámetros de las ecuaciones de campos potenciales, ya que por la doble naturaleza del operador (atractor y repulsor) este creará un mínimo local antes de ser alcanzado; la posición se puede encontrar alineando al operador, obstáculo y robot ($\theta_a = \theta_r$) el mínimo se encontrará a la distancia donde los dos campos se anulen. Es importante sintonizar los parámetros a una distancia segura y conocida (e.g. 50 cm).

6.3. Cinemática inversa

La obtención de la cinemática inversa se refiere al cálculo de velocidades necesarias en el mecanismo de actuación (locomoción) para ejecutar un movimiento

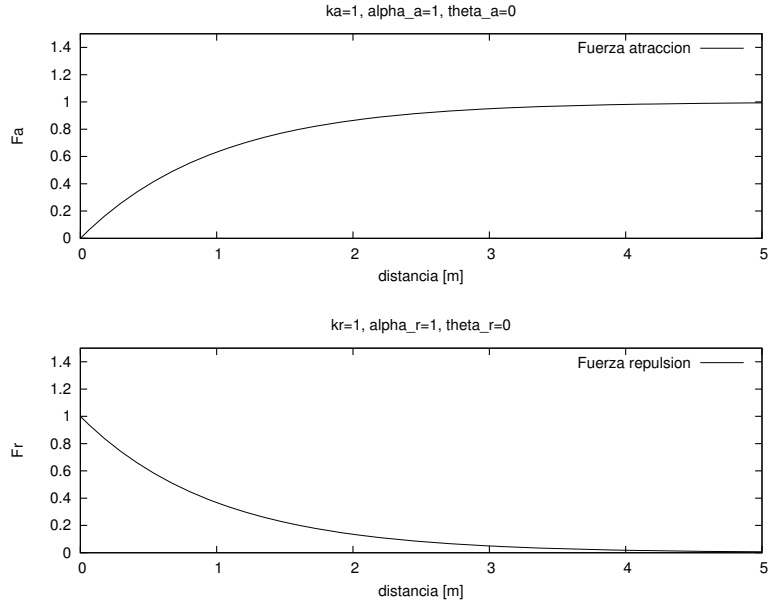


Figura 6.4: Comportamiento de las fuerzas de atracción y repulsión variando la distancia al operador (F_a) y al obstáculo más cercano (F_r).

deseado. Las ecuaciones de cinemática inversa son dependientes del mecanismo de locomoción empleado y de su geometría.

En este trabajo se empleó un robot con ruedas en configuración diferencial (fig. 6.3) por lo que la cinemática inversa consiste en calcular las velocidades necesarias en las ruedas para dirigirse en la dirección encontrada por campos potenciales.

En base a la figura 6.5, la cinemática directa de un robot diferencial está descrita por las siguientes ecuaciones:

$$v = \frac{v_l + v_r}{2} = R \frac{\omega_l + \omega_r}{2} \quad (6.6)$$

$$\omega = \frac{v_l - v_r}{L} = R \frac{\omega_l - \omega_r}{L} \quad (6.7)$$

Despejando ω_l y ω_r de las ecuaciones anteriores se obtiene la cinemática inversa para el robot diferencial.

$$\omega_l = \frac{2v + RL\omega}{2} \quad (6.8)$$

$$\omega_r = \frac{2v - RL\omega}{2} \quad (6.9)$$

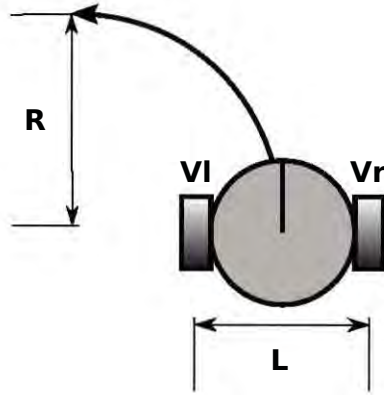


Figura 6.5: Parámetros cinemáticos de un vehículo diferencial

6.3.1. Implementación

Con los campos potenciales se obtuvo la dirección del movimiento (θ_F), así como su intensidad (F).

Ahora, debido a las restricciones cinemáticas de un vehículo diferencial (este no puede desplazarse a los lados), es importante que el robot primero se oriente hacia el operador, para ello se han ocupado las siguientes ecuaciones:

$$w_r = F * \left((w_{max} - w_{min}) * \exp \left(-\beta * \left(\left(\theta_F + \frac{\pi}{4} \right)^2 \right) \right) + w_{min} \right) \quad (6.10)$$

$$w_l = F * \left((w_{max} - w_{min}) * \exp \left(-\beta * \left(\left(\theta_F - \frac{\pi}{4} \right)^2 \right) \right) + w_{min} \right) \quad (6.11)$$

En estas ecuaciones w_{max} es la velocidad de giro máxima de avance del robot y w_{min} es la velocidad máxima en sentido contrario a w_{max} .

Las ecuaciones anteriores tienen por objetivo corregir primero la orientación del robot y coordinar que el avance de este sea proporcional a F . Por ello, mientras $(\theta_F + \frac{\pi}{4}) \neq (\theta_F - \frac{\pi}{4})$, ambas ruedas recibirán velocidades diferentes, cuando esta condición se cumple, ambas ruedas reciben la misma velocidad angular.

Capítulo 7

Implementación y resultados

7.1. Introducción

El sistema de seguimiento de personas descrito en los capítulos precedentes ha sido implementado en dos medios: en el simulador Player/Stage[?] corriendo bajo ROS (*Robotic Operating System* [?, ?]) y en el robot de servicio Justina[?] del Laboratorio de Biorrobótica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Ambas implementaciones se realizaron en lenguaje C/C++ corriendo bajo Linux. Se han utilizado algunas bibliotecas externas según las necesidades¹.

El sistema de software se ha implementado utilizando tres módulos (fig. 7.1). Cada módulo ya ha sido descrito en los capítulos precedentes.

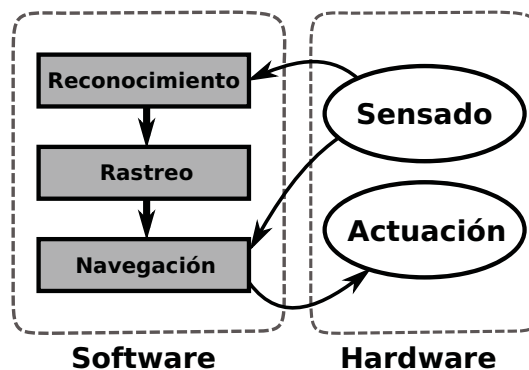


Figura 7.1: Implementación del sistema de seguimiento de personas

¹Principalmente se hace referencia a aquellas bibliotecas necesarias para el simulador (Player/Stage) y para utilizar el hardware (escáner láser *Hokuyo URG04LX*).

7.2. Experimentos con el simulador Player/Stage

En esta sección se describen los experimentos implementados con el simulador Player/Stage.

La mayoría de los textos de robótica coinciden en que un simulador no sustituye a un robot. Sin embargo, sirve perfectamente para implementar sistemas y explorar su comportamiento en ambientes controlados, antes de enfrentarse a la implementación con un robot de verdad.

Por otro lado, un simulador provee herramientas muy útiles que no siempre se encuentran disponibles con un robot en el laboratorio. Por ejemplo, espacios de trabajo muy amplios y *ad-hoc*, sistemas de localización, sensores caros, etc. Por estas razones, es justificable el uso de simuladores en la investigación en robótica, no como un fin, sino como una herramienta útil.

7.2.1. Simulador Player/Stage/Gazebo

El proyecto *Player* consiste en una plataforma de software para producir proyectos de investigación en robótica, proporciona una capa de abstracción de hardware (*Player*) que oculta los detalles de hardware y proporciona servicios de red para comunicar diferentes módulos. Fue desarrollado por la Universidad del Sur de California (USC) en el año 2000 como un proyecto de investigación de software para robótica [?]. Además de la plataforma, junto con *Player* se desarrollaron dos simuladores de robots, Stage y Gazebo.

Stage es un simulador 2D de robots móviles (fig. 7.2), proporciona una interfaz gráfica y un conjunto de sensores y actuadores que se pueden utilizar para construir agentes artificiales en el mundo virtual. Stage es lo suficientemente robusto como para permitir la simulación de varios agentes al mismo tiempo [?], debido en gran medida a las gráficas simples que maneja.



Figura 7.2: Entorno de simulación de Player/Stage

Por su lado, Gazebo es un simulador 3D que permite construir espacios y agentes más complejos que Stage. A diferencia de Stage, con Gazebo se pueden simular sólo pequeñas cantidades de agentes, dependiendo especialmente de las capacidades de procesamiento gráfico de la máquina sobre la que se ejecute.

Stage y Gazebo son los dos simuladores de robots más utilizados, tienen la ventaja de ser proyectos de software libre, por lo que se encuentran disponibles para su uso de forma gratuita y existe una gran comunidad de usuarios. Además, Stage y Gazebo son las herramientas de simulación de la suite ROS (*Robot Operating System*) [?, ?] y se encuentran disponibles para ser usados junto con el resto de la suite. ROS es una plataforma de desarrollo que además reúne un conjunto amplio de herramientas (bibliotecas, controladores de hardware, administración de recursos, red, etc.) para elaborar software para robots. Por el momento ROS es el proyecto de software libre para robótica más grande y completo.

7.2.2. Descripción de la implementación

El sistema desarrollado se ha construido utilizando el simulador Player/Stage ejecutándose sobre ROS en una computadora con Linux Ubuntu 11.10.

En el experimento participan dos agentes: un robot y una persona (fig. 7.3). El robot tiene forma circular con diámetro de 40cm, y tiene un escáner láser a 50cm sobre el suelo. La persona se ha elaborado en tres partes: piernas (0-80cm), torso (80-140cm) y cabeza (140-170cm). Para elegir las dimensiones de las personas, se han utilizado tablas antropométricas de la población latinoamericana, que se corresponden a las de un adulto promedio [?].

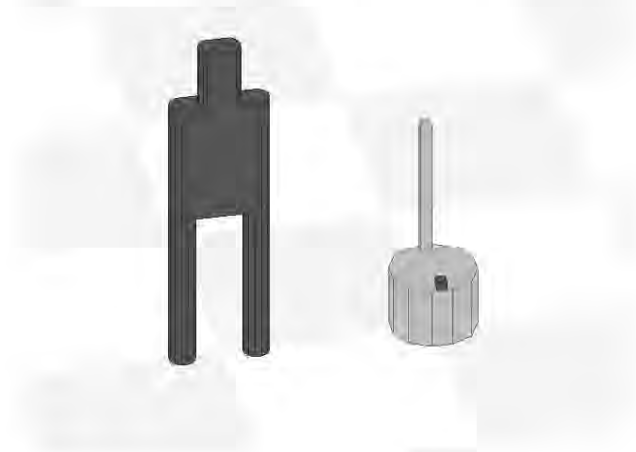


Figura 7.3: Agentes necesarios para la simulación de seguimiento. Un operador (izquierda) y un robot (derecha).

Ambos agentes son definidos como vehículos móviles. En todos los experimentos la persona sigue una trayectoria bien definida, el objetivo de esta puede variar (c.g. cruzar una puerta, acercarse a otra persona, caminar cerca de la pared, etc.).

El robot se desplaza utilizando el sistema de seguimiento desarrollado en esta tesis. El robot implementa un vehículo en configuración diferencial y posee un escáner láser con ruido².

Dadas la ventaja del simulador de poder contar con ambientes diferentes a voluntad, se han construido tres para explorar el comportamiento del sistema ante pruebas diferentes.

Además del robot y del operador. Se han añadido elementos como paredes, muebles y personas, para dificultar la actuación del robot. De esta forma, se pretende resaltar las cualidades y defectos del sistema desarrollado.

Ambiente 01: Cuarto vacío Consiste únicamente en un cuarto cuadrado de 10 metros por cada lado (fig. 7.4).

Representa un caso casi ideal, ya que no hay muchos obstáculos, ni patrones falsos que puedan confundir el sistema de reconocimiento del robot.

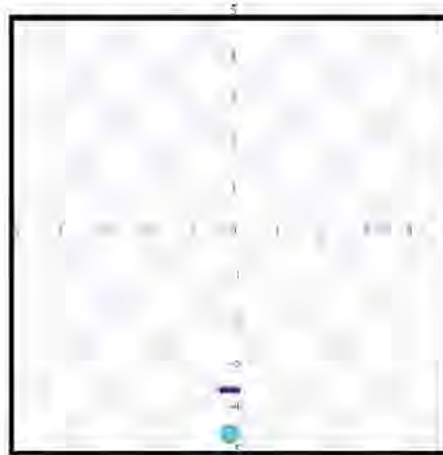


Figura 7.4: Vista superior del ambiente-01, un cuarto vacío.

Ambiente 02: Corredor con puertas Consiste en un corredor de 20m de largo y 2.5m de ancho (fig. 7.5). A lo largo del pasillo hay interrupciones en las paredes, a modo de puertas para que el robot y la persona puedan pasar a través de ellas.

²El simulador ofrece la posibilidad de utilizar un sensor ideal y uno con ruido. Todos los experimentos se realizaron con un sensor ruidoso.

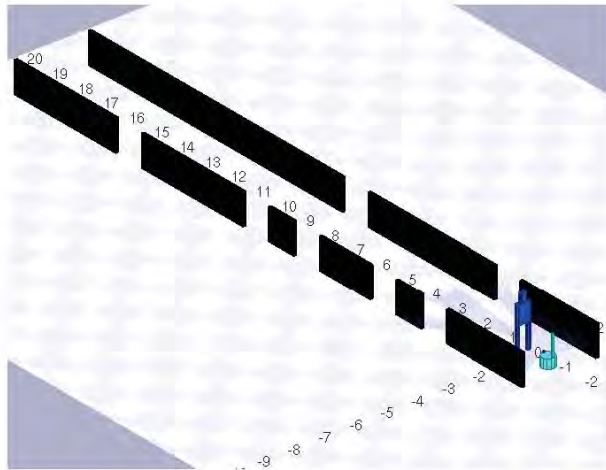


Figura 7.5: Vista isométrica del ambiente-02, un pasillo con puertas.

Ambiente 03: Habitación amueblada Se han añadido agentes al cuarto del Ambiente-01 para simular la presencia de muebles y personas (fig. 7.6).

Los muebles incluyen sillones, mesas, sillas, macetas y un bote de basura. Se han elegido estos dos últimos ya que su patrón de silueta puede pasar por una persona.

Además, se han añadido 10 personas en el ambiente, de manera que el robot pueda llegar a sentir más de una persona en algunos instantes.

