

Trabajando en equipo: Un repaso a los Robots móviles coordinados

Carlos E. Agüero, José M. Cañas, Héctor Montes y Manuel Armada

Universidad Rey Juan Carlos e Instituto de Automática Industrial

{caguero,jmplaza}@gsyc.urjc.es

armada@iai.csic.es

Enero 2009

Los sistemas que incorporan mecanismos de cooperación entre robots permiten extender las capacidades de los mismos y realizar tareas que de manera individual no podrían afrontar. Esta área de la robótica tiene su propio espacio específico dentro de la comunidad. En este artículo se barren los principales elementos comunes que forman parte de un sistema cooperativo y se revisan las principales aplicaciones existentes que utilizan esta tecnología, con el fin de dar una visión panorámica de esta disciplina en desarrollo.

1. Introducción

En los últimos años los avances en robótica están siendo considerables. En [66] se describe el trabajo de la Universidad de Stanford y el vehículo/robot Stanley ganadores del Grand Challenge 2005. Este vehículo fue capaz de conducir a alta velocidad por el desierto sin ninguna intervención humana. Como es de esperar, su completo *software* de control incluye numerosas tecnologías punteras en cuanto a AI y robótica se refiere (aprendizaje, razonamiento probabilístico, fusión sensorial, navegación, etc.). A su vez, la industria también está incorporando tecnología en robótica. Incluso el público en general puede disponer de pequeños electrodomésticos robotizados [36] como aspiradoras, fregasuelos, limpiadores de tuberías, etc.

A medida que el progreso avanza de manera imparable en comportamientos mono-robot, es lógico que comiencen a coexistir vehículos autónomos por las carreteras, robots de transporte de mercancías en centros de distribución, cadenas de brazos manipuladores en fábricas o incluso varios robots en pequeños comercios como las farmacias. Esto requiere que los investigadores desarrollen algoritmos para coordinar todos estos comportamientos individuales.

Aunque el concepto de coordinar comportamientos en agentes autónomos es relativamente nuevo, muchas de sus técnicas están influenciadas de los trabajos existentes en el campo de la DAI (*Distributed Artificial Intelligence*), disciplina que cuenta con una relativa madurez de dos décadas. En [14] se repasan los problemas clásicos abordados por la DAI. A su vez, la naturaleza siempre es fuente de inspiración y la robótica cooperativa no es una excepción.

En la naturaleza podemos encontrar multitud de ejemplos de grupos de individuos coordinados en mayor o menor medida. El deseo de conocer y analizar el funcionamiento de la naturaleza, junto con la necesidad de diseñar y construir robots o sistemas artificiales, tienen puntos en común. Los trabajos de Ronald Arkin [6] siguen esta línea y tratan de diseñar sistemas complejos inspirados en el mundo natural. El concepto de *Swarm robotics* ha surgido al hilo de las grandes colonias de robots al igual que ocurren en la naturaleza con las bandadas de aves o bancos de

peces.

En el mundo que nos rodea también podemos encontrar influencias sobre grupos de agentes. Lynne E. Parker utiliza un ejemplo muy visual en [52]. Las personas nos organizamos en puestos específicos para desempeñar trabajos en una empresa. Cada trabajador se especializa en una parcela concreta formando una sociedad. En el ámbito médico sucede lo mismo, podemos encontrar especialistas en neurología, estomatología, pología, etc. Existen multitud de ejemplos en nuestra vida donde aparecen equipos de individuos. Las personas hemos aprendido que un equipo coordinado es más eficiente a la hora de resolver problemas que un individuo.

Marvin Minsky propuso en su libro *The society of Mind*[44] la idea de que la inteligencia se consigue como una sociedad de agentes que interactúan entre sí y el resultado es un comportamiento global. Sus ideas estaban fundamentadas bajo su opinión sobre el funcionamiento del cerebro y la inteligencia. La base de su argumentación es que la mente no es un única entidad monolítica, sino que está formada por la sociedad de agentes especializados en tareas específicas. Estos agentes se relacionan produciendo como resultado un comportamiento o un pensamiento inteligente.

Las sociedades de robots cooperativas tienen asociadas una serie de ventajas. Gracias al paralelismo que se genera permiten abordar tareas de manera más rápida y eficiente que si lo hicieran de forma individual, tolerando errores o pérdidas en alguno de sus miembros. En la sección 2 describiremos con mayor profundidad las ventajas e inconvenientes asociados al uso de equipos de robots.

