

ROBOT 2011

ROBÓTICA EXPERIMENTAL

28-29 Noviembre 2011. Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla (España)

Libro de Actas

Editores:

A. Ollero	F. Caballero
J.R. Martinez de Dios	L. Merino
J.A. Cobano	A. Rodriguez-Castaño
J.Ferruz	

Con la colaboración de los organizadores de sesiones: J. Agirre , J. Amat, M. Armada , R. Aracil, C. Balaguer, L. Basañez, A. Casals, J.A.Castellanos, A. García-Cerezo, A. González, V. Matellán, L. Montano, J. M. M. Montiel, V. Muñoz, J.L. Pons , O. Reinoso, P. Ridaó, A. Sanfeliú, P. Sanz y F. Torres.

PREFACIO

La comunidad española de investigación y desarrollo en robótica ha alcanzado un importante nivel contando con numerosos grupos de investigación, proyectos financiados con fondos del Programa Marco de la Comisión Europea, de los programas españoles, de las Comunidades Autónomas y de las empresas. El número y la calidad de las publicaciones han experimentado también un notable incremento. Además, existen numerosos grupos que realizan actividades de transferencia de tecnología a las empresas y organismos. ROBOT 2011 es una muestra de la vitalidad de la esta comunidad.

ROBOT 2011 es la tercera edición de un evento bienal iniciado en Zaragoza en 2007 y reeditado en 2009 en Barcelona. En ROBOT 2011 se ha prestado una atención especial a la Robótica Experimental con contribuciones en las que se describen no sólo los métodos, sino también su validación experimental en laboratorio o en entornos de aplicación. El Programa del evento incluye la presentación de 96 artículos en tres sesiones en paralelo a los que hay que añadir dos sesiones plenarias organizadas por los Grupos Temáticos de Robótica y Visión de CEA, la presentación de la iniciativa Flagship Robot Companion de la Comisión Europea, y una Mesa Redonda sobre la investigación en robótica en España.

ROBOT 2011 se celebra en el marco de la Semana Europea de Robótica en la cual más de 125 organizaciones llevan a cabo 340 actividades en 18 países.

ROBOT 2011, en su formato actual, no hubiera sido posible sin la decidida participación de los miembros del Comité de Programa que han organizado numerosas sesiones y la revisión de los trabajos presentados en estas sesiones. En nombre del Comité Organizador deseo expresar mi agradecimiento a dicho Comité de Programa, a los revisores de los artículos y a los investigadores que han respondido a la llamada presentando tantos trabajos de calidad. Hay que agradecer también a los mencionados Grupos de Robótica (GTROB) y Visión que hayan celebrado sus jornadas anuales en el marco de ROBOT 2011.

De igual forma deseo expresar mi agradecimiento por el trabajo de los miembros del Comité Organizador, y en general de los investigadores del Grupo de Robótica, Visión y Control (GRVC) de las Universidades de Sevilla y Pablo de Olavide, que han dedicado gran cantidad de horas a la organización del evento, así como a FADA-CATEC y a las organizaciones que han apoyado ROBOT 2011.

Por último quiero expresar mis mejores deseos para la comunidad española de investigación y desarrollo en robótica, así como para las futuras ediciones de estos eventos.

Anibal Ollero Baturone
Presidente del Comité de Programa

Comité de Programa

Anibal Ollero (Presidente), *Univ. de Sevilla, FADA-CATEC*

Jon Agirre, *Tecnalia*

Josep Amat, *Univ. Politècnica de Catalunya*

Rafael Aracil, *CAR - Univ. Politécnica de Madrid*

Manuel A. Armada, *CAR - CSIC*

Carlos Balaguer, *Univ. Carlos III de Madrid*

Luis Basañez, *Univ. Politècnica de Catalunya*

Fernando Caballero, *Univ. de Sevilla*

Alicia Casals, *IBEC - Univ. Politècnica de Catalunya*

Jose Ángel Castellanos, *Univ. de Zaragoza*

Josep Lluís de la Rosa, *Univ. de Girona*

Vicente Feliú, *Univ. Castilla la Mancha*

Alfonso García-Cerezo, *Univ. de Málaga*

Fernando Gómez, *Univ. de Huelva*

Antonio González, *Univ. de Granada*

José Ramiro Martínez, *Univ. de Sevilla*

Vicente Matellán, *Univ. de León*

Luis Merino, *Univ. Pablo Olavide*

Luis Montano, *Univ. de Zaragoza*

Victor Muñoz, *Univ. de Málaga*

José Luís Pons, *CAR - CSIC*

Óscar Reinoso, *Univ. Miguel Hernández*

Pere Ridao, *Univ. de Girona*

Miguel Ángel Salichs, *Univ. Carlos III de Madrid*

Alberto Sanfeliú, *Univ. Politècnica de Catalunya*

Pedro Sanz, *Univ. Jaume I*

Rafael Sanz, *Univ. de Vigo*

Fernando Torres, *Univ. de Alicante*

Eduardo Zalama, *Univ. de Valladolid*

Comité Organizador

Publicaciones:

José Antonio Cobano, *Univ. de Sevilla*

Finanzas:

Joaquín Ferruz, *Univ. de Sevilla*

Web/Difusión:

Begoña C. Arrúe, *Univ. de Sevilla*

Gestión local:

Guillermo Heredia, *Univ. de Sevilla*

Registro:

Ángel Rodríguez, *Univ. de Sevilla*

Patrocinadores

Vicerrectorado de Investigación, Universidad de Sevilla.



Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla



Grupo Temático de Robótica, Comité Español de Automática



Plataforma Tecnológica Española de Robótica



CONET Network of Excellence, FP7



Red Temática en Visión por Computador, Comité Español de Automática



Organizadores

Grupo de Robótica, Visión y Control



Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales



Índice general

Prefacio	III
Comité de Programa	V
Comité Organizador	V
Patrocinadores	VII
Sesión 1.a: Navegación y Control Visual	1
Navegación Reactiva de un Robot Móvil usando Kinect	1
Control Visual Dinámico del Sistema RoboTennis para el Seguimiento y Golpeo de una Pelota de Ping-Pong	9
Visual Navigation by Means of Three View Geometry	17
Visual Odometry with an Appearance-based Method	25

Control visual combinado de dos robots acoplados para su aplicación a tareas de manipulación	33
Sesión 1.b: Robótica Asistencial	38
Key Aspects of Biological Postural Control in Robotics	38
Improving target acquisition for users with cerebral palsy using an inertial person-computer interface	43
Control de un brazo robot mediante una interfaz cerebro-máquina no invasiva espontánea	49
Robotic platform as assistant to training of children with motor impairments	54
Diseño de una Arquitectura de ortesis Adaptativa y Estudio de la Personalización de su Grado de Asistencia	60
Sesión 1.c: Robótica para aplicaciones de campo	66
Planificación de trayectorias bi-objetivo en robótica aérea para agricultura de precisión	66
Outdoor Motion Robots Planning using the Fast Marching Method	72
Maniobras 3D en el Robot ALACRANE: Paso de un Desnivel con apoyo del manipulador en el Suelo	80
Mobile Robot Navigation for Remote Handling operations in ITER	85
Experiencias en robótica aplicada a invernaderos	91

