

Arquitectura de Ambiente Multi-Agente Robótico para la Navegación Colaborativa

Demetrio A. OVALLE C.

**GIDIA: Grupo de I&D en Inteligencia Artificial, Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Antioquia, Colombia
dovalle@unal.edu.co**

Jovani A. JIMÉNEZ B.

**GIDIA: Grupo de I&D en Inteligencia Artificial, Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Antioquia, Colombia
jajimen1@unal.edu.co**

Gustavo A. ACOSTA A.

**Universidad de San Buenaventura
Medellín, Antioquia, Colombia
gustavo.acosta@usbmed.edu.co**

Resumen: Este artículo describe una arquitectura de sistema multi-agente de mini-robots móviles que trabajan de manera colaborativa para realizar tareas de mapeo digital de un entorno estructurado.

Palabras Claves: Sistemas Multi-Agente, Ambientes Colaborativos, Robótica Móvil, Inteligencia de Enjambres, Inteligencia Artificial.

I. INTRODUCCIÓN

La robótica móvil constituye actualmente uno de los tópicos de estudio que más ha suscitado interés en comunidades científicas que trabajan el área de la inteligencia artificial, en lo concerniente con el diseño de algoritmos de navegación, control, trazado de trayectorias y planificación de tareas en escenarios estructurados y no estructurados.

Una de las tecnologías emergentes más prometedoras corresponde a la de agentes inteligentes que se aplica en las áreas de control de procesos industriales, comercio electrónico, aplicaciones médicas, educación y entretenimiento entre otras (Brena 2003); que tienen una estrecha relación con el campo de la robótica móvil.

En este artículo se presenta una arquitectura de un sistema multi-agente (MAS), en el que un grupo de robots móviles que disponen de características diferentes en cuanto a sensorica y sistemas de locomoción (efectores) cooperan para llevar a cabo una tarea.

En la siguiente sección se hace un breve resumen del estado del arte de los ambientes colaborativos, los sistemas multi-agente y la robótica móvil. En secciones posteriores se presenta y argumenta la arquitectura propuesta.

II. ANTECEDENTES EN ROBÓTICA MÓVIL COLABORATIVA

Ambientes Colaborativos (CSCL). El uso de la colaboración para facilitar el trabajo y la transmisión de información fue inicialmente propuesto por la National Science Foundation en 1989 después fue

promovido por el National Research Council en 1993 (Dorneich 2002).

Los ambientes colaborativos hacen referencia a un grupo de entidades trabajando conjuntamente en un mismo ambiente de trabajo propiciando la colaboración.

En un escenario colaborativo es necesario que se den tres elementos claves (Johnson & Johnson, 1978): Igual participación, responsabilidad individual e interdependencia positiva.

El término CSCW (Computer-Supported Collaborative Work) fue acuñado para explorar el rol de la tecnología en el ambiente de trabajo (Grudin 1994). Dependiendo del grupo de trabajo, la segunda "C" de la abreviatura, puede entenderse como cooperativo o colaborativo. La palabra cooperación se refiere a la búsqueda de una meta común mediante la división de tareas mientras que la palabra colaboración hace referencia al logro de un objetivo compartiendo tareas (Jiménez 2006).

Esta tecnología se clasifica según su objetivo principal de la siguiente forma (Ortega & Bravo 1998):

- Centrado en el Individuo: El cual gestiona localmente el trabajo de cada individuo en el interior del grupo.
- Centrado en el Escenario: El cual se esmera por la gestión de las tareas encargadas en un determinado entorno, su enrutamiento, consulta, actualización, entre otras.
- Centrado en el Proceso: El cual controla la conclusión de actividades.

Sistemas Multi-Agente (MAS). Los MAS son una de los campos de investigación de la inteligencia artificial distribuida, la solución de problemas distribuidos y la inteligencia artificial paralela.

Los agentes son entidades que actúan en representación de sus usuarios humanos o dueños para realizar tareas complejas, se comunican por medio del protocolo de paso de mensajes y realizando

sus acciones concurrentemente; poseen propiedades como: autonomía, habilidad social, reactividad, proactividad, movilidad, continuidad temporal, adaptabilidad y aprendizaje (Gomes et al 2004, Jennings & Wooldridge 1998, Maes 1996). Habitan en ciertos ambientes dinámicos y complejos, sensando y actuando de manera autónoma para adaptarse al ambiente; mediante lo anterior, realizan una serie de tareas o metas para las cuales fueron diseñados (Figura 1) (Jiménez 2006, Nwana & Ndumu 1998, Russell & Norving 2003).

