

Sistemas Multiagente y Fútbol de robots: Estado del Arte

Ing. Luis Fernando Ortega Melo

lfortegam@unal.edu.co

Departamento de Ingeniería de Sistemas - Universidad Nacional De Colombia

Abstract—Este artículo describe el estado del arte en los sistemas multiagente y del fútbol de robots, abarca desde los comienzos de la inteligencia artificial distribuida hasta las aplicaciones mas recientes, y los trabajos mas importantes en el área. Se toma en cuenta estados del arte hasta el año 2000 como el de Kim[11], y se incluye los trabajos realizados posteriormente, y los trabajos extras relevantes no incluidos en este Survey. Se abarca toda la teoría básica de agentes, en cuanto a su definición y arquitectura, y a partir de allí se introduce el concepto de sistemas multiagente, igualmente resaltando sus principales características: cooperación, comunicación y coordinación, sus posibles enfoques de construcción, se identifica hacia que tipos de problemas estan orientados. Se muestran los principales trabajos actuales en el área centrándose en el fútbol de robots como la aplicación por excelencia de este tipo de sistemas.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistema multiagente son un campo de estudio relativamente nuevo, desde los años 80 en donde se comenzaron a tejer las teorías, partiendo de la inteligencia artificial distribuida, sobre el estudio de los agentes, y a partir de las cuales se ha formado una teoría concreta sobre agentes y las propiedades emergentes de la combinación de estos en algunos sistemas, para modelar el trabajo en equipo, la cooperación y la negociación, convirtiéndose en la mejor alternativa para solucionar ciertos problemas complejos que se pueden dividir jerárquicamente y distribuir entre los agentes y cuya posterior combinación trae consigo una cierta cantidad de propiedades emergentes deseables y esperadas en el sistema.

Los sistemas multiagente son una rama de las ciencias de la computación que ha evolucionado en las dos últimas décadas, y que permiten resolver ciertos problemas a partir de sus características. Problemas en los que la complejidad se puede distribuir al conjunto de agentes y las acciones de ellos con las propiedades emergentes de su interacción y trabajo en equipo solucionan el problema de una forma adecuada.

II. MOTIVACIÓN, ANTECEDENTES

El estudio de los sistemas multiagente surge de la idea de elaborar un equipo de la universidad con base a las reglas de la Federación Internacional de fútbol robótico Asociado (FIRA), a partir de lo cual se comenzó a trabajar en diferentes puntos claves para el desarrollo del mismo, partiendo de características básicas como el control de movimiento de los robots para lograr desplazarse hasta su objetivo y evadir

obstáculos. En seguida se pretendía incluir características inteligentes a lo largo del juego en la estrategia de juego del equipo, para lo cual primero se trabajó en un modelo orientado a objetos en donde se volvían persistentes a través de todo el juego información sobre el estado del equipo y se incluyó un director técnico. Sin embargo, es preciso obtener un estado del arte en esta línea de investigación para organizar el trabajo existente, incluir las características que ya se han estudiado y experimentado. Y a partir de ese punto contribuir con el estudio de problemas nuevos, primero en el fútbol de robots, y luego evaluar en que otros escenarios o aplicaciones sean válidas estas soluciones.

En artículos como el que plantea Kitano[12] en 1997, sobre RoboCup, se muestra una introducción a esta organización dedicada a la organización del fútbol robótico a nivel mundial, se presenta -para un público general- la descripciones sencillas del sistema y de su funcionamiento: comportamiento reactivo, adquisición de estrategias, reconocimiento del contexto, colaboración multiagente, etc. Kitano identifica cuatro aspectos fundamentales del fútbol de robots: (1) el ambiente, el equipo propio y rival son altamente dinámicos, (2) La percepción de cada jugador o agente es limitada, (3) El rol de cada agente es diferente y (4) la comunicación entre los agentes es limitada. lo que hace que cada agente debe ser bastante autonomo en su comportamiento. En la última parte de este trabajo se incluyen consideraciones en cuanto a las reglas de RoboCup (tamaño del campo, número de jugadores, peso de los jugadores, tamaño y estructura de los jugadores), los simuladores existentes, específicamente el Server Soccer y el sistema MARS con su estructura general y los modelos existentes para describir el juego y la interfaz gráfica de usuario.

II-A. Bases teóricas, definiciones

Los estudios se centran en dos problemas, el diseño de los agentes y el diseño de las sociedades de agentes o Sistemas Multiagente (MAS).

II-A.1. Agente: Un agente es un sistema computacional autónomo con respecto a las acciones que ejecuta en busca de sus objetivos en un ambiente dado, del cual obtiene información mediante sensores y tiene un repertorio de acciones que puede ejecutar para modificar el ambiente, que pueden ser ejecutadas de forma no determinística.

