

Simulación de Procesos de Cooperación con Robots Móviles

Fernando De la Rosa, Martín E. Jiménez¹

Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación,
Carrera 1 No 18A-10, Bogotá, Colombia
fde@uniandes.edu.co, martjim@gmail.com

Resumen. Este artículo presenta el proceso de diseño y validación de una arquitectura que controla un grupo de robots trabajando cooperativamente. La arquitectura propuesta está basada en comportamientos y es el resultado de pruebas en simulación modificando los niveles de conocimiento, coordinación y organización de múltiples robots. Las pruebas se realizan resolviendo una tarea conjunta con un objetivo común. Los comportamientos son heurísticas que definen una secuencia lógica para resolver una tarea definida. La ejecución de un comportamiento en un robot depende del resultado de comportamientos anteriores en la secuencia, de la información sensorial captada por el robot y del estado de avance del objetivo común. Un proceso central en la arquitectura conoce el estado de los robots y de avance del objetivo común e interviene sólo si hay medidas indicando un estancamiento en el objetivo común.

Palabras Claves: sistemas multi-robot, arquitecturas multi-robot, sistemas colaborativos, inteligencia artificial distribuida, robótica móvil.

1 Introducción

Una de las principales motivaciones en robótica es lograr la integración de los robots en las labores humanas. Para lograr esto, los robots deben en muchos casos interactuar con otros robots, con otras máquinas y con los seres humanos. Por lo anterior, el estudio particular de la interacción entre robots a diversos niveles cobra gran relevancia. Una de las formas más avanzadas en la que los robots pueden interactuar es la cooperación. Existen diferentes estrategias de cooperación que dependen básicamente de tres aspectos: (1) el conocimiento que tiene cada robot de los demás miembros del grupo, (2) la forma en la que los robots coordinan el trabajo conjunto y (3) la autonomía (organización) que poseen los robots. Este trabajo se enfoca en el estudio de diferentes niveles de cooperación entre robots móviles para desarrollar una tarea en forma conjunta. Diferentes arquitecturas son propuestas modificando su nivel de conocimiento, de coordinación y de autonomía. La arquitectura resultante está basada en comportamientos que proveen a cada robot móvil de capacidades de acción

¹ Actualmente trabaja en las Universidades Distrital y Central, Bogotá, Colombia.

autónomas. Un proceso base (central) se integra a la arquitectura para manejar información global, tanto de los robots como del entorno. Este proceso no determina completamente el comportamiento de los robots pero agrega un nivel de centralización enviándoles información e influyendo en sus comportamientos.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente forma: la sección 2 presenta las características de las arquitecturas de cooperación de robots. En la sección 3 se enuncia el problema de estudio y las características del caso de validación. Las arquitecturas propuestas, los resultados de evaluación y su síntesis aparecen en la sección 4. La parte final contiene las conclusiones y la propuesta de trabajos futuros.

2 Cooperación entre Robots

Según Daniele Nardi [1], la cooperación en robótica se define como “una situación en la cual varios robots operan conjuntamente para desarrollar una tarea global la cual no puede ser desarrollada por un solo agente o cuya ejecución se puede mejorar usando más de un robot”. La investigación en el área de sistemas multi-robot se basa en la hipótesis de que un grupo de robots puede resolver una tarea en forma más eficaz que uno solo miembro. La eficiencia se logra aumentando la tolerancia a fallas y la simplicidad de los robots y disminuyendo el tiempo de realización de una tarea.