Típicamente los mecanismos de cooperación se emplean en aplicaciones formadas por equipos de robots, denominados sistemas multi-robot. Un ejemplo muy conocido son las cadenas de brazos robots realizando labores de soldadura o pintura en las fábricas de automóviles. Sin embargo, también es posible encontrar sistemas colaborativos dentro de un mismo robot (por ejemplo gestionando el control de los actuadores de un robot con patas) o en sistemas de percepción distribuida (por ejemplo coordinando varias cámaras diseminadas por el entorno para tareas de vigilancia).

Existen numerosas aplicaciones donde se extrae todo el potencial y las ventajas de mantener un equipo de robots. Las tareas de recolección donde se pretende recoger una serie de objetos, conservación de formaciones específicas en tareas de navegación, construcción de mapas, percepción distribuida, etc. son algunos ejemplos de tareas paradigmáticas en este campo.

Con el fin de continuar el desarrollo de los robots cooperativos es habitual encontrar competiciones entre robots organizadas en todo el mundo. Estas competiciones sirven de excusa y motivación para poner en práctica las técnicas desarrolladas por los investigadores en todos los campos de la robótica. En muchos casos los avances en robótica cooperativa son el resultado de los trabajos en este área de universidades o grupos de investigación participantes. Entre las competiciones más prestigiosas podríamos citar las organizadas dentro de la RoboCup[58] o por la FIRA[50]. En estas competiciones es habitual que todos los equipos tengan cierto grado de cooperación entre sus miembros. Entre las aplicaciones más usuales de cooperación se encuentran la asignación dinámica de roles de juego entre todos los robots del equipo.

La robótica cooperativa goza de una buena actividad investigadora respaldada por eventos periódicos. En la tabla 1 mostramos las principales conferencias en este ámbito. También se editan números especiales en revistas que dedican su contenido a publicar artículos del campo como [1; 19; 22], e incluso revistas específicas como [25]. La red Europea de investigación en robótica EURON[29] incluso organizó un curso de verano celebrado en Darmstadt (Alemania) en agosto del 2008 con el título *Monitoring and Coordination Across Networked Autonomous Entities*.

El resto del artículo se vertebra en tres bloques principales: En la sección 2 se describen los elementos comunes que aparecen en todo sistema multi-robot. Las aplicaciones o retos abordados mediante coordinación son repasadas en la sección 3 y, finalmente, se exponen las conclusiones

Nombre de la conferencia	Fecha y lugar
IFAC Workshop on Networked Robotics	Octubre 2009, Colorado, USA
Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems	Junio 2009, Salamanca, España
International Workshop on Robotic Wireless Sensor Networks	Junio 2009, California, USA
Network Robot Systems at ICRA	Mayo 2009, Kobe, Japón
Robot Communication and Coordination - <i>RoboComm</i>	Marzo 2009, Odense, Dinamarca
New Challenges for Cooperative Robotics	Octubre 2008, Lisboa, Portugal
Network Robot Systems	Septiembre 2008, Niza, Francia
Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems - <i>MFI</i>	Agosto 2008, Seoul, Korea
Formal Models and Methods for Multi-Robot Systems - <i>AAMAS</i>	Mayo 2008, Estoril, Portugal
Cooperative Robotics in Europe	Abril 2008, Hannover, Alemania

Cuadro 1: Principales eventos relacionados con la robótica cooperativa en 2008/2009

extraídas tras la elaboración de este artículo.

2. Fundamentos teóricos

Una cuestión clave a la hora de diseñar un sistema cooperativo es conocer todas las posibles configuraciones del sistema, ventajas, inconvenientes, etc. De esta manera, el diseño será más apropiado a las necesidades requeridas. En esta sección exponemos los conceptos habituales en entornos cooperativos, estableciendo una breve taxonomía de estos sistemas.

Cuando hablamos de sistemas cooperativos podemos diferenciar tres familias o niveles: sistemas multi-sensoriales que cooperan entre sí, sistemas con múltiples actuadores dentro de un mismo robot y sistemas formados por varios robots independientes.

El caso de varios sensores cooperantes incluye todas aquellas aplicaciones que involucran a más de un sensor y comparten información. Esta información es útil para modelar de manera más rica el entorno que quieren percibir.