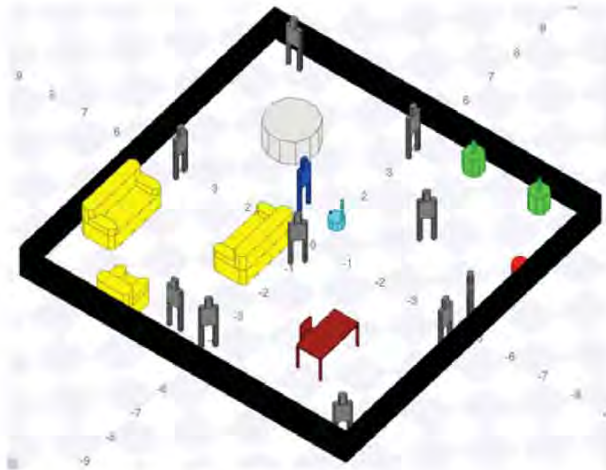


Figura 7.6: Vista isométrica del ambiente-03, un cuarto amueblado y con personas.

7.2.3. Metodología

Cada experimento consiste en la ejecución de una trayectoria por el operador y de este por el robot. Se ha utilizado el sistema de localización del simulador para muestrear los agentes y comparar las trayectorias de estos. Para cada experimento se reportan tres ejecuciones.

Además, se van a utilizar dos parámetros para medir el desempeño del sistema:

Distancia robot-operador Es la distancia entre el robot y el operador en un instante dado. El sistema se ha construido de manera que el robot no se acerque a menos de 70cm del operador. La distancia máxima puede variar, sin embargo, esta no debería exceder los 4m, ya que este es el rango máximo del escáner láser.

Error trayectoria Este parámetro mide la diferencia entre la trayectoria del robot con respecto del operador. Sólo se toma en cuenta las secciones comunes entre ambas trayectorias (donde el robot pasa donde antes el operador), no los extremos. Cabe señalar que este parámetro no ilustra por completo el desempeño del sistema, ya que el objetivo es seguir al operador, no a la trayectoria de este. El robot debe anticipar las circunstancias del entorno que le impidan navegar adecuadamente y corregir su trayectoria sin perder al operador.

Las constantes utilizadas en el sistema de seguimiento son las siguientes:

- Reconocedor
 - Tamaño de Filtro [2].- Se refiere a la cantidad de rayos vecinos a ser promediadas para filtrar un barrido con el escáner.
 - Umbral de Flanco [10cm].- Se refiere a la distancia mínima entre dos rayos aledaños para ser considerado un flanco.
 - Ancho de piernas [10 - 20cm]
 - Espacio entre piernas [0 - 40cm]
 - Dos piernas juntas [40cm]
- Rastreo
 - Tamaño de la historia de rastreo [30].- Se refiere al número de mediciones pasadas que serán utilizadas para calcular el estado presente.
 - Alpha-rastreo [0.05].- Constante de disipación de la historia temporal en el rastreo.
- Navegación
 - Distancia mínima al operador [70cm].- El robot se detiene si sobrepasa esta distancia.
 - Campos potenciales atracción [k=1, alpha=1.5].
 - Campos potenciales repulsión [k=4, alpha=0.0075].

7.2.4. Experimento 1 [Ambiente 01] - Línea recta

Este experimento ilustra el caso más básico, seguir a una persona que se desplaza en línea recta sobre un ambiente libre de obstáculos.

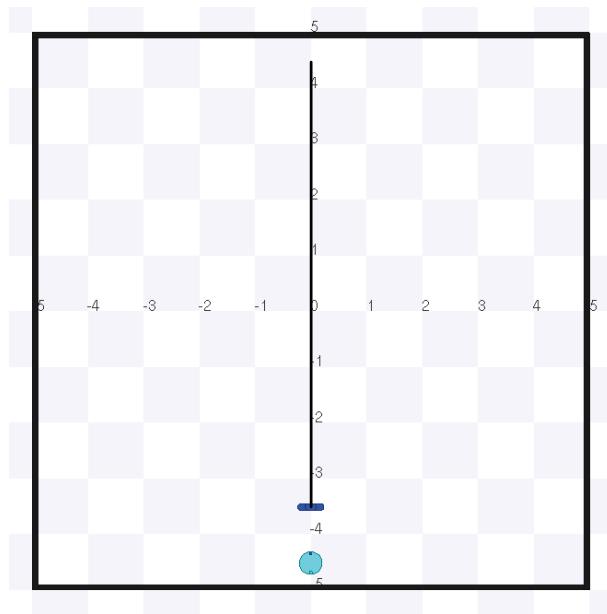


Figura 7.7: Experimento 01 - Trayectoria en línea recta

Las posiciones iniciales de los agentes en el entorno son las siguientes:

$$X_{operador} = -3,5m, Y_{operador} = 0m, \theta_{operador} = 0$$

$$X_{robot} = -4,5m, Y_{robot} = 0m, \theta_{robot} = 0$$

El operador se desplaza en línea recta como se muestra en la fig. 7.7. Este experimento sirve para ejemplificar algunos rasgos básicos del comportamiento de seguimiento ante un escenario simple.

Se puede observar, por ejemplo, un defecto debido a que este sistema no toma en cuenta el modelo de movimiento del operador. Esto lleva al robot, a tener un comportamiento oscilante de camino-paro al seguir a una persona; el robot siempre alcanza al operador, pero debe detenerse antes de llegar a él. Este resultado es poco eficiente, frenar y acelerar producen un gasto de energía superior que si el robot únicamente tratara de emular la velocidad de desplazamiento del humano.

Otro elemento positivo que se evidencia en el experimento es la capacidad de mantener un error de trayectoria pequeño ante esta trayectoria, no más de 20cm.

7.2.4.1. Prueba 1

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.8.

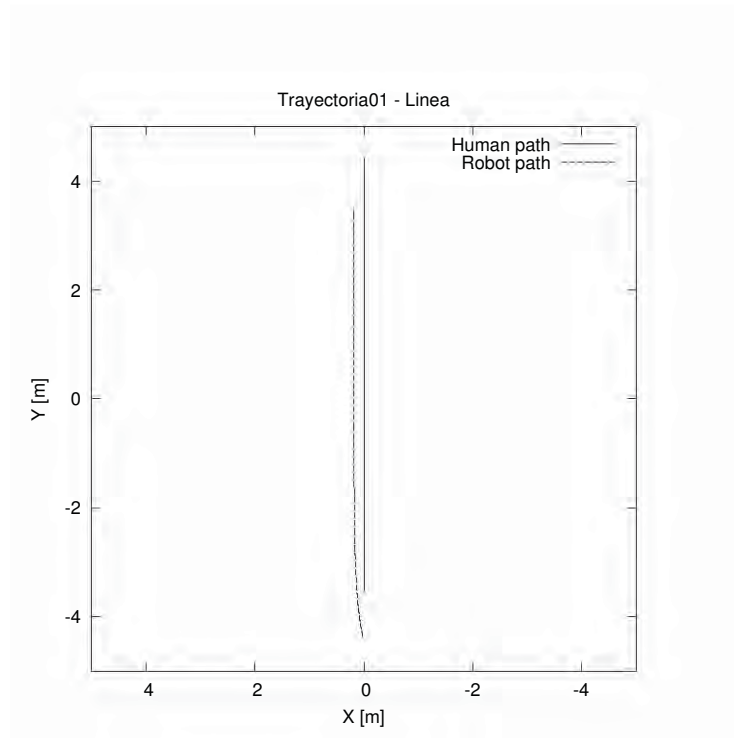


Figura 7.8: Experimento 01:1 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

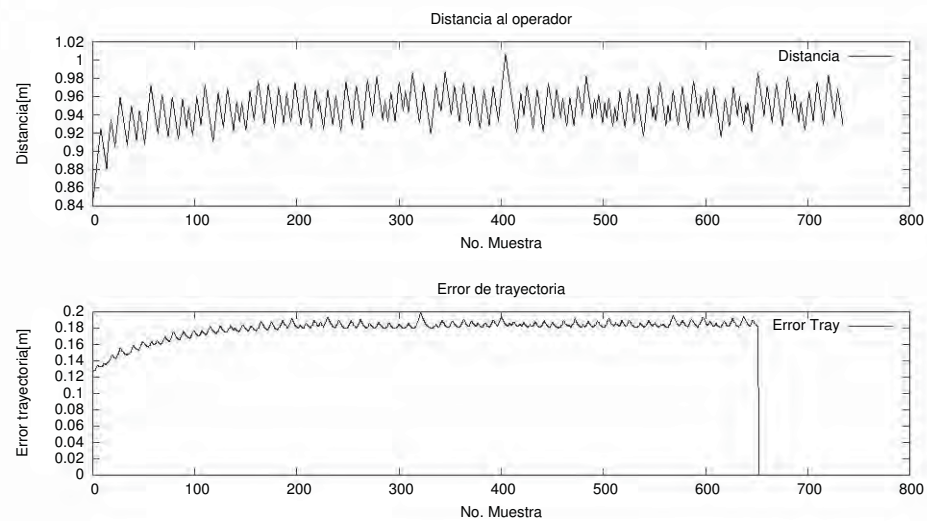


Figura 7.9: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 01:1.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 1.00684m.
- Error máximo de trayectoria: 0.198112m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.947031m.
- Error promedio de trayectoria: 0.178995m.

7.2.4.2. Prueba 2

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.10.

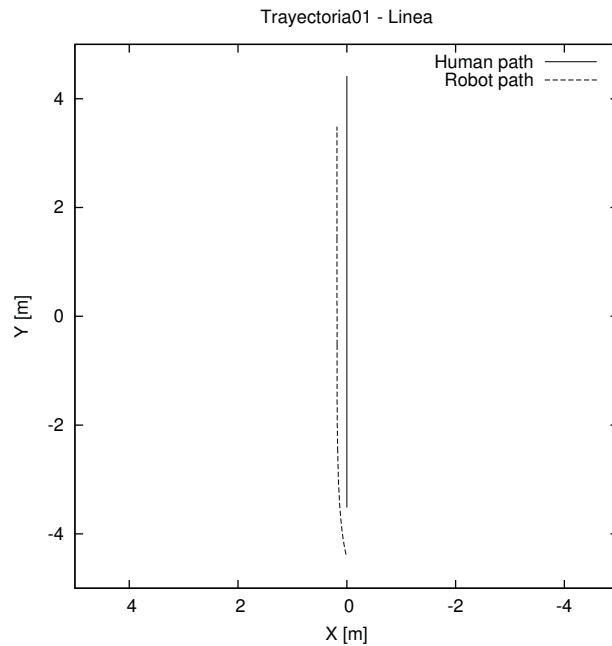


Figura 7.10: Experimento 01:2 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

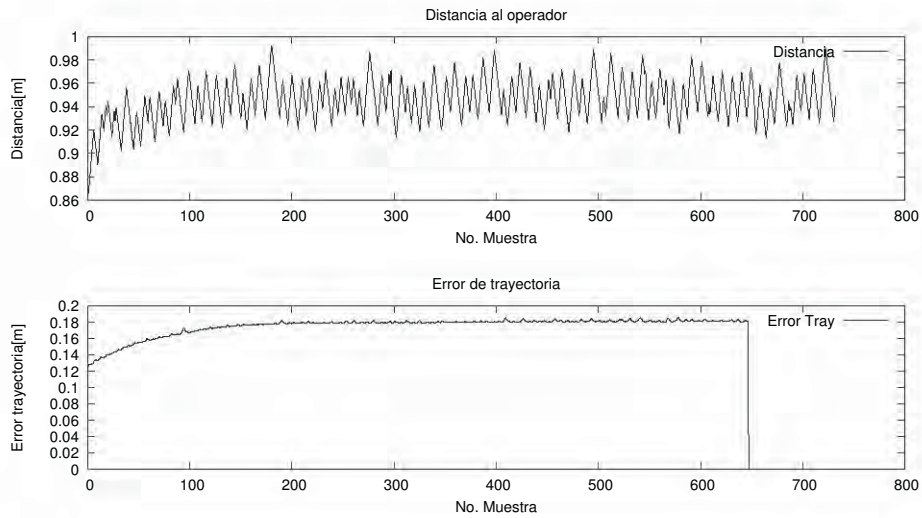


Figura 7.11: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 01:2.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 0.992794m.
- Error máximo de trayectoria: 0.186211m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.945936m.
- Error promedio de trayectoria: 0.175759m.

7.2.4.3. Prueba 3

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.12.

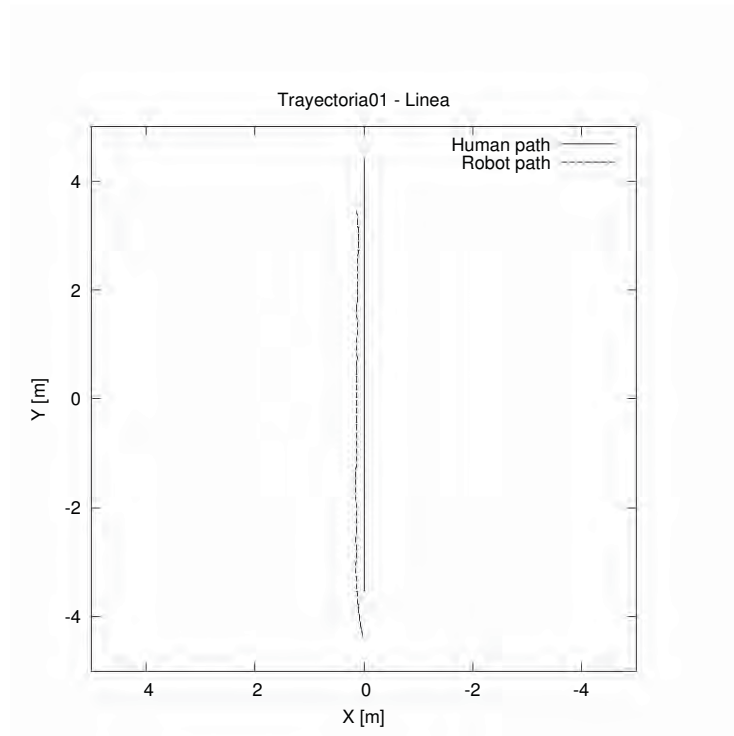


Figura 7.12: Experimento 01:3 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

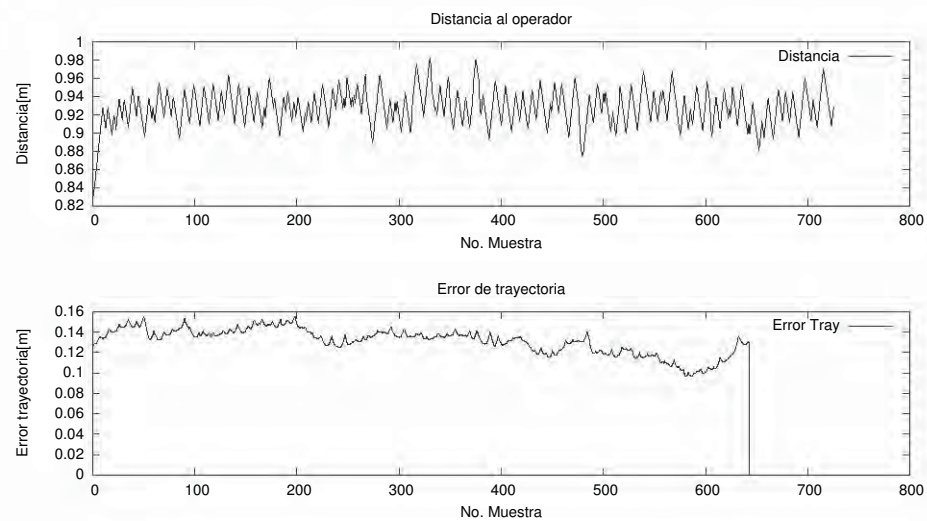


Figura 7.13: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 01:3.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 0.982506m.
- Error máximo de trayectoria: 0.155387m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.92757m.
- Error promedio de trayectoria: 0.13116m.