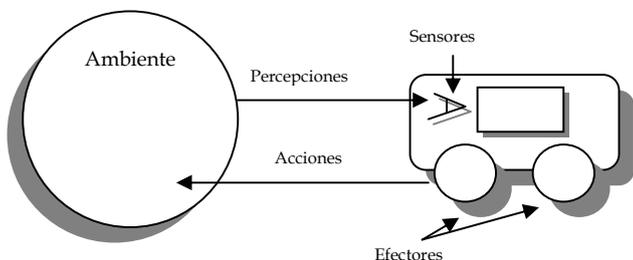


Figura 1. Estructura de un Agente (Russell & Norving 2003)

Un MAS es una sociedad organizada compuesta por agentes semiautónomos que interactúan entre sí, ya sea para colaborar en la solución de un conjunto de problemas o en la consecución de una serie de objetivos individuales o colectivos. Estos agentes informáticos pueden ser homogéneos o heterogéneos y pueden tener metas comunes o no, pero siempre involucrarán algún grado de comunicación entre ellos (Figura 2) (Lemaître 1998, Boissier & Demazeau 1991).

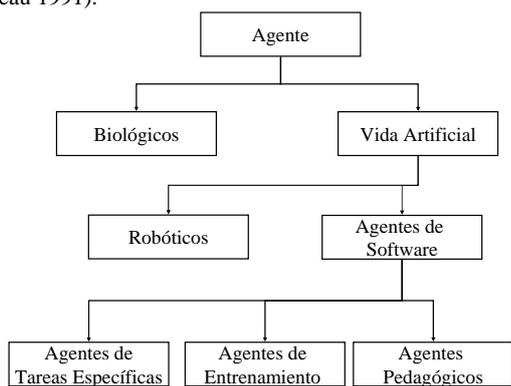


Figura 2. Clasificación de los Agentes

➤ Estructura: Los MAS incluyen diversos agentes que interactúan o trabajan en conjunto. Cada agente es básicamente un elemento capaz de resolver autónomamente problemas y operar de manera asíncrona, con respecto a los otros agentes. Para que un agente pueda operar como parte del sistema, es necesario la existencia de una estructura que permita la comunicación y/o interacción entre los agentes que componen el MAS.

➤ Características Algunas de las características que deben poseer los MAS son (Ferber 1999, Deshpande et al 2004, Xu & Deters 2004):

- Organización Social: Es la manera como el grupos de agentes se organizan dentro del sistema de acuerdo con la función o rol que les corresponda, sus características, responsabilidades, necesidades y teniendo en cuenta el propósito de la comunicación con los demás agentes.

- Cooperación: Es el resultado de compartir resultados intermedios para producir un avance en la solución de las metas particulares de otros agentes y a la vez, aportar al logro progresivo de las metas globales del sistema.

- Coordinación: Es una propiedad de los sistemas de agentes que se encuentran realizando una actividad en un ambiente compartido. Por medio de la comunicación los agentes pueden coordinar sus acciones y comportamiento, con el consiguiente resultado de sistemas más coherentes, es decir, sistemas que se comportan bien como una unidad. En síntesis, el objetivo de la coordinación es evitar situaciones de conflictos entre los agentes.

- Control: Es el mecanismo básico de apoyo para la implementación de los mecanismos de la coordinación en un MAS. Este puede ser considerado desde dos puntos de vista: control global y control local

- Comunicación: Los agentes pueden comunicarse con el fin de alcanzar sus metas o las de la sociedad o sistema en el cual habitan.

➤ Arquitecturas. Las arquitecturas identificadas de MAS son (Boissier & Demazeau, 1991; Lejter & Dean, 1996):

- Arquitectura de Árbol Fijo. Es la imagen de sistemas que usan estrategia de control jerárquica tradicional.

- Red de Agente Conectados. Cada agente establece conexión con cada uno de los otros agentes en el sistema, correspondiendo con la imagen de un sistema que usa estrategias de coordinación tales como esquemas de comunicación.

