

Comportamientos coordinados en formaciones de robots usando percepción visual y comunicación punto a punto¹

Antonio Botía, Domingo Gallardo ,María Isabel Alfonso

Dept. Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial

Universidad de Alicante

03080 Alicante

abotia@dccia.ua.es, domingo@dccia.ua.es, eli@dccia.ua.es

Resumen

En este trabajo se presentan varias conductas de coordinación en formaciones de robots con el objetivo de ser utilizadas dentro de tareas de vigilancia en entornos conocidos. Proponemos para ello un control distribuido basado en comportamientos que hace uso de percepción local y comunicación restringida, tanto en su ancho de banda como en su alcance. Nuestro algoritmo establece y mantiene una red virtual de enlaces de comunicación entre pares de robots próximos en la formación, y requiere así mismo un tamaño y número de mensajes limitado. Asumimos que el sistema de percepción permite realizar un *tracking* visual de un robot y permite detectar marcadores visuales, tanto para planificar la tarea como para identificar el estado de un robot. En nuestros experimentos en entornos simulados hemos probado el buen funcionamiento de los comportamientos implementados.

1. Introducción

Este artículo aborda el problema de lograr comportamientos coordinados en un sistema de robots móviles distribuidos. Planteamos un contexto de marcha en formación, con comunicación restringida, y dentro de un entorno de tareas de vigilancia.

En un grupo de robots existe coordinación cuando cada robot tiene conocimiento de la presencia de otros robots en el entorno [4]. Nosotros conseguimos esa coordinación a través

de un conocimiento local, tanto a nivel de percepción visual como de comunicación con otros robots. Consideramos además un control distribuido en un grupo de robots homogéneo, en donde la toma de decisiones se lleva a cabo de una manera autónoma, sin necesidad de que un individuo del grupo o una unidad central externa organice el trabajo del equipo.

Existe una gran variedad de propuestas que abordan el problema del control de formaciones. Unas tratan la inicialización autónoma de la formación [9]. Otras propuestas se centran en mantener una determinada forma geométrica para la formación y en cómo cambiarla dinámicamente durante la tarea [2, 6, 10]. Muchas otras abordan el problema de mantener una formación en presencia de obstáculos [3, 5, 12]. Por lo general, todas estas aproximaciones no se orientan a la realización de tareas concretas en entornos reales. En cambio, nuestra propuesta presenta varios comportamientos elementales de coordinación en una formación de robots, que se pueden combinar para dar lugar a conductas coordinadas de vigilancia con multi-robots.

Los comportamientos propuestos pretenden ser aplicados en un escenario real, en el que asumimos restricciones en la comunicación, tanto en su ancho de banda como principalmente en su alcance limitado, al igual que se considera en [11]. Nuestro algoritmo trabaja bajo estas condiciones de comunicación limitada.

El resto del artículo está organizado del siguiente modo: en el apartado 2 se presentan los

¹ Esta investigación ha sido financiada en parte por la Consellería de Empresa, Investigación y Ciencia de la Generalitat Valenciana, bajo el proyecto GV05/148.

mecanismos utilizados en nuestra aproximación para conseguir coordinación global del grupo de robots, mientras que en el apartado 3 se describen los comportamientos elementales de coordinación logrados. El apartado 4 presenta una conducta coordinada de vigilancia con multi-robots como resultado de la combinación de comportamientos elementales y en el apartado 5 se discuten algunos resultados experimentales en entorno simulado que prueban la validez de nuestra propuesta. Finalmente en el apartado 6 mostramos las conclusiones y algunas ideas para trabajos futuros.

2. Percepción visual y comunicación

Nuestra propuesta de coordinación de un sistema multi-robot se basa fundamentalmente en dos mecanismos: la percepción visual y la comunicación mediante paso de mensajes entre robots. Usamos ambos sistemas de forma activa y económica, transmitiendo el mínimo número de mensajes (visuales y textuales) necesarios para obtener comportamientos coordinados.