7.2.5. Experimento 2 [Ambiente 01] - Ocho

Este experimento plantea una trayectoria más complicada, el operador describe un ocho sobre el suelo. Aún es una trayectoria sencilla, sin embargo, exhibe el comportamiento del sistema ante un cambio de curvatura.

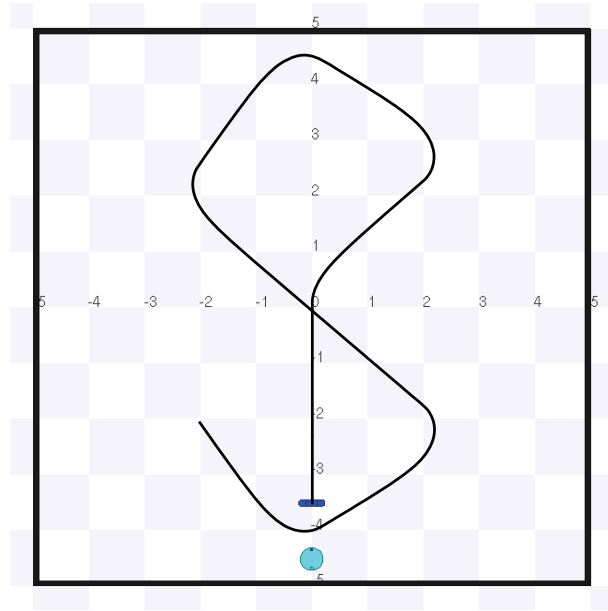


Figura 7.14: Experimento 02 - Trayectoria en ocho

Las posiciones iniciales de los agentes en el entorno son las siguientes:

$$X_{operador} = -3,5m, Y_{operador} = 0m, \theta_{operador} = 0$$

$$X_{robot} = -4,5m, Y_{robot} = 0m, \theta_{robot} = 0$$

Se puede apreciar el comportamiento del sistema al dar giros. Por ejemplo, el robot toma giros menos pronunciados que el operador. Esto sucede debido a que no hay obstáculos significativos durante la trayectoria, así se permite corregir la trayectoria del robot de forma reactiva.

7.2.5.1. Prueba 1

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.15.

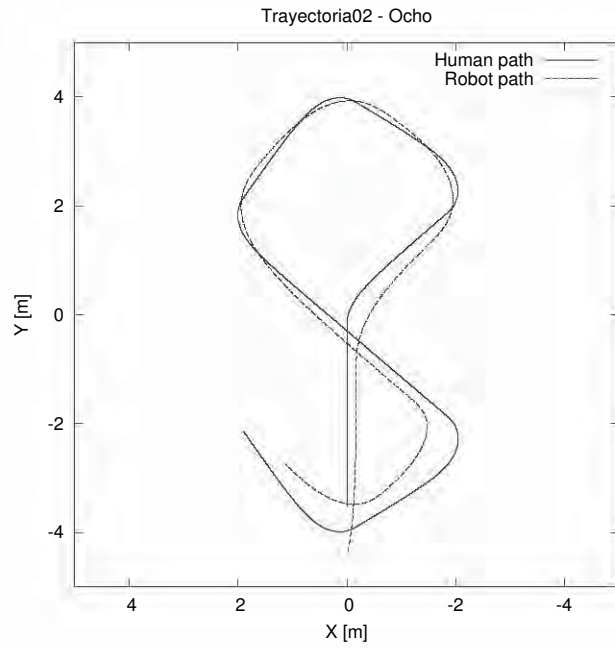


Figura 7.15: Experimento 02:1 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

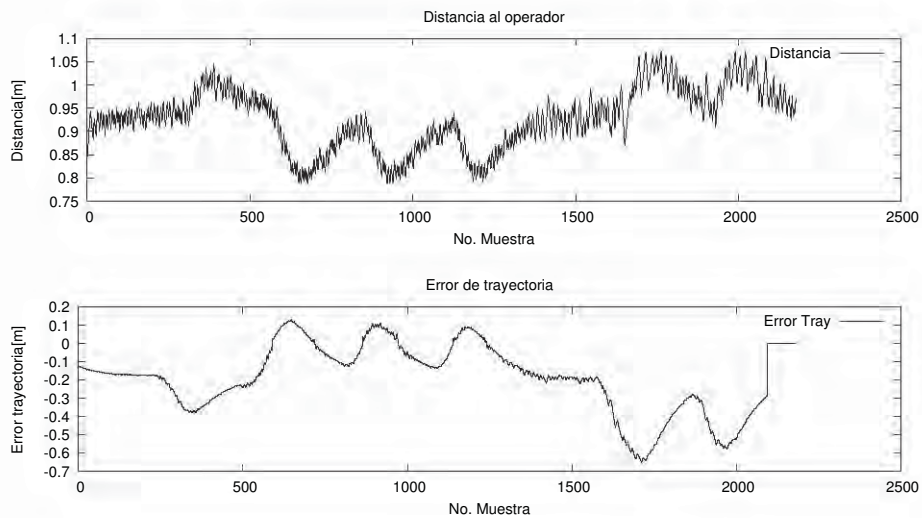


Figura 7.16: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 02:1.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 1.07228m.
- Error máximo de trayectoria: 0.650825m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.927097m.
- Error promedio de trayectoria: 0.217205m.

7.2.5.2. Prueba 2

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.17.

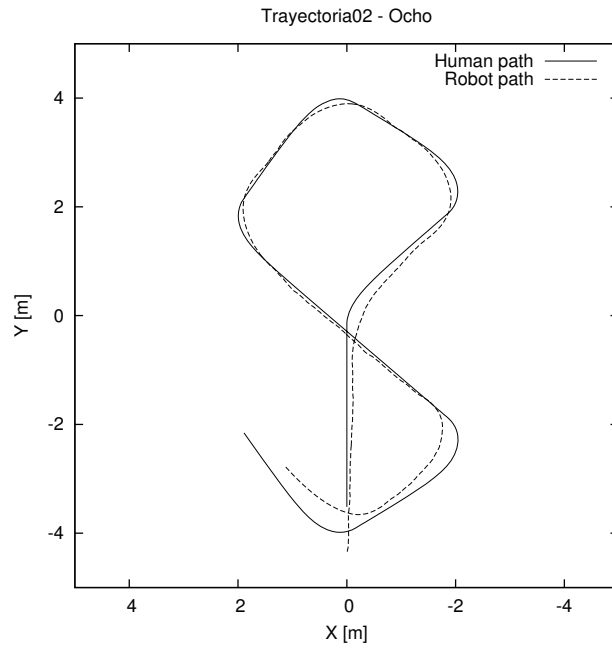


Figura 7.17: Experimento 02:2 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

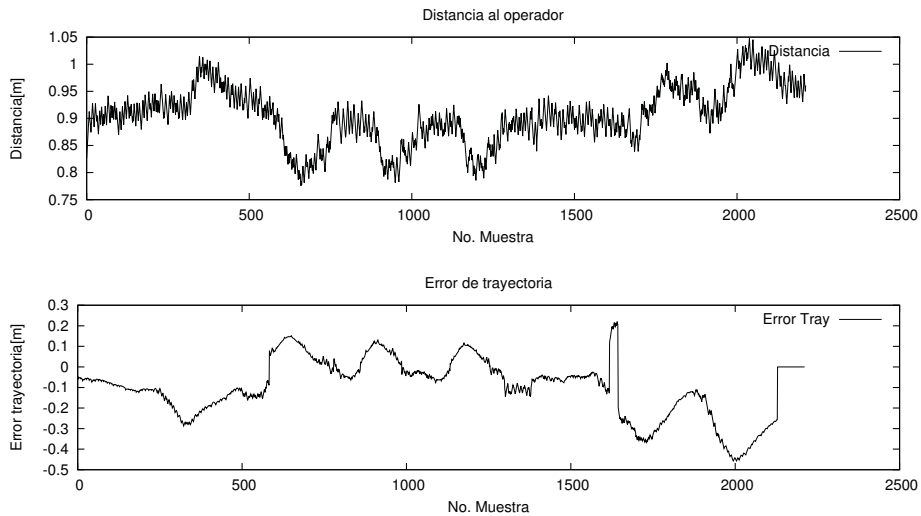


Figura 7.18: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 02:2.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 1.04756m.
- Error máximo de trayectoria: 0.457564m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.905655m.
- Error promedio de trayectoria: 0.136289m.

7.2.5.3. Prueba 3

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.19.

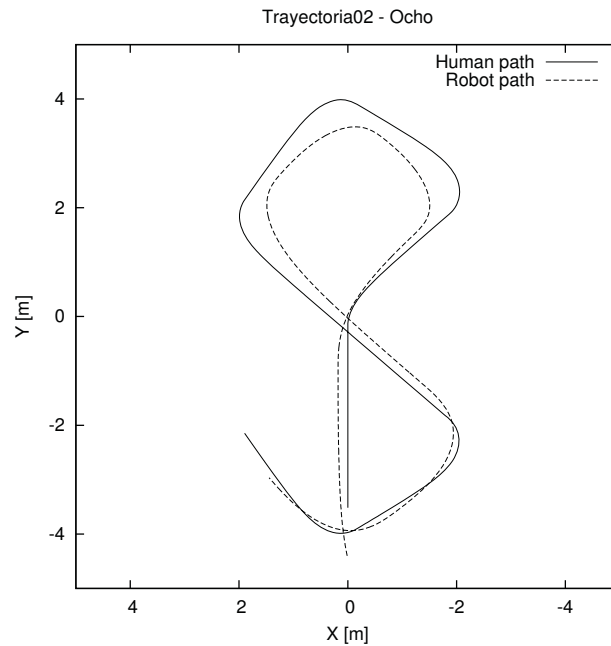


Figura 7.19: Experimento 02:3 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

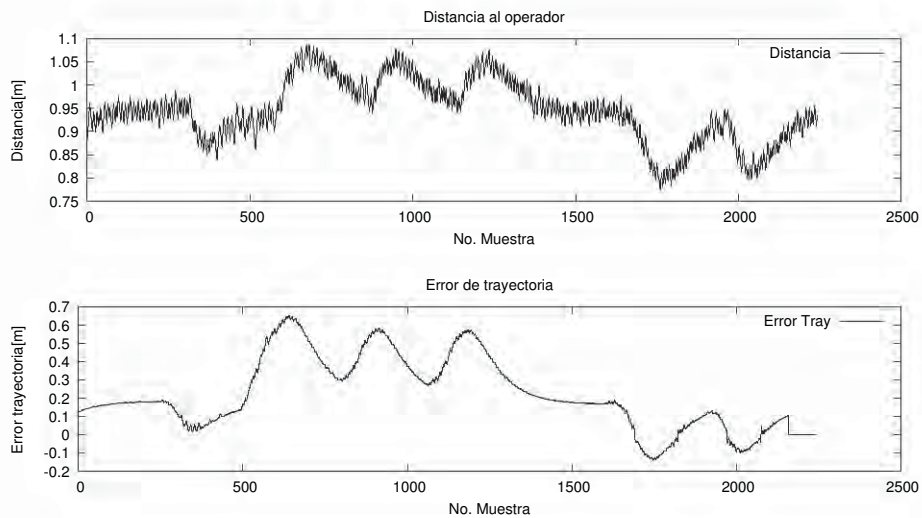


Figura 7.20: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 02:3.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 1.08742m.
- Error máximo de trayectoria: 0.65421m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.944514m.
- Error promedio de trayectoria: 0.244759m.

7.2.6. Experimento 3 [Ambiente 01] - Seguimiento de pared

Este experimento plantea el desplazamiento del operador siguiendo la pared del cuarto (fig. 7.21). El operador se desplaza a 20cm de la pared.

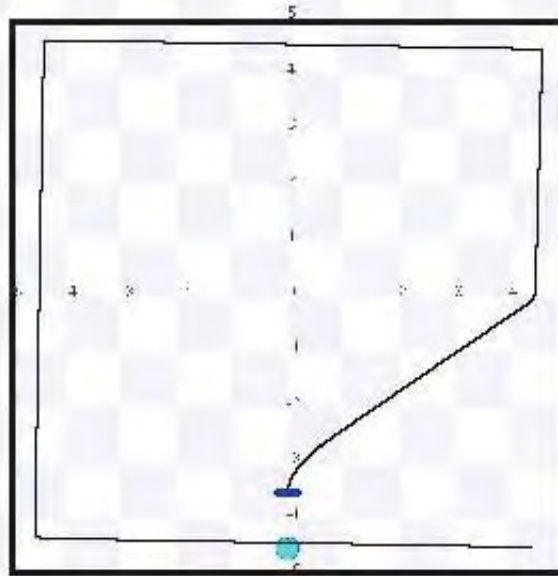


Figura 7.21: Experimento 03 - Seguimiento de pared

Las posiciones iniciales de los agentes en el entorno son las siguientes:

$$X_{operador} = -3,5m, Y_{operador} = 0m, \theta_{operador} = 0$$

$$X_{robot} = -4,5m, Y_{robot} = 0m, \theta_{robot} = 0$$

Este experimento permite demostrar cómo el seguimiento de personas no necesariamente implica la réplica de la trayectoria del operador, sino el acomodo de la atracción y la repulsión dentro de un mismo comportamiento.

7.2.6.1. Prueba 1

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.22.

