

Protocolos de Comunicación Borrosa para la Coordinación de Robots Autónomos

Vicente Matellán José M. Molina Lorenzo Sommaruga

Departamento de Informática. Universidad Carlos III de Madrid

Avd. Butarque 15, Leganés (Madrid), SPAIN.

Phone: +34 1 624 94 31, Fax: +34 1 624 94 30

E-mail: {vmo, molina, los}@ia.uc3m.es.

Resumen

Este artículo se enmarca dentro del campo de las arquitecturas de cooperación entre robots. En concreto, el trabajo presenta un estudio comparativo del rendimiento de tres protocolos de comunicación borrosos entre dos robots autónomos. Para ello se ha procedido a integrar trabajos previos realizados en el Laboratorio de Agentes Inteligentes (LAI) sobre comportamientos borrosos y sobre arquitecturas de cooperación. Estos protocolos tendrán en cuenta los controladores borrosos utilizados en el diseño de los robots. Se han considerado tres tipos diferentes de protocolos borrosos y se han probado tanto en un simulador como sobre un robot real. Por último, se presenta la descripción de los experimentos realizados así como los resultados obtenidos.

Palabras Clave: Fuzzy, robots, comunicación, cooperación, coordinación.

1 Introducción

Dentro del campo de la cooperación entre robots, nuestra aproximación fundamentalmente aborda el problema de la coordinación desde dos puntos de vista complementarios: la comunicación y el comportamiento. La coordinación de robots puede conseguirse mediante la comunicación explícita entre los individuos, habitualmente realizada mediante mensajes. En segundo lugar, la coordinación global de un grupo puede verse también influenciada implícitamente por los efectos del comportamiento individual de cada robot, lo cual se manifiesta mediante sus acciones y los cambios que éstas producen en el mundo percibido por los otros robots. Estos métodos directos e indirectos de

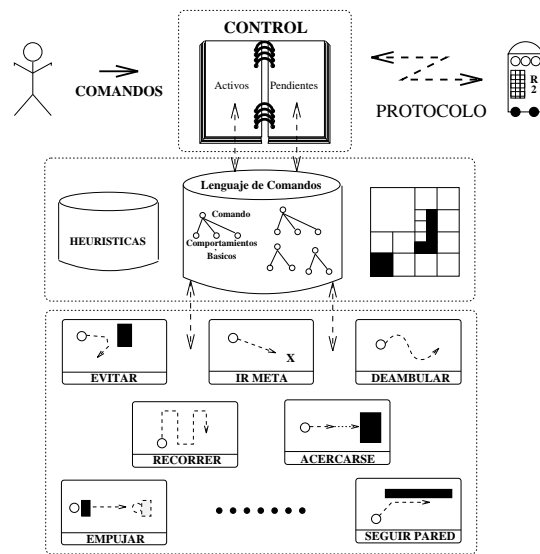


Figura 1. Arquitectura de Control de Robots

coordinación son mecanismos complementarios muy útiles para obtener cooperación intencional de alto nivel. Además, dichos mecanismos pueden integrarse en un modelo único.

Este artículo presenta un protocolo borroso para la coordinación de robots como una solución alternativa a los protocolos utilizados en otras arquitecturas, tanto fuzzy [6], como tradicionales [5], que se pueden encontrar en la literatura como [7], [1], etc.. Esta clase de protocolos de coordinación proporcionan también un comportamiento suave y flexible gracias a la representación borrosa del conocimiento y al razonamiento borroso. En realidad, las inexactitudes e incertidumbres de los datos proporcionados por los sensores y por la ejecución de las tareas del robot, así como los errores de hardware, los errores en las comunicaciones, etc., se tratan fácilmente con una aproximación borrosa. En concreto, la adopción de una filosofía borrosa se puede utilizar para borrosificar tanto el receptor de un mensaje como su contenido, lo que proporciona una comunicación más suave. Más aún, puede utilizarse para realizar una fusión de los comportamientos de los robots, no solo al bajo nivel de las tareas reactivas, como el control de los motores, sino en el alto nivel de la cooperación intencional.

La integración de trabajos previos [3] sobre comportamientos borrosos y arquitecturas de cooperación [8], se han considerado la base para conseguir una arquitectura para la cooperación de robots. La idea principal es crear dos niveles en la arquitectura: un nivel reactivo, que se encarga de todas las actividades *instintivas* de un robot (ej. moverse, girar, evitar obstáculo, etc.); y un nivel de coordinación, que controla las actividades inteligentes, como el comportamiento cooperativo y que influye en el bajo nivel.

