



Resumen de Tesis: Exploración Completa Basada en Comportamientos Cooperativos para un Agente Autónomo Móvil

Alberto Poncela Gonzalez

Departamento de Tecnología Electrónica, ETSI Telecomunicación, Universidad de Málaga
Campus de Teatinos, s/n, 29071, Málaga
apg@dte.uma.es

Resumen En esta Tesis se desarrolla un sistema eficiente de navegación basado en comportamientos para la exploración completa de entornos total o parcialmente desconocidos por parte de un agente autónomo móvil. El sistema de exploración ha sido ampliamente probado tanto en entornos simulados como reales, habiendo demostrado su correcto funcionamiento, ya que se alcanza la cobertura completa de una manera totalmente autónoma.

Palabras clave: Sistema Autónomo Móvil, Arquitectura Híbrida, Comportamientos, Razonamiento Basado en Casos, Cooperación de Comportamientos, *PCA*, Mapa Topológico, *TSP*

1. Introducción

La Robótica se usa hoy de forma extendida en multitud de aplicaciones, muchas de ellas basadas en plataformas que se desplazan por el entorno, como en los robots exploradores, de vigilancia o de rescate. Su operación se desarrolla, en muchas ocasiones, en entornos dinámicos, por lo que es necesario llevar a cabo la exploración de los entornos de trabajo para adquirir conocimiento de los mismos.

Dentro de esta disciplina, la Robótica, existe un significativo potencial investigador en España. Según el Libro Blanco de la Robótica [2], existen 10 líneas prioritarias hacia las cuales habría que enfocar la investigación en nuestro país. La más importante de todas ellas es la Robótica Autónoma, línea a la que se contribuye con la presente Tesis. Otra línea a la que también se realizan aportaciones es el comportamiento cognitivo y aprendizaje.

Estas dos líneas estratégicas justifican el presente trabajo, cuyo objetivo es el diseño y desarrollo de un sistema de navegación basado en comportamientos para la exploración completa de entornos total o parcialmente desconocidos por parte de un agente autónomo móvil.

La planificación de rutas está soportada por una estructura jerárquica que integra los paradigmas métrico y topológico de modelado de entornos, donde las áreas desconocidas están explícitamente representadas. Para navegar por el entorno se propone el uso de tres comportamientos reactivos de navegación local habitualmente usados cuando el robot está explorando una zona desconocida [3]: Seguir Pared, Seguir Pasillo y Cruzar Puerta. Como los entornos hacia los que va destinado el trabajo son desconocidos, no se sabe *a priori* cuál de los tres comportamientos es el más adecuado para cada situación concreta. Por este motivo se analiza la configuración del entorno para conseguir en todo momento una cooperación

eficiente de los tres comportamientos durante la navegación. En la Sección 2 se describe la arquitectura del sistema propuesto.

2. Arquitectura del Sistema

En esta Tesis se emplea el estilo de la arquitectura *DLA* [8], que soporta la estructura para el sistema de exploración completa. Dicha estructura se corresponde con la de un sistema híbrido, la cual combina las ventajas de los sistemas reactivos y deliberados. Se ha optado por esta elección porque actualmente está admitida como la mejor alternativa a la hora de trabajar con robots. Las arquitecturas híbridas constan de tres capas, la capa reactiva, la capa deliberativa y la capa intermedia que actúa de interfaz entre las otras dos. En el sistema desarrollado la capa reactiva está basada en tres comportamientos, Seguir Pared, Seguir Pasillo y Cruzar Puerta. La capa deliberativa se encarga de la planificación. Y la capa intermedia sirve de ayuda para la fusión de los comportamientos. Estas tres capas concentran las principales aportaciones realizadas con el trabajo. En las siguientes secciones se analiza su funcionamiento.

2.1. Comportamientos para Navegación Reactiva

El nivel reactivo se basa en la cooperación de tres comportamientos, Seguir Pared, Seguir Pasillo y Cruzar Puerta. En el diseño e implementación de estos comportamientos se han seguido dos estrategias, las cuales han sido comparadas. En primer lugar, se ha desarrollado un nuevo modelo analítico basado en los campos de potencial, el cual consiste en una suma ponderada de fuerzas. Como este modelo presenta problemas, por ejemplo la dificultad para moverse entre obstáculos cercanos y las oscilaciones, los tres comportamientos también han sido desarrollados según el Razonamiento Basado en Casos o *CBR* [7]. Esta segunda aproximación permite aprender de la propia experiencia para mejorar la operación del robot a la hora de ejecutar las tareas de cada uno de los comportamientos.

La metodología de diseño de comportamientos reactivos es novedosa. Incorpora mecanismos de razonamiento y aprendizaje que permiten su adaptación a diferentes plataformas robóticas con pequeños cambios.

Para cada uno de los tres comportamientos, la metodología incluye dos tipos de aprendizaje. El primero, el aprendizaje por observación. Se alcanza mediante el guiado que un humano realiza del robot para que implemente el comportamiento deseado. Esta fase de entrenamiento permite aprender las peculiaridades del entorno, incorporándose a través de ella de manera implícita las restricciones cinemáticas del agente. Cuando el robot opera se realiza un aprendizaje por experiencia. Al detectar una situación nueva, se aumenta el conocimiento del sistema para poder resolver situaciones similares en el futuro.