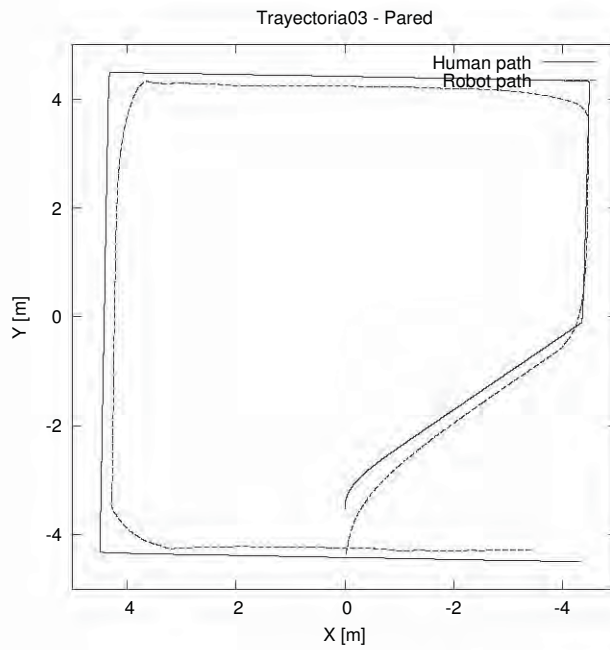


Figura 7.22: Experimento 03:1 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

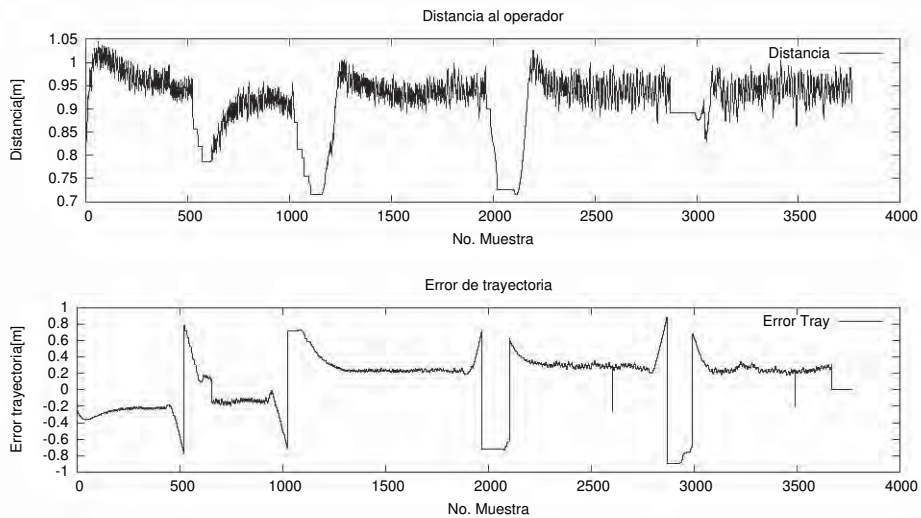


Figura 7.23: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 03:1.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 1.04519m.
- Error máximo de trayectoria: 0.891896m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.9176m.
- Error promedio de trayectoria: 0.323221m.

7.2.6.2. Prueba 2

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.24.

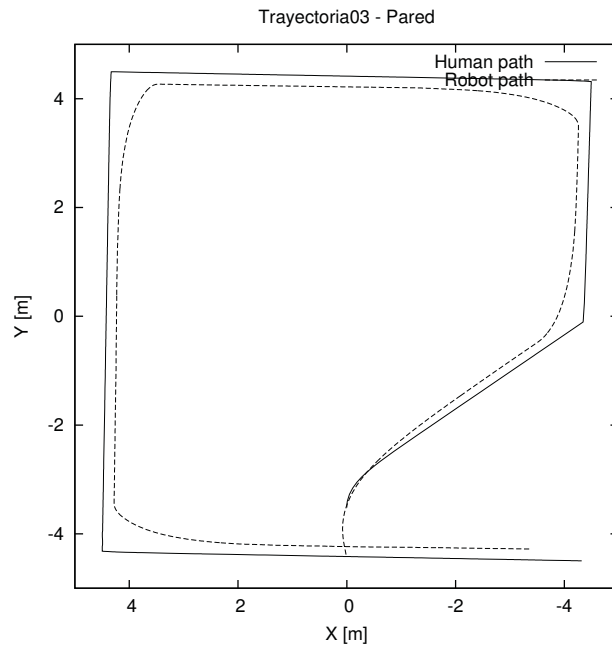


Figura 7.24: Experimento 03:2 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

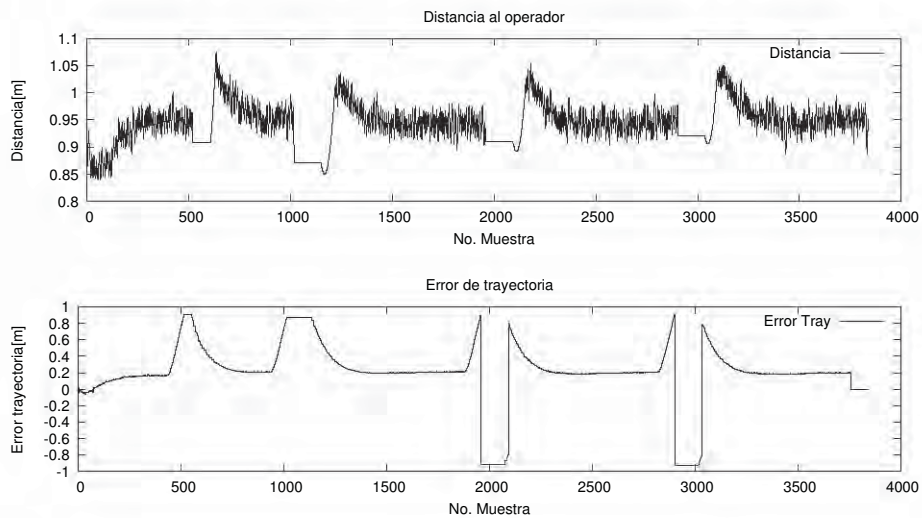


Figura 7.25: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 03:2.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 1.07398m.
- Error máximo de trayectoria: 0.921249m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.944028m.
- Error promedio de trayectoria: 0.340245m.

7.2.6.3. Prueba 3

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.26.

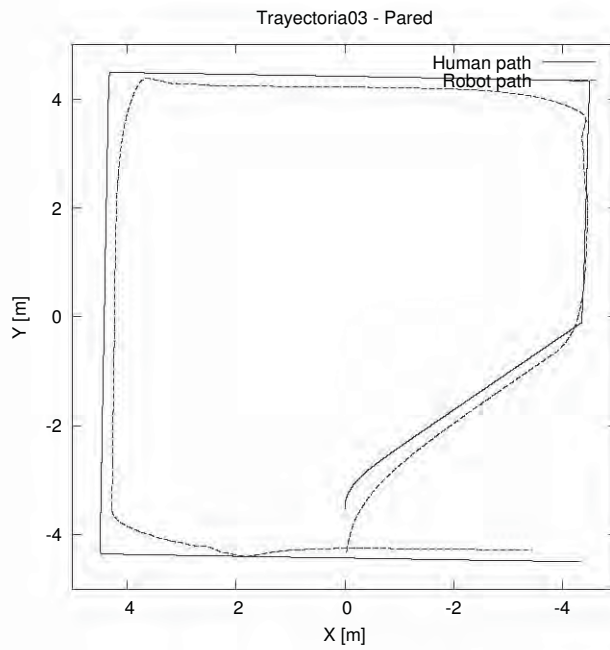


Figura 7.26: Experimento 03:3 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

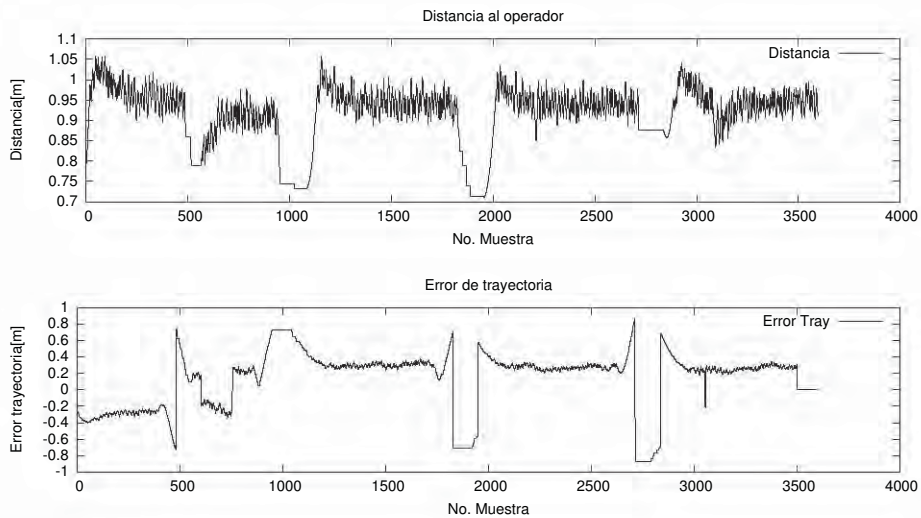


Figura 7.27: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 03:3.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 1.05925m.
- Error máximo de trayectoria: 0.875095m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.919064m.
- Error promedio de trayectoria: 0.347696m.

7.2.7. Experimento 4 [Ambiente 02] - Recorrido pasillo

Este experimento propone el desplazamiento del operador en un escenario que emula un corredor con puertas abiertas (fig. 7.28). Este escenario plantea varias dificultades, las paredes no son continuas y poseen huecos a manera de puertas. El operador se desplaza cerca de las paredes y cruzando las puertas; de igual forma se dan algunas vueltas bruscas en U, con el fin de enfrenar el sistema de seguimiento a un ambiente más difícil.

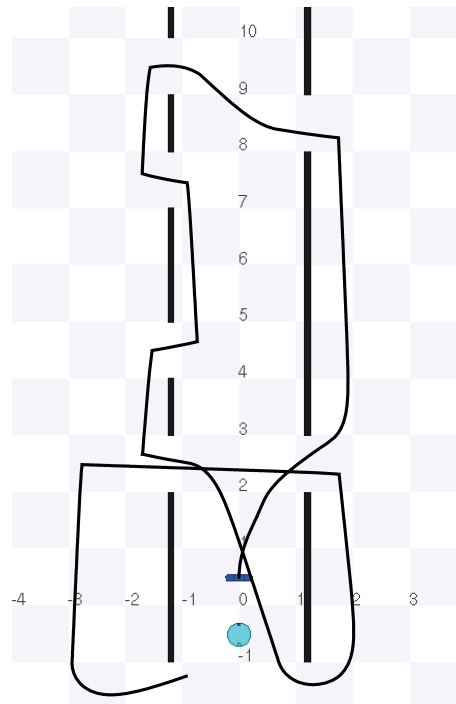


Figura 7.28: Experimento 04 - Recorrido por pasillo

Las posiciones iniciales de los agentes en el entorno son las siguientes:

$$X_{operador} = 0,5m, Y_{operador} = 0m, \theta_{operador} = 0$$

$$X_{robot} = -0,5m, Y_{robot} = 0m, \theta_{robot} = 0$$

El sólo hecho de caminar junto a una puerta abierta es un reto en sí, ya que el perfil de la pared puede asemejar el patrón de una pierna. De igual forma se pone a prueba los sistemas de rastreo y navegación, debido a que en las vueltas o cruces de puertas el robot puede dejar de ver al operador, o acercarse demasiado a una pared.

7.2.7.1. Prueba 1

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.29.

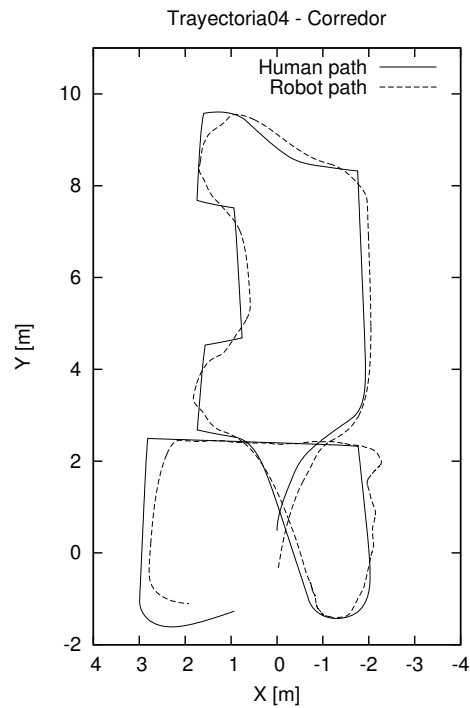


Figura 7.29: Experimento 04:1 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

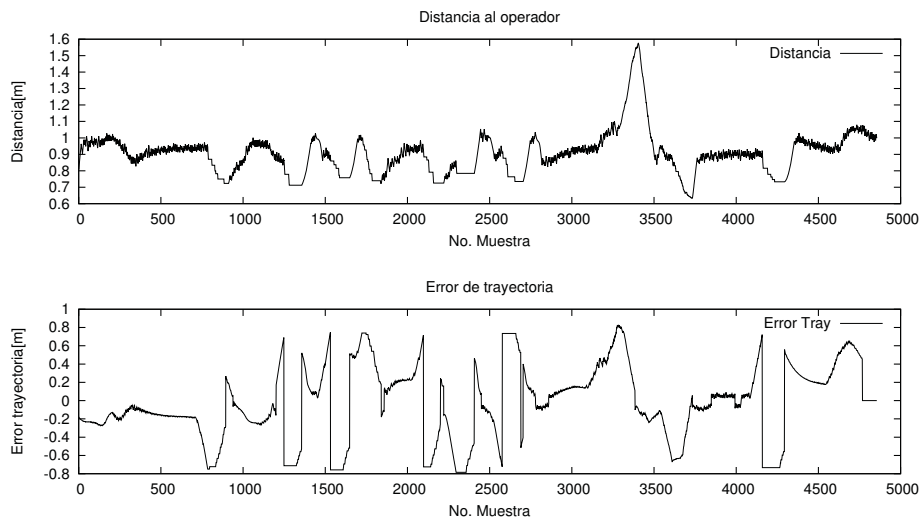


Figura 7.30: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 04:1.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 1.57384m.
- Error máximo de trayectoria: 0.826956m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.904065m.
- Error promedio de trayectoria: 0.331106m.

7.2.7.2. Prueba 2

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.31.