2.1 Trabajos Anteriores

Los sistemas multi-robot han sido motivo de investigación desde ya hace varios años [2]. Una problemática central corresponde a lograr la cooperación multi-robot. Como solución se han propuesto diferentes tipos de arquitecturas que pueden clasificarse en cuatro grandes grupos [3]: deliberativas, reactivas, de interacción e híbridas. En las arquitecturas deliberativas los agentes mantienen una representación del mundo y tienen una capacidad cognitiva para realizar acciones. Los agentes pueden mantener objetivos globales durante una tarea. Un enfoque común es el BDI (por sus siglas *Beliefs, Desires, Intentions*) donde el modelaje de los agentes se basa en creencias, deseos e intenciones. Rao y Georgeff [4] presentan una arquitectura BDI que permitió la implementación de aplicaciones prácticas. Las arquitecturas reactivas permiten a los agentes tomar decisiones en tiempo de ejecución, bajo información (sensorial) limitada y aplicando reglas situación-acción. Los agentes mantienen un comportamiento robusto, sacrificando los aspectos correctitud y optimalidad. Un enfoque común de este tipo es el basado por comportamientos. Parker [5] aplica este enfoque en el manejo de un grupo heterogéneo de robots en tareas de limpieza de materiales tóxicos. Mataric [6] describe una arquitectura basada en comportamientos donde los agentes tienen una capacidad de aprendizaje a medida que interactúan con el medio. Las arquitecturas de interacción se centran en el proceso de coordinación y en los mecanismos de cooperación destacando el aspecto social de los agentes [7]. Las arquitecturas híbridas están basadas en capas que estructuran la funcionalidad y el control buscando obtener las propiedades de reactividad, deliberación, cooperación y adaptación. D'Angelo *et al.* [8] describen una arquitectura híbrida donde cada agente se define por un nivel reactivo y un nivel deliberativo favoreciendo la cooperación.

2.2 Niveles en una Arquitectura Multi-Agente

El diseño de una arquitectura para multi-agentes trabajando en forma conjunta y simultánea debe tener en cuenta los siguientes niveles [1] (Fig. 1):

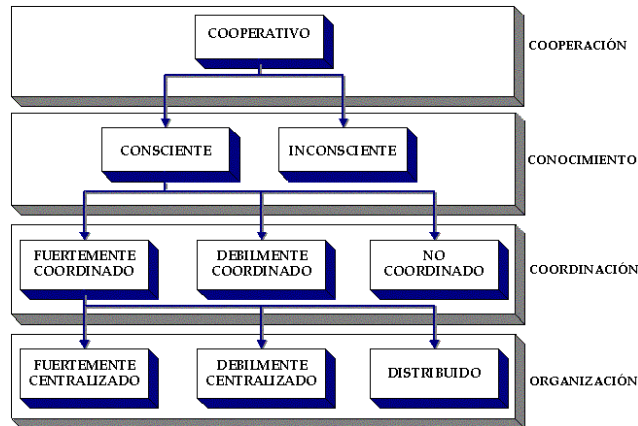


Fig. 1. Taxonomía de un Sistema Multi-Agente[1]

1. Nivel de cooperación: Por cooperación se entiende una situación en la que los robots trabajan juntos para realizar una tarea que no puede ser completada por un solo robot o que se puede realizar más eficientemente con varios robots. También se habla de cooperación si los robots realizan tareas diferentes con un fin común.
2. Nivel de conocimiento: Por conocimiento se refiere a la información que tiene un agente de la existencia de los demás para tenerla en cuenta en su accionar.
3. Nivel de coordinación: La coordinación se refiere a supeditar las acciones desarrolladas por cada robot según las acciones de los demás robots con el fin de lograr una operación coherente y de mejor desempeño. Cuando se cuenta con un protocolo de coordinación se habla de un sistema fuertemente coordinado.
4. Nivel de organización: Este aspecto tiene en cuenta la centralización o distribución de funciones entre los agentes. En un extremo la coordinación de las funciones de los robots se dirige desde un proceso central (base), que puede ser un agente externo o también uno de los agentes dentro del grupo. En el otro extremo cada agente actúa en forma autónoma como es el caso de los sistemas distribuidos.

2.3 Arquitectura Multi-Agente de Trabajo

El diseño de arquitecturas multi-agente encuentra conflictos en algunos criterios. En particular se discute el compromiso entre la eficiencia por un lado y la adaptabilidad y capacidad de reacción por el otro. Este compromiso se trata de manera diferente en los diferentes enfoques de las arquitecturas mencionadas (sección 2.1). Este trabajo apoya el enfoque basado en comportamientos, en el cual se apuesta por un control distribuido de las acciones del robot [6][9]. Se intenta escalar en complejidad, introduciendo habilidades en los robots como motivaciones internas, memoria,

aprendizaje y comunicación, sin perder la simplicidad del enfoque reactivo. El accionar del robot se descompone en comportamientos simples los cuales se activan principalmente por la interacción del robot con el ambiente y lo guían a alcanzar un objetivo. La acción inteligente emerge de la interacción entre los comportamientos del robot. El comportamiento grupal surge como resultado de la interacción de unos robots con otros bien sea directamente o a través del medio ambiente.