Un agente también cuenta con la capacidad de interactuar con sistemas semejantes en busca un objetivo común.

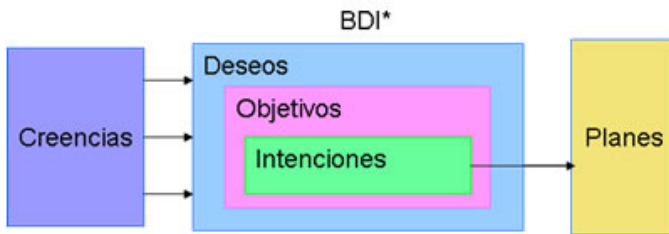


Fig. 1. Arquitectura BDI extendida con objetivos y planes

II-A.2. Agente inteligente: Un agente inteligente según Jennings y Wooldridge [23] posee tres características básicas:

- **Proactividad:** Se refiere a la capacidad de tomar la iniciativa para realizar las acciones necesarias para cumplir con los objetivos para los que son diseñados.
- **Capacidad de reacción:** A partir de sus sensores, un agente debe estar en la capacidad de responder a los estímulos del ambiente con las respuestas adecuadas y en el tiempo adecuado, de forma activa.
- **Habilidades sociales:** Un agente inteligente debe ser capaz de interactuar con otros agentes, inclusive humanos cuando es necesario para cumplir con sus objetivos. Las dos habilidades básicas son las habilidades de cooperación y de negociación. Es mucho más complejo que el simple intercambio de bits.

Un agente puede tener un comportamiento definido por objetivos y comportamiento reactivo, es compleja la combinación adecuada de estos dos en un agente.

Un agente es más que un objeto [22] -programación orientada a objetos- por que: (1) Tiene mayor autonomía, no solo sobre sus atributos, sino sobre sus acciones o métodos que describen su comportamiento, (2) los agentes poseen comportamientos flexibles, como el reactivo, proactivo, social, (3) La concurrencia es inherente a los sistemas multiagente, cada agente tiene el control de por lo menos un hilo, mientras que en un objeto la concurrencia es opcional.

II-A.3. Arquitectura BDI: En cuanto a la arquitectura de los agentes, es imprescindible destacar una de las más aceptadas en todos los tiempos, la arquitectura BDI en donde los expositores más relevantes son Rao & Georgeff [16], [15], que define un agente en función de sus creencias (*Beliefs*), que se refiere esencialmente al conocimiento del agente sobre su entorno, deseos (*Desires*) que se derivan de las creencias y que corresponden a hechos que el agente quiere que se cumplan en estados futuros que puede contener conflictos y contradicciones entre ellos, e intenciones (*Intentions*) que son los objetivos que el agente persigue en el momento presente.

En una versión extendida (véase figura 1), se incluyen los Objetivos como subconjunto de los deseos a cuya consecución podría dedicarse el agente. Tienen que ser realistas y no puede haber conflictos entre ellos, y los Planes, que combinan las intenciones del agente en unidades consistentes. Reflejan las acciones a desarrollar por el agente para conseguir sus intenciones. Habrá un plan global y un número adecuado de subplanes.

II-A.4. El ambiente o entorno: Los ambientes en los cuales se colocan los agentes son base fundamental en el

cumplimiento de los objetivos perseguidos con estos sistemas, por ende su estudio es tan relevante como el del propio agente.

La clasificación de las propiedades de los ambientes con mayor aceptación en la cual tenemos ambientes inaccesibles versus accesibles, ambientes determinísticos versus no determinísticos, ambientes dinámicos versus estáticos, ambientes discretos versus ambientes continuos.

II-A.5. Sistema Multiagente: La parte más importante de un agente es toda propiedad emergente que se obtiene cuando se acompaña de otros agentes, la interacción autónoma entre ellos generan el valor agregado con respecto a otro paradigma inteligente. Un sistema multiagente puede ser homogéneo (todos los agentes son idénticos) o heterogéneo, dependiendo de la estructura de todos sus agentes. La heterogeneidad agrega robustez al sistema, pero es más costosa y compleja su construcción. En el fútbol de robots tenemos un ejemplo clásico, con un sistema multiagente homogéneo podemos construir un equipo en el que todos los jugadores tengan las mismas acciones, todos intentan buscar el balón y llevarlo hasta el arco contrario (cómo el juego de unos niños pequeños), o podemos asignar a cada jugador (como en el juego profesional) una tarea dependiendo del rol que debe asumir, en este caso, corresponde a un sistema heterogéneo.