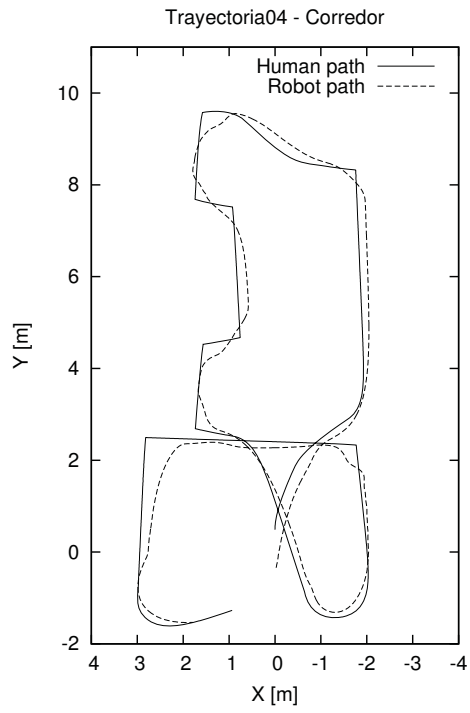


Figura 7.31: Experimento 04:2 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

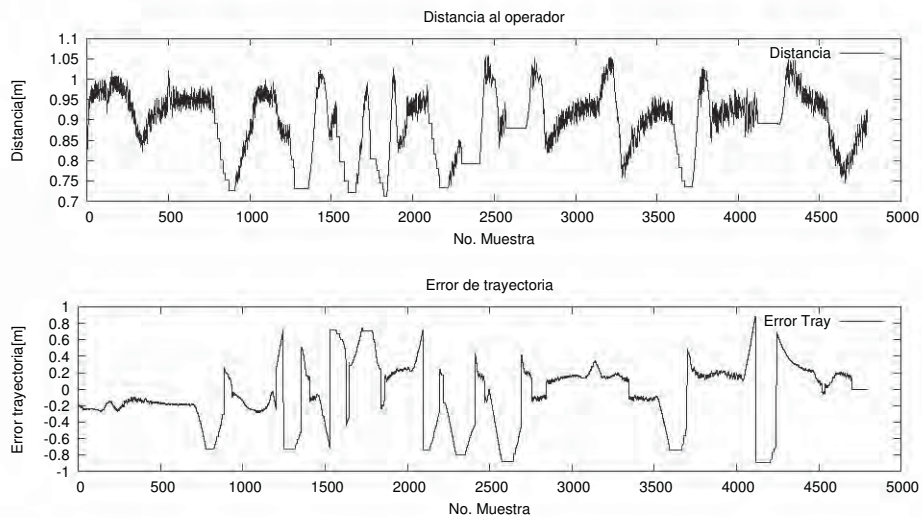


Figura 7.32: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 04:2.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 1.05701m.
- Error máximo de trayectoria: 0.890715m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.88979m.
- Error promedio de trayectoria: 0.325509m.

7.2.7.3. Prueba 3

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.33.

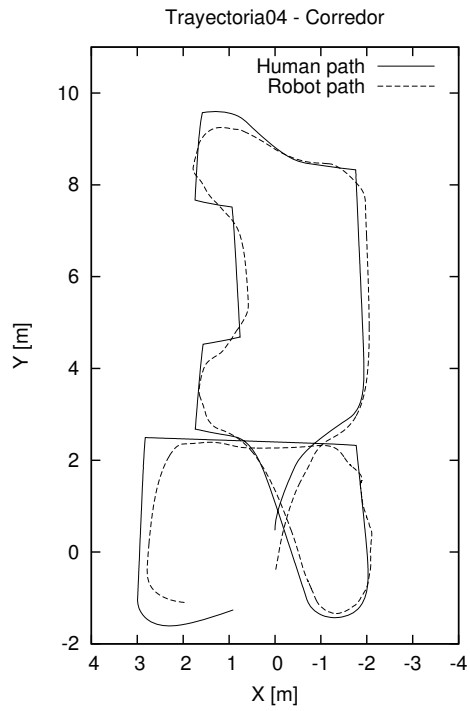


Figura 7.33: Experimento 04:3 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

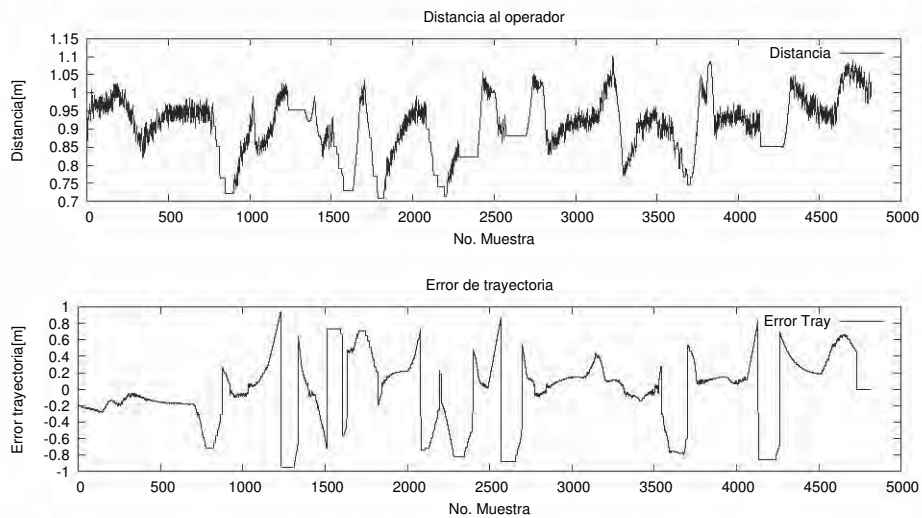


Figura 7.34: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 04:3.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 1.10142m.
- Error máximo de trayectoria: 0.953263m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.907456m.
- Error promedio de trayectoria: 0.341699m.

7.2.8. Experimento 5 [Ambiente 03] - Recorrido habitación

Este experimento plantea recrear una escena doméstica tradicional (fig. 7.35). El escenario posee muebles y otras personas, además del operador. Este ambiente trata de emular una escena doméstica cotidiana con objetos comunes y siluetas de diferentes tipos y engañosas.

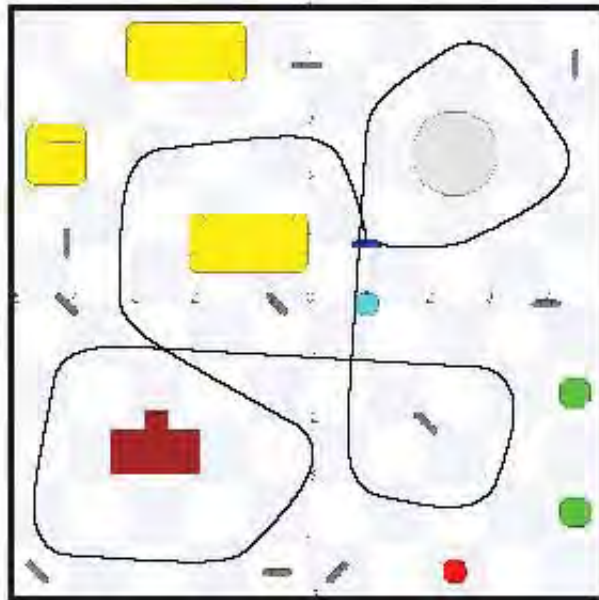


Figura 7.35: Experimento 05 - Recorrido habitación

Las posiciones iniciales de los agentes en el entorno son las siguientes:

$$X_{operador} = 1,0m, Y_{operador} = 1,0m, \theta_{operador} = 0$$

$$X_{robot} = 0m, Y_{robot} = 1,0m, \theta_{robot} = 0$$

La dificultad del escenario estriba en poner al robot y al operador a interactuar en un ambiente con otros patrones que puedan confundir o dificultar la etapa de reconocimiento. Nuevamente se pone a prueba el sistema de rastreo para poder discriminar entre todos los patrones que el robot tenga a la mano y continuar el seguimiento de forma correcta.

7.2.8.1. Prueba 1

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.36.

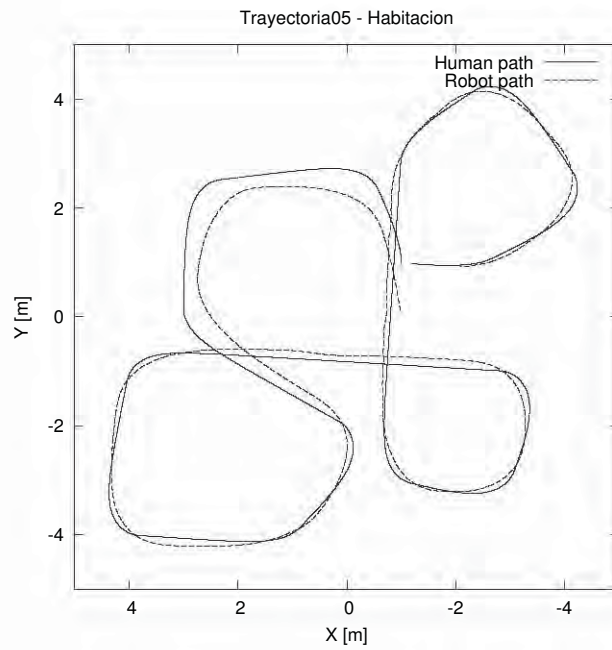


Figura 7.36: Experimento 05:1 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

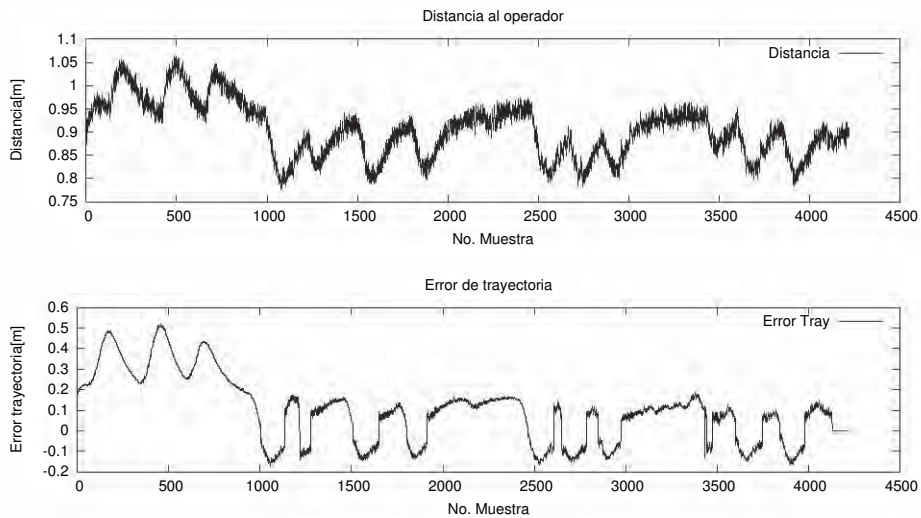


Figura 7.37: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 05:1.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 1.06406m.
- Error máximo de trayectoria: 0.516877m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.903929m.
- Error promedio de trayectoria: 0.157567m.

7.2.8.2. Prueba 2

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.38.

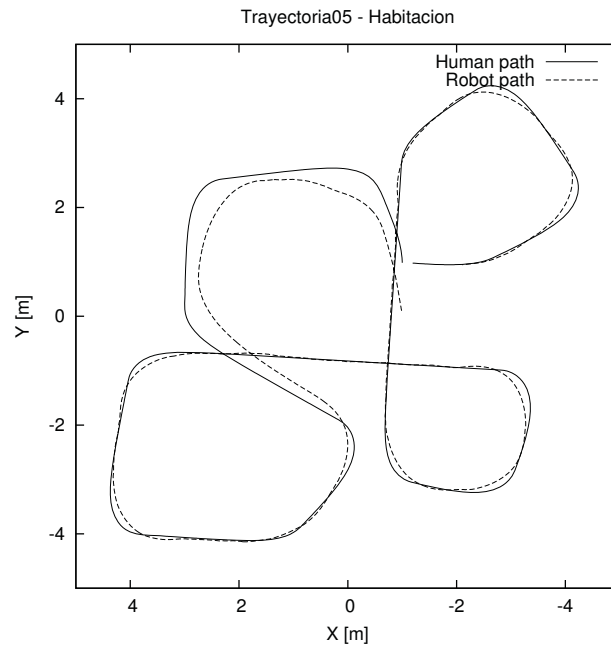


Figura 7.38: Experimento 05:2 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

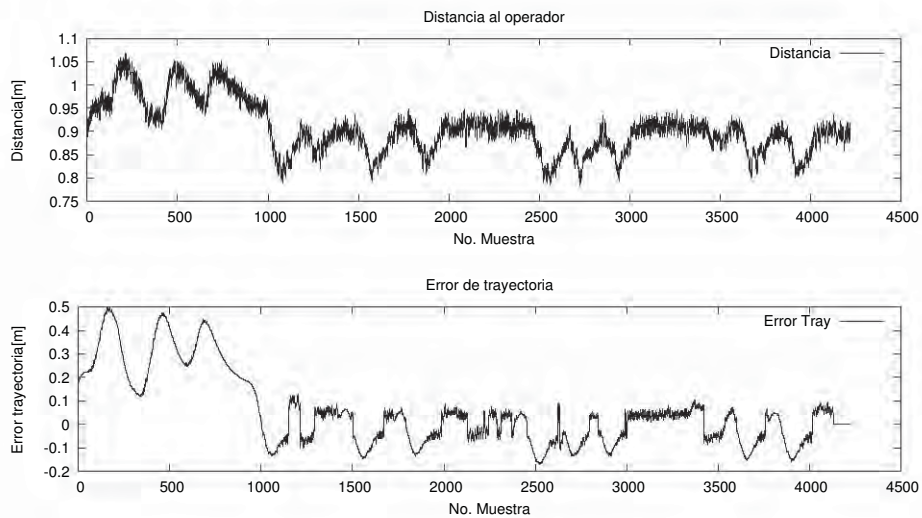


Figura 7.39: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 05:2.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 1.06902m.
- Error máximo de trayectoria: 0.497515m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.905578m.
- Error promedio de trayectoria: 0.119596m.

7.2.8.3. Prueba 3

Las trayectorias seguidas por los agentes se pueden apreciar en la fig. 7.40.