En el resto de este artículo se presenta un análisis de la comunicación entre

robots, desde la perspectiva de los principios de la lógica borrosa. Así, se describe un experimento que presenta la influencia potencial de la comunicación borrosa en el comportamiento de un robot móvil real.

2 Protocolo Fuzzy

Algunos trabajos previos han mostrado que los robots pueden aprovechar las ventajas de las teorías [10], [11] del razonamiento borroso. En este sentido, hemos utilizado [3] controladores borrosos para tratar la incertidumbre que se produce ante las distintas situaciones a las que se enfrenta un robot autónomo. Estos *comportamientos* borrosos se han diseñado como parte de la arquitectura global de la Figura 1.

Esta arquitectura se diseñó para coordinar robots en tareas cooperativas. Ésto implica la necesidad de comunicar información entre los robots. Dicha comunicación se basaba en un protocolo fijo que intercambiaba información clásica. En este capítulo se presenta una nueva aproximación a la construcción de este protocolo, permitiendo la transmisión de información borrosa.

En este trabajo, el protocolo propuesto no será un intercambio cerrado de conceptos *crisp*, idénticamente definidos en todos los robots. Donde el término *crisp* querrá decir que el valor de la variable, o de cualquier otra información intercambiada entre los robots, se define por sus valores numéricos exactos. En nuestro protocolo esto no será así, lo que nos enfrentará con algunos problemas semánticos.

Explicaremos estos conceptos mediante un ejemplo sencillo. Supongase que un robot, que percibe el mundo mediante sus sensores, obtiene cierta información sobre la anchura de un objeto. Este concepto (anchura) se ha definido en su controlador fuzzy mediante una *variable difusa* llamada *anchura*. El valor de dicha variable se obtiene mediante el correspondiente proceso de borrosificación y se expresa mediante los valores de activación de las variables *lingüísticas* definidas sobre el rango de la variable. Por ejemplo, la variable *anchura* se puede definir por el conjunto de etiquetas {MUY GRANDE, GRANDE, PEQUEÑO y MUY PEQUEÑO}. El conocimiento obtenido sobre la anchura del objeto se expresará en términos borrosos como MUY GRANDE (0.8), GRANDE (0.5), PEQUEÑO (0.2) y MUY PEQUEÑO (0), donde 0.8, 0.5, 0.2 y 0 representan el grado de pertenencia de las medidas de los sensores a las variables lingüísticas.

A la hora de definir las etiquetas hay que tener en cuenta el dominio de la variable. Por ejemplo, al definir la variable *anchura* el rango de la variable puede ser por ejemplo de 0 a 1023. En muchos casos este rango viene determinado

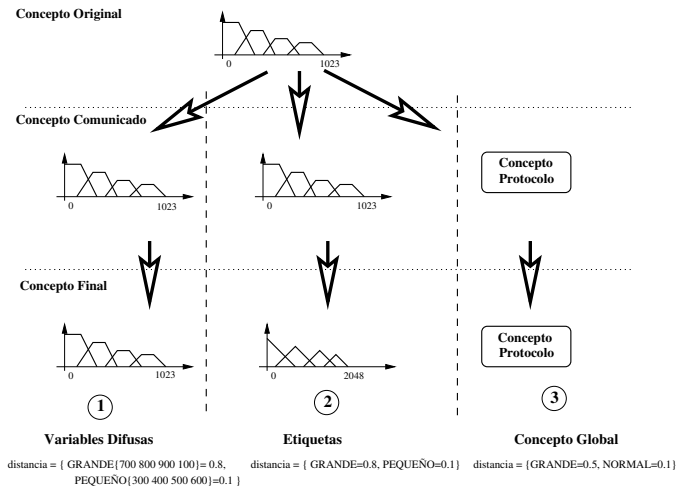


Figura 2. Tres protocolos de comunicación

por los requisitos físicos del sistema. Por ejemplo, el rango de la variable que representa la distancia a un objeto medida por un sensor, viene determinada por el rango del sensor. En el caso de nuestro robot (el micro-robot Khepera [4]) el rango de los sensores de infrarojos es un valor entre 0-1023, luego el rango de la variable será 0 - 1023.

