

# XXXI

# jornadas de Automática

Jaén 8 al 10 de septiembre de 2010



UNIVERSIDAD DE JAÉN

ISBN: 978-84-693-0715-1



**CEA**

[Comunicaciones](#)

[Comités](#)

[Programa](#)

[Patrocinadores](#)



# Herramienta interactiva para simulación de algoritmos de exploración mediante robots cooperativos en entornos virtuales

O. Reinoso, M. Juliá, A. Gil, L.M. Jiménez, M. Ballesta  
Avda. Universidad s/n 03202 Elche (Alicante), o.reinoso@umh.es

## Resumen

*En este artículo se presenta una herramienta interactiva desarrollada para facilitar la simulación y experimentación de algoritmos de exploración mediante el uso de robots móviles. Esta herramienta permite el acceso a la misma a través de internet, de manera que se integra dentro de un laboratorio virtual donde los alumnos únicamente necesitan disponer de un acceso a través de internet para su uso. Mediante el uso de esta herramienta a través de internet, los alumnos pueden realizar diferentes simulaciones de entornos diversos así como la sintonización de los parámetros en cada uno de los algoritmos implementados con objeto de poder constatar las diferencias entre los mismos.*

**Palabras clave:** Laboratorio virtual, exploración, robótica móvil, robots cooperativos.

## 1 INTRODUCCIÓN

La mayor parte de las asignaturas que se imparten en las nuevas titulaciones de grado incluyen una componente mayoritariamente práctica. Esto ha venido sucediendo en las titulaciones de ingeniería donde los diferentes contenidos de las materias que integran las asignaturas se realizaban tradicionalmente en aulas de teoría o en laboratorios (bien de tipo informático o equipados con maquetas y dispositivos físicos). A través de los contenidos prácticos los estudiantes pueden adquirir determinadas habilidades distintas a las adquiridas a través de los conocimientos teóricos. En ocasiones, la realización de prácticas resulta fundamental para poder comprender y afianzar los conocimientos previamente impartidos en teoría. Tradicionalmente, estos contenidos prácticos se realizan en laboratorios donde existe un alto grado de componentes o dispositivos físicos, bien reales o maquetas representativas, a través de los cuales los alumnos pueden realizar los distintos experimentos. El acceso a estos recursos se ha realizado hasta hace unos años de forma presencial, de manera que los alumnos se trasladaban a estos laboratorios durante una serie de horas previamente

fijadas.

Habitualmente los alumnos han realizado estos contenidos prácticos mediante el acceso a los laboratorios donde se ubicaban los equipos con los que interaccionaban. Esto ha originado una serie de inconvenientes entre los que cabe la pena citar dos. El primero de los mismos es la imposibilidad de que cada uno de los alumnos que integran el grupo de prácticas pueda disponer de un dispositivo físico real o maqueta representativa del mismo, para un uso individual (o bien en formato de pequeños grupos). Esto es debido generalmente al alto coste de estos equipos. Por otro lado, y como segundo inconveniente es preciso citar la dificultad de acceso a estancias para la realización de prácticas fuera del horario asignado para las mismas. Esto significa que en asignaturas con un elevado número de alumnos, deban realizar estas prácticas con estos equipos grupos de elevado número de componentes lo que degrada significativamente el proceso de aprendizaje. Además, en ocasiones los alumnos no pueden acudir a las sesiones programadas (por ejemplo por coincidencia con otras materias, o trabajos realizados de forma paralela). Se observa así la necesidad de poder diseñar herramientas que posibiliten el acceso a contenidos prácticos desde cualquier lugar y en cualquier instante de tiempo sin tener que acudir físicamente donde se encuentran disponibles estos dispositivos.

Durante los últimos años, se han ido desarrollando un elevado número de herramientas y laboratorios constituidos por dispositivos físicos reales o virtuales que posibilitan la realización de estas prácticas docentes a través de internet. Estos laboratorios constituyen hoy en día una clara alternativa a los laboratorios tradicionales. En la tabla 1 se desglosa las diferentes alternativas consideradas hoy en día para el desarrollo de laboratorios a distancia [6]. Como ejemplo de este tipo de laboratorios se puede citar los distintos dispositivos y laboratorios integrados dentro de un mismo proyecto AutomatL@bs, fruto del cual un conjunto de alumnos de distintas universidades comparten y acceden a través de internet recursos de todas las universidades que participan en el

Tabla 1: Clasificación de los laboratorios docentes

	Real	Simulado
Local	Laboratorio tradicional	Laboratorio virtual monousuario
Remoto	Laboratorio remoto	Laboratorio virtual multiusuario

proyecto [2] [17].