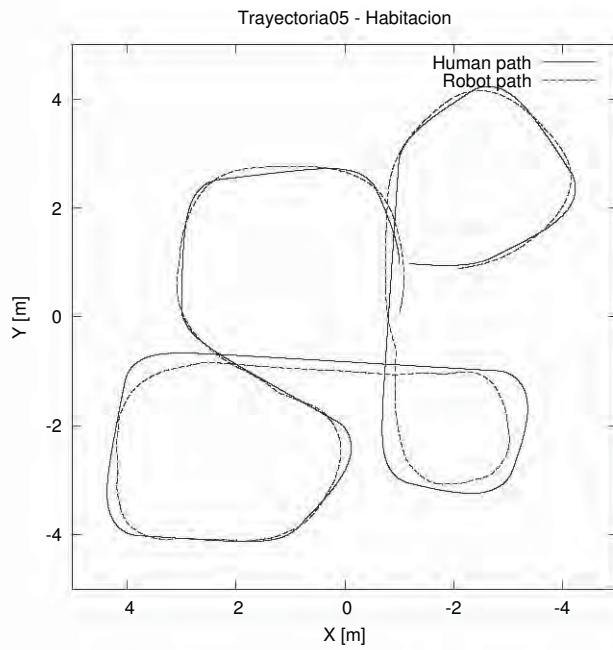


Figura 7.40: Experimento 05:3 - Resultados de las trayectorias del robot y del operador

La evolución de la prueba se muestra a través de la distancia robot-operador y del error de trayectoria:

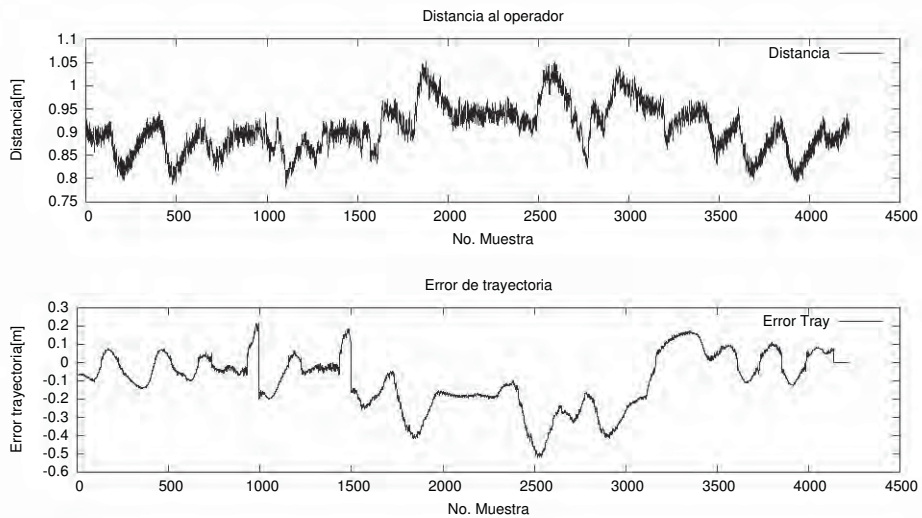


Figura 7.41: Estado de la distancia robot-operador y el error de trayectoria a lo largo de la prueba 05:3.

Los parámetros indicadores registrados en esta prueba son los siguientes:

- Distancia máxima robot-operador: 1.05008m.
- Error máximo de trayectoria: 0.519835m.
- Distancia promedio robot-operador: 0.906463m.
- Error promedio de trayectoria: 0.142526m.

7.3. Robot Justina

El sistema de seguimiento de personas también ha sido implementado en el robot de servicio Justina³ (fig. 7.42) del Laboratorio de Biorrobótica de la UNAM. Justina es un robot móvil que también posee capacidades de manipulación, visión computacional, procesamiento de lenguaje natural y expresión de emociones. Posee módulos que modelan su entorno y le ayudan a la toma de decisiones para interactuar en él.

El robot Justina cuenta con una base móvil de configuración diferencial y un escáner láser Hokuyo URG04LX; además también cuenta con una cámara estéreo, un sensor Kinect, un brazo manipulador, un manipulador inferior, una cabeza mecatrónica, un micrófono direccional y un par de bocinas. Funciona utilizando tres computadoras internas que corren todos los módulos de procesamiento y se comunican por red ethernet. Cuenta con elementos de hardware suficientes para realizar seguimiento de personas.

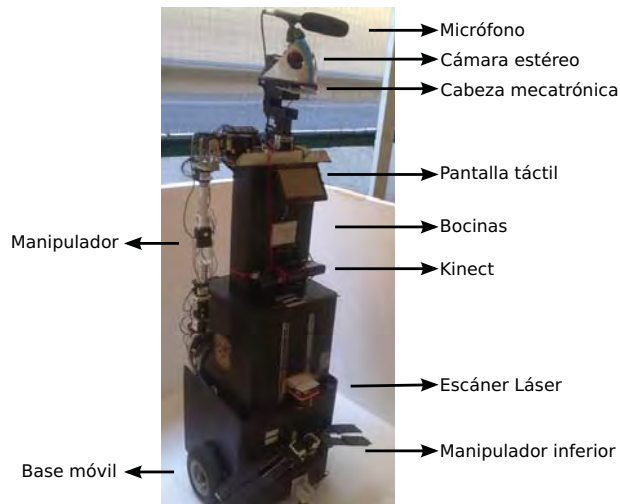


Figura 7.42: Robot de servicio Justina

³Pronunciado fonéticamente *paquito*.

Como métrica principal para realizar seguimiento de personas con Justina se ha utilizado el reglamento de la prueba *Follow Me!* de la competencia RoboCup @Home 2011 (ver apéndice ??). A grandes rasgos, la prueba consiste en el seguimiento de una persona a través de un recorrido bien definido, al llegar a la meta se da por satisfactoria la prueba. A lo largo del recorrido se realizan tres subpruebas:

1. Oclusión temporal .- Una persona pasa entre el operador y el robot.
2. Seguimiento a distancia .- Se pide al robot que espere y el robot debe detenerse, mientras tanto el operador se aleja a otra posición a $3m$ del robot, pasados $10secs$ el robot debe aproximarse al operador y continuar siguiéndolo.
3. Reconocer al operador.- Se pide al robot que se detenga y el operador se pone frente a él junto con otra persona, después se le pide que continúe el seguimiento.

La prueba completa ocupa capacidades de comunicación con lenguaje natural, visión computacional, navegación y reconocimiento de personas.

7.3.1. Descripción

Los sistemas que integran a Justina se encuentran organizados utilizando la arquitectura VIRbot. Esta arquitectura tiene como meta operar robots autónomos en tareas cotidianas de servicio dentro de casas, oficinas y plantas industriales.

El sistema VIRbot (fig. 7.43) divide la operación de un robot móvil en varios subsistemas. Cada uno tiene una función específica que contribuye a la operación integral del robot (e.g. reconocimiento de voz, visión artificial, manipulación, etc.).

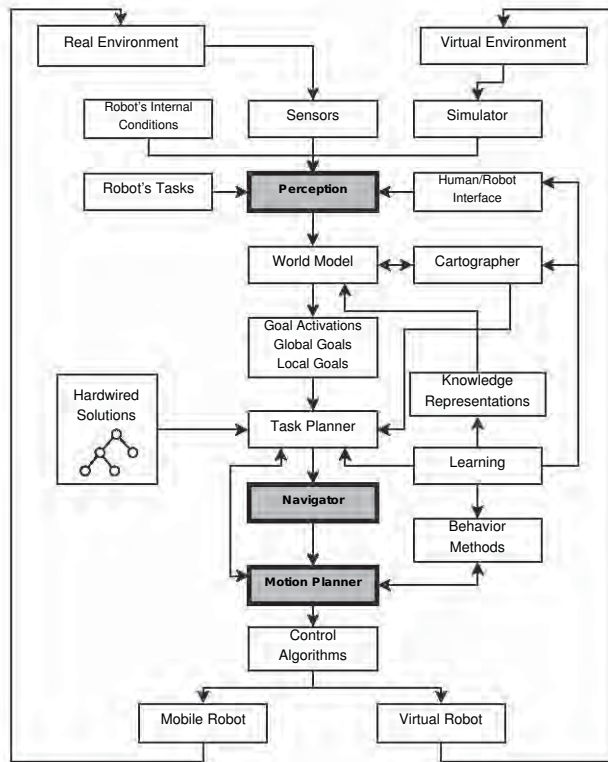


Figura 7.43: Sistema Virbot, se han resaltado los módulos en los que interviene el sistema de seguimiento de personas (*Percepción, Navegación y Planeación de Movimientos*).

Cada subsistema se encuentra representado por un módulo de software que recibe instrucciones y reporta respuestas. Existe además un programa (*black-board*) encargado de la interacción y comunicación entre los sistemas, para ello utiliza mensajes de texto para comunicar instrucciones y datos entre dos módulos diferentes (fig. 7.44); esto permite la administración de recursos de hardware (sensores y actuadores) y de procesamiento, por ejemplo, no se debe enviar una nueva instrucción a un módulo si este no ha enviado una respuesta coherente a la petición anterior, sólo puede ser interrumpido por una instrucción de mayor prioridad o si se ha rebasado la cota de tiempo asignada para realizar su tarea.

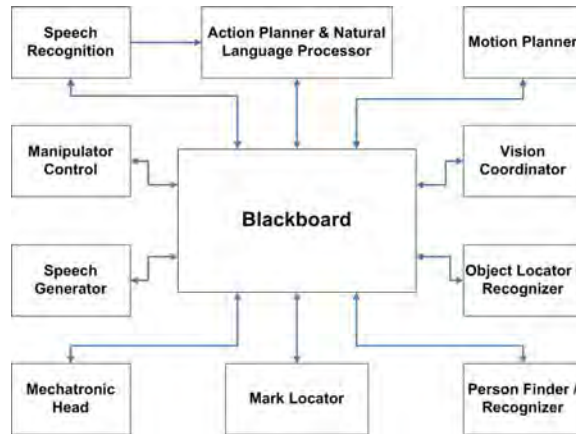


Figura 7.44: Arquitectura de software del robot Justina

El sistema completo corre usualmente en tres computadoras y utiliza dos sistemas operativos (Linux y Windows). Como la comunicación es vía red, se permite que la implementación de cada módulo sea transparente al sistema, así los programas pueden estar escritos en lenguajes diferentes; se utilizan principalmente C/C++, C# y CLIPS.

7.3.1.1. Sistema de seguimiento de personas para Justina

El subsistema de seguimiento de personas implementado en Justina lo constituyen tres programas: 1) reconocimiento de personas con escáner láser, b) rastreo de operador y c) navegación.

El programa de reconocimiento de personas con escáner láser recibe las lecturas de barrido del escáner e implementa el sistema de reconocimiento de personas descrito en este trabajo para aproximar la pose del operador.

El programa de rastreo recibe la pose del operador de los diferentes módulos de reconocimiento (e.g. escáner láser, kinect, etc.). Cada módulo reporta una pose para el operador, y la etapa de filtrado implementada se encarga de obtener una conclusión sobre la pose del operador tomando en cuenta la información disponible en un instante dado.

Finalmente, el módulo de navegación utiliza las lecturas del escáner láser para localizar obstáculos y evadirlos mientras se aproxima al operador.

El subsistema de seguimiento de personas recibe órdenes para realizar la tarea: "FOLLOW" que indica que el robot debe moverse hacia el operador, y "STOP FOLLOW" que indica el paro del robot. Cabe mencionar que el módulo de reconocimiento de personas con el escáner láser puede quedar encendido al igual que el módulo de rastreo, de esta forma, se puede seguir al operador con los sensores, dentro de su campo visual, hasta que se reciba nuevamente la orden de seguimiento para mover al robot.

7.3.2. Pruebas

A lo largo de este trabajo se realizaron varias pruebas de seguimiento de personas con el robot Justina. El enfoque que se siguió fue progresivo, partiendo desde el caso más simple y la solución más trivial (seguimiento reactivo del objeto sensado más cercano) hasta llegar a proponer una solución más robusta que ya ha sido descrita anteriormente.

La mayor parte de los experimentos se realizaron en el laboratorio de Biorobótica ubicado en edificio “Bernardo Quintana” de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Posteriormente se tuvo la oportunidad de participar con Justina en dos competencias de robótica de servicio, el Torneo Mexicano de Robótica y el RoboCup @Home 2011, en ellas se pudo poner a prueba el seguimiento de personas fuera del laboratorio. A continuación se describen las experiencias con Justina.

7.3.2.1. Experimento 1 - Seguimiento Reactivo

Este enfoque es una solución trivial para el problema de seguimiento, se utilizó como primera propuesta de solución y como programa de prueba para evaluar el control cinemático y aprender a usar el hardware y el software de Justina.

El seguimiento reactivo consiste en detectar el obstáculo más cercano y navegar hacia él. No se hace ningún reconocimiento de personas ni detección de obstáculos.

Esta estrategia funciona muy bien en complicidad con el operador, ya que este debe esperar al robot para seguir siendo el *obstáculo más cercano*; de hecho, es posible realizar el seguimiento de personas en entornos bastante complicados (fig. 7.45).

La desventaja principal es que no hay reconocimiento de personas ni revisión de colisiones. Si en algún momento una pared o un objeto está mas cerca del robot, este dejará al operador e irá directamente hacia el nuevo objetivo.



Figura 7.45: Seguimiento de personas reactivo

7.3.2.2. Experimento 2 - Seguimiento (base móvil + escáner láser)

Debido a la alta complejidad y al poco espacio del laboratorio fue muy difícil hacer pruebas satisfactorias de seguimiento dentro de él; especialmente complicado para el módulo de reconocimiento, ya que existían muchos muebles que eran reconocidos como personas o que alteraban el patrón de piernas del operador. Por estos motivos, la mayor parte de los experimentos se realizaron en el corredor de cubículos a la entrada del laboratorio. En este corredor transitaban personas ocasionalmente, había puertas abiertas y tres obstáculos de forma similar a una persona (un bote de basura, una aspiradora y macetas).

El enfoque adoptado reportó resultados satisfactorios. El seguimiento se realizaba sobre el corredor, dando vueltas en U o en forma de ocho; se transitaba el espacio pasando frente a los obstáculos y con las personas pasando junto al robot. Ocasionalmente ocurrió la pérdida del operador, pero con la sintonización correcta de parámetros el sistema fue robusto a los obstáculos y a alguna otra persona transitando sobre el pasillo.

Un punto a favor del sistema fue su robustez a la oclusión, siempre y cuando esta sea breve. La oclusión consiste en que una persona pase entre el operador y el robot. El sistema puede manejar la oclusión y continuar siguiendo a la persona correcta. El reconocedor elige el patrón de piernas más cercano a la pose anterior del operador, así, si alguien llega por los lados, este patrón se ignora hasta que interfiere con el del operador, cuando esto ocurre, el rastreo se encarga de resistirse al cambio de dirección al tomar en cuenta la historia temporal. No obstante, se debe hacer incapié en que la oclusión debe ser breve (10 segundos o menos) para que la historia temporal sobreviva después de ocurrida la oclusión.



(a)



(b)

Figura 7.46: Seguimiento de personas puesto a prueba durante el Torneo Mexicano de Robótica 2011

Cabe señalar que esta implementación se probó en el Torneo Mexicano de Robótica 2011 (fig. 7.46). En la prueba de seguimiento Justina pudo seguir a un operador ajeno a través de la arena de competencia (entre paneles de separación, sofás, sillas, burós y una mesa con mantel). Justina pudo sobrevivir a la prueba de oclusión temporal y llegó a la meta sin chocar con nada.

7.3.2.3. Experimento 3 - Seguimiento (base móvil + escáner láser + Kinect)

Con esta nueva implementación se ocuparon dos módulos de reconocimiento: búsqueda de patrones de piernas con el escáner láser y un módulo de rastreo de esqueleto para el sensor Kinect.