3 Problema de Estudio y Tarea de Prueba

Se estudia el desempeño de un conjunto de agentes robóticos en una arquitectura que permite variar los niveles de conocimiento, coordinación y organización descritos anteriormente. Para esto se plantea una tarea a resolver y se proponen diferentes arquitecturas de grupo con el fin de realizar medidas de desempeño de los robots en cada una de ellas. La tarea específica a resolver es lograr que un grupo de robots encuentre y recoja en un ambiente desconocido un conjunto de objetos (basuras) que se encuentran dispersos y los lleven a una zona determinada (meta). Se incluye también un proceso base con el cual los robots pueden establecer comunicación bi-direccional para reportar información propia o conocer información de otros agentes.

3.1 Propuesta de Solución

Se proponen cuatro arquitecturas multi-agente cooperativas basadas en comportamientos, diferenciándose por sus niveles de conocimiento, coordinación y organización entre sus agentes. Adicionalmente, cada una de las arquitecturas propuestas involucra algún grado de centralización de acciones de los agentes.

Los comportamientos que se definen están basados en las necesidades identificadas en el caso de prueba. Los agentes necesitan *Buscar* basura, *Reconocer objeto detectado* (obstáculo, basura o robot), *Sortear* obstáculo y *Depositar* basura.

3.2 Modelado del Ambiente de Simulación

El ambiente de simulación está compuesto por el escenario, un proceso base y los robots móviles. Las simulaciones se desarrollaron y probaron en MATLAB [10].

El escenario está definido por un sistema de referencia, su frontera, un conjunto de obstáculos, un conjunto de basuras y una zona de descarga (meta). Su frontera es cuadrada con un área donde evolucionan los robots. Sus límites al igual que los obstáculos al interior son de un color característico. Los obstáculos tienen forma poligonal. Las basuras son objetos físicos con un color distinguible y una ubicación accesible pero desconocida para los robots. La meta se ubica en una esquina del escenario definiendo una zona cuadrada con 2 límites físicos y 2 bordes virtuales. Los robots sólo pueden llegar hasta los bordes virtuales de la meta para depositar una basura y evitar tomar otras ya depositadas. Una simulación termina cuando se deposita la última basura. Para las simulaciones se utilizaron 3 escenarios con 3 robots. En cada escenario se hicieron pruebas con 3 distribuciones de basuras (Fig. 2).

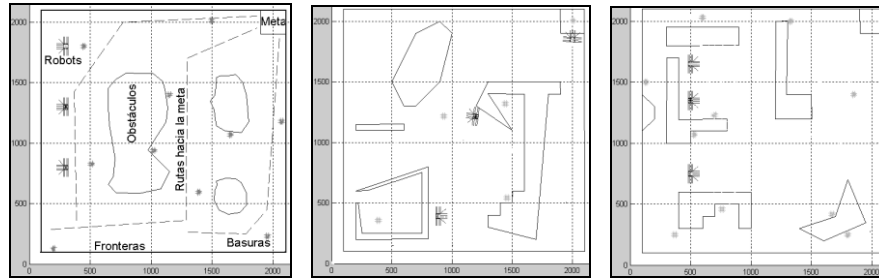


Fig. 2. Escenarios de prueba con diferentes obstáculos y distribuciones de basuras.

El proceso base corresponde a un agente (virtual) que conoce la posición de los robots y el escenario. El proceso de consulta de información con el proceso base integra un mecanismo de acceso exclusivo garantizando la comunicación con un único robot a la vez.