Ahora, si nuestro robot quiere compartir su conocimiento sobre la anchura del objeto, consideraremos tres posibles métodos de comunicación (según la Figura 2:

- (1) Comunicación de la variables difusas.
- (2) Comunicación de las etiquetas lingüísticas.
- (3) Comunicación de *conceptos del protocolo*.

El primer método se basa en la comunicación de variables difusas almacenadas como un conjunto de valores de las etiquetas lingüísticas. Estas etiquetas habrán sido definidas mediante un conjunto de *funciones de pertenencia* sobre el dominio de la variable. Esto es, el valor de activación de las etiquetas se calcula mediante dichas funciones, que usualmente es una función lineal.

Si se envía la variable completa, las etiquetas de todos los robots usarán el mismo dominio y las mismas funciones de pertenencia. En ese caso, el receptor obtiene la misma información borrosa que el emisor. En el ejemplo, querría decir que se ha enviado la definición de las etiquetas { MUY GRANDE, GRANDE, PEQUEÑO y MUY PEQUEÑO }, enviando sus funciones de pertenencia, y los valores de activación de las mismas MUY GRANDE (0.8), GRANDE (0.5), PEQUEÑO (0.2) y MUY PEQUEÑO (0).

El segundo método utiliza etiquetas definidas sobre diferentes rangos de las variables. Esto quiere decir que cada robot usará las mismas etiquetas para de-

finir sus variables difusas (*anchura* en el ejemplo), es decir { MUY GRANDE, GRANDE, PEQUEÑO y MUY PEQUEÑO }, pero el dominio será diferente. Por ejemplo, otro robot utilizará un rango 0 - 2048 en vez del 0 - 1023 del anterior.

Esto quiere decir que el robot receptor usa las etiquetas utilizando sus propias funciones de pertenencia. Esto hace que los robots no compartan la misma información, lo que intercambian es la *impresión* subjetiva. Por ejemplo, la variable “anchura” para un robot pequeño (por ejemplo de 6 cm. de diametro) se puede calificar como MUY GRANDE un objeto de más de 6 cm. (rango de 6 - ∞). Si esta información se transmite a un robot más grande, por ejemplo con un diámetro de 30 cm., donde se ha definido el mismo concepto MUY GRANDE como objetos de más de 30cm (rango de 30 - ∞), la información realmente intercambiada será diferente.

Para resolver este problema, sería posible ajustar el conocimiento dentro de cada robot. Siguiendo con el ejemplo anterior, si el robot grande sabe que el robot que le envía la información es más pequeño, entonces la información recibida se traduciría desde MUY GRANDE a PEQUEÑO dentro del receptor. De esta forma, lo que se ha transmitido realmente es la impresión del emisor, pero lo que obtiene el receptor es la información real (y la impresión del otro robot, como información adicional). Este mecanismo nos lleva a un tercer método que utilizará conceptos, en forma de etiquetas lingüísticas, compartidos e independientes.

En el tercer método se utilizará un concepto que resulte de la interpretación de la etiqueta lingüística que el robot quiere transmitir. Esto quiere decir que definirán conceptos globales como protocolo de comunicación. Continuando con el ejemplo, los valores de la variable difusa serían traducidos en valores de activación de un nuevo conjunto de etiquetas {ENORME, GRANDE, NORMAL, PEQUEÑO, DIMINUTO}. A continuación, una de estas etiquetas sería la que se transmitiese.

Se puede hacer una analogía con la comunicación humana: una persona tiene una imagen perfecta de una situación que ha vivido, pero cuando comunica esta información a otra utiliza una serie de reglas para traducir sus experiencias en palabras. Esta traducción implica una reducción de la información almacenada en su cerebro. Por su parte, la persona que recibe las palabras transmitidas las traduce en ideas mentales usando sus propias reglas de traducción, obteniendo su imagen particular.