El objetivo de este artículo consiste en presentar una herramienta que a modo de laboratorio virtual se ha desarrollado en la Universidad Miguel Hernández de Elche, con el objetivo de posibilitar la realización de prácticas en temas relacionados con la exploración de entornos no determinísticos. Desde este punto de vista esta herramienta se encuadra dentro de la tipología considerada como Laboratorio Virtual Multiusuario, según la tipología representada en la Tabla 1.

El resto del artículo se encuentra organizado como se indica a continuación. En la siguiente sección se especificarán algunos laboratorios tanto virtuales como remotos diseñados hasta el momento dentro del ámbito de la robótica. A continuación se presentarán algunos detalles de configuración de la herramienta desarrollada. En la siguiente sección se especificarán los algoritmos que se encuentran implementados dentro de esta herramienta, para indicar y presentar posteriormente algunos detalles de utilización de la misma. Por último se resumirán las conclusiones principales.

## 2 LABORATORIOS DE ROBÓTICA A DISTANCIA

Durante los últimos años han ido apareciendo diferentes asignaturas con contenidos relacionados con la robótica. De igual forma con la transformación en los nuevos planes de estudio, estas asignaturas han perdurado en los nuevos planes una vez adaptados. Este tipo de asignaturas con contenidos relacionados dentro del ámbito de la robótica necesitan llevar asociadas un conjunto de prácticas dada su naturaleza. Tradicionalmente los laboratorios para realizar prácticas de robótica eran de tres tipos diferentes:

- Laboratorios informáticos. Este tipo de laboratorios se utilizaban habitualmente para el desarrollo de prácticas en simulación, o bien para el testeo de algoritmos.
- Laboratorios con brazos robóticos. Generalmente sobre los mismos se realizan prácticas de programación y de realización de tareas de manipulado o entornos de fabricación.
- Laboratorios de robots móviles. Sobre los mismos se realizan prácticas de orientación, localización, navegación, etc. Usualmente, este tipo de prácticas llevan asociado un mayor contenido algorítmico que las anteriores.

Tanto en un caso como en otro, disponer de robots, bien sea fijos o móviles, en un laboratorio de forma que los alumnos puedan interactuar con los mismos mediante el desarrollo de diferentes experimentos es bastante complicado principalmente por el alto coste que conllevan estos equipos. Además es preciso tener en cuenta el tamaño de los laboratorios sobre los que puedan realizarse estas prácticas. Por este motivo el diseño y realización de laboratorios donde poder realizar prácticas docentes con robots resulta de extraordinario interés en el mundo educativo.

En este sentido, durante los últimos años se han ido desarrollando diferentes laboratorios o herramientas docentes que tienen todas ellas en común la realización de experimentos a través de internet mediante el uso de robots (sean estos finalmente dispositivos físicos reales o simulados). Así por ejemplo, Candelas et. al. han desarrollado un laboratorio virtual y remoto que permite la realización de prácticas para la interacción de un brazo robótico tanto de forma simulada como con un sistema físico real [1]. Este laboratorio permite manejar el brazo robot a través de internet que en una primera instancia se encuentra constituido por una simulación realista del mismo en un entorno virtual sobre el que se desenvuelve. Otro ejemplo donde se presenta un laboratorio remoto que posibilita la interacción con un brazo robot a distancia real y en el que se dispone de una realimentación eficaz de las trayectorias realizadas por el robots lo podemos encontrar en [19].