Sesión 2.a: Robots Humanoides	99
Using Humanoids for Teaching Robotics and Artificial Intelligence Issues. The UJI Case Study	99
Modelling and simulation of the humanoid robot HOAP-3 in the OpenHRP3 platform	105
Diseño y evaluación experimental de bípedos pasivos	113
Aprendizaje genético de modos de caminar para el humanoide Nao	120
Arquitecturas de control sobre robots Nao en la SPL de Robocup	128
Sesión 2.b: Docencia en Robótica	136
Creación de laboratorios virtuales de robótica mediante EjsRL	136
Herramientas virtuales para el estudio cinemático de robots paralelos	144
Prácticas de Laboratorio mediante Robots Lego NXT y LabVIEW en la Docencia de Tolerancia a Fallos	150
Diez años dando clases de Robótica con HEMERO	156
A Toolkit for Robot Grasping Simulation	162
Sesión 2.c: Robots de Cinemática Paralela	168
Aplicación de un robot delta a la manipulación de cebollas y vegetales	168

New Geometric Approaches to the Singularity Analysis of Parallel Platforms	173
Dimensional Synthesis of a 3PSU-1S Parallel Manipulator	181
Control strategies using redundant sensors applied to parallel robots	189
Sesión 3.a: Sistemas Multi-Robot	197
Multirobot Outdoors Event Monitoring in Strong Lightning Transitions	197
Robot teams for exploration in underground environments	205
Experiments on multi-robot routing with communication constraints	213
Supporting Approaches for Task Coordination in Large-Scale Rescue	221
Distribución óptima de múltiples robots en vigilancia de perímetros	228
Robot Formations Motion Planning using Fast Marching	233
Sesión 3.b: Robots Caminantes	241
Evaluación experimental de estrategias de control de fuerza para robots cuadrúpedos	241
Aplicación de técnicas de control reseteado al Robot SILO4	247
Robot híbrido basado en un diseño eficiente de pata	253
Mejora en la actuación del sistema de remonte en un dispositivo robótico capaz de superar escaleras	260

Reducing power consumption in bipedal walking	267
Análisis cinemático de robot cuadrúpedo utilizando screws	273
Sesión 3.c: Robótica Submarina	282
Una nueva Herramienta para la Simulación y Supervisión 3D de Misiones de In- tervención Submarinas	282
Girona 500, un vehículo autónomo submarino para la investigación	286
El robot submarino teleoperado Garbí: Avances y resultados	291
Desarrollo de un vehículo de observación oceanográfica autónomo	295
Optimal Image Keypoint Distribution for Visual Odometry - An Empirical Study .	302
Jornada de visión: Visión y construcción de mapas 3D	308
Mejora del campo visual de un robot móvil de inspección mediante el empleo de materiales ligeros	308
Sistema de calibración cámara-láser 3D portable. Aplicación al mapeado 3D	316
Reconstrucción Tridimensional de Entornos Exteriores mediante Robots Móviles .	323
Vehículo robotizado para el levantamiento automático de carreteras en 3D	331
Sesión 4.b: Aplicaciones en Fabricación Aeronáutica	337

La tecnología robótica cambia: Hacia nuevas soluciones para el sector aeronáutico .	337
Automated Sealant Application	342
ROPTALMU - Sistema Robótico portable de taladrado para grandes largueros aeronáuticos	350
Mobile Robotic Platform for drilling and riveting aerostructures	355
Sesión 4.c: Robótica Quirúrgica	362
Interfaz de teleoperación para un pequeño robot de cirugía mínimamente invasiva .	362
Sistema Integrado de Posicionado, Visualización y Acotamiento de Áreas de Trabajo en Cirugía Ortopédica	367
Cinemática de un robot endoscópico hiper-redundante accionado electromagnéticamente	373
Robot quirúrgico auto-guiado para cirugía mínimamente invasiva en solitario . . .	381
Sesión 5.a: Sistemas Inteligentes y Robótica I	389
Uso de técnicas de preprocesamiento de imágenes y aprendizaje para la detección de cambios de atención de una persona en procesos de interacción persona-robot	389
Aprendizaje Inteligente de Controladores Difusos para Seguimiento de Trayectorias en Robots Serpiente	397
Vehículo satélite de recogida de contenedores con brazos hidráulicos automatizados	404

Sesión 5.b: Robótica Urbana I	411
Person Tracking in Urban Scenarios by Robots Cooperating with Ubiquitous Sensors	411
Robot Companions for Guiding People in Urban Areas	419
Robot Teams: Adapting to the environment and to human behaviors	427
Sesión 5.c: Manipulación Robótica I	434
Active perception of deformable objects using 3D cameras	434
Primitivas de manipulación: un paradigma para la planificación y ejecución de la prensión robótica	441
Control Architecture for a Multifinger Haptic Interface: MasterFinger 3	445
Sesión 6.a: Sistemas Inteligentes y Robótica II	451
Object-based visual attention for mobile robotics	451
Terrain Detection for Control of an Outdoor Mobile Robot	458
A vision-based external localization and automatic evaluation system for mobile robots localization	463
Algoritmo Minimax aplicado a vigilancia con robots móviles	468
Sesión 6.b: Robótica Urbana II	475

Planificación y seguimiento de maniobras en entornos dinámicos utilizando redes de sensores inalámbricos: resultados experimentales	475
Distributed Semantic Middleware for Social Robotic Services	483
Navegación autónoma basada en la representación del entorno mediante polilíneas etiquetadas semánticamente	488
ACC of a Commercial Vehicle Using Fractional Order Controllers for Throttle and Brake	496
Sesión 6.c: Manipulación Robótica II	504
Control de posición de un robot flexible de tres grados de libertad robusto ante cambios en la carga	504
Planificación de movimientos para conjuntos mano-brazo con numerosos grados de libertad	512
Sistema de agarre basado en una pinza con dedos flexibles	520
Modelado dinámico y control en lazo abierto de una antena sensora flexible de dos grados de libertad	528
Sesión 7.a: SLAM	536
Partición de mapas densos para SLAM monocular en gran escala	536
Experimental Comparison of Optimum Criteria for Active SLAM	543
Active Sensing approach for Range-Only SLAM using Gaussian Mixture Models	551

Known-depth Single-beacon bearings-only SLAM	560
Dense Outdoor 3D Mapping and Navigation with Pose SLAM	567
Sesión 7.b: Telerobótica	573
A Framework for Robotized Teleoperated Tasks	573
Robust Stability of teleoperation systems under time-varying delays	581
Teleoperación de manos antropomorfas	588
Telerobotics for Nuclear Fusion Environment	595
Exploración teleoperada de entornos desconocidos mediante un conjunto de robots móviles	601
Sesión 7.c: Robótica Social	609
Robots for Social Service: ACROSS Project	609
Propuesta metodológica para la evaluación de la interacción persona-robot en di- versos escenarios de aplicación	617
Robots sociales en la escuela Explorando la conducta interactiva con niños en edad escolar	622
Playzones : A robust detector of game boards for playing visual games with robots	626
Definición de reglas de comportamiento para un robot cognitivo social	634