Desde otro punto de vista, en el diseño de un sistema multiagente, se puede optar por dos alternativas, una en la que el comportamiento es estructurado de forma jerárquica y con un control central sobre el comportamiento general del sistema y/o una basada en la distribución del control en todos los agentes y la combinación de sus comportamientos, obteniendo un comportamiento emergente del sistema. En este caso, al igual que con la anterior clasificación las variables claves a tener en cuenta son inversamente proporcionales, y por ello se puede pensar en una arquitectura híbrida según el campo de aplicación del sistema.

La tercera clasificación importante en los MAS, corresponde al nivel de comunicación entre los agentes, y, como en los otros casos tenemos dos alternativas, sistema no comunicativo en el que los agentes solo tienen en cuenta sus sensores para conocer el estado de los otros agentes o comunicativo, en donde se puede hablar de una interacción real, mediante protocolos o lenguajes definidos, como KQML (véase [8]), que permiten entre otras, conocimiento más preciso del estado del sistema, comportamientos cooperativos, de coordinación y de negociación.

II-B. Definición detallada del problema

Así, el objetivo principal parte del problema de la construcción de sistemas multiagente apropiado para cada aplicación. En este documento, específicamente se trata la de fútbol de robots, en donde se tienen unas condiciones bien definidas, y en donde la combinación adecuada de las arquitecturas posibles marca el punto base de la línea de investigación.

III. FÚTBOL DE ROBOTS

El fútbol de robots, como ya se ha dicho en este documento, es la aplicación por excelencia de los sistemas multiagente, y para completar el estado del arte es necesario incluir los

elementos básicos de un equipo de fútbol de robots, para de esta forma empalmar con lo descrito en las secciones anteriores y complementarlas. Estos elementos básicos, pertenecen indistintamente a equipos de fútbol basados en modelo FIRA o RoboCup.

Existen diferentes categorías dentro de estas dos organizaciones de fútbol de robots, que difieren en el tipo de robots utilizados, entre las principales tenemos

- HuroSot (Humanoid Robot World Cup Soccer Tournament), Contiene robots humanoides que tienen dos piernas, que poseen un tamaño máximo de 150 cms y un peso máximo de 30kg.
- Kheperasot, categoría en la cual compiten dos equipos, cada uno compuesto de un robot y dos humanos. El robot es totalmente autónomo e incluye un sistema de visión. Los humanos tienen permitido colocar el robot en una posición en el campo indicada por el arbitro, al inicio de cada ronda, iniciar el funcionamiento del robot cuando el arbitro lo indique y retirar el robot del campo al concluir el encuentro.
- Micro Robot World Cup Soccer Tournament(MiroSot). Cada encuentro es jugado por dos equipos de cinco(middle league) u once(large league) jugadores, uno de los cuales puede ser el arquero. además tres miembros del equipo humanos, un manager, un director técnico y un entrenador, que son los únicos permitidos en el campo de juego. Un computador por equipo dedicado al procesamiento de la visión y la identificación de posiciones. El tamaño de cada robot está limitado a un cubo de 3 centímetros de lado, el tamaño de la antena del robot no tiene restricciones.
- RoboSot, en esta categoría los equipos están compuestos de uno a tres robots, uno de los cuales puede ser el arquero. La principal característica es que los robots pueden ser completa o parcialmente autónomos. Igual que con la categoría MiroSot, cada equipo tiene tres miembros humanos, el manager, el director técnico y el entrenador. Cuando los robots son parcialmente autónomos disponen de un computador como base para controlar y procesar el sistema de visión implementado en las cámaras que contiene cada robot.

Para el caso de estudio se tendrá en cuenta robots con la morfología mas sencilla (categoría MiroSot), que consiste en una caja de 7.5cms de lado, con dos ruedas a derecha e izquierda que permite el movimiento (ver figura 2). Lo que permite centrar el estudio en las estrategias de equipo, más que en la arquitectura y el control de cada agente por separado.

III-A. Elementos básicos de un equipo de fútbol de robots

III-A.1. Interfaz con los robots: La interfaz y la comunicación entre el ambiente y los robots, corresponde al conjunto de componentes básicos de elementos de control, y se escapan del alcance de este documento, sin embargo se describen de forma general, para mayor información referirse a artículos como el de Kim[10], y el de Veloso[21] en donde se describen con detalle estos elementos de un sistema de fútbol de robots.