Además del caso de la utilización de los brazos robóticos dentro de los laboratorios a distancia, últimamente han aparecido diferentes experiencias donde se presenta el uso y desarrollo de laboratorios y herramientas a través de internet para la realización de prácticas docentes con robots móviles. Este tipo de laboratorios permiten la interacción a distancia tanto con robots móviles virtuales (que se desenvuelven en un entorno virtual), como con robots móviles reales (que se de-

senvuelven en un entorno real remoto). Por ejemplo, Masar et. al han presentado una arquitectura que permite desarrollar laboratorios virtuales con robots móviles de manera que puedan ser manejados a distancia[12]. Khamis et. al han presentado diferentes experiencias en el uso de un laboratorio remoto de robots móviles para la navegación de estos dentro de un entorno remoto. En los análisis realizados se ha presentado un especial interés en las capacidades que se debe ofrecer al usuario para manejar de forma remota este tipo de dispositivos [8] [9].

En experiencias previas dentro del grupo de investigación dentro de esta temática se ha desarrollado previamente una arquitectura de laboratorio remoto constituido por robots reales (Wifibot), para la realización de prácticas sencillas con este conjunto de dispositivos [14]. En este trabajo se presenta la arquitectura desarrollada así como las diferentes prácticas docentes integradas dentro de este laboratorio remoto donde los alumnos interactúan con el entorno remoto donde se encuentran físicamente estos robots. La última generación de laboratorios remotos con robots móviles, permiten desarrollar tareas dentro de este entorno remoto sobre el que se tiene una supervisión continua en todo momento. Este tipo de soluciones deben prestar atención a problemas típicos como seguridad, retardos en la comunicación, modularidad, etc. En este sentido, Sagioglu et. al presentan un sistema vía web en que se utiliza una plataforma constituida por un robot móvil para el desarrollo de prácticas docentes a distancia [15].

También en el caso de herramientas virtuales han ido apareciendo últimamente diferentes desarrollos para la realización de prácticas con entornos virtuales remotos constituidos por robots móviles que permiten a los alumnos probar y testear diferentes algoritmos para el desarrollo de una tarea determinada. Así por ejemplo, en [5] se presenta una herramienta interactiva que permite a los alumnos probar y testear diferentes técnicas de planificación de movimientos y trayectorias de forma tal que evidencien las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

La misma situación se contempla en la herramienta presentada en este trabajo donde se posibilita a los alumnos el testeo y análisis de diferentes algoritmos a través de internet en este caso para la exploración de entornos mediante robots móviles. La exploración de entornos mediante el uso de un conjunto de robots que actúan de forma coordinada constituye un campo de aplicación donde es difícil disponer de herramientas que permitan sintonizar la multitud de parámetros que afectan la mayor parte de estos algoritmos y

establecer un análisis en función de los mismos.

### 3 HERRAMIENTA DESARROLLADA

La herramienta desarrollada permite a los usuarios validar y contrastar diferentes algoritmos utilizados tradicionalmente para la exploración de entornos mediante un conjunto de robots móviles. Como se ha indicado previamente constituye un laboratorio virtual multiusuario, donde diferentes usuarios al mismo tiempo pueden interactuar con esta herramienta sintonizando los parámetros en función del análisis que estimen más oportuno. Como se refleja en la figura 1, el laboratorio virtual presentado en este artículo está constituido por tres partes perfectamente diferenciadas:

- Interfaz gráfica de usuario.
- Servidor de acceso remoto.
- Librería de exploración implementada.

#### 3.1 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

La interfaz gráfica desarrollada posibilita que el alumno interactúe con el sistema virtual ubicado en el servidor remoto. Se encuentra desarrollada a través de un applet de java. Este applet se instala y descarga en cualquier navegador web al entrar dentro de la página del laboratorio virtual que es servida por el servidor HTTP instalado. Lo primero que es preciso realizar antes de poder interactuar con la herramienta a través de internet consiste en realizar una validación sobre el sistema. Una vez se ha validado el estudiante, ya se encuentra en disposición de interactuar con la herramienta virtual desarrollada configurando todos los algoritmos que vaya a testear. Para la ejecución de cada uno de estos algoritmos será necesario previamente la sintonización de todos los parámetros asociados a cada uno de estos algoritmos de exploración implementados dentro de la herramienta. En la figura 2 se observa el aspecto de la herramienta.