Cada robot móvil (agente físico) posee un conjunto de comportamientos, una geometría, una cinemática de movimiento, un sistema sensorial y un sistema de comunicación con el proceso base. Los comportamientos definen la capacidad de operación (funciones) del robot y su autonomía. Esta capacidad se ve afectada por la información recibida por los sensores o por el proceso base. La definición de un agente se ilustra en Fig. 3. Los comportamientos reciben datos de entrada (flechas continuas) del proceso base y de los sensores y generan datos de salida (flechas punteadas) hacia el proceso base y hacia los servos de los robots. Entre comportamientos las flechas continuas significan secuencialidad (un comportamiento sigue a otro) y las flechas punteadas significan inhibición (un comportamiento inhibe a otro). El símbolo \otimes representa un mecanismo de decisión para la ejecución de un comportamiento y el símbolo \boxplus representa un mecanismo de selección excluyente entre múltiples acciones.

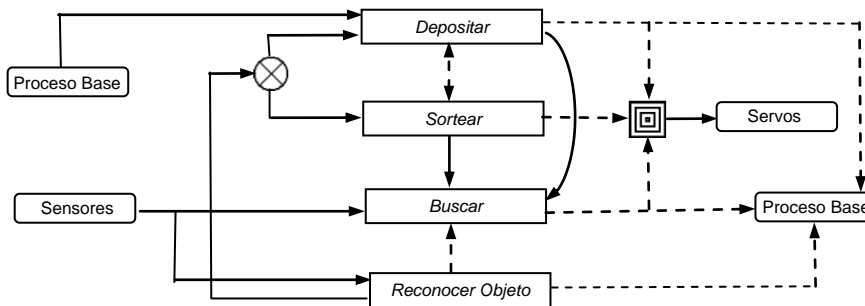


Fig. 3. Arquitectura de un agente basado en comportamientos.

La geometría de un robot es cuadrada. Su cinemática se controla con dos variables excluyentes: la velocidad lineal y la velocidad angular –no hay trayectorias curvas-. Los sensores (de tipo infrarrojo) permiten detectar objetos (obstáculos, basuras, otros robots) próximos al robot. Cada sensor se modela como un haz de longitud finita, la cual está relacionada con el alcance del sensor. Cuando el haz colisiona con algún

objeto se envía un valor al sensor dependiendo de su color, el cual es característico de cada objeto (basura, obstáculo o robot). Cada robot está equipado con 14 sensores: 4 frontales, 2 en las esquinas frontales y 4 en cada costado (izquierdo, derecho).

4 Soluciones Evaluadas y Resultados

A continuación se presentan las cuatro arquitecturas multi-agente propuestas y sus resultados resolviendo la tarea de prueba. Las simulaciones se realizaron en 3 escenarios (Fig. 2) y en cada uno se definen 3 distribuciones diferentes de 10 basuras. Con cada distribución la tarea se resuelve 10 veces. Para obtener medidas en simulación acordes al desempeño de un robot real se miden dos parámetros: la distancia recorrida por cada robot para recoger las basuras y el número de encuentros que tiene cada robot con los demás. La distancia recorrida no depende de la velocidad de la simulación ni de la velocidad que tiene el robot y está directamente relacionada con el consumo de energía. Se define un encuentro como la situación en la que un robot detecta a otro con sus sensores frontales. El número de encuentros tiene que ver con la seguridad de los agentes y con su distribución en el área de búsqueda. Un número alto de encuentros aumenta la probabilidad de colisión y de que varios robots busquen en una misma área, lo cual implica un gasto inútil de energía y tiempo.

4.1 Cooperación Emergente con Comportamientos Homogéneos

El experimento recibe el nombre de cooperación emergente, ya que el trabajo colectivo surge a partir de comportamientos individuales e independientes. Para esto se creó la arquitectura cooperativa más sencilla: cada agente no sabe de la existencia de los demás y no existe comunicación directa entre ellos ni tampoco a través del proceso base, por lo que el nivel de conocimiento es inconsciente. En este caso cada agente actúa en forma totalmente individual. Cada agente está dotado de los mismos comportamientos, lo cual garantiza que no existe coordinación en el grupo ni reparto de tareas. Los agentes se comunican con el proceso base una vez que encuentran una basura y éste coordina la llegada a la meta, por lo cual se puede decir que existe un nivel mínimo de centralización.