- Colección de Grupos de Agentes Conectados. Los agentes que componen un grupo interactúan con otros grupos vía un agente escogido como representante del grupo, y a su vez, todos los agentes representantes se juntan en un grafo completamente conectado, formando concilio.

- Niveles de Representación Basados en Abstracción. Es la imagen de sistemas distribuidos jerárquicos, donde cada nivel de agentes es independiente de los otros niveles, los agentes de un nivel interactúan con los agentes de los niveles adyacentes, y cada uno de los niveles de agentes corresponde a un nivel de abstracción en la descomposición de un problema en subproblemas. Los agentes de un mismo nivel tienen la misma jerarquía dentro del sistema.

Agentes Robóticos Colaborativos. Los desarrollos más recientes en robótica móvil buscan obtener agentes robóticos dotados de percepción y cierto grado de inteligencia que realicen tareas útiles en su entorno de trabajo. Esto implica que el sistema sensorial del robot, le debe permitir a éste ciertos niveles de detalle en la comprensión espacial de su entorno.

Hasta cierto punto esta ha sido la aproximación tradicional en la que un solo agente robótico debe disponer de toda la sensorial y potencia computacional necesaria para realizar la tarea previamente definida.

Entre las desventajas de esta aproximación se tienen:

- Mayores costos de diseño y construcción.
- Mayor tamaño físico del agente.
- Mayores niveles de consumo de energía

- Menor confiabilidad: una falla en alguno de los subsistemas que constituyen el agente puede llevar al fracaso en el cumplimiento la tarea debido a la concentración de inteligencia y sensorial en un solo agente (Souza 2002).

La idea de diseñar grupos o enjambres de robots para la realización cooperativa de tareas no es nueva y ofrece una serie de ventajas

comparativas con respecto a al esquema tradicional, como por ejemplo:

- Simplificación y distribución de tareas mediante la estrategia de solución de problemas, “divide y vencerás”.
- Sensórica e inteligencia distribuida que potencializa el paralelismo de tareas.
- Posibilita el diseño de mini-robots de bajo consumo de energía y de arquitectura más simple, haciendo que el sistema sea más confiable.

Estas ventajas hacen que los MAS robóticos dispongan de mayor capacidad de trabajo, más aún, cuando algunos de los agentes se tornan especialistas en la ejecución de tareas específicas, esto da origen a un trabajo cooperativo más eficiente y adaptable. No obstante el diseñador enfrenta problemas más complejos a la hora de implementar un MAS comparado con la aproximación tradicional de sistema monoagente; como son: la coordinación entre agentes y toma de decisiones, la inteligencia y sensórica distribuida que deben de ser soportados por un sistema de comunicaciones robusto y confiable.

Las acciones que lleva a cabo cada individuo del MAS robótico durante el proceso de cooperación se relacionan con sus características en cuanto al sistema perceptual y los efectores con que cuenta cada agente, de allí los diferentes grados de especialización que puede lograr cada agente en el sistema.

Los niveles de especialización que puede alcanzar cada individuo del MAS se relaciona con las especificidades a nivel de sistema perceptual, procesamiento y de los efectores con que cuenta cada uno. En ese sentido se establecen dos tipos de relaciones: de complementariedad (la suma de los esfuerzos individuales permite completar la tarea) y jerarquización (nivel de subordinación entre agentes) entre los robots en lo referente a los niveles de funcionalidad y de procesamiento de cada agente.

El mapeo digital (cartografiado) de un entorno de trabajo es uno de los ámbitos en los que más se utilizan los robots móviles trabajando de forma cooperativa. El equipo trabaja, y coopera en la tarea de explorar y construir mapas de un entorno estructurado o no, en el cual, posteriormente un grupo de agentes ha de llevar a cabo una tarea. Una vez el equipo de exploración construye el mapa digital, lo transfiere al grupo que ha de ejecutar las tareas predefinidas. El grupo responsable del levantamiento cartográfico puede entonces desplazarse a otro entorno.

III. ARQUITECTURA PROPUESTA

En este artículo se propone una arquitectura cooperativa en la cual tres robots balizas se ubican en posiciones diferentes en el entorno de trabajo, objeto del mapeo digital. Un cuarto robots realiza desplazamientos en zig-zag y paso a paso en el área definida por la ubicación de los tres robots balizas; este desplazamiento permite determinar la ubicación de obstáculos en el área delimitada y calcular las coordenadas mediante un algoritmo de localización por triangulación ultrasónica que se basa en la medida de rango de distancias por tiempo de vuelo (TOF) de señales ultrasónicas (Mäkelä 2001).