A través de esta interfaz, el usuario puede configurar todos los parámetros para hacer una simulación de cualquiera de los métodos de exploración implementados. Además es posible visualizar el proceso de exploración a medida que éste se va desarrollando así como descargar los ficheros de resultados una vez que ha finalizado la exploración. Desde el punto de vista de funcionamiento, una vez que el usuario se ha validado, es preciso seleccionar el algoritmo de SLAM

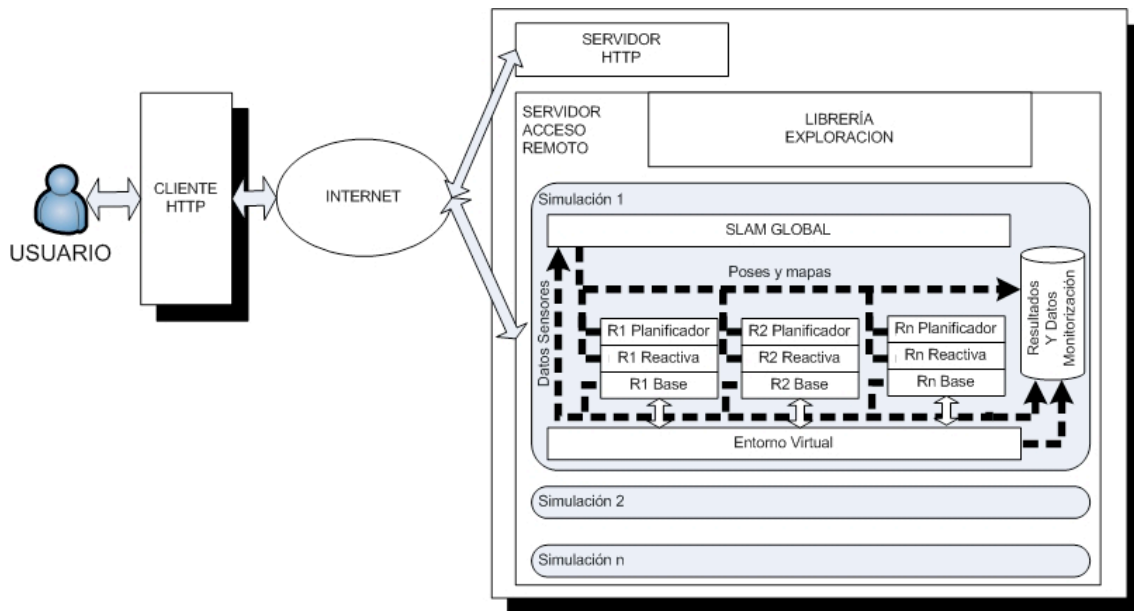


Figura 1: Arquitectura del laboratorio virtual desarrollado

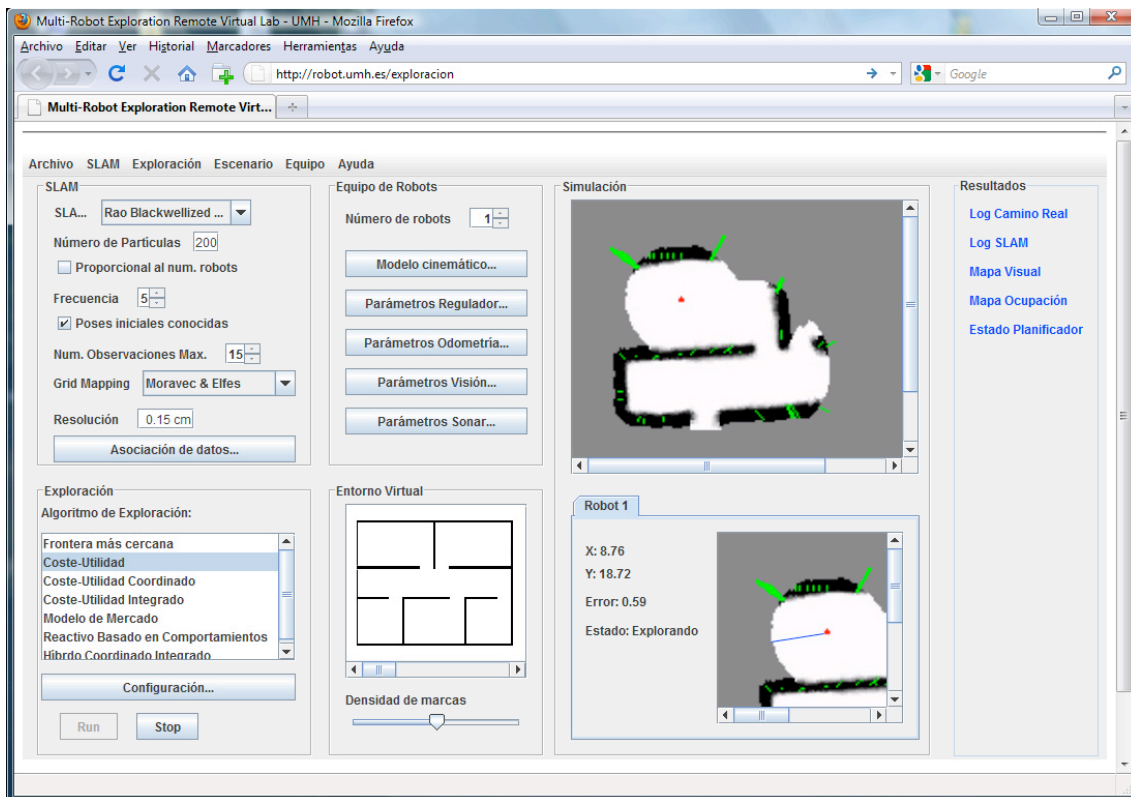


Figura 2: Aplicación del laboratorio virtual

que va a utilizarse en los mecanismos de exploración integradas implementados. Asimismo es posible configurar las características de los robots que van a realizar la exploración. Es posible seleccionar las características de estos robots así como el número de robots que participan en el equipo. Además es posible seleccionar entre diferentes entornos de simulación y variar sus características. En resumen las posibilidades que nos ofrece la herramienta virtual consisten en seleccionar los siguientes parámetros y características:

- Algoritmo de exploración
- Algoritmo de SLAM en la exploración
- Características de los robots: cinemática, configuración, etc.
- Entorno de exploración
- Sintonización de parámetros en el algoritmo
- Número de robots para la exploración
- Posición inicial de los robots

Como se ha comentado con anterioridad una vez finalizada la exploración, se vuelcan los resultados de la misma en ficheros de datos, de manera que el usuario pueda contrastar y validar los resultados alcanzados al compararlos con otros algoritmos y parámetros de configuración. Además se almacenan las trayectorias realizadas por cada uno de los robots durante la exploración.

### 3.2 SERVIDOR DE ACCESO REMOTO

El servidor de acceso remoto permite gestionar las diferentes peticiones que realiza el usuario una vez que ha entrado en la herramienta a través de internet. Este servidor se encuentra desarrollado íntegramente en C++. Dentro de este servidor de acceso remoto se integran las diferentes particularidades