Un ejemplo de estos sistemas son las *redes de sensores*. Es un concepto relativamente nuevo en adquisición y tratamiento de datos de manera coordinada. Estas redes están compuestas por un amplio número de sensores con capacidades comunicativas, que se interconectan formando redes ad-hoc. Disponen de una reducida capacidad de cálculo e incapacidad motora pero sus capacidades cooperativas permiten a estos sistemas ser una buena opción en determinados entornos: Por ejemplo zonas de difícil acceso (zonas asoladas por catástrofes, otros planetas, etc.) o con alto riesgo de bloqueos (volcanes, desiertos, etc.). Berkeley Motes[35], Pico-Radio[56] o Smart-Dust[38] son el resultado de varios trabajos en el ámbito de las redes de sensores.

Los sistemas cooperantes con múltiples actuadores incluyen el control de actuadores dentro de un mismo robot o la manipulación coordinada de objetos. La locomoción con patas requiere que haya una sincronización y planificación de todos los movimientos, para que se produzca de manera suave y efectiva. En el caso de la manipulación coordinada sucede algo parecido, es vital que haya cooperación para evitar choques entre los manipuladores, interferencias, etc. Un ejemplo de estos últimos sistemas los podemos encontrar en las cadenas de montaje de automóviles responsabilizándose de tareas de soldadura o pintura.

La tercera familia de sistemas cooperantes está formada por varios robots independientes. Estos robots forman un equipo en caso de no ser excesivamente numeroso o un enjambre (*swarm robotics*) en caso de pertenecer a un equipo muy numeroso. Las aplicaciones habituales de estos equipos son la recolección de objetos, exploración, navegación en formación, etc.

El uso de varios robots para lograr un objetivo común viene motivado por varios factores: El primero de ellos es que en algunos escenarios, el uso de un solo robot puede hacer la tarea muy complicada o incluso imposible de realizar. Imaginemos que se quiere construir un mapa de la superficie de Marte. Con una única entidad móvil se emplearía mucho tiempo hasta conseguir explorar toda la superficie marciana. Otra ventaja adicional es la mayor tolerancia a fallos. En nuestro ejemplo, si un robot se quedara bloqueado, el resto de compañeros completarían la labor. La mejora del rendimiento es otro factor positivo. A mayor número de robots bien organizados, menor será el tiempo empleado hasta llegar al objetivo. Cuando la tarea a realizar es fácilmente divisible en subtareas es más fácil la asignación de subobjetivos a los miembros del equipo. Las capacidades de percepción de cada robot pueden verse ampliadas al compartir información. De esta manera un robot podría percibir más allá de lo que captan sus sensores. Otra ventaja del uso de sistemas multi-robot coordinados es el paralelismo, es decir, se podrían llevar a cabo diversas acciones de manera simultánea. El coste económico también puede beneficiarse del uso de equipos de robots. La compra de un *super-robot* encarecerá el coste total más que la suma de los precios individuales de varios robots convencionales.

La otra cara de la moneda son los efectos laterales o adversos que también pueden producirse. El problema de las interferencias es uno de los más comunes. Habitualmente los miembros del equipo comparten el medio y se pueden producir colisiones o demoras para evitar las mismas, empeorando el rendimiento. Si los robots se coordinan utilizando comunicaciones existe un coste añadido en *hardware*, en tiempo de proceso y en gasto energético. Otro de los requisitos para coordinarse adecuadamente es conocer en cierta medida las intenciones del resto de individuos. Los instantes en que haya demasiada incertidumbre en este aspecto podrían provocar colisiones ante la falta de entendimiento.

El término comportamiento colectivo describe cualquier comportamiento en el que intervienen múltiples robots. La definición de comportamiento cooperante es mucho más interesante y denota un comportamiento colectivo que incluye algún mecanismo de coordinación implícito o explícito entre los robots para organizar y ordenar la tarea común aumentando el rendimiento global.

Existe una nueva corriente dentro del mundo de la coordinación multi-robot llamada *swarm robotics*. Este término hace referencia a grandes equipos de robots, formados por cientos de miembros. En general, la coordinación entre los miembros de estas hordas o enjambres es muy baja. El resultado es lo que se conoce como comportamiento emergente, es decir, su comportamiento aparece como resultado de la ejecución sin apenas comunicación de todos los comportamientos individuales (sin que haya una programación explícita de esa tarea colectiva). El proyecto Centibots [40], es un buen ejemplo donde 100 robots coordinados tratan de construir mapas y realizar tareas de vigilancia.

Dado un grupo de robots, un entorno y una tarea, ¿Cómo debería emerger un comportamiento cooperante que la realizara? ¿Cómo deberían coordinarse los diferentes individuos para culminar su objetivo común? ¿Qué tipos de robots pueden intervenir en los equipos? ¿Qué tipo de información se pueden intercambiar? Las respuestas no son triviales y hay que analizar los elementos que conforman este tipo de sistemas para poder contestar a estas preguntas. A continuación se presentan los ejes que soportan cualquier sistema multi-robot coordinado.