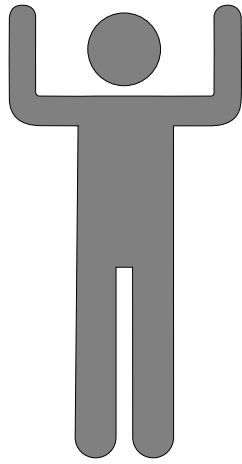
Con el sensor Kinect se realiza el rastreo del esqueleto del operador, este enfoque es bastante robusto ya que es difícil confundir el esqueleto en otros elementos en escena (aún personas). Para detectar el esqueleto de una persona se le pide a esta que se calibre, para ello debe realizar una pose (fig. 7.47).

Con esta nueva implementación se pudo robustecer la implementación anterior para reconocer al operador con más de un sensor, de esta forma si alguno de los módulos perdía al operador, el seguimiento podría continuar con la información del otro reconocedor, además se podría validar que la información fuera correcta.

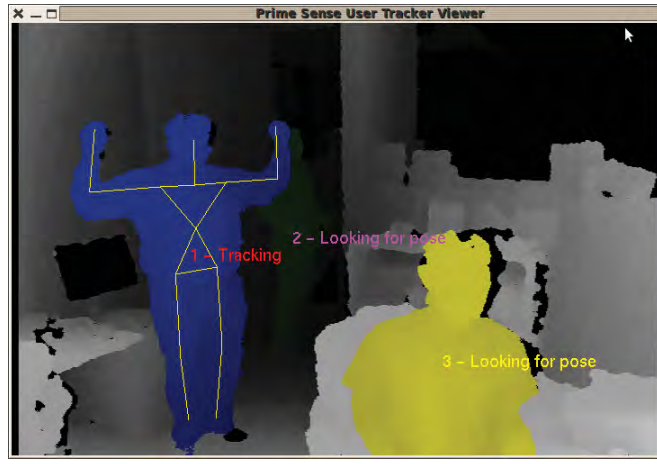
En general el seguimiento se realizó de forma adecuada. El robot es capaz de lidiar mejor con la oclusión ya que tiene forma de validar la pose del operador de dos maneras diferentes, se puede utilizar una condición para que ambos sensores validen el reconocimiento antes de continuar el seguimiento.

Un punto que se hizo notar al usar dos módulos de reconocimiento fue la desincronización de ambos módulos, el reconocedor de patrones piernas opera reportando 5 veces por segundo, mientras que el rastreo de esqueleto tarda alrededor de 2 segundos para reportar una nueva pose.

Algunos problemas ocurrieron durante la ejecución originados principalmente por las vibraciones del robot. Estas afectaban al rastreo de esqueleto, llegando en el peor de los casos a que el sensor perdiera al operador. También es posible perder el rastreo de esqueleto durante la oclusión si esta se realiza demasiado cerca del sensor Kinect, en condiciones donde se tapa toda la escena el sensor pierde el rastreo. Para recuperar al operador con el sensor se debe volver a calibrar al operador (fig. 7.47), sin embargo, esto no siempre es posible y no está permitido en las reglas del RoboCup @Home [?].



(a) Pose de calibración



(b) Calibración de esqueleto, mapa de profundidad.

Figura 7.47: Pose de calibración para rastrear esqueleto con el sensor Kinect

Capítulo 8

Conclusiones y trabajo futuro

8.1. Conclusiones

Con el presente trabajo se desarrolló un sistema de seguimiento de personas para un robot de servicio. A lo largo del trabajo se hizo un estudio del problema y se desarrollaron varios experimentos prácticos tanto simulados como implementados en un robot de servicio real.

Con la experiencia ganada se puede señalar que el seguimiento de personas es un problema que depende mucho del entorno. Mientras que es relativamente fácil hacer un seguimiento de personas en ambientes libres de obstáculos, el problema se complica junto con el entorno.

Con este trabajo se pudo aprender y poner en práctica un conjunto amplio de habilidades y conocimientos para desarrollar proyectos de robótica autónoma. El trabajo realizado no se limitó únicamente a implementar un sistema de seguimiento de personas, sino también a prestar atención en la puesta en marcha, cuidado y mantenimiento del robot.

8.1.1. Reconocimiento de personas

En cuanto al reconocimiento de personas, el enfoque de buscar patrones de flancos resulta bastante eficiente. Su principal desventaja es el ser susceptible a confusión por otros objetos en el entorno con una silueta similar a la de piernas (principalmente piernas juntas).

Hay que tener presente que un escáner láser realiza un barrido en un plano horizontal, por esta razón puede dejar de percibir varios obstáculos importantes, por ejemplo el robot podría sentir sólo las patas de una mesa e intentar cruzar sin éxito a través de la mesa. En algunas circunstancias es posible anticiparse al entorno y colocar el escáner láser a una altura confortable para el sensor, pero en el caso general no será posible. Algunos sistemas ocupan más de un escáner láser; esto es de especial interés para el seguimiento de personas ya que podrían validarse los patrones de piernas con el torso de la misma.

Una limitante de este enfoque es que se hacen a un lado aquellas siluetas que no parecen piernas (e.g. persona con vestido, un bebé gateando, otro robot, etc.). Una extensión lógica del módulo de reconocimiento de personas con escáner láser es trabajar una etapa de entrenamiento de patrones *ad hoc*. Esto quiere decir que antes de iniciar el seguimiento, el robot debería aprender el patrón del agente que va a seguir. Esto ayudaría a generalizar el problema de seguimiento y extendería las aplicaciones (e.g. una fila de robots que se dirigen a algún lado).

Otra extensión en esta etapa es el trabajar el seguimiento no sólo de un agente, sino de un grupo de ellos [45]. Al tener diferentes puntos de referencia disminuye la dependencia de un sólo guía y puede ser útil en situaciones contextuales (e.g. un miembro del grupo debe ir al tocador).

Finalmente hay que señalar que el sensado de personas y del entorno con un escáner láser es muy restrictivo, aún permanecen muchos detalles ocultos al robot (e.g. color, forma), por lo que es recomendable utilizar más módulos de sensado (preferencialmente cámaras y nubes de puntos).

8.1.2. Rastreo

Se desarrollaron e implementaron técnicas simples de rastreo para lidiar con el problema de seguimiento. Las técnicas trataron de hacer énfasis en el manejo de incertidumbre durante la prueba, ¿Qué hacer ante situaciones de este tipo? ¿De dónde obtener información para estimar la pose del operador?. Básicamente se buscó construir la estimación de estado manejando varios módulos de reconocimiento (redundancia) y hacer que el registro temporal contribuyera también previendo casos en dónde los sensores quedaran superados (e.g. oclusión o doblar una esquina).

La metodología empleada funcionó bien en las circunstancias planteadas, sin embargo, estas técnicas no son el estado del arte en cuanto a rastreo y fusión sensorial. Lo más recomendado en la literatura son filtros bayesianos, particularmente Filtro de Kalman y Filtro de Partículas [46, 9, 5, 7]. Ambas técnicas permiten tomar en cuenta la historia temporal de una estimación e incluir los datos de varias fuentes, con ello se construye un modelo probabilístico para estimar el estado de un sistema (desplazamiento del operador) en casos con incertidumbre.

Un punto que es relevante es la necesidad de implementar un modelo de movimiento completo para el operador que incluya no sólo la pose, sino también orientación y vectores de velocidad y giro. Tener un modelo completo de movimiento permitiría robustecer la predicción.

8.1.3. Planeación de Movimientos

En cuanto a la planeación de movimientos el uso de campos potenciales fue justificado, aunque en algunas circunstancias presentó fallas. Por ejemplo, es por culpa de los campos potenciales que el robot necesita doblar las esquinas de forma amplia, ya que si no lo hace así, se quedará atascado contra la pared. Para estos casos sería conveniente no sólo ir tras el operador, si no tratar de

replicar su trayectoria o al menos trazar una gráfica topológica local para saber por donde se puede continuar la marcha en caso de quedar atascado.

El problema de planeación de movimientos es muy amplio, además de la navegación, incluye los problemas de mapeo, localización y cobertura. Es una extensión natural ocupar la información de los sensores y odometría para otras tareas (e.g. localización y mapeo).

Finalmente, vale la pena enfatizar la capacidad de interacción del seguimiento de personas. En este trabajo el robot se desplaza detrás del operador; este es un enfoque práctico, sin embargo no es tan natural. Al acompañar el desplazamiento de otros agentes (humanos o animales) se dan algunas normas sociales, no siempre se camina detrás del acompañante (lo más común para las personas es caminar a lado) y por lo general hay que guardar una distancia (un espacio íntimo que debe ser respetado¹). Una extensión al seguimiento de personas es hacerlo socialmente correcto para lograr una mejor interacción.

8.2. Experiencias

Por medio de la realización de este trabajo se tuvo la oportunidad de formar parte y colaborar en el Laboratorio de Biorobótica y con el equipo RoboCup PUMAS @Home, teniendo acceso al robot Justina para desarrollar este trabajo.

Se participó en dos competencias de robótica de servicio con Justina y con los demás integrantes del equipo:

1. En el Torneo Mexicano de Robótica se obtuvo el primer lugar nacional, en esta competencia se pudo demostrar la prueba de seguimiento de personas.
2. Finalmente, también se participó en el RoboCup 2011 en la categoría @Home, donde se obtuvo el 8° lugar. En esta competencia no se logró demostrar la prueba de seguimiento debido a fallas de hardware.

Finalmente, este trabajo fue presentado dentro del taller RoboCup @Home realizado como parte de la Mexican International Conference on Artificial Intelligence (MICAI), celebrada en la ciudad de Puebla del 26 de noviembre al 4 de diciembre del 2011.

¹ Por ejemplo, no es lo común caminar con alguien y que nuestro acompañante esté a 10cm de separación. Incluso con los animales, uno no puede acercarse demasiado a un perro desconocido por la calle antes de que este se ponga alerta.

Apéndice A

Reglamento de la prueba de seguimiento de personas del Robocup @Home¹

A.1. Prueba *Follow Me!*

El robot debe seguir a una persona desconocida de manera segura y en un ambiente dinámico.

A.1.1. Objetivo

Esta prueba se centra en el reconocimiento y seguimiento de una persona desconocida, interacción multi-modal² y navegación segura en un ambiente desconocido.

A.1.2. Descripción de la prueba

Esta prueba se lleva a cabo afuera de la arena de competencia, por ejemplo, en un supermercado. Un operador profesional es seleccionado por el Comité Técnico (CT) para probar el robot. Es probable que esta prueba se realice en paralelo, esto implica que hay más personas caminando.

Antes de la prueba, el operador permanecerá al menos 3 metros lejos del robot. Cuando la prueba comienza, él se acercará al robot y le dirá qué lo siga. El robot debe anunciar cuando haya finalizado de calibrar y comenzará a seguir

¹ Esta es una traducción a partir del reglamento oficial en su edición 2011, véase [1].

² Se refiere al procesamiento de dos o más señales de interacción dadas por el usuario, e.g. mensajes hablados, mirada, movimientos corporales, etc.; ofreciendo una respuesta coordinada. Su objetivo es hacer más natural la interacción hombre máquina, [47].

al operador. Es posible dar instrucciones al operador sobre qué hacer durante la etapa de calibración.

Durante el tiempo restante, el robot debe seguir al operador por una ruta predefinida, y pasar por diferentes puntos de evaluación antes de cruzar la línea de meta.

El operador caminará con la espalda hacia el robot a una velocidad regular lenta, y esperará al robot en caso de que avance despacio, pero nunca caminará de espaldas, excepto para interactuar con el robot. El robot mantendrá una distancia con respecto al operador de al menos un metro, a menos que sea este el que camine hacia el robot.

Hay cuatro puntos de evaluación predefinidos a lo largo de la ruta. En cada punto se desempeñará una acción específica. Si el robot falla en completar una de las evaluaciones, la prueba termina ahí.

Punto de Evaluación 1: Oclusión Temporal El operador para. Luego, una segunda persona camina lentamente entre el robot y el operador. Después, el operador continúa caminando y el robot lo sigue

Punto de Evaluación 2: Seguimiento a distancia El operador le dice al robot que pare y espere. El robot debe permanecer inmóvil por 10 segundos. Debe anunciar cuando el periodo de 10 segundos empiece. Entonces, el operador se aleja del robot 3 metros, de manera que no haya objetos entre él y el robot. Una vez transcurridos los 10 segundos, el robot se aproxima al operador y continúa siguiéndolo.

Punto de Evaluación 3: Reconocer operador El operador le indica al robot que pare. Luego él se aleja a algún lugar donde se encuentre completamente escondido del robot. Luego el operador y otra persona, la cual no ha aparecido antes, caminan hacia el robot. Ellos permanecen a 1.5 metros de distancia del robot, y a 1 metro de separación. El robot debe reconocer cual de los dos es el operador y continuar siguiéndolo.

Punto de Evaluación 4: Línea de meta Todas las partes del robot que están tocando el suelo deberán cruzar la línea de meta.

A.1.3. Observaciones

La señal de inicio en esta prueba es el oprimir el botón de inicio.

El equipo puede instruir al operador en cómo operar al robot o hacer notar algo en este ámbito. Esto incluye, por ejemplo, comandos de voz y gestos, procedimiento de la calibración, etc. El equipo debe hacer esto dos minutos antes que la prueba comience.

Los comandos con gestos deben ser explicados a los árbitros antes de que la prueba comience. Si no se realiza esto a tiempo, sólo serán permitidos comandos de voz.

Si una persona de la audiencia interfiere con el robot de alguna manera que se haga imposible hacer la prueba, el equipo podrá repetirla inmediatamente.

A.1.4. Instrucciones a los árbitros

Las tareas de los árbitros son:

- Elegir a los caminantes que participarán en la prueba y mostrarles la ruta a seguir.

- Definir dónde se encontrarán los puntos de evaluación (sección A.1.2).

- Preguntar al equipo si utilizarán gestos en la prueba.

- Si el equipo utiliza gestos, revisar si estos cumplen las reglas para este efecto.

- Revisar si el robot toca algo.

- Detectar si el robot se acerca demasiado al operador.

- Revisar si el equipo cumple satisfactoriamente la tarea en cada punto de evaluación.

- Tener cuidado de no interferir con la prueba y con los robots.

A.1.5. Evaluación

La duración de la prueba es de 8 minutos a lo máximo, incluyendo la etapa de calibración.