Exploración teleoperada de entornos desconocidos mediante un conjunto de robots móviles

M. Juliá, A. Gil, L. M. Jiménez, D. Valiente y O. Reinoso

Abstract—En este artículo presentamos un sistema que permite teleoperar un conjunto de robots de una manera colaborativa. Para mostrar las capacidades del sistema de teleoperación presentado, describimos el caso particular de una tarea donde el operador colabora con el equipo de robots para explorar un entorno remoto de forma coordinada. El sistema implementa la interacción entre hombre y robot por medio de interfaces de lenguaje natural, de manera que se permite la teleoperación del conjunto de robots. Con la supervisión del operador, el equipo de robots crea un mapa del entorno utilizando una técnica de SLAM visual. La solución está indicada para aplicaciones donde el operador humano debe guiar la exploración, como, por ejemplo, en tareas de búsqueda y rescate. Se presenta un esquema de teleoperación distinto del común maestro-esclavo. Así pues, se presenta un mecanismo de exploración que permite la integración de los comandos de un operador en la tarea de exploración, tomándose como consejos las órdenes expresadas por el humano. En consecuencia, los robots en el entorno remoto escogen los movimientos que mejoran la estimación del mapa y conjuntamente cumplen con las instrucciones del operador. Se presentan resultados experimentales que demuestran que el mecanismo de colaboración presentado es adecuado para el control de un equipo de robots.

I. INTRODUCCIÓN

Durante la última década han surgido un gran número de aplicaciones que precisan la utilización de grupos de robots móviles. En dichas aplicaciones, los robots deben ser capaces de desenvolverse de una forma autónoma y coordinada para cumplir una tarea determinada. Por ejemplo, podemos pensar en un grupo de robots explorando un entorno de oficinas. En esta situación, los robots deben planificar sus movimientos de manera que puedan construir un mapa correcto del entorno. Por ejemplo, en [12], un conjunto de robots cooperan para realizar una tarea en el entorno remoto.

Por otra parte, existe un conjunto de aplicaciones en las que no es aconsejable que los robots sean totalmente autónomos y se precisa la participación de un operador humano. Por ejemplo, en una misión de búsqueda y rescate el operador humano será capaz de guiar al equipo de robots hacia zonas del entorno donde es más probable encontrar víctimas [1]. Este hecho toma mayor importancia si observamos que, para un operador, comandar un equipo de robots para realizar la exploración de un entorno de forma coordinada es bastante complicado. En consecuencia, es necesario establecer mecanismos que permitan al equipo de robots y al operador trabajar de forma coordinada.

M. Juliá, A. Gil, L. M. Jiménez, D. Valiente y O. Reinoso pertenecen al Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Miguel Hernández de Elche, Avda Universidad s/n, 03202, Elche (Alicante), España mjulia@umh.es

En un esquema clásico de teleoperación, el operador humano controla directamente al robot, quien realiza una tarea en el entorno remoto [13]. Una solución más sofisticada consiste en controlar y supervisar un entorno compartido por varios usuarios [10]. Por otra parte, en [5] un conjunto distribuido de usuarios teleoperan de forma simultánea un brazo robótico a través de Internet. Se describe un sistema de tipo cliente-servidor que facilita la cooperación de varios usuarios para compartir un único recurso.

En otros sistemas de teleoperación la interacción entre el humano y el robot o robots en el entorno remoto se consigue a través de diálogos de alto nivel utilizando comandos de lenguaje natural [7]. Por ejemplo, en [2], se presenta un conjunto de herramientas que permiten mejorar la interacción entre humano y robot para guiar un vehículo. En el esquema de control propuesto el humano y el robot interactúan para realizar tareas y conseguir objetivos. En lugar de un supervisor que emite órdenes a un subordinado, el humano y el robot dialogan para intercambiar ideas y resolver diferencias.

Finalmente, existen otros sistemas de teleoperación donde existe algún tipo de colaboración entre el entorno local y remoto. Este esquema es comúnmente denominado teleoperación colaborativa. En este caso, la colaboración puede ser entendida como una asociación mediante la cual los robots y el operador humano comparten los mismos objetivos y actúan de acuerdo con sus posibilidades y conocimiento anterior. En este esquema de colaboración, el robot o el equipo de robots deciden cómo utilizar una orden del operador: pueden obedecerla cuando la orden cumple con los requisitos de la misión o pueden modificarla si se considera inapropiada. Así pues, los comandos emitidos por el humano son tomados como consejos y el equipo de robots cuenta con más libertad para realizar su tarea si lo comparamos con el esquema clásico de teleoperación. Podemos encontrar aplicaciones donde es recomendable que el operador humano emita consejos o sugerencias al equipo de robots. Por ejemplo, en una tarea de búsqueda y rescate la experiencia del operador humano puede resultar de gran importancia, ya que puede utilizar su experiencia previa y capacidad de aprendizaje para dirigir al equipo de robots hacia zonas particulares del entorno donde podrían encontrarse víctimas atrapadas. De esta manera, la exploración realizada por el conjunto de robots no es totalmente autónoma y existe la posibilidad de enviar comandos generales a todo el equipo.

En este artículo presentamos un sistema de teleoperación colaborativa que permite la interacción entre humano y robots a través de interfaces de lenguaje natural y permite la teleoperación de múltiples robots en entornos desconocidos

Actas ROBOT 2011. 28-29 de Noviembre de 2011. Sevilla (España)

y no estructurados. Con el fin de demostrar las capacidades del sistema de teleoperación, presentamos una tarea donde se precisa la cooperación entre operador y robots. En la aplicación, el operador colabora con el equipo de robots en la exploración coordinada del entorno remoto.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: El apartado 2 expone la arquitectura de control utilizada para controlar un conjunto heterogéneo de robots. A continuación, el apartado 3 detalla los mecanismos usados para explorar un entorno desconocido de forma eficaz mediante un conjunto de robots móviles. En el apartado 4 se presenta el método de interacción entre el operador humano y el equipo de robots. Los resultados alcanzados se presentan en el apartado 5. Finalmente, el apartado 6 expone las principales conclusiones y propone trabajos futuros.

II. ARQUITECTURA DE CONTROL DE ROBOTS

Se ha desarrollado una plataforma que permite la monitorización y control de un grupo de robots móviles con capacidades sensoriales diferentes, así como arquitecturas internas. Permite la realización de tareas cooperativas, ya que la arquitectura ofrece una capa de comunicación de alto nivel entre los robots [11]. Actualmente, el equipo de robots está formado por diferentes modelos, en concreto: 4 robots Wifibot, 3 robots Pioneer P3-AT y un robot B21r.