La forma en la que un robot avanza al igual que su forma de reaccionar ante un obstáculo definen estrategias de búsqueda totalmente diferentes. Se evaluaron dos estrategias de *Buscar/Sortear*: la primera estrategia permite al robot desplazamientos en línea recta (*Buscar*). Cuando se encuentra un obstáculo gira un ángulo aleatorio en el rango $[-120^\circ, 120^\circ]$ (*Sortear*). En la segunda estrategia de búsqueda los robots intercalan un desplazamiento corto (10 unidades) y un giro de un ángulo aleatorio en el rango $[-90^\circ, 90^\circ]$ (*Buscar*). Un giro aleatorio similar se produce cuando un robot encuentra un obstáculo (*Sortear*). Este algoritmo se diseñó con la idea de que el robot realizara una búsqueda más detallada.

Comparando los resultados en la Tabla 1 se observa que el número de encuentros con ambas estrategias es comparable pero las distancias recorridas con la segunda estrategia de búsqueda son significativamente menores, mostrando mayor eficiencia.

Tabla 1. Resultados de Cooperación Emergente con comportamientos homogéneos.

Escenario (Fig. 2)	Disposición de basuras	Distancia (promedio) recorrida por robot		Encuentros (promedio)	
		1a búsqueda	2a búsqueda	1a búsqueda	2a búsqueda
1	1ª	76173	66543	12.2	7.7
	2ª	51057	44417	9.8	10.0
	3ª	42140	39078	7.8	9.5
2	1ª	86773	102795	10.4	30.6
	2ª	94503	85341	9.0	13.2
	3ª	102300	90792	11.3	8.4
3	1ª	99703	74492	19.8	10.8
	2ª	131890	121960	15.2	17.9
	3ª	143220	152170	21.5	18.9
	Promedio	91973	86398	13.0	14.1

4.2 Cooperación Emergente con Comportamientos Heterogéneos

A diferencia del experimento anterior, los comportamientos *Buscar* y *Sortear* son diferentes para cada robot con el propósito de explorar áreas diferentes del escenario. El robot 1 realiza búsquedas con desplazamientos en línea recta y sorteando obstáculos generando ángulos aleatorios en un rango pequeño $[-30^\circ, 30^\circ]$. El robot 2 realiza búsquedas con desplazamientos en línea recta y sorteando obstáculos generando ángulos aleatorios en un rango amplio $[-120^\circ, 120^\circ]$. El robot 3 realiza búsquedas alternando desplazamientos cortos y giros de un ángulo aleatorio en un rango intermedio $[-90^\circ, 90^\circ]$. Al encontrar obstáculos, el robot 3 gira un ángulo aleatorio en el rango $[-90^\circ, 90^\circ]$. La arquitectura no incluye nivel de conocimiento de los agentes. La arquitectura de cada agente es similar a la del caso anterior (Fig. 3) excepto que cada robot tiene una lógica propia para los comportamientos *Buscar* y *Sortear*.

De las Tablas 2 y 3 se observa que el robot 3 es el más eficiente porque presenta la mejor relación entre la distancia recorrida y la cantidad de basuras encontradas.

Tabla 2. Distancias recorridas por cada robot y encuentros con Cooperación Emergente y comportamientos heterogéneos.

Escenario (Fig. 2)	Disposición de basuras	Dist. promedio robot 1	Dist. promedio robot 2	Dist. promedio robot 3	Encuentros (promedio)
1	1ª	106593	110370	99381	11.4
	2ª	51941	57008	56285	7.4
	3ª	46446	55472	49849	9.4
2	1ª	105022	124200	120642	24.0
	2ª	92345	95705	87323	24.3
	3ª	108321	111327	103213	12.5
3	1ª	63804	76710	69041	15.6
	2ª	115620	115070	117890	6.2
	3ª	139230	142070	135780	7.5
	Promedio	92146	98659	93267	13.1

Tabla 3. Número de basuras recogidas por cada robot con Cooperación Emergente y comportamientos heterogéneos.