2.1. Visión

Con respecto a la percepción visual, requerimos un algoritmo robusto de *tracking* que permita el seguimiento de un robot con un identificador visual determinado. A diferencia de [6] en donde cada robot tiene un identificador visual único y fijo que permite que sea distinguido del resto de robots, en nuestra aproximación sólo son necesarios tres identificadores visuales diferentes (basados en color). Además requerimos que cada robot sea capaz de cambiar dinámicamente dichos identificadores en función de la situación en la que se encuentre con respecto a la formación. Se puede considerar esto como una manera de comunicación implícita entre los robots. En concreto, tenemos un identificador (*blob* verde) que será utilizado por el último robot de la formación (la cola de la formación); un segundo identificador visual (*blob* azul) que será utilizado por el resto de robots de la formación (incluido el primero de la formación, es decir, el líder); y el tercer identificador (*blob* rojo) que será usado cuando el robot no pertenezca a la formación. Por otra parte, también se requiere la detección de marcadores visuales que pueden utilizarse para planificar la tarea a realizar. En nuestro contexto

de vigilancia, estos marcadores se usarán para identificar puntos de vigilancia a los que se deben dirigir individualmente los robots o para dividir la formación en dos sub-formaciones con el fin de que puedan seguir su marcha por caminos distintos.

2.2. Comunicación

Proponemos una comunicación mediante paso de mensajes entre robots a través de una red virtual de enlaces de comunicación. Nuestro algoritmo propone el establecimiento y mantenimiento de dicha red virtual entre los robots de la formación. En concreto, para formaciones en columna (las usadas en este trabajo), sólo se requiere que cada robot mantenga un enlace virtual con el robot que tiene delante y con el que tiene detrás dentro de la formación (Figura 1). Como excepciones, habrá un robot que no tenga ninguno delante y que es el encargado de conducir la formación (el líder) y otro robot que no tenga ninguno detrás y que será el último en la formación (la cola). Nuestra red virtual de enlaces se puede establecer utilizando una red wi-fi y puntos de acceso.

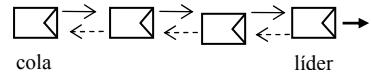


Figura 1. Enlaces virtuales de comunicación. Con el de delante (flechas con trazo continuo) y con el de detrás (con trazo discontinuo).

La red virtual es utilizada en dos situaciones diferentes: (i) cuando un robot quiere comunicarse únicamente con el que tiene delante o el que tiene detrás, y (ii) cuando una orden ha de transmitirse a toda la formación. En este segundo caso, la orden se va propagando de robot en robot.

3. Comportamientos coordinados

Los comportamientos coordinados desarrollados en este trabajo están orientados a la realización de tareas de vigilancia con un grupo de robots móviles en un entorno conocido. Se trata de comportamientos versátiles y elementales que se pueden combinar para dar lugar a conductas coordinadas de mayor nivel. Estos comportamientos son los siguientes:

- Marchar en formación
- Abandonar la formación
- Incorporarse a la formación
- Dividir la formación
- Inicializar la formación

Hay que resaltar que el último comportamiento es especial, ya que se construye de forma emergente a partir del comportamiento de incorporarse a la formación.

A continuación describimos en detalle estos comportamientos.

3.1. Marchar en formación

El objetivo de este comportamiento es mantener las posiciones relativas entre los robots cuando el grupo se mueve en un determinado entorno [8].

En una formación en columna, requiere realizar un *tracking* visual del robot de delante, manteniéndolo en el centro del campo visual. El sistema de percepción debe ser capaz de identificar el marcador visual de los robots en formación (*blob* azul), y distinguir el más cercano cuando se perciben varios.

El comportamiento se mantiene mientras el robot seguido está en el campo visual.

Algoritmo: marchar en formación

1. Un robot B (Figura 2) tiene en el centro de su campo visual al de delante (robot A).
2. El robot B debe ir modificando su velocidad rotacional para mantener al robot A próximo al centro de su campo visual.
3. Cuando el robot B percibe más de un robot en formación, sigue al que esté más centrado en su campo visual.



Figura 2. Los robots B y C marchan en formación. El robot A es el conductor (el líder).

3.2. Abandonar la formación

En este comportamiento un robot abandona la formación en movimiento sin afectar la marcha de la misma. En el caso de que el robot que abandona sea el líder, es necesario además que otro robot asuma dicho rol.