II-A. Arquitectura de red

La comunicación entre robots móviles con características diferentes y capacidades sensoriales variadas inspiró el diseño de una arquitectura de red que pudiera integrar diferentes tecnologías de comunicación. La red puede ser dividida en dos sub-redes principales.

- 1 Red cableada Fast Ethernet donde se conectan un conjunto de PCs.
- 2 Red WIFI 802.11b/g que se comunica con los robots.

II-B. Protocolos de comunicación

La comunicación entre los agentes en el sistema está basada en tecnología CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*) [6]. La arquitectura CORBA ofrece una metodología orientada a objetos para la implementación de aplicaciones distribuidas. Este estándar ha sido utilizado con anterioridad y ha demostrado ser eficaz para compartir datos entre equipos de robots [11].

Los componentes principales del sistema son los siguientes (mostrados en la figura 1):

- *Servidor de identidad*: Se ejecuta en un PC o a bordo de un robot móvil conectado al sistema. La dirección IP estática del elemento del sistema en el que se ejecuta debe ser conocida por cada elemento que quiere conectarse al sistema. Este elemento es usado como punto de partida para establecer las conexiones en el sistema y mantiene una lista de los robots que se encuentran activos en el sistema y qué interfaces (capacidades) implementa cada uno.
- *Servidores a bordo*: Cada robot cuenta con un conjunto de servidores que se ejecutan a bordo y permiten

acceder a sus sensores. Las interfaces que implementan dependen de los tipos de sensores en particular que llevan a bordo. En concreto, cada sensor se asocia a una interfaz CORBA y se identifica mediante una cadena IOR (*Inter-operable Object Reference*). Para esta aplicación se emplean 4 servidores que permiten: el envío de comandos de velocidad, la lectura de la odometría, lectura de los sensores de rango sonar y la adquisición de imágenes de la cámara estéreo.

- *Intérprete de lenguaje natural*: Este componente tiene dos funciones principales. Primero, utiliza el software de reconocimiento IBM ViaVoice para identificar comandos de voz emitidos por el operador humano. Segundo, procesa los comandos con un intérprete de lenguaje natural para obtener comandos que puedan ser entendidos por el sistema. Los comandos se almacenan en una lista que es accedida por la interfaz de control de los robots. Los comandos se eliminan de esta lista una vez se han procesado.
- *Interfaz de control de robots*: La interfaz de control de robots es el componente que permite la interacción del equipo de robots con el operador humano. Este elemento se ejecuta en un PC conectado a la red cableada Ethernet. Este programa se comunica con el Servidor de Identidad y los servidores a bordo de los robots. La aplicación permite a un operador humano enviar comandos al equipo de robots, así como observar los datos adquiridos por los robots. Además, este elemento se encarga de construir el mapa y enviar las órdenes procesadas al equipo de robots, según se describirá en la sección 3.

El funcionamiento del sistema es el siguiente: En el arranque del sistema, el Servidor de Identidad debe ser el primer elemento que se inicie, ya que el resto de componentes intentan conectar inicialmente con él. Cuando un servidor a bordo de un robot se inicia, contacta con el Servidor de Identidad, quien publica su nombre y sus interfaces disponibles. A partir de este momento, esta información es pública y accesible por el resto de elementos del sistema. Finalmente, la arquitectura CORBA permite la comunicación entre diferentes programas escritos en lenguajes diferentes y ejecutándose bajo diferentes sistemas operativos. En la actualidad los servidores de los robots están escritos en C++ y funciona bajo Linux Debian, mientras que la interfaz de control funcionan bajo Windows XP.

III. EXPLORACIÓN DE ENTORNOS MULTI-ROBOT

En esta sección describimos el uso de la arquitectura de control para una aplicación en particular: la exploración cooperativa de un entorno desconocido por un conjunto de robots móviles. Para esta tarea, un conjunto de robots cooperan con un operador humano para crear un mapa correcto del entorno. Con esta intención se propone un modelo basado en comportamientos. En este modelo, la combinación de varios comportamientos básicos genera el comportamiento global del robot. Este modelo ha sido aplicado con éxito para ciertas

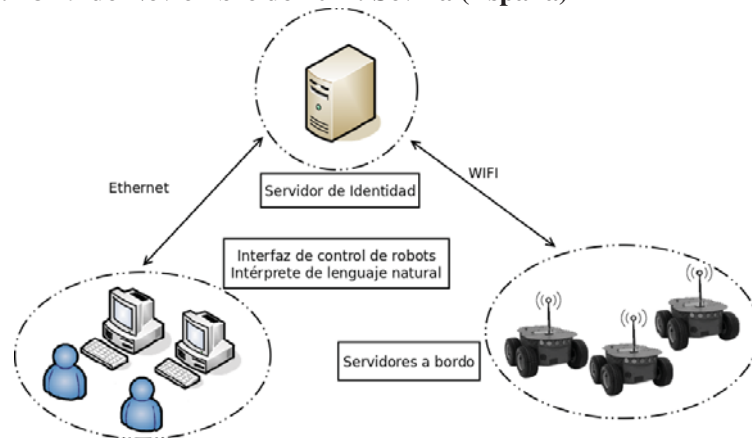


Fig. 1. Elementos básicos en la arquitectura de comunicaciones.

tareas en robótica cooperativa, incluyendo exploración multi-robot, como se presenta en [8] y [9].

III-A. Localización y reconstrucción simultánea del entorno

En entornos típicos (por ejemplo oficinas), podemos encontrar elementos distintivos que pueden ser extraídos con los sensores del robot (paredes, esquinas..., etc). Estos elementos se denominan normalmente como marcas. En nuestra aplicación, los robots detectan un conjunto de puntos 3D característicos utilizando un sistema de visión estereoscópico que les permiten obtener medidas relativas de dichos puntos [3].

Para construir un mapa, debemos conocer la posición y orientación de cada robot con respecto a un sistema de referencia global. Esto permite poner en común las observaciones construyendo un mapa coherente. Sin embargo, a medida que los robots se mueven, la incertidumbre en cuanto a su pose aumenta debido a errores acumulativos en la odometría. Esto plantea el problema de construir un mapa y localizar a los robots en el mismo de forma simultánea (SLAM). En este artículo no nos centramos en este problema, por ello empleamos una técnica de SLAM existente conocida basada en un filtro de partículas tipo Rao-Blackwellized [4].

El éxito de la tarea de SLAM depende grandemente de las trayectorias realizadas por los robots, por ejemplo, regresar a zonas previamente exploradas reduce la incertidumbre sobre la pose permitiendo así obtener un mapa más preciso del entorno. Sin embargo, explorar nuevas áreas, pese a ampliar el conocimiento del entorno, genera incertidumbre. Por esta causa, seguir de forma metódica las instrucciones de un operador humano podría resultar en la obtención de un mapa impreciso e inservible para la navegación. Por lo tanto, en esta propuesta, las instrucciones dadas por el operador son evaluadas y tenidas en cuenta por los robots para determinar los movimientos que mejor se ajustan tanto a la creación de un mapa correcto como al seguimiento de las órdenes.