Escenario (Fig. 2)	Disposición de basuras	Basuras prom. robot 1	Basuras prom. robot 2	Basuras prom. robot 3	Basuras recogidas
1	1ª	2.3	3.1	4.6	10.0
	2ª	1.3	4.3	4.4	10.0
	3ª	2.4	4.0	3.6	10.0
2	1ª	2.1	2.6	5.1	9.8
	2ª	3.2	2.7	3.9	9.8
	3ª	2.8	3.7	3.5	10.0
3	1ª	3.5	2.7	3.7	9.9
	2ª	2.0	3.7	4.1	9.8
	3ª	1.8	4.0	4.1	9.9
	Promedio	2.4	3.4	4.1	9.9

4.3 Cooperación con Conocimiento de la Posición del Grupo

En el tercer experimento cada agente toma en cuenta la posición en la que se encuentran los demás para definir la dirección de su movimiento (nivel de conocimiento). Los agentes poseen un nivel de coordinación débil. La arquitectura de cada agente conserva los mismos comportamientos y las relaciones entre ellos. En esta arquitectura se retoma el mejor comportamiento *Buscar* resultado de la primera arquitectura. A este comportamiento se le adiciona una nueva entrada generada por el proceso base informando si hay robots al frente en un arco de 90° dentro de una distancia definida. Esta entrada genera en un robot un giro de 120° para buscar en zonas diferentes. Este comportamiento también está informando la posición del robot al proceso base. La arquitectura también integra el mejor comportamiento *Sortear* resultado de la segunda arquitectura.

Observando los resultados de la Tabla 4, la distancia recorrida (promedio) de cada robot disminuyó con respecto a los resultados anteriores. Adicionalmente se redujo el número de encuentros entre robots. El nuevo comportamiento *Buscar* hace que los robots no se acerquen mucho y que sus zonas de búsqueda sean diferentes.

Tabla 4. Resultados obtenidos de la Cooperación con conocimiento de la posición del grupo.

Escenario (Fig. 2.)	Disposición de basuras	Dist. promedio robot	Encuentros (promedio)
1	1ª	45572	4.5
	2ª	34219	3.7
	3ª	34730	2.7
2	1ª	69353	21.7
	2ª	64224	8.2
	3ª	72671	6.5
3	1ª	50289	4.8
	2ª	89214	11.0
	3ª	110230	9.3
	Promedio	63389	8.0

4.4 Cooperación con Conocimiento del Espacio explorado en Grupo

Un problema identificado en las arquitecturas anteriores es que lograr finalizar la tarea implica un esfuerzo de búsqueda mayor. El problema radica en que las últimas basuras son las que quedan en los sitios más inaccesibles para los robots hasta que por búsqueda repetitiva y exhaustiva alguno logra encontrar la basura faltante. La solución que se propone es utilizar la información sobre los sitios por los que ya han pasado los robots después de un tiempo de búsqueda. Para lograr esto, se incrementó el nivel de centralización de la arquitectura haciendo que el proceso base realice el análisis de los sitios visitados y determine los sitios no visitados. Se logra así un sistema con conocimiento consciente, fuertemente coordinado y fuertemente centralizado. Se diseñó una arquitectura en la cual se divide el espacio en una cuadrícula regular. Inicialmente los robots tienen el mismo comportamiento *Buscar* de la tercera arquitectura y el proceso base calcula el número de veces que cada agente ha pasado por cada cuadro. Se define entonces la densidad de huellas por unidad de área. Esta variable se tiene en cuenta para el planteamiento de los comportamientos de los robots. Este esquema es similar al de pozos de potencial [11], pero en este caso, el potencial se está actualizando constantemente con el paso de los agentes. En este caso, las celdas con baja densidad se comportan como sitios de bajo potencial a los cuales se dirigen los agentes. En todo momento el proceso base selecciona un pozo por agente. Una vez que se ha explorado esta cuadrícula, se vuelve a calcular la densidad de cada celda, teniendo en cuenta las nuevas huellas y se selecciona el siguiente pozo de densidad al que debe dirigirse el robot.

Como se observa en los resultados (Tabla 5), el espacio recorrido por cada agente se hizo mucho menor, ya que no se desperdició mucho tiempo buscando las últimas basuras. Se destaca que cuando los robots disminuyen la tasa de captura de basuras en función del tiempo, el sistema de planificación por densidad de huellas se activa.

Tabla 5. Resultados obtenidos de la Cooperación con conocimiento del espacio explorado.