de la aplicación. Lo primero que gestiona este servidor es la autenticación del usuario que se ha conectado a este servidor. Esto se realiza a través de una base de datos de usuarios y en función de los diferentes permisos para cada uno de ellos. Una vez identificado el usuario como válido, en el applet cliente se configuran todos los parámetros para lanzar en simulación en el servidor. Como se observa en la figura 1 dentro de este servidor de acceso remoto se integra la librería de exploración implementada y que posibilita la ejecución de todos los algoritmos de implementación disponibles a través de la interfaz de usuario. Iniciada la simulación indicada por el usuario, el servidor de acceso remoto atiende toda la gestión para que en la ventana del cliente se visualicen los

datos de monitorización y de progreso de la exploración en función del algoritmo seleccionado. Una de las características principales de este servidor de acceso remoto es la posibilidad de trabajar con múltiples clientes de forma simultánea, en función de las capacidades del equipo. Esta es una de las ventajas propias de este tipo de herramientas, al ofrecer la posibilidad de que diferentes alumnos puedan desde lugares remotos interactuar con los diferentes algoritmos de exploración implementados en la aplicación desarrollada.

## 4 ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

Por exploración se entiende el proceso en el que uno o varios dispositivos recorren un entorno (desconocido o conocido) con objeto de determinar determinadas características sobre el mismo. En el caso de utilizar robots móviles como dispositivos para realizar la exploración, el resultado de la exploración consistirá en planificar las diferentes trayectorias que deben seguir cada uno de los robots que configuran el equipo para recorrer todo el entorno. En caso de que el entorno sea desconocido, a la vez que se realiza la exploración, será necesario acometer un proceso de construcción del mapa de forma simultánea a la localización por parte de cada uno de los robots dentro de este mapa. Este es el caso que nos ocupa y que se denomina sistemas de exploración integrados (ver Figura 3).