El agente explorador almacena las lecturas de coordenadas y luego las transfiere a los agentes encargados de efectuar tareas en dicho entorno. Éste emite un pulso electromagnético captado por los robots balizas que en respuesta emiten un pulso ultrasónico.

La frecuencia de cada pulso es diferente y se captan mediante el receptor ultrasónico omnidireccional ubicado en el explorador. A continuación las señales se separan mediante una operación de filtrado con lo que se determina el tiempo de arribo de cada una de las señales, para posteriormente calcular por triangulación, las coordenadas (X,Y) del agente explorador en cada punto de medida (mapeo discreto). Una interpolación tipo spline permite suavizar la superficie cartografiada.

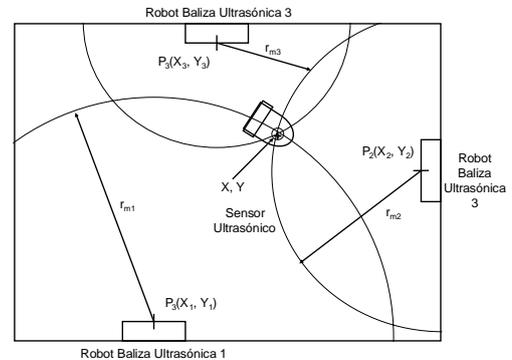


Figura 3. Algoritmo de Localización por Triangulación Ultrasónica (Khosla et al 1999)

En las figuras 3 y 4 se aprecia un MAS para el mapeo digital mediante el algoritmo de localización por triangulación ultrasónica es sugerido en Khosla et al (1999).

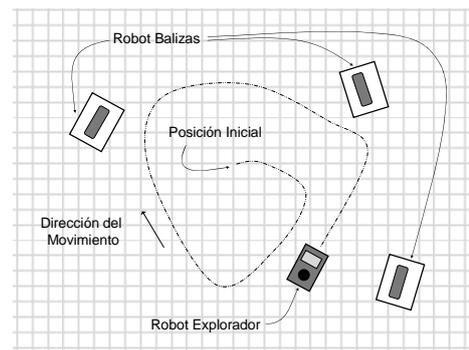


Figura 4. Sistema de Localización en Ambiente Estructurado (Khosla et al 1999)

El algoritmo de mapeo digital mediante balizas ultrasónicas calcula tres círculos de radios (r_{m1} , r_{m2} , r_{m3}) con centros en (P_1 , P_2 , P_3), correspondientes a las posiciones de las balizas, la intersección de estos tres círculos da como resultado la localización exacta (X , Y) del robot en su entorno y se calcula de acuerdo con expresiones simples de geometría analítica (Psenicka 1998).

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r^2_{m1} \quad (1)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r^2_{m2} \quad (2)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r^2_{m3} \quad (3)$$

Los mecanismos de percepción del entorno de los agentes que constituyen el MAS deben ser complementarios. Una buena metodología de diseño busca que cada agente disponga de sistemas de locomoción y percepción diversos; esto garantiza que la tarea pueda ser llevada a cabo exitosamente cuando cualquiera de los robots falla por uno u otro motivo; adicionalmente la disponibilidad de subsistemas complementarios en cada agente incrementa el desempeño y adaptabilidad del grupo en ambientes desconocidos y lo habilita para que pueda desempeñarse en ambientes no estructurados.

IV. PROTOTIPOS DESARROLLADOS

Actualmente se construyen los agentes robóticos de la arquitectura propuesta. Florez et al (2003) construyeron un prototipo en el contexto nacional que consiste en un pequeño robot reactivo móvil dotado de una tarjeta de control diseñada con base en el microcontrolador MC68HC908GP32 de la firma Freescale Inc.

Un módulo simple de percepción basado en sensores infrarrojos (IR) le permite determinar la presencia de obstáculos en su ruta y tomar decisiones de cambio de trayectoria. El módulo infrarrojo consta de un par emisor-receptor modulado en frecuencia mediante un reloj de 40 KHz lo que permite evitar interferencias de otras fuentes de luz infrarroja, tales como el sol y luminarias de uso residencial. Su rango de operación de este módulo es de aproximadamente 40 cms.