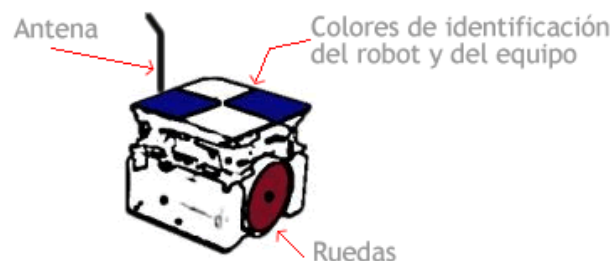


Fig. 2. Morfología del Robot

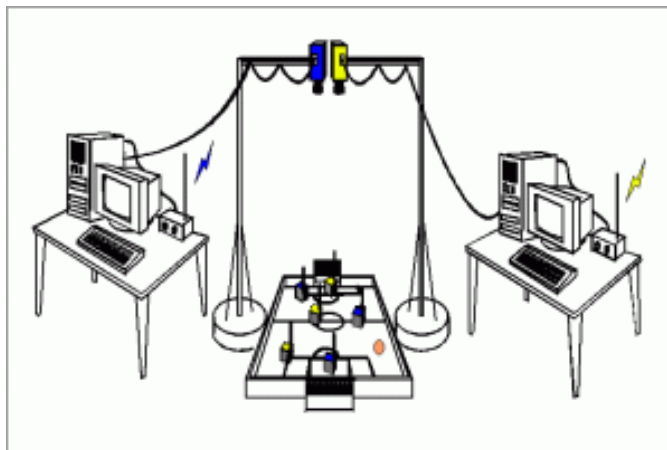


Fig. 3. Resumen del sistema base de un equipo de fútbol de robots.

Cuando existe la implementación física de los robots, la arquitectura básica de comunicación es la presentada en la figura 3¹, en donde los componentes principales son la cámara de visión, que actúa como sensor único de entrada para cualquiera de los dos equipos o sistemas, el sistema de envío de señales a los robots, con la velocidad de las ruedas derecha e izquierda, como los actuadores del sistema. Estos componentes deben tener sus respectivos métodos de conversión entre el sistema físico y lo que se modela en el programa de control. Sin embargo, estos temas han sido bastante tratados en diferentes implementaciones de equipos de fútbol de robots.

En el ambiente puramente simulado (véase figura 4), existen un servidor en donde se encuentra el ambiente y se manejan todas las variables correspondientes al campo de juego, el marcador, el tiempo, a los jugadores de cada equipo, así como la comunicación con los dos servidores en donde se encuentran las estrategias de juego de cada equipo.

III-A.2. Control de movimiento y control de colisiones o detección de obstáculos: El control de movimiento es uno de los problemas más tratados y superados en el fútbol de robots, se refiere a los mecanismos en el robot para que a partir de una posición inicial, se desplace hacia una posición final en una dirección específica, en la sección 3.1.3 de la tesis de maestría de Sotomonte[17], se muestran las técnicas mas fuertes de control de movimiento, o *path planning*, como también es conocido este problema.

¹Tomada del artículo [10]