En el ejemplo, la información contenida en la variable difusa se resumirá en el concepto GRANDE, que será la información que se transmitirá. De esta forma todos los robots tienen los mismos conceptos definidos para la comunicación

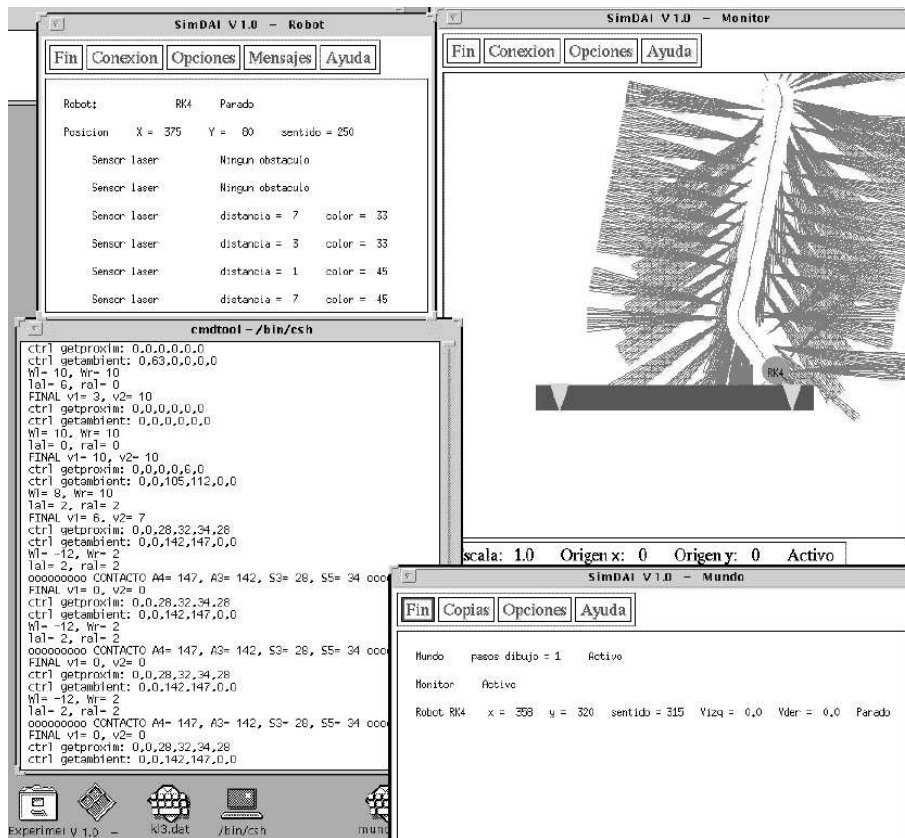


Figura 3. El entorno simulado

y pueden adaptar esta información limitada de acuerdo a sus características particulares.

3 Experimentos

Para probar las diferentes alternativas de comunicación enunciadas en el apartado anterior se han realizado experimentos utilizando tanto un simulador como robots reales. El simulador utilizado ha sido SimDAI [9], la versión distribuida del simulador ERA [8]. SimDAI permite la simulación de un grupo de robots simulados independientes, que se ejecutan en diferentes ordenadores, los cuales desarrollan tareas simples en un mundo definido por el usuario y que es común a los distintos robots. El simulador también proporciona un mecanismo para que los robots se comuniquen.

Los robots reales utilizados han sido dos robots Khepera [4]. Estos robots tienen 5.5 cm de diámetro, dos motores independientes (uno para cada una de sus dos ruedas) y 8 sensores de infrarrojos. Dichos sensores pueden medir tanto la distancia a un objeto como la luz ambiente. Estos robots pueden funcionar de forma autónoma (con su propia batería y micro-procesador) o conectados