2.1. Control Centralizado Vs Distribuido

Gregory Dudek presenta en [26] una taxonomía para clasificar los diferentes aspectos que forman parte de un sistema robótico multi-agente. Una de las características principales es la homogeneidad o heterogeneidad del grupo. En los sistemas centralizados uno de los robots actúa de líder y toma las decisiones (sistemas maestro-esclavo) o un ordenador externo se encarga de comandar las mismas. Habitualmente el líder o maestro también es el encargado de almacenar el

modelo perceptivo del entorno, pues en función de él decidirá sobre el resto de robots a su servicio. En los sistemas descentralizados no existe este líder y, o bien todos los agentes tienen el mismo peso en las decisiones de control (distribuido), o bien existen niveles jerárquicos. En los sistemas distribuidos cada robot es encargado de modelar su entorno con sus capacidades perceptivas y decidir en consecuencia. Parece bastante aceptado que las arquitecturas descentralizadas tienen mayores ventajas [43], [67].

En la competición internacional RoboCup podemos encontrar con frecuencia ejemplos de sistemas centralizados y distribuidos. En la categoría de robots de pequeño tamaño dos equipos de 5 miembros cada uno compiten entre sí en un entorno real simulando un partido de fútbol. La mayoría de los equipos emplean una o varias cámaras dispuestas en posición cenital a 4m. del suelo, desde donde capturan todos los movimientos de la pelota y los robots usando un ordenador. La fase perceptiva y estratégica se realiza en este PC externo, donde además se deciden los comandos individuales a ejecutar por cada robot. Estos comandos son enviados periódicamente a través de comunicación inalámbrica a cada uno de los miembros del equipo. Esta liga es un claro ejemplo de sistema centralizado.

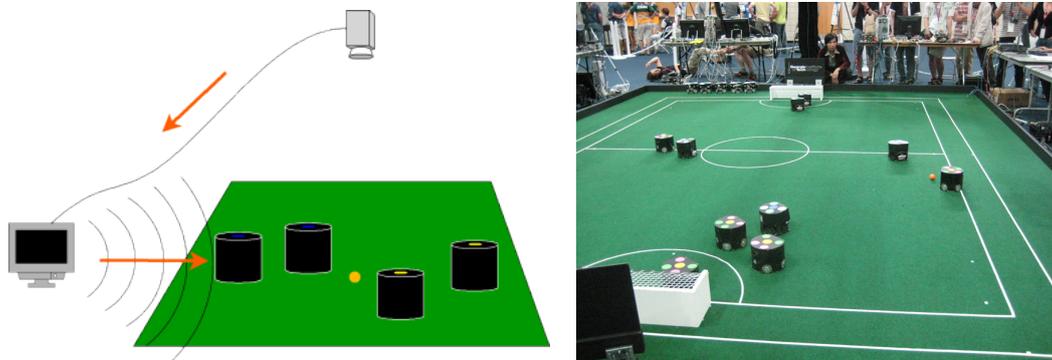


Figura 1: Esquema de intercambio de información en la liga de robots de pequeño tamaño (izquierda) e instante de una competición real (derecha)

En las categorías de robots de tamaño medio, humanoides o de plataforma estándar todos los robots son completamente autónomos (salvo determinadas situaciones que requieren detenciones del juego, penalizaciones, etc.). No hay un centro único de toma de decisiones. Los robots disponen de cámaras integradas, toman sus propias decisiones de movimiento y realizan todo el procesamiento perceptivo, estratégico, etc. sin depender de un sistema externo o de un robot que actúe como líder. En este caso estos sistemas son totalmente distribuidos.