Dada esta descomposición del problema, en la herramienta desarrollada se han incorporado tanto algoritmos de creación de mapas y localización dentro e los mismos (SLAM) por un lado, como mecanismos de exploración por otro. De esta manera la creación de los mapas a partir de diversas marcas visuales que se encuentren en los entornos virtuales considerados, se acomete de forma conjunta para todo el equipo de robots considerado. Para acometer este proceso se han implementado dos posibilidades diferentes:

- Filtro de Kalman extendido [3]
- Filtro de partículas te tipo Rao-Blackwellized [13]

Dentro de la implementación considerada en la herramienta, se emplea una medida del sensor de rango incorporado en los robots para genera un mapa de ocupación necesario para poder planificar las trayectorias de los robots.

En cuanto a los algoritmos considerados para planificar las trayectorias a realizar por cada uno

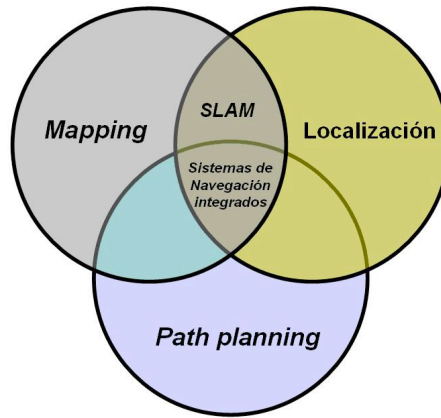


Figura 3: Mecanismos de exploración integrados

de los robots con objeto de explorar el entorno virtual, se han implementado dentro de la aplicación los siguientes algoritmos:

- Frontera más cercana [18]
- Coste-Utilidad [4]
- Coste-Utilidad Coordinado [16]
- Coste-Utilidad Integrado [11]
- Modelo de mercado [20]
- Reactivo basado en comportamientos [10]
- Híbrido Coordinado Integrado [7]

En la tabla 2 se presenta una clasificación de estos métodos implementados en función del grado de coordinación de los robots en los mismos y del tipo de exploración que consideran.

## 5 CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una nueva herramienta desarrollada para la realización de prácticas a distancia de robótica móvil para el testeo y aprendizaje de mecanismos de exploración integrados. La herramienta desarrollada se ha configurado mediante el desarrollo de un laboratorio virtual, de manera que los alumnos puedan acceder a la misma en cualquier lugar y en cualquier instante de tiempo siempre que dispongan de una conexión a internet. En la herramienta desarrollada se han implementado un conjunto de algoritmos (en total siete) empleados de forma clásica para resolver problemas de exploración en entornos no determinísticos, a partir de los cuales el alumno puede sintonizar una amplia cantidad de parámetros, de manera que se posibilite el análisis de estos algoritmos mediante un proceso de aprendizaje interactivo.

Esta herramienta virtual desarrollada posibilita el aprendizaje interactivo, ya que el alumno puede ir modificando cada uno de los parámetros que afectan a los algoritmos implementados, y a medida que se realiza la simulación se presentan las diferentes trayectorias ejecutadas por parte de cada uno de los robots que constituyen el equipo.

Esta herramienta virtual se integra dentro del conjunto de experiencias en laboratorios a distancia desarrollados dentro de la Universidad Miguel Hernández de Elche, tanto a nivel de laboratorio remoto como laboratorio virtual. En la actualidad se está ultimando la herramienta desarrollada comprobando su funcionamiento dentro de unas sesiones desarrolladas en la asignatura Técnicas Avanzadas de Planificación en Robótica Móvil, dentro del Master de Investigación en Tecnologías Industriales y de Telecomunicación impartido en la Universidad Miguel Hernández de Elche.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias en parte al Ministerio de Educación y Ciencia a través del proyecto DPI2007-61197, con título 'Sistemas de percepción visual móvil y cooperativo como soporte para la realización de tareas con redes de robots'.