III-B. Exploración Multi-robot Cooperativa Basada en Comportamientos

Nuestra propuesta al problema de la exploración multi-robot cooperativa consiste en un conjunto de comportamientos básicos cuya composición determina la trayectoria de cada robot en el entorno. Estos comportamientos básicos así como la forma en la que se decide la composición de los mismos se explican en esta sección. La sección IV describirá como tener en cuenta los comandos de voz dados por el operador para guiar los movimientos del equipo de robots.

De este modo, la técnica empleada consiste en una arquitectura híbrida de planificación de trayectorias [8]. Para ello, durante el proceso de exploración, el área a ser explorada se divide en una cuadrícula para darle después a cada celda un valor de probabilidad de ocupación. En cada momento, cada celda se puede clasificar como libre, obstáculo o desconocido. Las celdas libres situadas junto a celdas desconocidas se definen como *celdas de frontera*. Con estos datos, se definen 6 comportamientos básicos para resolver el problema de la exploración. Estos 6 comportamientos forman la capa reactiva de la arquitectura. Posteriormente una capa deliberativa controla y activa los comportamientos apropiados para cada momento. A continuación se explican cada uno de los comportamientos. La Tabla I muestra como calcular las fuerzas asociadas a dichos comportamientos.

- Ir a zonas no exploradas. Cada celda desconocida atrae a los robots. De esta forma los robots acuden a aquellas áreas con más celdas por explorar.
- Ir a frontera. Este comportamiento atrae a los robots hacia las celdas de frontera persiguiendo buscar una ruta corta hacia zonas donde adquirir nueva información del entorno.
- Evitar robots. Este comportamiento persigue dispersar a los robots en el entorno para reducir así el tiempo exploración.

TABLA I
FUERZAS DEFINIDAS PARA CADA COMPORTAMIENTO

Ir a zonas no exploradas:	$\vec{F}_k^1 = \frac{1}{M_U} \sum_{i=1}^{M_U} \frac{\vec{s}_i - \vec{p}_k}{r_{i,k}^3}$
Ir a frontera:	$\vec{F}_k^2 = \frac{1}{M_F} \sum_{i=1}^{M_F} \frac{\vec{s}_i - \vec{p}_k}{r_{i,k}^3}$
Evitar robots:	$\vec{F}_k^3 = \frac{1}{X} \sum_{j=1}^X -\frac{\vec{p}_j - \vec{p}_k}{r_{j,k}^3}$
Evitar obstáculos:	$\vec{F}_k^4 = \frac{1}{M_O} \sum_{i=1}^{M_O} -\frac{\vec{s}_i - \vec{p}_k}{r_{i,k}^3}$
Ir a poses precisas:	$\vec{F}_k^5 = \frac{1}{M_P} \sum_{i=1}^{M_P} \frac{\vec{s}_i - \vec{p}_k}{r_{i,k}^3}$
Ir a puerta:	$\vec{F}_k^6 = \frac{\vec{q}_g - \vec{p}_k}{r_{g,k}^3}$
M_U :	Número de celdas no exploradas.
M_F :	Número de celdas de frontera.
M_O :	Número de celdas ocupadas.
M_P :	Número de celdas precisas.
X :	Número de robots.
\vec{s}_i :	Vector de posición de la celda i .
\vec{q}_g :	Vector de posición de la puerta g .
\vec{p}_j :	Vector de posición del robot j .
\vec{p}_k :	Vector de posición del robot k .
$r_{i,k}$:	Distancia desde la celda i al robot k .
$r_{j,k}$:	Distancia desde el robot j al robot k .
$r_{g,k}$:	Distancia desde la puerta g al robot k .

TABLA II
CONSTANTES DE LA ECUACIÓN 1

Estado	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
A: Explorar	1	5	1	20	0	0
B: Reducir incertidumbre	0	0	0	20	5	0
C: Cambiar de zona	0	0	0	20	0	5

- Evitar obstáculos. Los obstáculos repelen a los robots para evitar colisiones.
- Ir a poses precisas. Mediante este comportamiento los robots se dirigen hacia zonas donde pueden recuperar la certidumbre sobre su pose.
- Ir a puerta. El robot navega hacia una puerta, o límite entre dos áreas no visibles entre sí.

Las fuerzas asociadas a dichos comportamientos se combinan según la fórmula:

$$\vec{F}_k = \sum_b \lambda_b \vec{F}_k^b \quad (1)$$

donde λ_b es una variable que determina el peso relativo que tiene ese comportamiento en el sistema. Dichos pesos se han ajustado de forma experimental y sus valores figuran en la Tabla II para diferentes estados como veremos a continuación.

La capa reactiva tiene limitada su influencia a un determinado radio de acción. Por lo tanto, solo considera para calcular la fuerza asociada a cada comportamiento aquellas celdas que caen dentro de dicho radio. Además, las celdas que se encuentran situadas detrás de obstáculos también son descartadas. El radio de acción empleado es superior al rango

del sensor, por lo tanto mientras el robot está explorando una nueva zona, celdas de frontera y celdas no exploradas aparecen dentro del radio de acción de la capa reactiva.

Estos 6 comportamientos se emplean conjuntamente mediante una de las siguientes combinaciones o estados:

- Estado A: Explorar:** Persigue explorar los alrededores del robot cuando hay zonas no exploradas en las proximidades del robot.
- Estado B: Disminuir incertidumbre:** Trata de hacer regresar al robot a zonas previamente exploradas para reducir la incertidumbre en su posición.
- Estado C: Cambiar de zona:** Dirige al robot hacia una zona de puerta cuando no hay nada que explorar en las proximidades del robot.

De esta forma, la capa reactiva se combina con un planificador de alto nivel que decide en cual de los 3 estados trabajará la capa reactiva, es decir que constantes λ_b se emplearán. Para ello se subdivide el mapa de ocupación que se está creando mediante una estructura de árbol como se explica en [8].

Este árbol $T(\text{nodos}, \text{aristas})$ consta de nodos $N_i(c_i, \rho_i, R_i, \gamma_i)$ y aristas $E_{l,m}(d_{l,m}, N_l, N_m)$. Cada nodo N_i representa una posición c_i en el entorno, el coste total para alcanzar dicho nodo ρ_i , una región de celdas asociada R_i , y el número de robots γ_i en dicha zona R_i . Las aristas $E_{l,m}$ representan la trayectoria en línea recta que conecta los nodos N_l y N_m requiriendo recorrer una distancia $d_{l,m}$.