2.2. Homogeneidad Vs heterogeneidad

Robin Murphy describe en [46] esta característica como el grado de similitud entre los robots que forman el grupo. Un grupo heterogéneo está formado por al menos dos miembros con *hardware* o *software* diferente, mientras que en un grupo homogéneo todos los miembros son idénticos. Los robots *Ganymede*, *Io* and *Callisto* diseñados en Georgia Tech son un buen ejemplo de equipo homogéneo. Estos robots ganaron el primer premio de la competición *Pick up the Trash* del AAAI Mobile Robot Competition en 1994. El resto de competidores diseñaron robots individuales más sofisticados con sistemas complejos de visión para reconocer los objetos a recoger. Por su parte *Ganymede*, *Io* y *Callisto* tenían un diseño mecánico sencillo y un programa

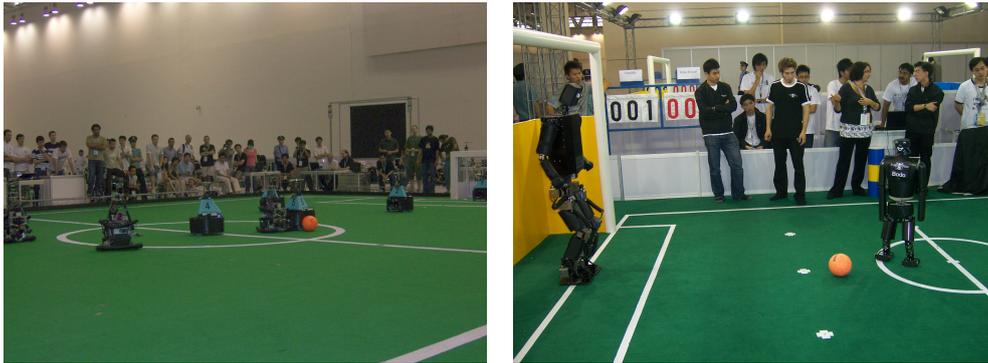


Figura 2: Instantes de las competiciones de robots de tamaño medio (izquierda) y humanoides (derecha) de la edición 2008 de la RoboCup celebrada en Suzhou (China)

de control basado en una secuencia de acciones reactivas siguiendo la arquitectura AuRa[7]. Los robots no se comunicaban entre sí, pero eran capaces de detectarse mutuamente creando fuerzas repulsivas.



Figura 3: Robots Ganymede, Io y Callisto

En la categoría de *plataforma estándar* de la competición Robocup encontramos a menudo ejemplos de equipos heterogéneos. La heterogeneidad la encontramos no tanto en la mecánica, sino en la parte del *software*, donde cada robot ejecuta roles distintos. En [55] se detalla uno de los últimos trabajos usando los robots AiBo, que permite establecer estrategias de decisión para posicionar los robots de un mismo equipo. Es habitual, establecer diversos roles como el de portero, chutador, defensa o delantero. Mientras que la labor del chutador es bastante clara y definida, consistente en alcanzar la pelota y golpearla hacia la portería adversaria; la labor del delantero (que apoya al chutador) es más difusa. En este trabajo se trata de maximizar las opciones ante un posible pase o una pérdida de la pelota. ACTRESS [9] y ALLIANCE [51] son ejemplos reales de arquitecturas que manejan grupos heterogéneos.

El concepto de cobertura de tarea o *task coverage* [53] expresa la habilidad de un robot para completar una tarea dada, es decir, el grado de independencia para la tarea especificada. Este parámetro es un cuantificador de la necesidad de cooperación. Si este valor es elevado, habrá poca

cooperación ya que los individuos se valdrán por ellos mismos para solucionar la tarea. Por el contrario, si la cobertura de tarea es baja, habrá que coordinarle con el resto de miembros para paliar las deficiencias de cada individuo. En grupos homogéneos, su valor es mínimo y éste crece a medida que aumenta la heterogeneidad.

El término de entropía social acuñado por Tucker Balch en [10] indica el grado de heterogeneidad del equipo. La entropía es una medida del grado de desorden en un sistema. Este indicador asigna un número para expresar el grado de desorden en el grupo. Un valor de 0 significará que la sociedad es homogénea. La entropía social será máxima si todos los miembros son diferentes. Este valor aumentará a medida que el número de robots heterogéneos se incrementa. La fórmula para expresar la entropía social es la siguiente:

$$Het(R) = - \sum_{i=1}^c p_i \log_2(p_i) \quad (1)$$

siendo c el número de castas, es decir, el número de robots diferentes. Imaginemos que queremos calcular el valor de entropía social de un equipo de 5 robots participante en la liga de robots de cuatro patas de la Robocup. Supongamos que se han diseñado 4 roles diferentes: Portero, defensa, chutador y jugador de campo. Si dos de los robots ejecutaran el rol de jugador de campo y los tres restantes los de portero, defensa y chutador respectivamente, tendríamos 4 castas. El valor de p_i corresponde al porcentaje de robots que pertenecen a la casta c_i , en nuestro ejemplo los valores serían $p_1 = p_2 = p_3 = 0,20$ y $p_4 = 0,40$. Si desarrolláramos la ecuación 1 obtendríamos un valor de 1.91 de entropía social.