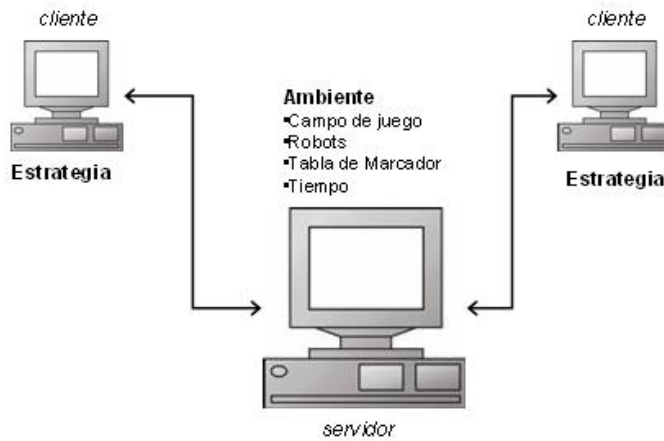


Fig. 4. Estructura del ambiente simulado

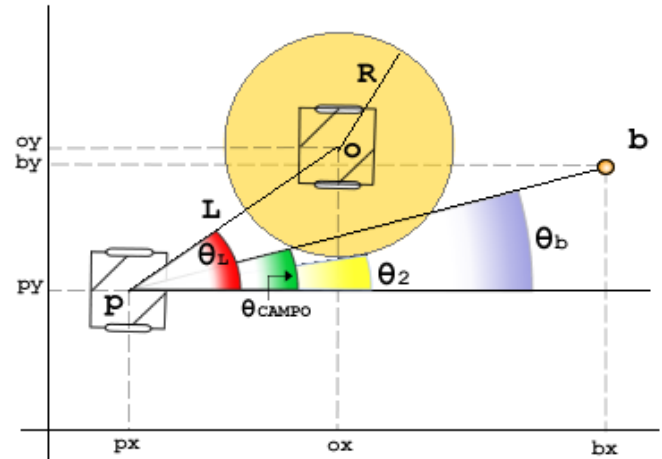


Fig. 6. Detección de obstáculos

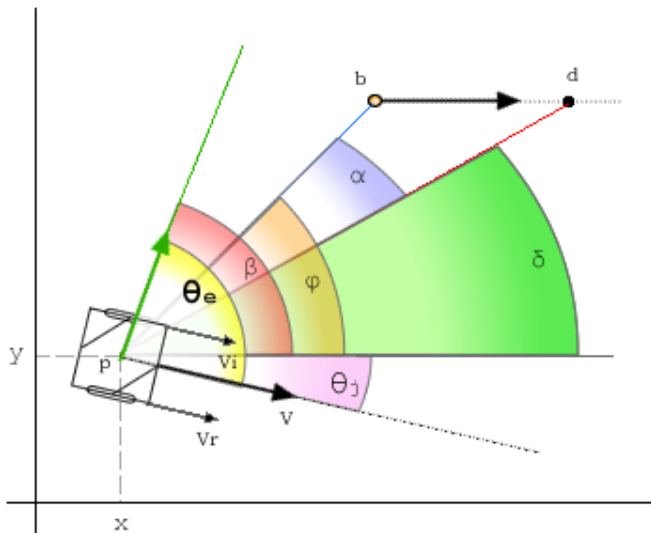


Fig. 5. Control de movimiento por campos univectoriales potenciales

Ver figura 5

III-A.3. *Detección de obstáculos:* Ver figura 6

III-A.4. *Habilidades básicas:* Las habilidades básicas son un conjunto de operaciones sencillas de movimiento asociadas al robot, que se encapsulan con base a un objetivo. Por ejemplo, diblar, pasar la bola, interceptar, disparar al arco o marcar a un oponente, entre otras.

III-B. Elementos de alto nivel, sistemas multiagente

Los elementos básicos presentados en la sección anterior establecen el soporte sobre el cual se construye un sistema de fútbol de robots, tomando esto como las características de la construcción de los agentes en este sistema, podemos ahora abarcar el tema del sistema multiagente en este caso, con el fin de integrar la teoría hasta este punto mostrada.

III-B.1. *Roles y estructuración del agente:* En artículos como el de Simon Chng[5], se expone el concepto de rol dentro de un sistema multiagente, que corresponde a un conjunto de responsabilidades asociadas a un agente, con relación al objetivo del sistema. En el caso del fútbol de robots,

los roles son fácilmente identificables, el defensa, el arquero, el medio, volante y delantero, son algunos ejemplos, y en cada uno de ellos tenemos diferentes acciones que debe realizar el agente con base a sus responsabilidades.

Otro aspecto importante cuando se especifican roles en un sistema multiagente, es la heterogeneidad que ello le asigna al sistema, los roles se incluyen para dividir el gran problema del sistema en subproblemas diferentes en donde la definición y la ejecución del conjunto de actividades para llegar a una solución de estos es sencillo.

III-B.2. *Estrategia y cambio dinámico de roles:* La estrategia se enmarca dentro del aspecto deliberativo de este sistema. En la estrategia de juego se incluye el aprendizaje del equipo, el control de las variables asociadas al equipo y que son persistentes en todo el juego. Además, el intercambio dinámico de roles, permite que el sistema adquiera flexibilidad en tiempo de ejecución, como reacción a un evento determinado, o como parte de un plan establecido en la estrategia.

III-B.3. *Otros elementos relevantes del sistema:* La persistencia de los datos relevantes en el juego deben incluirse en la estrategia del equipo, jugadas anteriores, marcos de juego o estados similares, son los elementos con perspectiva de investigación en este tema. Corresponden al nivel con mayor abstracción.

IV. TRABAJOS REALIZADOS EN EL ÁREA

IV-A. Trabajos teóricos básicos fundamentales

Kim[11] presenta en el año 2000 un estado del arte sobre los sistemas multiagente desde la perspectiva del fútbol de robots, en este artículo condensa las teorías existentes hasta el momento, basándose en los mejores autores de la década pasada, y establece una taxonomía que estructura de forma adecuada el trabajo realizado hasta el momento. La estructura de este documento, junto con los aspectos que no incluyó de otros estudios en su época y las temáticas de trabajos más recientes, se construye la figura 7, en donde se puede observar a partir de la teoría básica de los agentes, la integración de estos en la construcción del sistema multiagente, del cual



Fig. 7. Taxonomía principal del tema de investigación

se desprenden los principales tópicos de estudio, entre los cuales hay unos donde el nivel de madurez en cuanto a la investigación es bastante alto, como en la arquitectura de los sistemas, la comunicación interna del mismo, y el comportamiento y la clasificación de los sistemas de acuerdo a este.