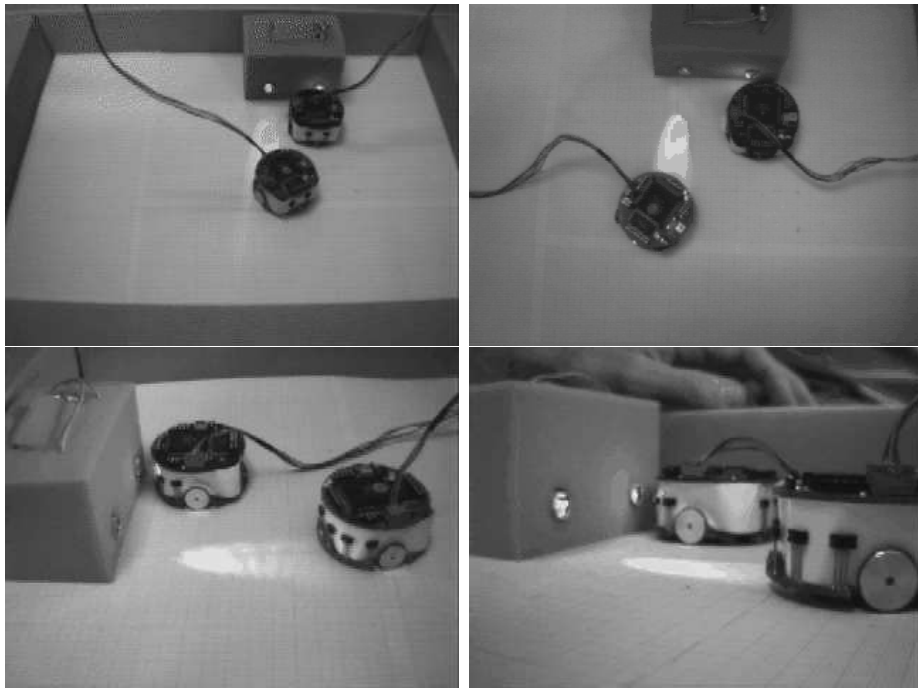


Figura 4. El experimento real

a una estación de trabajo.

Para realizar los experimentos en el simulador SimDAI se ha diseñado un mundo simulado (Figura 2) que imita el entorno real de simulación (Figura 3). Es interesante reseñar que se han utilizado los mismos controladores borrosos para controlar los robots simulados que los robots reales, lo que prueba la idoneidad del simulador SimDAI para este tipo de experimentos.

La siguiente sección describe solamente los experimentos con los robots reales, pues los simulados se han utilizado únicamente para probar la viabilidad de éstos, que son los verdaderamente significativos.

3.1 Descripción de los experimentos

Los experimentos realizados intentan mostrar la influencia de la comunicación borrosa en el comportamiento coordinado. Así, el objetivo común de los robots será empujar un objeto, de forma coordinada entre dos robots. Esta tarea puede dividirse en dos subtareas principales, prepararse para empujar y empujar. Para probar las diferentes alternativas de comunicación consideramos suficientemente relevante la primera subtask. Esta subtask se ha dividido en tres fases:

- (1) Un robot encuentra el objeto a empujar.

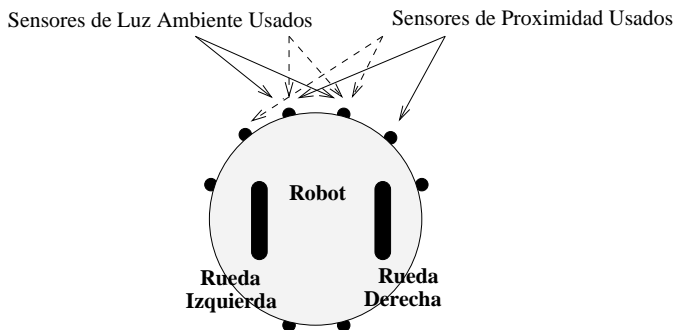


Figura 5. Distribución de los sensores usados en el experimento.

- (2) El robot se alinea con el objeto y envía al otro robot una descripción de su alineamiento.
- (3) El segundo robot trata de alinearse exactamente como el primero.

La primera fase se puede realizar mediante un controlador difuso sencillo, como alguno de los desarrollados previamente [3], o mediante otro tipo de controladores. Por ejemplo, una versión del controlador reactivo propuesto por V. Braitenberg [2] se ha utilizado para alcanzar la posición correcta de alineación.

Una vez que el robot ha encontrado el objeto, se alinea con él de una determinada forma. Esta fase necesita un control más preciso que la fase anterior, pues el alineamiento determinará si la tarea cooperativa puede ser realizada correctamente o no. Utilizando un robot real como el Khepera, la definición del alineamiento habrá que realizarla en función de las medidas de los sensores que se utilizan en el controlador de alineación.

En este sentido, hemos realizado la definición del alineamiento en función de variables borrosas definidas para cada sensor del robot Khepera. Así, supongamos que un robot, que usa un controlador estándar, se ha alineado cuando sus sensores de proximidad y sus sensores de luz ambiente devuelven unos valores borrosos concretos. En ese momento el robot informará al otro *como* se ha alineado. Será en esta comunicación donde probaremos las tres alternativas de comunicación enumeradas anteriormente.

Además de las tres alternativas borrosas, se ha probado también método de comunicación tradicional, que consiste en el intercambio de conceptos no-borrosos. Es decir, el emisor le dice al otro robot los valores exactos que han medido sus sensores. Esta situación sería la ideal si los dos robots fuesen físicamente idénticos, incluyendo la sensibilidad de los sensores, y si no se produjesen errores en las medidas.