Se requiere que el robot pueda cambiar su propio identificador visual, para diferenciarse del resto de los robots en formación (de azul pasa a rojo). Además debe comunicarse con el robot de delante y con el de detrás.

El comportamiento finaliza una vez que el robot ha cambiado su propio marcador visual y ha creado el enlace virtual entre el robot de delante y el de detrás mediante el envío de un mensaje a cada uno.

Algoritmo: abandonar la formación

1. Un robot B (Figura 3), con un robot A delante y un robot C detrás, comienza a salirse de la formación.
2. El robot B cambia su identificador visual (de azul pasa a rojo) para diferenciarse del resto de la formación.
3. El robot B envía un mensaje al robot A para que actualice su enlace con el de detrás (su nuevo enlace será con el robot C).
4. El robot B envía un mensaje al robot C para que actualice su enlace con el de delante (su nuevo enlace será con el robot A).
5. El robot B elimina sus enlaces con los robots A y C.
6. Si el robot B era el líder (no existe el robot A), el robot C asumirá el rol de líder, puesto que no tendrá enlace con nadie de delante.
7. Si el robot B era la cola (no existe el robot C), el robot A será la nueva cola, y deberá cambiar su identificador visual (de azul pasa a verde).

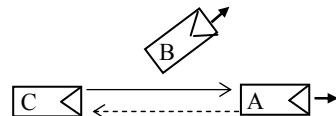


Figura 3. El robot B abandona la formación. El robot C seguirá al robot A.

3.3. Incorporarse a la formación

En este comportamiento un robot que no pertenece a la formación en movimiento se incorpora a ella sin afectar su marcha.

En nuestra aproximación, existe la restricción de que sólo se puede incorporar al final de la formación. Se requiere además que el robot de la cola se diferencie del resto de robots de la formación con un identificador visual distinto

(marcador verde) y el robot que se incorpora pueda modificar su identificador (de rojo pasa a verde) una vez que sea la nueva cola. Como el robot que tiene que incorporarse no tiene enlace virtual de comunicación con ningún robot, también necesita realizar una comunicación *broadcast*, que sólo deberá responder el robot de la cola, con el que finalmente podrá establecer el enlace virtual.

El comportamiento finaliza cuando el robot establece el enlace virtual con el que hasta ese momento era la cola, y modifican sus respectivos identificadores visuales.

Algoritmo: incorporarse a la formación

1. Un robot C (Figura 4) que no pertenece a la formación detecta mediante percepción visual al robot de la cola de la formación (robot B).
2. El robot C envía un mensaje *broadcast* preguntando quién es el último de la formación.
3. El mensaje puede llegar a todos los robots de la formación (robots A y B) pero el robot B es el único que debe responder al mensaje *broadcast*, de forma que en ese momento se puede establecer el enlace virtual entre C y B.
4. El robot B cambia su identificador visual (de verde pasa a ser azul), dejando de ser la cola de la formación.
5. El robot C cambia su identificador visual (de rojo pasa a ser verde), dejando de ser un robot externo a la formación y pasando a ser el último de la formación (la cola).

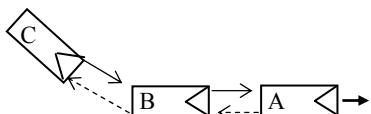


Figura 4. El robot C se incorpora a la formación, pasando a ser la nueva cola de la misma.

3.4. Dividir la formación

El objetivo de este comportamiento es dividir la formación en dos sub-formaciones, quedándose cada una de ellas con su propio líder. Los robots se separan de forma alternativa, quedando los que estaban en posiciones impares en una sub-formación y los de posiciones pares en la otra. De esta forma, ambas sub-formaciones quedan equilibradas en número de robots.

Se requiere que el líder se comunique con el robot que tiene detrás para indicarle que debe tomar también dicho rol. Además es necesario que cada robot indique al de detrás la formación que le corresponde (por ejemplo, la de su izquierda o derecha) y el enlace al robot que a partir de ese momento debe seguir. En ese momento, el *tracking* visual debe cambiarse para seguir al robot que esté más a la izquierda o derecha de su campo visual. También se requiere que el penúltimo robot de la formación, que se convertirá en la cola de una de las formaciones, cambie su marcador visual (de azul a verde).