## Referencias

- [1] F.A. Candelas, S. Puente, F. Torres, F. Ortiz, P. Gil, and J. Pomares. A virtual laboratory for teaching robotics. *International Journal of Engineering Education*, 19(3):363–370, 2003.
- [2] R. Costa-Castello, M. Valles, L.M. Jimenez, L. Diaz-Guerra, A. Valera, and R. Puerto. Integración de dispositivos físicos en un laboratorio remoto de control mediante diferentes plataformas: Labview, matlab y c/c++. *Re-*

Tabla 2: Clasificación de los métodos implementados

	No coordinados	Coordinados
No integrados	Frontera más cercana Coste Utilidad	Coste Utilidad Coordinado Modelo de mercado Reactivo Basado en Comportamientos
Integrados	Coste Utilidad Integrado	Híbrido Coordinado Integrado

*vista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7(1):23–35, 2010.

- [3] M.W.M.G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, H.F. Durrant-Whyte, and M. Csorba. A solution to the simultaneous localization and map building (slam) problem. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 17(3):229–241, June 2001.
- [4] H. H. Gonzalez-Baños and J. C. Latombe. Navigation strategies for exploring indoor environments. *International Journal of Robotics Research*, 21(10), 2002.
- [5] J.L. Guzman, M. Berenguel, F. Rodriguez, and S. Dormido. An interactive tool for mobile robot motion planning. *Robotics and Autonomous Systems*, 56(5):396–409, 2009.
- [6] J.L. Guzman, M. Dominguez, M. Berenguel, J.J. Fuertes, F. Rodriguez, and P. Reguera. Entornos de experimentación para la enseñanza de conceptos básicos de modelado y control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7(1):10–22, 2010.
- [7] Miguel Juliá, Óscar Reinoso, Arturo Gil, Mónica Ballesta, and Luis Payá. A hybrid solution to the multi-robot integrated exploration problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, In Press, Corrected Proof:–, 2010.
- [8] A. Khamis, M. Perez-Vernet, and K. Schilling. A remote experiment on motor control of mobile robots. *Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2002.
- [9] A. Khamis, D.M. Rivero, F. Rodriguez, and M. Salichs. Pattern-based architecture for building mobile robotics remote laboratories. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003.
- [10] H. Lau. Behavioural approach for multi-robot exploration. In *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA'03)*, Brisbane, Australia, 2003.
- [11] A.A. Makarenko, S.B. Williams, F. Bourgoult, and F. Durrant-Whyte. An experiment in integrated exploration. In *Proceedings of the IEEE-RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'02)*, Lausanne, Switzerland, 2002.
- [12] I. Masar, A. Bischoff, and M. Gerkes. Remote experimentation in distance education for control engineers. *Proceedings of Virtual University*, 2004.
- [13] M. Montemerlo and S. Thrun. Simultaneous localization and mapping with unknown data association using fastslam. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'03)*, Taipei, Taiwan, 2003.
- [14] L. Paya, M. Julia, O. Reinoso, A. Gil, and L.M. Jimenez. Behaviour-based multi-robot formations using computer vision. *Proceedings of 6th IASTED International Conference on Visualization, Imaging and Images Processing*, pages 488–494, 2006.
- [15] S. Sagioglu and N. Yilmaz. Web-based mobile robot platform for real-time exercises. *Expert systems with Applications*, 36(2):3153–3166, 2009.
- [16] R. Simmons, D. Apfelbaum, W. Burgard, D. Fox, M. Moors, S. Thrun, and H. Younes. Coordination for multi-robot exploration and mapping. In *Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence*, Austin, TX, USA, 2000.
- [17] H. Vargas, J. Sanchez, C.A. Jara, F. Candelas, O. Reinoso, and J.L. Diez. Docencia en automática: Aplicación de las tic a la realización de actividades prácticas a través de internet. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7(1):36–45, 2010.
- [18] B. Yamauchi. A frontier based approach for autonomous exploration. In *Proceedings of*



*the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA '97)*, Monterey, CA, USA, 1997.

- [19] S. You, T. Wang, R. Eagleson, C. Meng, and Q. Zhang. A low-cost internet-based telerobotic system for access to remote laboratories. *Artificial Intelligence in Engineering*, 15(3):265–279, 2001.
- [20] R. Zlot, A. Stentz, M. B. Dias, and S. Thayer. Multi-robot exploration controlled by a market economy. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '02)*, Washington, DC, USA, 2002.