Existe una descripción detallada desde la parte filosófica y de los agentes (véase Bratman[3], Cohen & Levesque[7], Rao & Georgeff[16], [15]) con las características que los componen, cómo los deseos, creencias, intenciones y la aplicación en algunos sistemas como PRS y dMARS, hasta la formalización y síntesis teórica² (Wooldridge, Jennings[23]) con semánticas definidas, y la creación de metodologías orientadas a agentes en las que se han realizado importantes aportes en la industria, la ingeniería de software, y las ciencias de la computación.

IV-B. Trabajos específicos y actuales

IV-B.1. Multicapas en Sistemas Multiagente: De otro lado, la investigación en el área ha continuado y evolucionado en diferentes aspectos, como la inclusión de herramientas de IA en la arquitectura, la evolución, el aprendizaje y las estrategias en los sistemas multiagentes. El fútbol de robots ha sido el campo por excelencia en donde se han estudiado los MAS, y en donde autores como Peter Stone, Manuela Veloso, han estudiado y experimentado aspectos importantes de los MAS, como la división en capas de la complejidad de estos sistemas, logrando una jerarquía en la que se puede trabajar top-down (desde las capas mas abstractas y complejas hasta las acciones mas sencillas), bottom-up o combinando estas en una arquitectura híbrida. En la construcción basada en capas para los sistemas multiagente, se muestran las ventajas de trabajar cada nivel por separado y la forma en que se integran unos niveles con otros, de tal forma que unos son entradas para otros y viceversa, completando el sistema de nuevo y llegando a una solución, única pero a su vez flexible, mantenible y escalable. En [20] Stone y Veloso muestran un ejemplo interesante en el que crea dos conjuntos de capas.

El primer conjunto representa y estructura la arquitectura (cuadro I -traducido del artículo-) que incluye la capa comportamental asociada al robot, la perceptual representada en este caso con la cámara de visión que se tiene sobre el campo, y la capa estratégica que se almacena en el servidor que controla el equipo.

²Capítulo 2, teorías base

Capa	Entidad	Entrada	Salida
Comportamental	Robots	Comandos	Mov. Actuales
Perceptual	Cámara de visión	Visión del campo	Coord. robots y bola
Estratégica	Computador	Coord. robots y bola	Comandos

TABLE I
CAPAS DE LA ARQUITECTURA

Capas del nivel estratégico	ejemplos
Robot - bola	interceptar
Jugador uno a uno	pase, apuntar
Jugador uno a muchos	pase al equipo
Selección de acción	pase o drible
Colaboración de equipo	posicionamiento estratégico

TABLE II
CAPAS DE LA ESTRATEGIA

Y el segundo conjunto de capas corresponde a la estrategia (cuadro II -traducido del artículo-), en donde se tienen comportamientos de acuerdo a las capas del nivel estratégico, por ejemplo, la más sencilla que corresponde a la relación robot-bola, posee la acción interceptar o mover en una dirección específica, entre otras.

IV-B.2. Aprendizaje de los sistemas multiagente: Stone en el 2000[19], presenta un trabajo sobre sistemas multiagente en el que se enfoca en la perspectiva de aprendizaje de maquina para estos sistemas,

Uno de los trabajos más representativos, es el de *Genetic programming and multi-agent layered learning by reinforcements*[9], en donde se evalúa la función fitness del algoritmo aplicado en un nivel o capa intermedia, que consiste en pares de agentes o subgrupos, y con esto se forman las semillas para evolucionar todo el equipo, en una capa de abstracción más alta, lo que permite construir un sistema con un enfoque bottom - up, orientado a la composición incremental de las características abstractas y complejas del sistema. Este artículo aplica su teoría en el fútbol de robots, en donde muestra todo el proceso para un jugador defensa.

IV-B.3. Manejo de Acciones en el sistema multiagente: Con respecto al manejo de las acciones y de la selección de cuales utilizar en un momento determinado en el sistema existen dos enfoques representativos importantes, el primero[18] planteado por Peter Stone en el 2001, se centra en una función de probabilidad que se evalúa de acuerdo al rol del agente y a la distancia a la bola, o la posición de esta en el campo.

Bezek [2] en el 2005, se centran modelar el comportamiento del sistema multiagente basado en la especificación de las acciones de cada agente, jerarquía entre estas acciones y la representación de estas acciones dentro de un conjunto de características que se cumplen en un dominio. Este artículo presentado por Bezek tiene su experimentación en el sistema de fútbol de robots RoboCup.