Escenario (Fig 2.)	Disposición de basuras	Dist. promedio robot	Encuentros (promedio)
1	1 ^a	25466	4.0
	2 ^a	25438	1.9
	3 ^a	22577	2.7
2	1 ^a	32631	6.8
	2 ^a	30358	17.6
	3 ^a	45089	10.4
3	1 ^a	31198	5.5
	2 ^a	62445	13.3
	3 ^a	59811	14.6
	Promedio	37224	8.5

5 Conclusiones y Trabajo Futuro

El trabajo presenta el proceso de construcción de una arquitectura basada en comportamientos para el control de un grupo de robots que tienen un objetivo común.

En este proceso se exploraron diferentes niveles de conocimiento, coordinación y organización dentro de la arquitectura, comenzando con el caso más sencillo de cooperación (básicamente con un nivel de organización distribuido) hasta terminar con una arquitectura con niveles de conocimiento, de coordinación y de organización centralizado. En la arquitectura final los robots inician la tarea asignada de forma autónoma y cuando la tasa a la cual se resuelve el problema disminuye, un proceso centralizado interviene para realizar una búsqueda planificada basada en la información del espacio explorado por los robots que aumenta la eficiencia del grupo. La arquitectura final presenta un enfoque diferente de tipo híbrido, basada en comportamientos pero con una componente de manejo centralizado.

Aunque la arquitectura final se evaluó en una tarea específica, una extensión es la aplicación a otras tareas en escenarios diferentes, incluso dinámicos, con más robots o con otras metas siempre y cuando se utilicen los comportamientos adecuados y exista un proceso centralizado que maneje la información que los robots van recolectando.

El trabajo realizado utilizó la simulación como forma de validación. En un trabajo futuro sería importante implementar un modelo de simulación más completo que acerquen el experimento simulado a la realidad. Un aspecto a incluir corresponde a los errores acumulativos en las posiciones de los robots debido a que por limitaciones físicas no se pueden garantizar desplazamientos y rotaciones exactos. Otro aspecto a mejorar es usar un modelo de cinemática diferencial para lograr trayectorias curvas y cambios de velocidad (incluso desplazamientos en reversa). Desde el punto de vista experimental, el paso lógico de continuación es la validación de la arquitectura final dentro de un ambiente experimental real. Bajo condiciones reales aparecerán nuevos problemas a considerar que permitirán conocer el desempeño real de la arquitectura.

Referencias

1. Nardi, D.: Coordination in Multi-robot Systems. Dipartimento di Informatica e Sistemistica, Università di Roma "La Sapienza" (2002)
2. Veloso, M.M., Nardi, D.: Special Issue on Multirobot Systems. In Proceedings of the IEEE, vol. 94 (7), pp. 1253--1253 (2006)
3. Müller, J.P.: Control Architectures for Autonomous and Interacting Agents: A Survey. LNCS, vol. 1209, pp. 1--26. Springer, Heidelberg (1997)
4. Rao, A.S., Georgeff, M.P.: BDI Agents: From Theory to Practice. In 1st Intl. Conference on Multiagent Systems, San Francisco (1995)
5. Parker, L.E.: Heterogeneous Multi-Robot Cooperation. PhD thesis. MIT. (1994)
6. Mataric, M.J.: Issues and Approaches in the Design of Collective Autonomous Agents. Robotics and Autonomous Systems, vol. 16 (2-4), pp. 321--331 (1995)
7. Lux, A., Steiner, D.D.: Understanding Cooperation: an Agent's Perspective. In 1st Intl. Conference on Multiagent Systems, San Francisco (1995)
8. D'Angelo, A., Menegatti, E., Pagello, E.: How a Cooperative Behavior can Emerge From a Robot Team. Distributed Autonomous Robotic Systems 6, part II. Springer Japan (2007)
9. Parker, L.E.: ALLIANCE: An Architecture for Fault Tolerant MultiRobot Cooperation, IEEE Trans on Robotics and Automation, vol. 14 (2), pp. 220--240 (1998)
10. The MathWorks – MATLAB and Simulink for Technical Computing, User's Guide, <http://www.mathworks.com/>
11. Ollero, A.: Robótica, Manipuladores y Robots Móviles. Marcombo S.A., Barcelona (2001)