Para mostrar el rendimiento de las diferentes soluciones en primer lugar hemos realizado el experimento descrito en el simulador SimDAI. En el caso del entorno simulado la subtarea de alineamiento se tiene que realizar en una

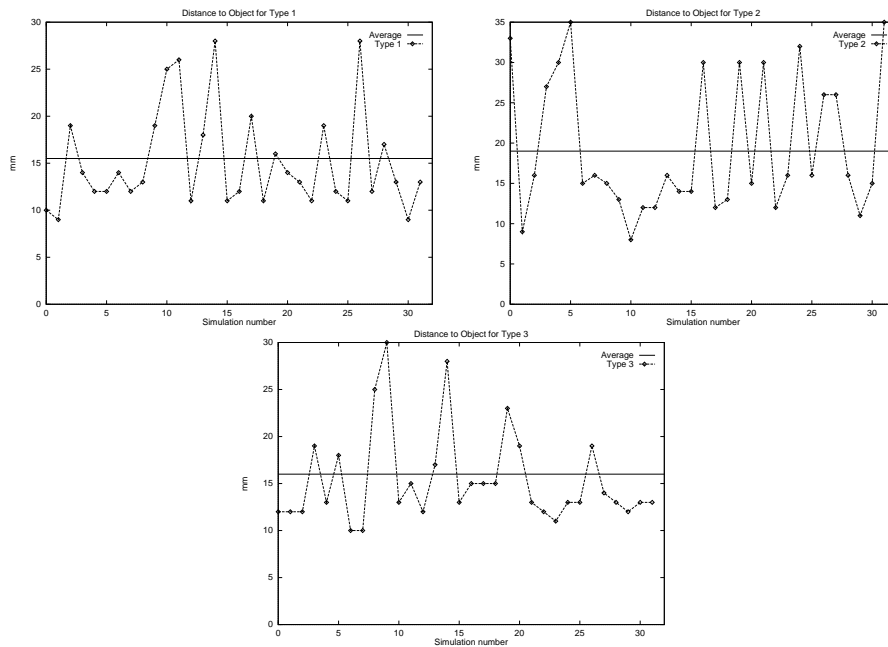


Figura 6. Resultados gráficos de los experimentos

posición determinada del objeto a empujar. Esta posición se indica en el objeto simulado mediante un color distintivo del propio objeto, como muestra la Figura 2.

A continuación el experimento se ha realizado sobre el entorno real mostrado en la Figura 3. Para ello se ha construido el objeto, que aparece en la figura, con dos luces en su interior. Estas luces son los puntos en los cuales los robots se tienen que alinear. Cuando uno de los robots se ha alineado envía el entorno percibido por sus sensores al otro robot utilizando uno de los métodos comentados.

En el experimento con los robots reales el entorno se percibe mediante los sensores de luz ambiente y de proximidad. Para simplificar el controlador, solamente se han utilizado los sensores que se muestran en la Figura 3.1. Dependiendo del lado en el que el robot se tenga que alinear los sensores de proximidad usados son los marcados con líneas de puntos (para alinearse a la izquierda) o los indicados por líneas continuas (alinearse a la derecha).

Dado que los sensores del Khepera son muy sensibles al entorno externo, se realizaron diversas pruebas preliminares para elegir una configuración significativa, ajustando las posiciones iniciales de los robots y la luz ambiente del laboratorio. La configuración final elegida hace que los robots encuentren fácilmente el objeto, pues el objetivo del experimento era probar las comunicaciones y no los controladores de movimiento.

En el experimento final, se ha medido la distancia al objeto para saber como se han utilizado los valores comunicados en el controlador. En algunas situaciones el tiempo empleado por el segundo robot para alinearse también es una información significativa. Por ejemplo, en el caso utilizar el método tradicional (los valores numéricos medidos por sus sensores), el segundo robot es incapaz de alinearse en un tiempo razonable. Ello se debe a que en el mundo real hay muy pocas probabilidades de que los sensores del segundo robot midan *exactamente* lo mismo que los correspondientes del primer robot. De hecho, este problema fue el origen de este trabajo.

Sin embargo, para el caso de los mecanismos difusos el tiempo empleado no es significativo para discriminar entre las distintas opciones. En la mayoría de los casos sólo mide la calidad del controlador y su tolerancia a las perturbaciones del entorno (sobre todo a las variaciones de luz ambiente).