Si bien el aprendizaje es una de las claves de la filosofía de diseño de comportamientos reactivos con el *CBR*, debido a que un humano está involucrado en el proceso se puede introducir información errónea durante el aprendizaje. Por este motivo también se propone un nuevo mecanismo de aprendizaje asistido que combina las órdenes que un humano aplica mediante un joystick con el movimiento autónomo del robot [10]. Este método permite, al mismo tiempo, considerar el estado del usuario para aumentar su contribución al control del sistema [1].

2.2. Cooperación de Comportamientos

La cooperación entre los tres comportamientos reactivos se determina en el nivel intermedio del sistema de exploración. Con este propósito se ha desarrollado una nueva técnica [4]. A partir de un mapa probabilístico local que representa el entorno más cercano al robot, se extrae el vector de características de un determinado lugar del entorno. El análisis de este vector nos permite determinar los factores de ponderación a aplicar a los tres comportamientos, de modo que se combinen linealmente sus comandos de movimiento. De este modo se consigue que la navegación del agente se adapte de forma eficiente a la configuración del entorno en todo momento, consiguiendo así una trayectoria más suave y acorde con el lugar por el que el robot se está moviendo.

El vector de características propuesto permite caracterizar el lugar con tan solo 9 componentes. Su extracción se basa en el procesado del mapa local inicial, donde el Análisis de Componentes Principales *PCA* tiene un papel significativo a la hora de reducir la redundancia en la información.

El análisis del vector de características se basa en su comparación con un conjunto de patrones definidos y conocidos en el sistema, el cual se ha realizado para poder, finalmente, obtener de manera automática los pesos asignados a los tres comportamientos en cada punto de la trayectoria seguida por el robot durante la navegación. La técnica tarda, en una máquina de bajas prestaciones, unos 40ms en el cálculo de los tres pesos. Si el robot navegara a una velocidad máxima de traslación de 200mm/s, no llegaría a recorrer 1cm antes de recalcular los pesos. Por lo tanto, la adaptación al entorno está asegurada. Así mismo, se ha demostrado la coherencia del método, pues el comportamiento que más influencia tiene en cada punto de la trayectoria está acorde con el entorno más cercano al agente.

2.3. Planificación de Rutas de Exploración Completa

El objetivo de la capa deliberativa es la planificación de la ruta de exploración completa para visitar todas las zonas no exploradas de un entorno total o parcialmente desconocido. La técnica está soportada por una estructura jerárquica que integra los paradigmas métrico y topológico de modelado de entornos, donde las regiones no exploradas están explícitamente representadas [5]. Esto es necesario para poder planificar las rutas de exploración completa.

La construcción de la estructura piramidal jerárquica parte de un mapa probabilístico global. A partir del mismo se extrae el mapa topológico del entorno. En primer lugar se preprocesa el mapa métrico en dos fases, una de umbralizado y la otra de crecimiento de obstáculos. Este mapa métrico preprocesado constituye la base de la pirámide, la cual se genera en tres etapas, Inicialización, Enlazado y Clasificación. Al concluir la generación de la estructura la base de la pirámide o, lo que es lo mismo, el entorno, queda dividido en regiones, bien de espacio libre, bien de espacio inexplorado. Por último, se analiza la relación de conexión entre las regiones para obtener el mapa topológico.

La estructura jerárquica es el punto de partida del algoritmo que planifica la ruta de exploración completa. El objetivo del algoritmo de exploración completa es obtener una ruta de coste mínimo que visite todas las regiones inexploradas del entorno una única vez. Por lo tanto, en primer lugar se obtiene las regiones no exploradas. Posteriormente se evalúa el coste para ir de cualquier región origen a cualquier región destino. Con todos estos datos, el algoritmo propuesto es capaz de planificar la ruta requerida. El problema que se nos plantea es similar al problema del viajante de comercio o *TSP*. Para su resolución se ha optado por un algoritmo genético, puesto que es la aproximación que mejores resultados ha dado [6].

El método planteado también permite planificar cualquier otra ruta que cumpla determinados criterios. Así, se ha empleado para planificar rutas que visiten varias zonas ya exploradas en un entorno hospitalario, incluso cuando hay varios agentes involucrados [9].

3. Conclusiones y Aportaciones

En esta Tesis se ha desarrollado un sistema eficiente de navegación basado en comportamientos para la exploración completa de entornos total o parcialmente desconocidos por parte de un agente autónomo móvil. El sistema está basado en una arquitectura híbrida, siendo la estructura propuesta novedosa. En ella se distinguen las tres capas de todo sistema híbrido. Estas tres capas concentran las principales aportaciones realizadas con el trabajo. A continuación se presenta un resumen de estas aportaciones.