2.3. Mecanismos de coordinación

Un equipo de robots puede cooperar de maneras muy diversas: Desde la más básica en la que cada individuo no tiene conciencia del resto, hasta las más elaboradas basadas en negociaciones de alto nivel y con un elevado grado de comunicación. Ilustraremos varios mecanismos de cooperación con el siguiente ejemplo.

Maja Mataric ha dedicado parte de su investigación a estudiar el comportamiento emergente en grupos de agentes. Uno de sus experimentos más conocidos es el denominado *The Nerd Herd*, que consistió en preparar un entorno con 20 robots exactamente iguales. El objetivo del experimento era conseguir que todos los agentes alcanzaran el mismo objetivo: Llegar a otra habitación conectada por una puerta por donde sólo podía pasar un robot simultáneamente.

En el primer conjunto de pruebas, cada robot no conocía la existencia de otros robots, es decir, operaban bajo una *coexistencia ignorante*. El conjunto de comportamientos reactivos que podían desplegar era muy simple y se limitaba a *mover-a-objetivo* y *esquivar-obstáculo*. Debido a que la cercanía con otro robot era tratado como si se estuviera cerca de un obstáculo, los robots estaban constantemente desviando su rumbo y alejándose del camino hacia el destino. El equipo era muy lento en culminar su tarea y a medida que se incorporaban nuevos robots empeoraba la tarea.

A continuación se modificó el experimento para que los robots fueran capaces de detectar la presencia de sus congéneres. A esta conciencia colectiva se le denomina *coexistencia informada*. Se añadió un tercer comportamiento *esquiva-robot* que simplemente detenía su camino durante un determinado tiempo. Los resultados fueron mejores debido a que se reducían los atascos de robots, aunque el resultado final seguía siendo malo.

En el experimento definitivo se cambió la heurística del comportamiento *esquiva-robot*: Ahora los robots eran repelidos por otros robots pero después el robot trataba de dirigirse en la misma dirección que la mayoría de sus compañeros. El comportamiento emergente obtenido fue similar al de un rebaño o bandada de animales avanzando al unísono hasta el mismo lugar. Ahora no

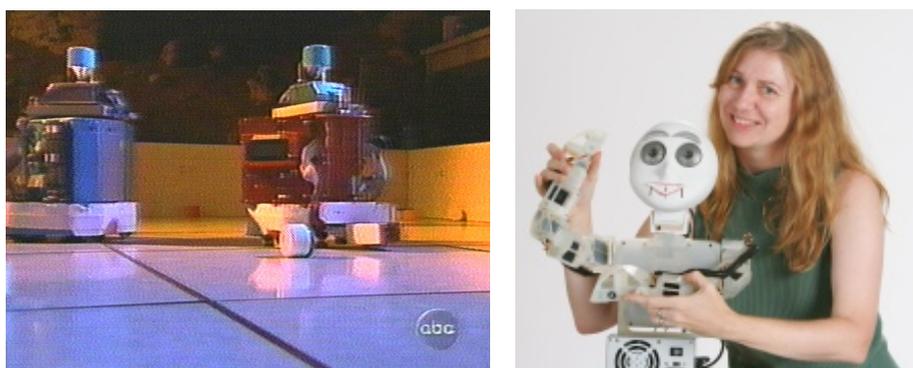


Figura 4: Robots del proyecto *The Nerd Herd* (izquierda) de la Universidad South California (EEUU), junto con su autora Maja Mataric (derecha)

sólo se redujeron las colisiones, sino que la tarea se completó mucho más rápido que de cualquier otra manera anterior. La definición para esta nueva sociedad es la de *coexistencia inteligente*.

Modelar las intenciones, creencias, acciones, capacidades, ... del resto de miembros del grupo lleva a una menor necesidad de comunicación explícita. Este modelado permite en cierta medida saber en todo momento la acción que otro individuo va a acometer sin emitir ningún mensaje. Usando un símil algo fantástico, es la capacidad de disponer de *telepatía* usando solamente los sensores de cada robot.

La coordinación de equipos de robots en entornos dinámicos es uno de los problemas fundamentales en grupos de agentes. Coordinarse normalmente significa sincronizarse. Este nivel de sincronización o intercambio de información están altamente ligados a la tarea a realizar. Por ejemplo y en general, tareas de transporte coordinado requieren mayor nivel de coordinación que trabajos de saqueo o recolección de objetos.