Para evaluar dicho árbol se da un beneficio $B(N_i)$ a cada nodo hoja N_i :

$$B(N_i) = \frac{\text{ICells}(R_i)}{\rho_i^2}, \quad (2)$$

siendo $\text{ICells}(R_i)$ una función que cuenta el número de celdas de interés dentro de la región R_i . A continuación se definen las celdas de interés. Si el robot se encuentra bien localizado de acuerdo a un modelo de histéresis, las celdas de interés serán las celdas no exploradas, si la localización era deficiente se consideran como celdas de interes las celdas de pose de localización precisas que son almacenadas a medida que se explora el entorno mientras se tiene una buena certidumbre en la localizacion. De esta forma la siguiente función recursiva $V(N_b)$ da a cada nodo N_b un valor:

$$V(N_b) = \begin{cases} \frac{\max_j V(N_j)}{1+\gamma_i} & \text{si } N_b \text{ es un nodo rama} \\ B(N_b) & \text{si } N_b \text{ es un nodo hoja} \end{cases} \quad (3)$$

siendo j el conjunto de nodos para los cuales existe una arista $E_{b,j}$ que conecta el nodo N_b con el nodo N_j y siendo $b < j$, o dicho de otro modo, cada nodo N_j es un descendiente directo del nodo N_b .

Como la Ecuación (3) no tiene en cuenta la posible presencia de otros robots en la región actual, la asociada al nodo raíz, en función de las distancias relativas a los otros robots en la región actual se corrigen los valores de los nodos de la siguiente forma:

$$V'(N_f) = \frac{V(N_f)}{d^{\gamma_0}(c_0, c_f)} \prod_{r=0}^{\gamma_0} d(c_0^r, c_f), \quad (4)$$

donde c_0^r es la posición del robot r , y f denota el subconjunto de nodos de primer nivel.

Finalmente, el mejor nodo de primer nivel N_g se determina como aquel que maximiza estos valores corregidos:

$$N_g = \arg \max_{N_f} V'(N_f). \quad (5)$$

La decisión final en cuanto a qué estado emplear se toma en función de la localización y del tipo de nodo que se considera el mejor. Si el mejor nodo es una rama, se emplea el estado de *Cambiar de zona*. Si el mejor nodo se corresponde con una nodo hoja o final del árbol se empleará el estado de *explorar* si la localización es buena o el de *Disminuir la incertidumbre* si la localización es mala.

IV. EXPLORACIÓN MULTI-ROBOT COOPERATIVA CON CONTROL COLABORATIVO

Basándonos en el método de exploración presentado en la sección anterior, en este apartado se presenta la extensión de dicho modelo con un sistema de control colaborativo que permite a un operador interactuar con los robots. En aplicaciones de exploración típicas, el robot o conjunto de robots explora de forma autónoma el entorno eligiendo las mejores trayectorias para minimizar el error en el mapa que está siendo construido. En el método aquí presentado, el operador sugiere nuevas áreas a explorar que son tenidas en cuenta por los robots al mismo tiempo que los otros comportamientos. En contraste con otros métodos, la propuesta presentada en este artículo permite la interacción entre el operador y los agentes remotos. De esta forma se establece una cooperación entre el entorno local y el remoto que tiene en cuenta el conocimiento previo del operador así como la configuración instantánea del entorno a explorar.

IV-A. Comprensión del Lenguaje Natural

El sistema es capaz de reconocer un conjunto de comandos de voz que permiten establecer un punto objetivo sobre el mapa. Las palabras reconocidas mediante software de reconocimiento de voz son evaluadas mediante una función gramatical que permite interpretar frases tales como “explora un poco más hacia la derecha” o “explora mucho más hacia arriba y hacia la izquierda”. Cada una de las expresiones naturales que pueden ser utilizadas por el operador son asociadas con una constante c_i que modela la magnitud del desplazamiento. Por ejemplo, la constante c_1 está asociada al término “un poquito más” mientras que la constante c_2 está asociada a la expresión “un poco más”. La constante $c_6 = 0$ se asocia al no desplazamiento del objetivo. Esto permite al operador mantener la atención sobre un punto en particular. Estas constantes dependen de la aplicación concreta y en nuestro caso toman los valores expuestos en la Tabla III.

TABLA III

CONSTANTES QUE MODELAN LA MAGNITUD DEL DESPLAZAMIENTO

Expresión	c_i	Valor
Explora un poquito más hacia	c_1	0,66
Explora un poco más hacia	c_2	1,33
Explora hacia	c_3	2,0
Explora más hacia	c_4	2,66
Explora mucho más hacia	c_5	3,33
Ve al punto seleccionado	c_6	0

IV-B. Representación de la Incertidumbre

La aplicación que se presenta en este artículo permite dirigir la exploración de un conjunto de robots hacia un área de interés en el mapa. El punto objetivo que debería ser explorado por los robots es representado mediante una distribución gaussiana $N(\mu, \Sigma)$, donde $\mu = (x, y)^T$ es un punto en el mapa referido a un sistema de coordenadas global y donde

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

es una matriz diagonal de covarianza, donde σ_x y σ_y representan la incertidumbre en las direcciones x e y . De este modo, si el deseo del operador es explorar una zona amplia del entorno, esto será representado por una matriz de covarianza grande. Cuando el operador desea explorar únicamente un zona muy concreta del entorno esto se representa por una baja varianza. En particular, se representa la distribución gaussiana mediante una serie de muestras de la misma. Esta representación permite calcular rápidamente una fuerza atractiva para los robots hacia dicho punto. Por este motivo, un nuevo comportamiento llamado *Ir al punto objetivo* se introduce junto con los otros comportamientos definidos previamente afectando al *Estado A*. La fuerza asociada a este comportamiento para el robot k se calcula como:

$$\vec{F}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\vec{s}_i - \vec{p}_k}{r_{i,k}^2} \quad (7)$$

donde \vec{s}_i es la posición de la muestra i de $N(\mu, \Sigma)$, p_k es la posición del robot k y $r_{i,k}$ es la distancia euclídea entre ambas posiciones.

Como se ha comentado, este nuevo comportamiento se induce directamente al *Estado A*. Además, en la capa deliberativa también se tiene en cuenta el punto de destino que ha fijado el operador. Esto se realiza cambiando la función para obtener el valor de las celdas de interés:

$$ICells(R_l) = \sum_{i=1}^{M_U} 1 + \frac{\lambda_7}{1 + \sqrt{\frac{d(i,t)_x^2}{\sigma_x^2} + \frac{d(i,t)_y^2}{\sigma_y^2}}} \quad (8)$$

donde $\vec{d}(i, t) = (d(i, t)_x, d(i, t)_y)$ es el vector distancia desde la celda i hasta el objetivo marcado por el operador.