En cuanto a la capa reactiva, las principales aportaciones son: i) una nueva implementación de los tres comportamientos, Seguir Pared, Seguir Pasillo y Cruzar Puerta con un modelo analítico basado en los campos de potencial; ii) una nueva metodología de diseño de comportamientos reactivos basada en el ciclo *CBR*; y iii) un nuevo método de aprendizaje asistido que permite combinar los comandos de movimiento autónomos del robot con las órdenes que un humano intenta aplicar con un joystick. En este sentido se aporta una métrica para ponderar los comandos y un nueva representación visual en 3 dimensiones.

Las aportaciones realizadas a la cooperación de comportamientos son: i) un nuevo vector de características útil para caracterizar un lugar. Este vector es compacto, eficiente y rápido de obtener. Es útil para que los comportamientos cooperen o compitan; ii) una metodología y un algoritmo para la caracterización de un lugar; y iii) dos representaciones visuales novedosas, la Representación de Selección y la Representación de Fusión.

En relación a la capa deliberativa, las principales aportaciones realizadas son: i) un método eficiente para la planificación de rutas de exploración completa a través de todas las zonas desconocidas de un entorno. Esta técnica está soportada por, ii) una estructura jerárquica que integra los paradigmas métrico y topológico, que explícitamente representa las regiones inexploradas, y iii) un algoritmo heurístico de optimización para resolver el problema del viajante (*TSP*), el cual planifica las rutas de alto nivel que permite visitar una única vez todas las regiones inexploradas del entorno.

Otra aportación fundamental del trabajo es la integración de todas las capas y módulos en un único sistema para la exploración completa de entornos total o parcialmente desconocidos. Tras esta integración, el sistema ha sido probado tanto en entornos simulados como reales. Los resultados han demostrado que el sistema propuesto alcanza el objetivo planteado de la exploración completa, funcionando el agente en todo momento de manera autónoma. Al mismo tiempo, se ha comprobado que el modelo basado en el *CBR* para los comportamientos es superior al modelo analítico, incorporando mecanismos de aprendizaje, siendo además independiente de la plataforma. La cooperación entre los comportamientos se adapta de forma rápida y coherente a la configuración del entorno, gracias a la técnica desarrollada. También se ha verificado la validez del algoritmo de planificación propuesto, en cuanto a su velocidad de respuesta, la calidad de la solución y la cobertura completa alcanzada.

Agradecimientos

El desarrollo de esta Tesis se llevó a cabo en el Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Málaga bajo la dirección de la Dra. Cristina Urdiales García. El trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) a través de los proyectos No. TIN2004-07741-C02-01 y No. TEC2006-11689-C01.

Referencias

- [1] B. Fernández-Espejo, A. Poncela, C. Urdiales, and F. Sandoval. Collaborative emergent navigation based on biometric weighted shared control. In *Computational and Ambient Intelligence, Lecture Notes in Computer Science 4507*, pages 814–821. Springer, 2007.
- [2] GTRob. *Libro Blanco de la Robótica: De la Investigación al Desarrollo Tecnológico y Aplicaciones Futuras*. Comité Español de Automática, 2007.
- [3] M. Mucientes, D.L. Moreno, A. Bugarín, and S. Barro. Evolutionary learning of a fuzzy controller for wall-following behavior in mobile robotics. *Soft Computing*, 10:881–889, 2006.
- [4] A. Poncela, B. Fernández-Espejo, C. Urdiales, and F. Sandoval. Place characterization for navigation via behaviour merging for an autonomous mobile robot. In *Proc. of the 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conf. (MELECON 2008)*, pages 850–855, Ajaccio, Francia, Mayo 2008.
- [5] A. Poncela, E.J. Pérez, A. Bandera, C. Urdiales, and F. Sandoval. Efficient integration of metric and topological maps for directed exploration of unknown environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 41(1):21–39, Octubre 2002.
- [6] A. Poncela, E.J. Pérez, C. Urdiales, and F. Sandoval. A hybrid path planning technique for partially unknown indoor environments. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 11(3):155–166, 2005.
- [7] A. Poncela, C. Urdiales, and F. Sandoval. A cbr approach to behaviour-based navigation for an autonomous mobile robot. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2007)*, pages 3681–3686, Roma, Italia, Abril 2007.
- [8] C. Urdiales, A. Bandera, E.J. Pérez, A. Poncela, and F. Sandoval. Hierarchical planning in a mobile robot for map learning and navigation. In *Autonomous Robotic Systems: Soft Computing Methodologies*, pages 188–203. Springer Verlag, 2003.

- [9] C. Urdiales, A. Poncela, R. Annicchiarico, F. Rizzi, F. Sandoval, and C. Caltagirone. A topological map for scheduled navigation in a hospital environment. In *e-Health: Application of Computing Science in Medicine and Health Care*, pages 119–132. 2003.
- [10] C. Urdiales, A. Poncela, I. Sánchez, F. Galluppi, M. Olivetti, and F. Sandoval. Efficiency based reactive shared control for collaborative human/robot navigation. In *Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007)*, San Diego, Estados Unidos, Octubre 2007.