El comportamiento finaliza cuando la orden de dividir la formación ha llegado a todos los robots, han actualizado sus enlaces virtuales, y el robot de la cola de la nueva formación ha modificado su marcador visual.

Algoritmo: dividir la formación

1. El robot líder A (Figura 5) envía un mensaje al robot de detrás (robot B) para informarle que debe adquirir el rol de líder de una nueva formación.
2. El robot B envía un mensaje al de detrás (robot C) indicándole la formación que tiene que seguir y el nuevo enlace virtual que debe establecer con el robot A.
3. Cuando el robot C tiene varios robots en su campo visual, cambiará su *tracking* visual para seguir al de más a su izquierda o derecha, según la formación que le corresponda, hasta que vuelva a tener uno sólo.
4. El robot B también envía un mensaje al robot A para que establezca un nuevo enlace con el robot C. Es decir, el robot B hace de “puente” para que los robots A y C se enlacen.
5. Una vez que el robot C se ha enlazado con la formación del líder A, envía un mensaje al de detrás (robot D) indicándole la formación a seguir y el nuevo enlace virtual que debe establecer con el robot B.
6. Cuando el robot D tiene varios robots en su campo visual, cambiará su *tracking* visual para seguir al de más a su izquierda o derecha, según la formación que le corresponda, hasta que vuelva a tener uno sólo.
7. El robot C también envía un mensaje al robot B para que establezca un nuevo enlace con el robot D. Es decir, el robot C hace de “puente” para que los robots B y D se enlacen.

8. Después de que el robot D se haya enlazado con la formación del líder B, se repiten los pasos del 2 al 7 hasta que lleguemos a la cola de la formación.
9. El último robot de la formación original (robot X), debe enviar un mensaje al que tiene delante (robot Z) para indicarle que se ha convertido en la cola de la otra formación.
10. El robot Z cambia su identificador visual (de azul pasa a verde), ya que es la cola de la nueva formación. El robot X seguirá siendo la cola de la formación original y no cambiará su identificador.

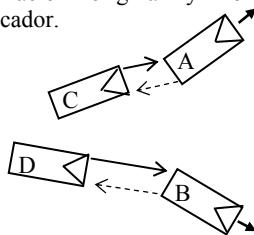


Figura 5. Dividir en dos sub-formaciones: el robot B adquiere el rol de líder de una de ellas. El robot A sigue siendo líder en la otra.

3.5. Inicializar la formación

Este comportamiento consiste en determinar de forma autónoma las posiciones iniciales más apropiadas de cada robot dentro de la formación, con independencia de la posición y orientación inicial de los mismos [9]. En nuestra aproximación, esta conducta coordinada emerge a partir del comportamiento de incorporarse a la formación presentado anteriormente.

Se requiere que en el estado inicial del sistema, exista un robot designado como líder, y el resto de robots ejecuten el comportamiento de incorporarse a la formación.

El comportamiento finaliza cuando todos los robots han conseguido incorporarse a la formación.

Algoritmo: inicializar la formación

1. Inicialmente existe un robot A con el rol de líder (Figura 6), y que a su vez será la cola de la formación.
2. Cualquier robot que perciba la cola de la formación (initialmente será el robot A), ejecutará el comportamiento de incorporarse a la formación.

3. Sólo uno de los robots (robot B) que estén ejecutando dicho comportamiento, tendrá respuesta del robot A.
4. El robot B podrá finalizar el comportamiento de incorporarse y se convertirá en la nueva cola de la formación.
5. El proceso se repite desde el paso 2, hasta que todos los robots se hayan incorporado a la formación.

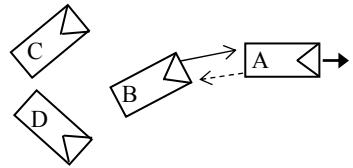


Figura 6. El robot B se incorpora a la formación formada sólo por el robot A. Los robots C y D se incorporan cuando vean la cola.