IV-C. Interacción Robot-Operador

Se considera que en un instante concreto el conjunto de robots está explorando un entorno. Entonces, tras recibir un comando *explora un poquito más hacia arriba*, el punto de referencia inicial se calcula como el valor medio de las posiciones de los robots en el grupo. El siguiente objetivo será calculado de esta forma como:

$$\mu_{i+1} = \mu_i + (c_x, c_y) \cdot \Sigma_i \quad (9)$$

donde $\mu_i = (x, y)_i^T$ y $\mu_{i+1} = (x, y)_{i+1}^T$ son los valores medios de las distribuciones que modelan el punto objetivo a explorar en el instante i e $i+1$ respectivamente, y Σ_i es la matriz de covarianza definida en la ecuación 6. El vector (c_x, c_y) define una dirección y un modulo, basándose en las constantes definidas en la Tabla III. Por ejemplo si el operador dice "Explora mucho más hacia la izquierda y un poquito más hacia abajo" el vector sería $(c_x, c_y) = (-2, 0, 1)$. Si el operador dice varios comandos de forma consecutiva en el tiempo, se asume que desea refinar la posición de dicho punto reduciendo la varianza de la distribución. Por ello, la varianza se modifica siguiendo la siguiente expresión:

$$\Sigma_{i+1} = \sqrt{\Sigma_i} \quad (10)$$

Con esta solución, el operador puede de forma sencilla especificar grandes desplazamientos al comenzar a dar instrucciones y posteriormente pequeñas correcciones para precisar la zona que desea explorar. Además el peso de este comportamiento λ_7 se modifica cada vez que el operador da una instrucción. De esta forma, si el operador repite comandos de forma insistente el peso asociado a explorar la zona que ha especificado en primer lugar será muy alto. El peso asociado se disminuye con el tiempo si el operador no ha dado nuevas instrucciones por un tiempo. De esta forma el comportamiento *Ir al punto objetivo* se va cancelando hasta hacerse nulo y proseguir en ese momento con una exploración totalmente autónoma.

V. EXPERIMENTOS

En esta sección presentamos un conjunto de experimentos realizados con un grupo de robots móviles. Los experimentos fueron realizados en nuestro laboratorio de robótica móvil, que puede ser considerado como un entorno de oficinas. El entorno es aproximadamente de $30 \times 30m$ y contiene dos bucles en su interior, según se muestra en la figura 2 (que fueron creados *ex profeso* para realizar los ensayos). Todos los experimentos fueron supervisados por un operador humano quien comandaba a los robots mediante voz. Los valores de las constantes λ_i definidas en la Ecuación 1 tomaron los valores indicados en la Tabla II, ajustadas experimentalmente tras un conjunto inicial de experimentos. En los experimentos se utilizaron 3 robots Pioneer P3-AT, equipados con pares estéreo STH-MDCS2-VAR de Videre Design y sensores SONAR que nos proporcionan información sobre los obstáculos en el entorno.

Se presentan los resultados de tres experimentos diferentes que simulan tres situaciones diferentes:

TABLA IV

COMANDOS DE LENGUAJE NATURAL EMITIDOS EN EL 2º EXPERIMENTO

Punto	Comando
1	Explora hacia adelante
2	Ve al punto seleccionado
3	Ve al punto seleccionado

- En la primera situación, los robots exploran un entorno remoto completamente desconocido y, simultáneamente, el operador humano supervisa la tarea y no envía comandos. En este caso, el equipo de robots realiza una exploración de forma totalmente autónoma.
- En el segundo experimento el operador humano interacciona con el equipo de robots emitiendo comandos de acuerdo con sus intenciones. En este caso, el operador está interesado en explorar un punto en concreto del mapa. Una vez el punto se ha seleccionado en el mapa, el operador emite comandos de voz para mantener la atención de los robots sobre ese punto. La lista de comandos de voz emitidos por el operador durante el experimento se presentan en la Tabla IV.
- En el tercer experimento el operador humano, otra vez, emite comandos para sugerir la exploración de ciertos puntos en el mapa. Sin embargo, en este caso, el operador cambia de opinión, dirigiendo la exploración hacia puntos diversos en el mapa, en consecuencia, las trayectorias de los robots cambian y reflejan esta circunstancia.

Los resultados del primer experimento se detallan en la Figura 2(a). Aquí se presentan el mapa y las trayectorias seguidas por cada uno de los robots. Según se puede observar en la figura, cada uno de los robots inicia la exploración desde una posición diferente en el mapa y realiza una trayectoria, según el resultado de las Ecuación (1) y de acuerdo con los comportamientos expuestos en el apartado III. Se puede observar que en determinados momentos durante la exploración, los robots con un grado alto de incertidumbre cambian al estado B (reducir incertidumbre) y se mueven a zonas del mapa previamente exploradas, reduciendo así su incertidumbre. Un detalle de este cambio de estado se presenta en la Figura 2(b).

En el segundo experimento el operador emite un conjunto de comandos de lenguaje natural. Los comandos se emiten de forma consecutiva y se listan en la Tabla IV. En la figura 3 se presentan las trayectorias de todos los robots. Se puede observar que los robots tienden hacia el área propuesta por el usuario, llegando a un consenso entre la tarea de explorar y la de examinar esa zona del mapa. Se puede observar claramente la influencia del operador en el momento de emitir un comando, ya que las trayectorias de los robots se modifican al añadir la fuerza definida en la Ecuación 7.

Finalmente, la figura 4 presenta los resultados del tercer experimento. En este caso, el operador emite los comandos listados en la Tabla V. En este experimento, el área que desea explorar el operador cambia durante el experimento.

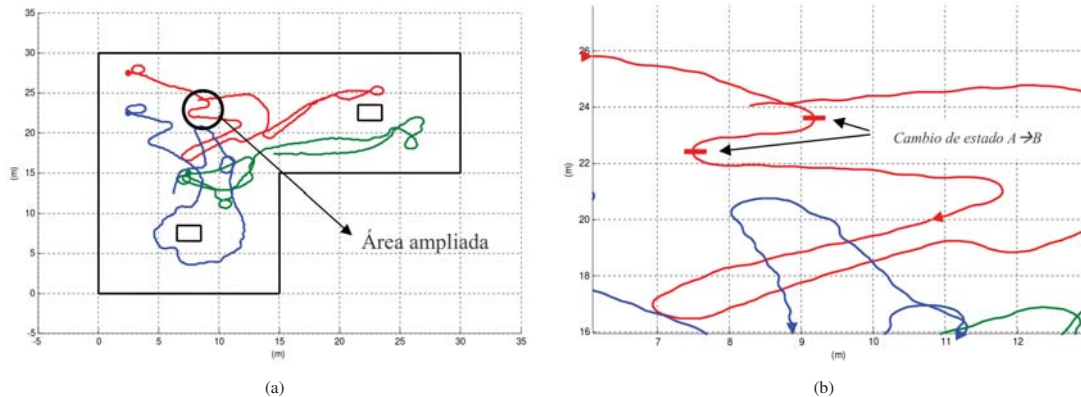


Fig. 2. a. Trayectorias de los robots en el experimento 1. b. Cambio en el estado de exploración

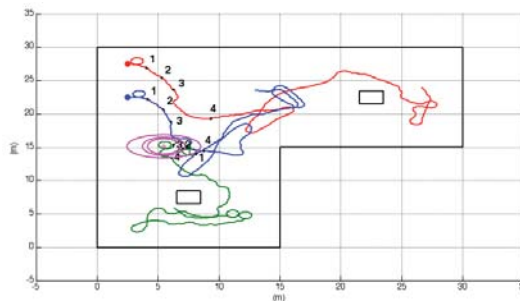


Fig. 3. Trayectorias realizadas en el experimento 2.