Los efectores de este agente reactivo corresponden a dos pequeños motores DC con control electrónico en puente H y modulación PWM. Estos permiten controlar la marcha y la dirección (posición angular del efector).

La detección se da cuando parte de la energía infrarroja transmitida por el transductor de salida o emisor es reflejada por el obstáculo y captada en el transductor de entrada o receptor. Una limitante importante del sensor infrarrojo desarrollado es la incapacidad de determinar la distancia y las características del obstáculo detectado. El agente reactivo puede operar en modo autónomo o teleoperado. En modo autónomo, el móvil decide su trayectoria con base en la información suministrada por el módulo IR. En modo teleoperado se dispuso de un mando remoto de radio frecuencia microcontrolado especialmente diseñado para la aplicación.

Florez et al. (2003) desarrollaron un segundo robot totalmente autónomo (Figura 5) con una sensórica un poco más elaborada consistente en un módulo de detección de obstáculos y distancias por ultrasonido (sonar). Para este segundo prototipo se diseñó una tarjeta de control que dispone de 64 Kb de memoria RAM adicionales y un microcontrolador de 16 bits con instrucciones de lógica difusa en su set de instrucciones. Este microprocesador es el MC68HC912B32 también de la compañía Freescale Inc.

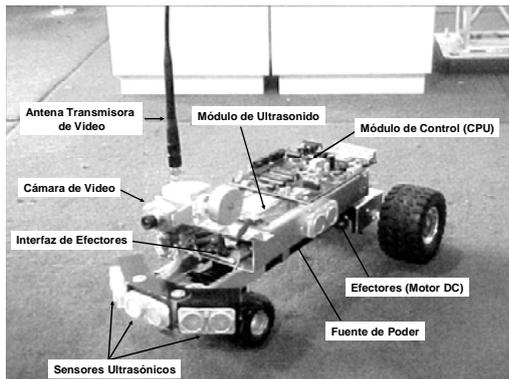


Figura 5. Segundo Agente Reactivo (Florez et al 2003) Plataforma de Investigación en Robótica Móvil

A pesar de que se diseñó un novedoso algoritmo de control neurodifuso para la navegación en entornos estructurados, este robot sigue siendo un agente reactivo, no orientado al trabajo en ambientes colaborativos.

El desarrollo de estos prototipos ha permitido alcanzar un grado de experticia en el diseño y construcción de sistemas robóticos y sus resultados se vienen extrapolando a situaciones de ambientes

colaborativos. No obstante, se deben enfrentar nuevos retos de diseño propios de los MAS como son la habilidad de interacción social, la proactividad, la movilidad, la adaptabilidad y el aprendizaje.

Los robots móviles hasta ahora desarrollados por Florez et al. (2003) constituyen agentes reactivos, puesto que obtienen información de su entorno mediante el sistema de sensores, procesan esta información y exhiben un comportamiento acorde con los algoritmos diseñados. Para varios de los prototipos construidos se han diseñado e implementado algoritmos de inteligencia artificial como redes neuronales y sistemas neurodifusos.

La arquitectura propuesta se viene diseñando con base en una nueva generación de agentes móviles cooperativos dotados de capacidades de comunicación, coordinación, control y organización social; estructurados en un ambiente colaborativo en el cual la sensórica y la inteligencia son distribuidas.

V. CONCLUSIONES

La teoría de agentes inteligentes viene cambiando significativamente la forma en que se conciben y diseñan los robots. Este nuevo paradigma de diseño, no solamente ha permitido mejorar notablemente el desempeño de los sistemas en aquellas tareas que hasta ahora se han considerado como típicas de la robótica; sino que también, ha permitido ampliar enormemente los campos de aplicación.

Se espera que en un corto plazo desarrollar MAS robóticos con atributos y capacidades que superen ampliamente los sistemas disponibles en la actualidad.

Lo anterior representa un gran reto para los investigadores en el campo de la robótica debido a que en éste convergen otras tecnologías que vienen alcanzando de manera independiente altos niveles de complejidad, tales como, la visión artificial, las telecomunicaciones, la microelectrónica, la nanotecnología, y las tecnologías asociadas a la inteligencia artificial, entre otras.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es auspiciada por la Dirección de Investigación Medellín-DIME (Código: 30805961) de la Universidad Nacional de Colombia.