4. Tarea de vigilancia con multi-robots

A partir de los comportamientos elementales expuestos anteriormente, proponemos la implementación de conductas coordinadas en tareas de vigilancia con un grupo de robots. En este trabajo se presenta una arquitectura de control distribuido utilizando el paradigma de programación de robots basado en comportamientos [1] para implementar el controlador de los robots. El sistema está compuesto por una serie de comportamientos primitivos que tienen dos componentes: (i) un componente de control que transforma información sensorial en órdenes a los actuadores; (ii) y un componente de activación que determina cuándo el componente de control debe actuar. Los comportamientos primitivos se combinan para lograr comportamientos más complejos.

Una manera de combinarlos es a través de un autómata de estados finitos. Los estados representan comportamientos primitivos o complejos. El sistema posee además unas reglas bien definidas que especifican las transiciones permitidas entre estados. Cuando un sistema posee estado, las respuestas del sistema no están influenciadas exclusivamente por las lecturas actuales de los sensores, sino también por las procesadas en el pasado.

Estado	Descripción
ASIGNAR _ROL	Parado. Esperando asignación de rol en la formación
LÍDER	Conducir la formación
MARCHAR	Seguir la formación
ABANDONAR	Abandonar la formación (para dirigirse a un punto de vigilancia)
VIGILAR	Realizando la vigilancia individual
INCORPORARSE	Buscar una formación
ESPERAR	Líder parado. Esperando seguidores.

Tabla 1. Descripción de los estados utilizados en el controlador de los robots.

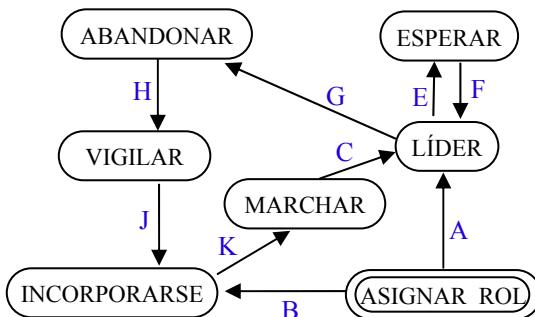


Figura 7. Autómata de estados finitos para el controlador de un robot.

Transición	Condición de activación
A	Designado como líder inicial
B	No tiene enlace con ningún robot
C	Recibe mensaje para ser líder
E	El líder no tiene enlace con robot de detrás (no tiene seguidores)
F	El líder vuelve a tener enlace con un robot de detrás (tiene seguidores)
G	El líder abandona la formación (detecta un punto de vigilancia)
H	Se ha alcanzado un punto de vigilancia
J	Terminada la misión de vigilancia
K	Recibe mensaje del último de la formación

Tabla 2. Descripción de las transiciones entre estados del autómata del controlador de un robot.

En la Tabla 1 se detallan los estados que utiliza nuestro controlador de robots, y en la Figura 7 se muestra el autómata de estados finitos que implementa dicho controlador.

La Tabla 2 describe las reglas (condiciones de activación) que especifican las transiciones entre estados que incluye el autómata de nuestro controlador.

Para implementar los comportamientos coordinados, las transiciones no sólo se activan con datos perceptuales, sino que también pueden requerir datos proporcionados por la comunicación con otro robot. En la Tabla 3 se describen los tipos de mensajes utilizados en nuestro algoritmo. Se indica el estado donde se origina el mensaje (Origen) y el estado donde se recibe (Destino). Un mensaje puede estar compuesto por un máximo de tres campos: (a) identificador del tipo de mensaje; (b) identificador de la formación a seguir (opcional, depende del mensaje); (c) dirección IP de un robot (opcional, depende del mensaje).

Tipo mensaje	Origen	Destino
Tú eres líder	LÍDER	MARCHAR
Quién es el último	INCORPORARSE	MARCHAR ESPERAR
Yo soy el último	MARCHAR ESPERAR	INCORPORARSE
Tú eres otro líder	LÍDER	MARCHAR
Dividir formación	MARCHAR	MARCHAR
Tienes nuevo enlace detrás	MARCHAR INCORPORARSE	LÍDER MARCHAR ESPERAR

Tabla 3. Paso de mensajes entre robots.