Los mecanismos de cooperación dinámica son adecuados para favorecer la flexibilidad y adaptabilidad a la hora de afrontar una tarea coordinada. En [20] se propone un mecanismo de asignación dinámica de roles, que permite asociar tareas concretas a robots o grupos de robots sobre la marcha. Este mecanismo es descentralizado y cada individuo toma sus propias decisiones basadas en la información local y global. Podemos enumerar tres tipos de cambio de rol:

- Asignación o *Allocation*: Se asume un nuevo rol cuando se termina la ejecución una tarea.
- Reasignación o *Reallocation*: El rol activo se aborta y comienza la ejecución de otro nuevo.
- Intercambio o *exchange*: Dos o más robots se sincronizan e intercambian sus papeles.

¿Cuándo se produce el cambio de rol? Este es un aspecto importante y varios autores han propuesto el concepto de utilidad. Cuando un nuevo rol está disponible se calcula la utilidad de ejecutarlo y si la diferencia entre la utilidad del nuevo rol y el antiguo supera cierto umbral, el robot cambiará al nuevo rol.

2.4. Tipos de comunicación

La comunicación determina las posibilidades de interacción entre los miembros del grupo, siendo el vehículo para que la coordinación se manifieste. Podemos identificar tres tipos de

interacción que tienen que ver con el *intercambio de información*: A través del medio, a través de los propios sensores del robot o explícita empleando comunicaciones.

La interacción a través del entorno es el método más simple y limitado. Se modifica el entorno como medio de comunicación sin existir una comunicación explícita. Esta interacción suele darse principalmente en robots reactivos produciendo comportamientos emergentes. Algunos ejemplos pueden verse en [5] y [59]. Este tipo de comunicación aparece en la naturaleza y se conoce como estigmergia, comportamiento innato o *eusocial behavior*. En las colonias de hormigas, los diferentes componentes colaboran a través de pautas o hitos dejados en el medio: feromonas, acumulación de objetos o cualquier otro tipo de cambio físico, como la temperatura.

La interacción sensorial se produce cuando continúa sin haber comunicación explícita pero a través de sus sensores (visión, infrarrojos, ...) cada miembro del equipo es capaz de percibir a otros individuos del mismo. De esta manera se pueden crear comportamientos colectivos como pueden apreciarse en [41] y [42].

Finalmente, la interacción usando comunicaciones utiliza comunicación explícita entre los robots como herramienta de comunicación, ya sea entre pares o mediante *broadcast*. Buscando el símil con la naturaleza, ahora la comunicación sería similar a la encontrada en animales superiores. La interacción entre los miembros es más elevada y existe mayor intencionalidad para maximizar el beneficio del grupo. Lo habitual aquí es utilizar protocolos existentes, aunque para robots concretos y limitados surgen protocolos específicos [30], [2].

Cuando un equipo de robots tiene necesidad de intercambiar información surge el concepto de *sincronización*. Existen dos tipos de comunicación explícita para coordinarse: Síncrona y asíncrona. Con comunicación síncrona los mensajes son enviados y recibidos constantemente, mientras que en el modo asíncrono se desencadena la comunicación sólo ante situaciones excepcionales o destacadas.

Otra definición interesante es el concepto de *negociación*. Las negociaciones permiten intercambiar información sobre el estado de los robots o sus intenciones, favoreciendo la cooperación. Los robots negocian sus pasos a seguir y puede entenderse como una comunicación de alto nivel. El lenguaje *KQML*[31] es un esfuerzo por unificar protocolos de comunicación. *KQML* define tanto un formato de mensajes como un protocolo de manejo de los mismos, para proporcionar intercambio de conocimiento entre varios agentes. En [62] se presenta una aproximación al modelado de negociaciones entre agentes, un concepto absorbido desde el campo de la Inteligencia Artificial.

2.5. Interferencias y conflictos

Este es un problema típico cuando varios elementos quieren acceder a un recurso compartido. Este medio compartido puede ser desde un canal de comunicaciones hasta una intersección de carreteras. Si dos o más individuos acceden a él en el mismo instante de tiempo se produce una colisión. Por tanto, es necesario que exista algún mecanismo de exclusión mutua para evitar estos problemas cuando sea necesario.

Otro ejemplo ilustrativo puede darse en competiciones como la Robocup [58], donde equipos formados por varios robots compiten en un partido de fútbol en un entorno controlado y conocido. Si dos jugadores del mismo equipo deciden ir a por la pelota a la vez, ambos se estorbarán mutuamente. En [63] y [3] podemos encontrar un protocolo de reserva de pelota para que sólo un jugador intente acceder a ese recurso en un instante de tiempo determinado, y un mecanismo de intercambio dinámico de roles de juego, que permite que dos jugadores siempre tengan papeles diferenciados durante el partido.