Se ha realizado el mismo número de pruebas para cada tipo de comunicación y se han medido los parámetros relevantes. Los resultados obtenidos se muestran en las gráficas de la Figura 3.1. La distancia media al objeto para los tipos de comunicación uno, dos y tres fueron, respectivamente, 15.125, 19.375 y 15.375. De esta forma se puede apreciar como el primer método es el más exacto, es decir, es el que detiene al robot de forma más similar a como se alineó el primer robot. Este resultado era predecible, pues es el método que pasa más información al controlador.

El segundo es el menos exacto en el alineamiento ya que las etiquetas se definen de forma distinta, sucediendo por ejemplo que una distancia realmente próxima resulte mayor que una comunicada como lejana.

El tercer método tiene un rendimiento similar al primero. Ello es debido a que los dos robots comparten la misma interpretación de un concepto. Este método presenta un buen rendimiento, sobre todo si se tiene en cuenta que es más tolerante al ruido externo. Además, este método es el que utiliza menos recursos de comunicación, puesto que sólo necesita intercambiar un concepto.

El último caso, la comunicación de valores numéricos, produce, como ya hemos comentado, resultados desastrosos, siendo incapaz de alinear al robot, finalizando al consumir el tiempo fijado como máximo.

4 Conclusiones y Trabajos Futuros

En este se han presentado tres métodos de comunicación entre robots móviles con el objetivo de realizar una tarea conjunta. La comunicación se ha basado en el intercambio de mensajes borrosos en lugar de los clásicos valores numéricos. Como conclusión se puede decir que los tres métodos borrosos permiten una comunicación entre los robots más flexible, suave y fiable. Además, permiten que los robots incrementen la semántica de los mensajes y obtengan mejores resultados a la hora de alinearse que con el envío de los valores numéricos crudos.

De entre los tres métodos examinados, hemos concluido que el preferible (en condiciones normales) es el tercero, puesto que proporciona un rendimiento aceptable con el menor uso de recursos de comunicaciones. Así mismo, este método es el más tolerante ante perturbaciones externas.

Para contrastar la validez de estos resultados hemos previsto realizar un número similar de experimentos para el desarrollo de tareas más complejas.

Referencias

- [1] **H. Asama, M.K. Habib, I. Endo, K. Ozaki, A. Matsumoto and Y. Ishida**, *Functional Distribution among Multiple Mobile Robots in an Autonomous and Decentralized Robot System*. Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento-California (USA), pag 1921-1926.
- [2] **V. Braitenberg** *Vehicles. Experiments in Synthetic Psychology*. MIT Press, Cambridge, MA, 1984.
- [3] **V. Matellán, J.M: Molina, J. Sanz, C. Fernández**, *Learning Fuzzy Reactive Behaviors for Autonomous Robots*, 4rd European Workshop on Learning Robots, B-Learn Technology Transfer Workshop. Karlsruhe, Germany, December 1995.
- [4] **F. Mondada, F. P. Ienne**, *Mobile Robot Miniaturization: A tool for investigation in control algorithms*. Proceedings of the Third International Symposium on Experimental Robotics. Kyoto, Japan, 1993.
- [5] **F. R. Noreils**, *Toward a robot architecture integrating cooperation between mobile robots: Application to indoor Environment* The International Journal of Robotics Research, 12 (1):79-98. 1993.
- [6] **P. Reignier**, *Fuzzy logic techniques for mobile robot obstacle avoidance*, Robotics and Autonomous Systems, 12, pag. 143-153, 1994.

- [7] **L. E. Parker**, *Heterogeneous Multi-Robot Cooperation*. Ph. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, May, 1994.
- [8] **L. Sommaruga, N. Patón, E. M. Montero**, *An Architecture for Autonomous Robots Simulation*. Third International Symposium on Intelligent Robotic Systems, Pisa, (Italy). 1995.
- [9] **L. Sommaruga, Ignacio Merino, V. Matellán, José Manuel Molina**, *A Distributed Simulator for Intelligent Autonomous Robots*. Fourth International Symposium on Intelligent Robotic Systems, Lisbon, (Portugal). 1996.
- [10] **L. A. Zadeh**, *Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes*. Trans. on SMC, vol 3, 1, January 1973.
- [11] **H.J. Zimmermann**, *Fuzzy Set Theory and its Applications*. Kluwer Academic Publishers, 1990.