IV-B.4. Evolución de los sistemas multiagente: Otros trabajos como el de [6], se centra en una línea de investigación en la que se aplican los algoritmos genéticos coevolutivos y otras técnicas de inteligencia para optimizar el comportamiento y la coordinación a nivel grupal del equipo de agentes. En su trabajo, introduce los conceptos básicos, como coordinación en los sistemas multiagente, muestra las bases de los conceptos y técnicas del proceso de coevolución, en donde se tiene en cada conjunto de especies una parte de la solución al problema tratado, y a partir de la combinación de un número de especies se llega a la solución total, teniendo en cuenta una función de conveniencia ("fitness") asociada con las soluciones completas. Se resalta la flexibilidad de escoger entre unas u otras especies. El algoritmo genético de coevolución contiene todas las diferentes configuraciones posibles y es el responsable de la evolución del equipo. Empalma los algoritmos descritos con la coordinación de un equipo de fútbol, en donde presenta las simulaciones realizadas y los resultados.

IV-B.5. Sistemas multiagente con Coach: La dirección de un grupo de agentes es otro de los puntos relevantes en un sistema multiagente y aun más en la aplicación del fútbol robótico, es tratado a fondo en trabajos como [14]. Las actividades básicas del director son: el control, el filtro de información entre la comunicación de los agentes, la especificación de la misión, la notificación de novedades, como el cambio de estrategias, roles o modelos de juego. Sin embargo se deben tener claro que es solo una dirección y que no se pierde la autonomía de los agentes. Otro aspecto relevante es que plantea que la intervención humana se realice a través del director del equipo, es decir que mediante este se especifica algunas acciones correctivas o evolutivas hacia el comportamiento individual o colectivo del equipo.

IV-B.6. Diseño orientado a agentes: Existen diversas metodologías orientadas a los sistemas multiagente, entre las mas importantes, descritas en el libro de Brian[4] en el 2005 tenemos,

Otro aspecto importante es la utilización de herramientas como UML en el modelamiento de los sistemas multiagente, en los trabajos de Arai y Murray [13], [1] muestran como utilizar cuadros de estado y diagramas de actividad para describir las acciones e interacciones entre los agentes. Las actividades representadas en los diagramas mantienen una jerarquía con la cual se vislumbra la composición recursiva de estas actividades, dividiendo la complejidad hasta las acciones mas sencillas. El trabajo de Murray muestra el caso del fútbol de robots, en el cual modela mediante diagramas de actividad el comportamiento de un agente, incluyendo la interacción y cooperación con los compañeros de equipo.

V. PERSPECTIVAS

Los temas principales en los cuales trabajar con respecto al fútbol de robots se centra en la aplicación de inteligencia artificial, cómo redes neuronales, algoritmos evolutivos, heurística, aprendizaje de máquina y modelos más flexibles como lógica difusa para la creación de estrategias que involucren comportamientos complejos de los SMA, sin afectar el rendimiento de este sistema.

Así se busca el punto de equilibrio adecuado en un comportamiento híbrido entre un sistema que debe ser altamente reactivo, pero que debe incluir aspectos deliberativos para obtener mayores beneficios y acercarse más a la capacidad y el comportamiento humano.

Aprovechando la estructura de capas mostrada en la sección IV-B.1, estos temas de investigación se centran en la capas más abstractas y complejas.

VI. CONCLUSIONES

Los sistemas multiagente han surgido como uno de los paradigmas actuales para el modelamiento de sistemas complejos, en donde se puede representar diferentes características, de una forma incremental y de composición, que provee modularidad, flexibilidad, escalabilidad y fácil mantenimiento. Las aplicaciones más relevantes de los sistemas multiagente se encuentran en la ingeniería de software, orientado a aplicaciones distribuidas autónomas sobre la red, sin embargo en esta línea de investigación, existen muchas perspectivas, en cuanto a las programación orientadas a agentes, y la inclusión de metodologías experimentales en proyectos reales. Ahora bien, en cuanto al fútbol de robots -la aplicación por excelencia de los SMA-, la etapa de arquitectura y construcción de los SMA asociados, tiene un alto grado de maduración, y los estudios se centran en técnicas de evolución del sistema, de aprendizaje por refuerzo, aprendizaje multi-capas, o utilizando redes neuronales.