Acción	Evaluación
Punto de evaluación 1: Oclusión temporal	
Seguir satisfactoriamente al operador	100
Punto de evaluación 2: Seguimiento a la distancia	
Entender correctamente los comandos del operador	50
Bonus por usar un gesto	100
Esperar 10 segundos, encontrar y seguir al operador	100
Punto de evaluación 3: Reconocer operador	
Entender correctamente los comandos del operador	50
Bonus por usar un gesto	100
Reconocer y seguir al operador después de que regrese	200
Punto de evaluación 4: Línea de meta	
Cruzar la línea de meta	200
No tocar	
Completar la prueba sin tocar objetos o personas	100
Castigos & bonus especiales	
No atender	-500
Desempeño sobresaliente	100
Puntuación total	1100

Apéndice B

Glosario

actuador Dispositivo capaz de transformar energía eléctrica, neumática o hidráulica en la activación de un proceso automático.

agente Un agente es algo que razona. Los agentes informáticos se diferencian de los programas convencionales por tener atributos especiales, como que estén dotados de controles autónomos, que perciban su entorno, que persistan durante un periodo prolongado, que se adapten a los cambios, y que sean capaces de alcanzar objetivos diferentes[41].

autonomía Se refiere a que un robot sea capaz de reaccionar ante situaciones no consideradas *a priori* dentro de la programación de su control y sin ninguna supervisión exterior [42].

base móvil Hace referencia al módulo de un robot que le da movilidad y le hace *móvil*. Puede ser alguna configuración de ruedas (e.g. diferencial, Ackerman, sincro, omnidireccional, etc.) o articulado.

biometría Estudio de métodos automáticos para el reconocimiento único de humanos basados en uno o más rasgos físicos o conductuales intrínsecos. Algunas características biométricas son el rostro, huellas digitales, voz, caligrafía, etc.

comportamiento Manera de proceder que tienen las personas u organismos en base a los estímulos obtenidos con su entorno.

comportamiento deliberativo Se refiere al comportamiento *consciente* cuyo modo de actuar está basado en conclusiones obtenidas de manera lógica y utilizando el conocimiento y experiencia; e.g. jugar una partida de ajedrez.

comportamiento reactivo Se refiere al comportamiento que se activa instintivamente y sin ninguna deliberación previa, e.g. una persona que quita la mano de una estufa caliente.

- cobertura** Es el problema de pasar un sensor o herramienta de un robot sobre todos los puntos en un espacio (e.g. pintar, remover minas) [16].
- ingeniería** Compendio de conocimientos y técnicas científicas aplicadas a la invención, perfeccionamiento y utilización de técnicas para la resolución de problemas en beneficio de la humanidad y el medio ambiente.
- inteligencia** Capacidad de entender, asimilar, elaborar información y utilizarla para resolver problemas.
- inteligencia artificial** En ciencias de la computación se refiere a las inteligencias no naturales en agentes racionales no vivos. John McCarthy acuñó el término en 1956 y la define como *“Es la ciencia e ingeniería de hacer máquinas inteligentes, especialmente programas de cómputo inteligentes. Se relaciona con la tarea de utilizar computadoras para entender la inteligencia humana, sin embargo, la IA no debe confinarse a estudiar únicamente métodos que son biológicamente observables. [32]”*.
- localización** Es el problema de usar un mapa para interpretar los datos de los sensores y determinar la configuración (estado) del robot.
- lidar** (trad. del inglés, *Light Detection and Ranging*) Se refiere a la tecnología que permite medir la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado. Esta tecnología utiliza el mismo principio que el radar al comparar la onda luminosa reflejada con la emitida, a través de la magnitud del desfaseamiento se infiere la distancia al objetivo.
- manipulador** Mecanismo articulado gobernado por control automático equivalente a un brazo, destinado al agarre y desplazamiento de objetos.
- mapeo** Es el problema de explorar y sensar un ambiente desconocido para construir una representación útil [16].
- máquina** Conjunto de piezas o elementos móviles y fijos cuyo funcionamiento posibilita aprovechar, dirigir, regular o transformar la energía para realizar un trabajo con un fin determinado.
- navegación** Es el problema de encontrar un movimiento libre de colisiones para que el robot cambie de una configuración (estado) a otra [16].
- omnidireccional** El movimiento de este tipo se refiere a aquel que puede realizarse sin restricciones sobre el espacio y que permite variar cada una de las variables de estado de forma independiente.
- oclusión** Se refiere a la obstrucción sensorial de un objeto con otro. Con respecto al seguimiento de personas se refiere al ocultamiento momentáneo del operador al robot debido al cruce de otra persona u otro objeto.

- planeación de movimientos** Se encarga de calcular la cinemática necesaria en el robot para ejecutar una tarea determinada.
- radar** Acrónimo del inglés *RAtio Detecting And Ranging*. Es un sistema que utiliza radiaciones electromagnéticas reflejadas por un objeto para determinar la localización y velocidad de este.
- rastreo** (del inglés *tracking*) Consiste en resolver el problema de correspondencia, esto es, extraer la historia espacio-temporal de los objetos/agentes en escena [49].
- robot** Máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes reservadas solo a las personas.
- robot de servicio** Un robot de servicio es aquel que opera de manera parcial o totalmente autónoma, desarrollando servicios útiles para el bienestar de los humanos y equipos, excluyendo tareas de manufactura. Pueden ser móviles y con capacidad de manipulación. [37]
- robótica** Ciencia de percibir y manipular el mundo físico a través de artefactos controlados por computadora.
- sensor** Dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas.
- servicio** Aquellas que aportan un beneficio a las personas o a los equipos. Para un robot de servicio, el término excluye las aplicaciones que contribuyan directamente a la industria de fabricación de bienes.
- tecnología** Conjunto de conocimientos técnicos, ordenados científicamente, que permiten diseñar y crear bienes y servicios que facilitan la adaptación al medio ambiente y satisfacer tanto las necesidades esenciales como los deseos de las personas.

Bibliografía

- [1] Robocup @home 2011 rulebook, 2011.
- [2] J. K. Aggarwal and Q. Cai. Human motion analysis: A review. *Computer Vision and Image Understanding*, 73:428–440, 1999.
- [3] Ronald C. Arkin. *Behavior Based Robotics*. MIT Press, 1998.
- [4] N. Bellotto and H. Hu. Multisensor integration for human-robot interaction. *The IEEE Journal of Intelligent Cybernetic Systems*, 1, July 2005.
- [5] N. Bellotto and H. Hu. Vision and laser data fusion for tracking people with a mobile robot. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2006)*, pages 7–12, Kunming, China, December 2006.
- [6] N. Bellotto and H. Hu. People tracking and identification with a mobile robot. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation (ICMA 2007)*, pages 3565–3570, Harbin, China, August 2007.
- [7] N. Bellotto and H. Hu. People tracking with a mobile robot: a comparison of kalman and particle filters. In *Proc. of the 13th IASTED International Conference on Robotics and Applications (RA 2007)*, pages 388–393, Würzburg, Germany, August 2007.
- [8] N. Bellotto and H. Hu. Multisensor-based human detection and tracking for mobile service robots. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics – Part B*, 39(1):167–181, 2009.
- [9] N. Bellotto and H. Hu. A bank of unscented kalman filters for multimodal human perception with mobile service robots. *International Journal of Social Robotics*, 2(2):121–136, 2010.
- [10] David L. Buckley. History making mobile robots. <http://www.davidbuckley.net/DB/HistoryMakers.htm>. Last Visited in December 2011.
- [11] W. Burgard, A. B. Cremers, D. Fox, D. Hahnel, G. Lakemeyer, D. Schulz, W. Steiner, and S. Thrun. Experiences with an interactive museum tour-guide robot. *Artificial Intelligence*, 114(1-2):3–55, October 1999.

- [12] Wolfram Burgard, Armin B. Cremers, Dieter Fox, Dirk Hähnel, Gerhard Lakemeyery, Dirk Schulz, Walter Steiner, and Sebastian Thrunz. The interactive museum tour-guide robot. pages 11–18, 1998.
- [13] Nick Carey. Draft results establishing pedestrian walking speeds. *Traffic Engineering*, 503, 2005.
- [14] P. Chakravarty and R. Jarvis. Panoramic vision and laser range finder fusion for multiple person tracking. In *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2949 –2954, oct. 2006.
- [15] R.Á. Chaurand, L.R.P. León, E.L.G. Muñoz, and Universidad de Guadalajara. Centro de Investigaciones en Ergonomía. *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana: México, Cuba, Colombia, Chile*. Colección Modulo. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, División de Tecnología y Procesos, Departamento de Producción y Desarrollo, Centro de Investigaciones en Ergonomía, 2001.
- [16] Howie Choset, Kevin M. Lynch, Hutchinson, George Kantor, Wolfram Burgard, Lydia E. Kavraki, and Sebastian Thrun. *Principles of Robot Motion*. MIT Press, 2005.
- [17] Grzegorz Cielniak, Andre Treptow, and Tom Duckett. Quantitative performance evaluation of a people tracking system on a mobile robot. *Proceedings of the European Conference on Mobile Robots*, 2005.
- [18] Roberto Cordeschi and Guglielmo Tamburrini. Intelligent machines and warfare. *ECAO*, 2004.
- [19] Jean-daniel Dessimoz and Pierre-françois Gauthey. Domestic service robots in the real world : the case of robots following humans. *Autonomous Robots*, pages 217–228, 2010.
- [20] Stefan Feyrer and Andreas Zell. *Robust real time pursuit of persons with a mobile robot using multisensor fusion*, pages 710–715. I O S PRESS, 2000.
- [21] Terrence Fong, Illah Nourbakhsh, Kerstin Dautenhahn, Terrence Fong A, Illah Nourbakhsh A, and Kerstin Dautenhahn C. A survey of socially interactive robots: Concepts, design, and applications, 2002.
- [22] J Fritsch, M Kleinhagenbrock, S Lang, T Plötz, G A Fink, and G Sagerer. Multi-modal anchoring for human-robot interaction. *Robotics and Autonomous Systems*, 43(2-3):133–147, 2003.
- [23] Bill Gates. A robot in every home. *Scientific American*, December 2006.
- [24] B P Gerkey, R T Vaughan, K Stoy, A Howard, G S Sukhatme, and M J Mataric. *Most Valuable Player: A Robot Device Server for Distributed Control*, volume 12261231, pages 1226–1231. Citeseer, 2001.

- [25] Georges Giralt, Raja Chatila, and Marc Vaisset. An integrated navigation and motion control system for autonomous multisensory mobile robots. pages 191–215, 1983.
- [26] Takashi Gomi and Ann Griffith. Developing intelligent wheelchairs for the handicapped. *Assistive Technology*, pages 150–178, 1998.
- [27] Reuben Hoggett. Cybernetic zoo, a history of cybernetic animals and early robots. <http://cyberneticzoo.com>. Last Visited in December 2011.
- [28] J. C. Latombe. *Robot Motion Planning*. Springer, 1990.
- [29] M. Lindstrom and J. O. Eklundh. Detecting and tracking moving objects from a mobile platform using a laser range scanner. *2008 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 3(July):1364–1369, 2001.
- [30] J N K Liu, M Wang, and B Feng. ibotguard: an internet-based intelligent robot security system using invariant face recognition against intruder. *Systems Man and Cybernetics Part C Applications and Reviews IEEE Transactions on*, 35(1):97–105, 2005.
- [31] R.C. Luo, Y.J. Chen, C.T. Liao, and A.C. Tsai. Mobile robot based human detection and tracking using range and intensity data fusion. In *Advanced Robotics and Its Social Impacts, 2007. ARSO 2007. IEEE Workshop on*, pages 1 –6, dec. 2007.
- [32] John McCarthy. What is artificial intelligence? <http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai/node1.html>. Last Visited in December 2011.
- [33] Hans P. Moravec. The CMU rover. In *AAAI*, pages 377–380, 1982.
- [34] E. Muybridge and R. Taft. *The human figure in motion*. Dover pictorial archive series. Dover Publications, 1955.
- [35] N J Nilsson. *A mobile automaton: An application of artificial intelligence techniques*, pages 509–520. Mitre Co., 1969.
- [36] Nils Nilsson. Shakey the robot. Tech Note 323, AI Center, SRI International, 1984.
- [37] International Federation of Robotics. Provisional definition of service robots. <http://www.ifr.org/service-robots/>, September 2011. Last Visited in October 2011.
- [38] Anibal Ollero Baturone. *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*. Alfaomega, 2001.
- [39] ROS Project. Robot operating system. <http://www.ros.org>. Last Visited in October 2011.

- [40] Morgan Quigley, Brian Gerkey, Ken Conley, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Eric Berger, Rob Wheeler, and Andrew Ng. *ROS: an open-source Robot Operating System*, pages 1–8. Number Figure 1. IEEE, 2009.
- [41] Stuart Russell and Peter Norvig. *Inteligencia Artificial: Un enfoque moderno*. Prentice Hall, 2002.
- [42] José Santos and Richard J. Duro. *Evolución Artificial y Robótica Autónoma*. Alfaomega, 2005.
- [43] Jesus Savage, and Figueroa Israel Matamoros, Mauricio, Marco Negrete, Francisco Dorantes, Ismael Castillo, Luis Munguia, Luis Contreras, Abel Pacheco, David Esparza, Alejandra Sanchez, and Marco Becerra. Pumas 2011 team description paper. *RoboCup @Home 2011*, 2011.
- [44] M Scheutz, J McRaven, and Gy Cserey. Fast, reliable, adaptive, bimodal people tracking for indoor environments. *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS IEEE Cat No04CH37566*, 2:1347–1352, 2004.
- [45] D. Schulz, W. Burgard, D. Fox, and A.B. Cremers. Tracking multiple moving targets with a mobile robot using particle filters and statistical data association. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1665 – 1670 vol.2, 2001.
- [46] Dirk Schulz, Wolfram Burgard, Dieter Fox, and Armin B. Cremers. People tracking with mobile robots using sample-based joint probabilistic data association filters. *I. J. Robotic Res*, 22(2):99–116, 2003.
- [47] A. Sears and J. A. Jacko, editors. *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies & Emerging Applications*. Lawrence Erlbaum Associates, 2008.
- [48] Peter J. B. Slater. *The Encyclopedia of Animal Behavior*. Facts on File, September 1987.
- [49] T. Teixeira, G. Dublon, and A. Savvides. A survey of human sensing: Methods for detecting presence, count, location, track and identity. Technical report, Yale University, ENALAB, 2010. ACM Surveys, under review.
- [50] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. *Probabilistic Robotics*. MIT Press, 2005.
- [51] Elin Anna Topp. *Human-Robot Interaction and Mapping with a Service Robot: Human Augmented Mapping*. PhD thesis, KTH, School of Computer Science and Communication, Stockholm, Sweden, 2008.
- [52] Tijn van der Zant and Thomas Wisspeintner. Robocup x: A proposal for a new league where robocup goes real world. In *RoboCup*, pages 166–172, 2005.

- [53] Richard Vaughan. Massively multi-robot simulation in stage. *Swarm Intelligence*, 2(2-4):189–208, 2008.
- [54] David Watson and David Scheidt. Autonomous systems. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 26(4):368–376, 2005.
- [55] W Zajdel, Z Zivkovic, and B J A Krose. Keeping track of humans: Have i seen this person before? *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2(April):2081–2086, 2005.