Algoritmo: tarea de vigilancia

1. Asignar a un robot el rol de líder.
2. Inicializar la formación.
3. El líder conduce la formación a través del entorno.
4. Si el líder detecta un punto de vigilancia, entonces abandona la formación y se dirige a dicho punto. El robot que tenía detrás asume ahora el rol de líder.
5. Si un robot termina su misión individual de vigilancia y percibe la cola de una formación, se incorpora a la misma.

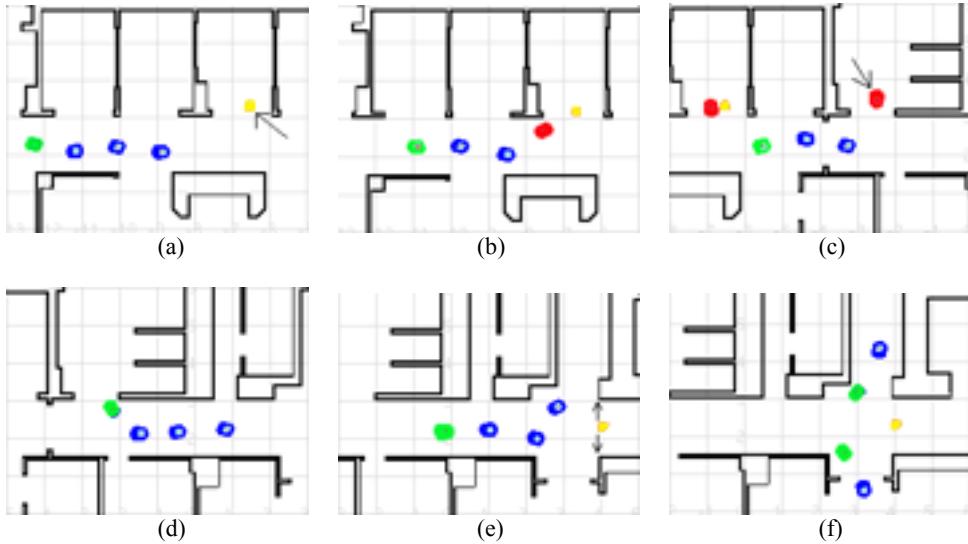


Figura 8. Tarea de vigilancia: (a) El líder detecta un punto de vigilancia; (b) se dirige al punto y el resto continúa la marcha con un nuevo líder; (c) un robot desea incorporarse a la formación; (d) el robot se incorpora cuando detecta la cola de la formación; (e) el líder detecta un marcador que indica que hay que dividir la formación; (f) se divide en dos sub-formaciones continuando la marcha con sus líderes respectivos.

6. Si el robot líder se queda sin seguidores, espera hasta la llegada de alguno para continuar la marcha.
7. Si el líder percibe un marcador en el entorno que indica que hay que dividir la formación, se crean dos sub-formaciones con sus líderes respectivos.

5. Experimentos simulados

Para validar nuestro algoritmo hemos utilizado el simulador Player/Stage² [7]. Player es un servidor que permite controlar los dispositivos de un robot y obtener información de sus sensores. Es una capa software que abstrae los detalles hardware del robot. Los algoritmos de control de los robots funcionan como clientes del servidor Player. Por su parte, Stage simula un conjunto de dispositivos de Player en un entorno 2D.

Los experimentos se han centrado en validar las conductas coordinadas propuestas. Por una parte se han basado en el uso del sistema de visión

del simulador por detección de *blobs* de color, y por otra parte en una comunicación por *sockets* que hemos añadido para el envío de mensajes entre los robots simulados. También hemos modificado ligeramente el código fuente del simulador para conseguir que el color de un robot cambie dinámicamente, con el fin de simular los cambios en el identificador de un robot que requiere nuestro algoritmo.

En la Figura 8 se muestra una secuencia de imágenes que ilustra la conducta coordinada de vigilancia implementada en este trabajo. Cuando un robot (en nuestro algoritmo, el líder) percibe un punto de vigilancia identificado con un marcador visual (Figura 8.a), abandona la formación y se dirige hacia dicho punto. El robot que tenía detrás adquiere el rol de líder, por lo que pasa a tener la función de conducir la formación. El resto de robots de la formación sigue al nuevo conductor (Figura 8.b).