TABLA V
COMANDOS DE LENGUAJE NATURAL EMITIDOS EN EL EXPERIMENTO 3

Punto	Comando
1	Explora mucho más hacia adelante
2	Explora hacia la izquierda
3	Explora más hacia adelante
4	Explora hacia adelante
5	Explora un poco más hacia adelante
6	Explora un poquito más adelante

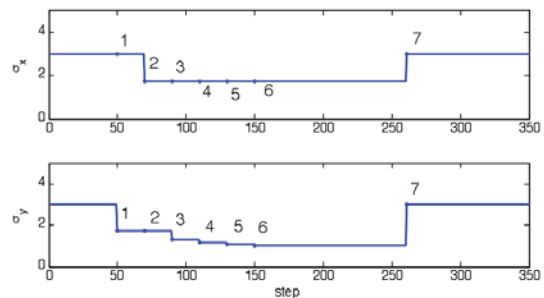


Fig. 5. Desviación estándar del punto de destino.

Según se definió en la ecuación 10, la varianza asociada al punto de destino se reduce con cada comando que se emite, permitiendo al operador dirigir la exploración de forma más precisa. La figura 5 presenta la incertidumbre asociada al punto de destino. Se puede observar que la incertidumbre se reduce con cada comando del operador. Dicha incertidumbre se reduce únicamente en la dirección que le interesa al operador, y se mantiene en la otra. La figura 6 se presenta el valor de la constante λ_7 . Este peso se asocia a la interacción del operador con el equipo de robots y se modifica en cada instante de tiempo.

VI. CONCLUSIONES

En este artículo, se ha presentado un sistema de teleoperación colaborativa que incorpora la interacción hombre-máquina a través del procesamiento del lenguaje natural. Las capacidades de este sistema han sido mostradas sobre el problema de la exploración colaborativa con un conjunto de robots móviles y empleando un modelo basado en comportamientos. Las órdenes dadas por el operador humano son evaluadas por los robots y son tenidas en cuenta a

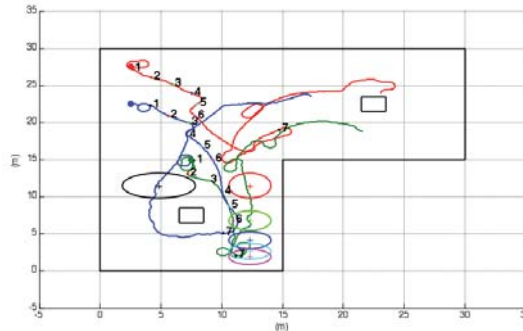


Fig. 4. Trayectorias realizadas en el experimento 3.

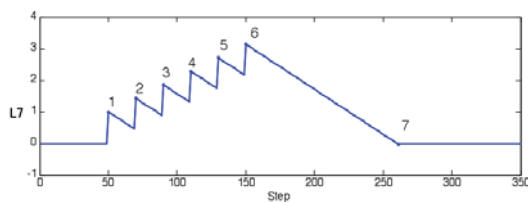


Fig. 6. Valor de λ_7 .

modo de sugerencias. De esta forma, el mapa de un entorno desconocido es generado tomando ventaja de la experiencia del operador así como de los requerimientos del algoritmo de SLAM. Los resultados de estos experimentos muestran un buen rendimiento del sistema. La proposición por parte del operador de nuevas áreas a explorar causa que los robots varíen sus trayectorias, este efecto se ve incrementado a medida que el operador insiste en una orden. Este sistema podría ser aplicado en aplicaciones de búsqueda y rescate donde el operador puede establecer una prioridad sobre las áreas a explorar conforme a su experiencia.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el Gobierno de España (Ministerio de Ciencia e Innovación) a través del proyecto DPI2010-15308 Exploración Integrada de Entornos mediante Robots Cooperativos para la Creación de Mapas 3D Visuales y Topológicos que puedan ser usados en Navegación con 6 Grados de Libertad.

REFERENCIAS

- [1] D.J. Bruemmer, D. Dudenhoefler, and J. Marble. Dynamic autonomy for urban search and rescue. In *In 2002 AAAI Mobile Robot Workshop, Edmonton, Canada.*, 2002.
- [2] T. Fong, C. Thorpe, and C. Baur. Advanced interfaces for vehicle teleoperation: Collaborative control, sensor fusion displays, and remote driving tools. *Autonomous Robots*, 11(1):77–85, 2001.
- [3] A. Gil, O.M. Mozos, M. Ballesta, and O. Reinoso. A comparative evaluation of interest point detectors and local descriptors for visual slam. *Machine Vision and Applications*, 21(6), 2010.
- [4] A. Gil, O. Reinoso, M. Ballesta, and M. Juliá. Multi-robot visual slam using a rao-blackwellized particle filter. *Robotics and Autonomous Systems*, 58(1):68–80, 2010.

- [5] K. Goldberg, B. Chen, R. Solomon, S. Bui, B. Farzin, J. Heitler, D. Poon, and G. Smith. Collaborative teleoperation via the internet. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, volume 2, pages 2019–2024. IEEE, 2000.
- [6] Object Management Group. *Common object request broker: architecture and specification*, 1995.
- [7] G. Hoffman and C. Breazeal. Collaboration in human-robot teams. In *Proc. of the AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, Chicago, IL, USA*. Citeseer, 2004.
- [8] M. Juliá, O. Reinoso, A. Gil, M. Ballesta, and L. Payá. A hybrid solution to the multi-robot integrated exploration problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(4):473–486, 2010.
- [9] M. Juliá, O. Reinoso, A. Gil, M. Ballesta, and L. Payá. Behaviour based multi-robot integrated exploration. *Int. Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 7(9), September 2011.
- [10] A. Monferrer and D. Bonyuet. Cooperative robot teleoperation through virtual reality interfaces. In *IEEE Proceedings of the Sixth International Conference on Information Visualisation (IV'02)*, pages 243–248, 2002.
- [11] L. Payá, A. Gil, O. Reinoso, M. Ballesta, and R. Neco. Behaviour-based multi-robot formations using computer vision. In *6th IASTED Int. Conf. on Visualization, Imaging and Image Processing*, pages 488–494, 2006.
- [12] J. Vazquez and C. Malcolm. Distributed multirobot exploration maintaining a mobile network. In *Proc. of the 2nd Int. IEEE Conf. on Intelligent Systems*, volume 3, pages 113–118, June 2004.
- [13] J. Vertut and P. Coiffet. *Teleoperation and robotics: evolution and development*. Kogan page, 1986.