REFERENCES

- [1] T. Arai and F. Stolzenburg, "Multiagent systems specification by uml statecharts aiming at intelligent manufacturing," in *AAMAS '02: Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*. New York, NY, USA: ACM Press, 2002, pp. 11–18.
- [2] A. Bezek, "Discovering strategic multi-agent behavior in a robotic soccer domain," in *AAMAS '05: Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*. New York, NY, USA: ACM Press, 2005, pp. 1177–1178.
- [3] M. Bratman, D. Israel, and M. Pollack, "Plans and resource-bounded practical reasoning," *computational intelligence*, vol. 4, pp. 349–355, 1988.
- [4] P. G. Brian Henderson-Sellers, *Agent-Oriented Methodologies*, 2005.
- [5] S. Chng and L. Padgham, "From roles to teamwork: a framework and architecture," *Applied Artificial Intelligence Journal*, 1997.
- [6] A. L. V. Coelho and D. Weingaertner, "Evolving coordination strategies in simulated robot soccer," in *AGENTS '01: Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*. New York, NY, USA: ACM Press, 2001, pp. 147–148.
- [7] P. R. Cohen and H. J. Levesque, "Intention is choice with commitment," *Artif. Intell.*, vol. 42, no. 2-3, pp. 213–261, 1990.
- [8] —, "Communicative actions for artificial agents," in *Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'95)*, V. Lesser and L. Gasser, Eds. San Francisco, CA, USA: The MIT Press: Cambridge, MA, USA, 1995, pp. 65–72. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/cohen95communicative.html
- [9] W. H. Hsu and S. M. Gustafson, "Genetic programming and multi-agent layered learning by reinforcements," in *GECCO 2002: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, W. B. Langdon, E. Cantú-Paz, K. Mathias, R. Roy, D. Davis, R. Poli, K. Balakrishnan, V. Honavar, G. Rudolph, J. Wegener, L. Bull, M. A. Potter, A. C. Schultz, J. F. Miller, E. Burke, and N. Jonoska, Eds. New York: Morgan Kaufmann Publishers, 9-13 July 2002, pp. 764–771.
- [10] J. Kim, "Cooperative multi-agent robotic systems: from the robot-soccer perspective," 1997. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/kim97cooperative.html

- [11] J.-H. Kim and P. Vadakkepat, "Multi-agent systems: A survey from the robot-soccer perspective," *Intelligent Automation and Soft Computing*, p. 31, 2000.
- [12] H. Kitano, M. Asada, Y. Kuniyoshi, I. Noda, and E. Osawa, "RoboCup: The robot world cup initiative," in *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents (Agents'97)*, W. L. Johnson and B. Hayes-Roth, Eds. New York: ACM Press, 5–8, 1997, pp. 340–347. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/kitano95robocup.html
- [13] J. Murray, "Specifying agents with uml in robotic soccer," in *AA-MAS '02: Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*. New York, NY, USA: ACM Press, 2002, pp. 51–52.
- [14] M. Perron, "Coaching a society of robots in accomplishing joint tasks," *Crossroads*, vol. 9, no. 1, pp. 19–27, 2002.
- [15] A. S. Rao and M. P. Georgeff, "BDI-agents: from theory to practice," in *Proceedings of the First Intl. Conference on Multiagent Systems*, San Francisco, 1995. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/rao95bdi.html
- [16] —, "Modeling rational agents within a BDI-architecture," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'91)*, J. Allen, R. Fikes, and E. Sandewall, Eds. Morgan Kaufmann publishers Inc.: San Mateo, CA, USA, 1991, pp. 473–484. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/rao91modeling.html
- [17] W. Sotomonte, "Estrategias de sistemas de agentes (simple y múltiples): Caso de estudio fútbol de robots," Master's thesis, universidad Nacional De Colombia, 2005.
- [18] P. Stone and D. McAllester, "An architecture for action selection in robotic soccer," in *AGENTS '01: Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*. New York, NY, USA: ACM Press, 2001, pp. 316–323.
- [19] P. Stone and M. M. Veloso, "Multiagent systems: A survey from a machine learning perspective," *Autonomous Robots*, vol. 8, no. 3, pp. 345–383, 2000. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/stone97multiagent.html
- [20] M. Veloso, P. Stone, and S. Achim, "A layered approach for an autonomous robotic soccer system," in *AGENTS '97: Proceedings of the first international conference on Autonomous agents*. New York, NY, USA: ACM Press, 1997, pp. 530–531.
- [21] M. Veloso, P. Stone, and K. Han, "The cmunited-97 robotic soccer team: perception and multiagent control," in *AGENTS '98: Proceedings of the second international conference on Autonomous agents*. New York, NY, USA: ACM Press, 1998, pp. 78–85.
- [22] M. Wooldridge, *An Introduction to MultiAgent Systems*, May 2002.
- [23] M. J. Wooldridge and N. R. Jennings, "Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey," in *Workshop on Agent Theories, Architectures & Languages (ECAI'94)*, ser. Lecture Notes in Artificial Intelligence, M. J. Wooldridge and N. R. Jennings, Eds., vol. 890. Amsterdam, The Netherlands: Springer-Verlag, Jan. 1995, pp. 1–22. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/article/wooldridge94agent.html