REFERENCIAS

- Boissier, O.; Demazeau, Y. (1991) A Distributed Artificial Intelligence View on General Purpose Vision Systems. En: Proceeding Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agents World MAAMAW '91.
- Brena, R.; Aguirre, J.; Garrido L.; Conat, S. (2003) Conocimiento Distribuido y Agentes Inteligentes. Centro de Sistemas Inteligentes, Instituto Tecnológico de Monterrey.
- Deshpande, U.; Gupta, A.; Basu, A. (2004) Coordinated Problem Solving Through Resource Sharing in a Distributed Environment. En: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, Vol. 34, No. 2.
- Dorneich, M. (2002) A System Design Framework-Driven Implementation of a Learning Collaboratory. En: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, Vol. 32, No. 2.
- Ferber, J. (1999) Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison-Wesley.

- Florez, R.; Castrillón, Y.; Quintero, E.; Medina, J.; Garzon, L. (2003) Prototipo de Navegación y Sensórica en un Robot Móvil. Universidad de San Buenaventura.
- Gomes, E.; Boff, E.; Viccari, R. (2004) Social, Affective, and Pedagogical Agents for the Recommendation of Tutorial Colleagues in Agent Based Learning Environments. En: Proceedings of Workshop Social and Emotional Intelligence in Learning Environments of 7th International Conference on ITS2004, Brasil.
- Grudin, J. (1994) Computer-Supported Cooperative Work: History and Focus. En: IEEE Transactions Vol. 27 No. 5.
- Jennings, N.; Wooldridge, M. (1998) Applications of Intelligent Agents. En: Agent Technology. Foundations, Applications, and Markets. Springer-Verlang.
- Jennings, N. (2000) On Agent-based Software Engineering. En: Artificial Intelligence Vol. 117 No. 2.
- Jiménez, J. (2006) Un Modelo de Planificación Instruccional usando Razonamiento Basado en Casos en Sistemas Multi-Agente para entornos integrados de Sistemas Tutoriales Inteligentes y Ambientes Colaborativos de Aprendizaje. Universidad Nacional de Colombia. Tesis Doctoral.
- Johnson, D.; Johnson, R. (1978) Cooperative, Competitive and Individualistic Learning. Journal of Research and Development in Education, Vol 12.
- Khosla, P.; Navarro, L.; Paredis, Ch. (1999) A Beacon System for the Localization of Distributed Robotic Teams. Carnegie Mellon University.
- Lejter, M.; Dean, T. (1996) A Framework for the Development of Multiagent Architectures. IEEE Expert Intelligent Systems. Vol. 11, No 6.
- Lemaître, Ch. (1998) Multi-Agent Network for Cooperative Work. Expert System with Applications: An international Journal Elsevier Science.
- Maes, P. (1996) Intelligent Software Easing the Burdens that Computers Put on People. MIT Media Laboratory. IEEE Expert Intelligent Systems, Vol. 11 No 6.
- Mäkelä, H. (2001) Outdoor Navigation of Mobile Robots. University of Technology. Tesis Doctoral
- Nwana H.; Ndumu, D. (1998) A Brief Introduction to Software Agent Technology. En: Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets. Springer-Verlang.
- Ortega, M.; Bravo, J. (1998) Groupware and Computer-Supported Collaborative Learning.
- Psenicka, B.; Savage, J.; Lepe-Casillas, F.; Minami, Y.; Rivera, C. (1998) Robot Localization Using Ultrasonic Beacons. Universidad de México.
- Russell, S.; Norving, P. (2003) Intelligent Agents. En: Artificial Intelligence: A Modern Approach. Second Edition. Prentice Hall Series in Artificial Intelligence.
- Souza, J. (2002) Cooperação entre Robôs Aéreos e Terrestres em Tarefas Baseadas em Visão. UFMG. Proceeding of SPG'2002.
- Wooldridge, M. (2002) An Introduction to Multi-Agent Systems, John Wiley & Sons, Ltd.
- Xu, P.; Deters, R (2004) MAS & Fault-Management. En: Proceedings of the 2004 International Symposium on Applications and the Internet (SAINT'04) IEEE.