Cuando un robot ha acabado su misión de vigilancia individual (Figura 8.c), se incorporará a la formación cuando visualice su cola. Establece entonces un enlace virtual con el robot de la cola y a partir de ese momento sigue a la formación, convirtiéndose en la nueva cola (Figura 8.d).

² Desarrollado en el Robotic Research Lab de la USC. (<http://playerstage.sourceforge.net>)

Si el líder detecta un marcador visual situado en el entorno que determina que se debe dividir la formación (Figura 8.e), envía un mensaje al robot que tiene detrás para informarle que debe de convertirse en líder de otra formación. A continuación, los robots van comunicando sucesivamente al que tienen detrás la formación que les corresponde, y simultáneamente se van reestableciendo los nuevos enlaces (Figura 8.f).

6. Conclusiones y líneas futuras

Hemos presentado una nueva aproximación de comportamientos coordinados en un grupo de robots que marchan en formación, a través de una arquitectura de control distribuido basada en comportamientos. Nuestro algoritmo permite trabajar en condiciones de comunicación limitada, tanto en su alcance como en su ancho de banda. Se basa también en percepción visual, tanto para planificar la tarea (utilizando marcadores visuales en el entorno) como para realizar una comunicación implícita entre los robots (utilizando identificadores visuales en los robots). No se requiere un identificador único para cada robot, sino que cada uno sea capaz de cambiar su identificador en función de su situación con respecto a la formación. Tanto la percepción visual como la comunicación por paso de mensajes son locales.

Consideramos que los comportamientos propuestos y otros que podremos incorporar en un futuro, pueden ayudar en una tarea de vigilancia llevada a cabo por un grupo de robots. Pretendemos realizar experimentos reales con robots físicos (robot Aibo de Sony) y probar su efectividad en un entorno de interior. No obstante, hay cuestiones importantes que no se han tratado en este trabajo y que necesitarán ser abordadas en un escenario real. Tendremos que incorporar técnicas robustas de *tracking* visual, tratar rupturas en la formación debidas a obstáculos o a que un robot deje de funcionar, y estudiar protocolos de comunicación robustos a la pérdida esporádica de mensajes.

Referencias

- [1] Arkin, R.C., “Behavior-based robotics”. Cambridge, MA: MIT Press, 1998.
- [2] Balch, T.; Arkin, R.C. “Behavior-based formation control for multi-robot teams”, IEEE Transactions on robotics and automation, vol. 14, pp. 926-939, Dec. 1998.
- [3] Carpin, S.; Parker, L.E., “Cooperative leader following in a distributed multi-robot systems”, ICRA, 2002
- [4] Ferber, J., “Multi-agent systems”. Reading, MA: Addison-Wesley, 1999.
- [5] Fierro, R.; Das, A.; Kumar, V.; Ostrowski, J., “Hybrid control of formations of robots”, ICRA, 2001
- [6] Fredslund, J.; Mataric, M.J. “A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication”, IEEE Transactions on robotics and automation, vol 18, nº 5, October 2002
- [7] Gerkey, B.P.; Vaughan, R.T.; Stoy, K.; Howard, A.; Sukhatme, G.S.; Mataric, M.J., “Most valuable player: a robot device server for distributed control”, IROS, 2001
- [8] Jones, C.; Mataric, M.J., “Behavior-based coordination in multi-robot systems”, Autonomous mobile robots: sensing, control, decision-making, and applications, Sam S. Ge and Frank L. Lewis, eds., Marcel Dekker, Inc., 2005
- [9] Lemay, M.; Michaud, F.; Létourneau, D.; Valin, J.M., “Autonomous initialization of robot formations”, ICRA, 2004
- [10] Renaud, P.; Cervera, E.; Martinet, P., “Towards a reliable vision-based mobile robot formation control”, IROS, 2004
- [11] Vazquez, J.; Malcolm, C., “Distributed multirobot exploration maintaining a mobile network”, IEEE Intelligent Systems, 2004
- [12] Vidal, R.; Shakernia, O.; Sastry, S. “Formation control of nonholonomic mobile robots with omnidirectional visual servoing and motion segmentation”, ICRA, 2003.