Durfee [27; 68] introdujo el concepto de *Recursive Modeling Method* o RMM para modelar explícitamente las creencias sobre los estados de otros agentes. El objetivo de modelar las creen-

cias del resto de individuos es predecir sus acciones para mantener un alto grado de cooperación y evitar en mayor medida las interferencias.

3. Aplicaciones

Una vez que hemos barrido los fundamentos teóricos y los conceptos más interesantes de los sistemas robóticos cooperativos vamos a hacer un repaso a las aplicaciones típicas que se abordan con grupos de robots. Por cada una de ellas identificaremos los conceptos más representativos y la clasificaremos según los criterios presentados en la sección anterior.

3.1. Recolección o *foraging*

La recolección consiste en encontrar y recoger una serie de objetos diseminados por el entorno. En situaciones reales estas técnicas se pueden usar para recoger sustancias tóxicas, participar en situaciones de rescate, detectar de minas, etc. Los mecanismos de cooperación en estos entornos pueden ser variados, desde repartir los robots por zonas disjuntas, hasta construir cadenas con ellos para recolectar los objetos. Incluso pueden repartirse aleatoriamente y que emerja un comportamiento colectivo. Los equipos de robots para recolección suelen ser homogéneos y el control es totalmente distribuido. En cuanto al tipo de comunicación empleado lo habitual es utilizar interacción sensorial para evitar colisiones. Los sistemas más avanzados emplean comunicaciones para hacer un mejor reparto de las zonas a explorar y optimizar el tiempo empleado.



Figura 5: Robots *Sally* y *Shannon* (izquierda) pertenecientes a Georgia Institute of Technology participando en la competición de saqueo *Find Life on Mars* (derecha) dentro del *AAAI-97 Robot Competition*

La figura 3.1 muestra instantes de la competición *Find Life on Mars*[60], inspirada en la exploración de Marte. Los robots participantes deben recolectar objetos y pelotas específicamente coloreados y depositarlas en una zona común. Los robots *Sally* y *Shannon* fueron programados por Georgia Institute of Technology para abordar el problema desde un punto de vista cooperativo. Los dos robots estaban gobernados por varias capas de control. La capa de bajo nivel, más reactiva, se encargaba de implementar los comportamientos reactivos como por ejemplo *esquivar_obstáculo* o *ir_a_objetivo*. El resultado final era un comportamiento emergente donde los dos robots no comunicaban explícitamente entre sí pero si colaboraban minimizando el tiempo de recolección.

3.2. Formaciones

Esta especialidad aparece cuando se combina la navegación y los grupos de robots. Consiste en el control de múltiples individuos moviéndose juntos en formación. Los trabajos en el ámbito de las formaciones en vehículos no tripulados despertaron un interés militar en el Ministerio de Defensa de Estados Unidos durante la década de los 90. El control de las formaciones de vehículos resulta interesante para realizar funciones de escolta o exploración.

Un primer ejemplo de formaciones lo podemos encontrar en [23]. El método propuesto usa sensores locales y no externos y asigna a uno de los robots el rol de líder, por tanto este sistema es centralizado. Al haber un robot actuando como líder, el equipo es por definición heterogéneo, pues los roles diferenciados de cada tipo de robot marcan la heterogeneidad. En este caso concreto la cooperación se produce mediante interacción sensorial detectando la distancia y orientación entre los vehículos.

El robot que juega el papel de líder se mueve según un planificador de trayectorias disponible. El objetivo es mantener una distancia aproximada entre las parejas de robots y que todos tengan una orientación determinada. Los parámetros involucrados en las decisiones son la distancia entre los robots, la velocidad y la orientación de cada uno. Mediante cálculos matemáticos se consiguen dar los comandos de movimiento adecuados a cada robot para que la formación se mantenga en equilibrio. La presencia de obstáculos podría desencadenar cambios de formación y pasar a formas más lineales para evitar el contacto, etc.

Un segundo ejemplo interesante es el caso del proyecto desarrollado en el *Georgia Tech Mobile Robot Laboratory*, utilizando vehículos terrestres no tripulados. En la figura 3.2 se muestra un convoy real de vehículos durante una demostración, así como las cuatro formaciones clásicas más empleadas (línea, columna, diamante y cuña). En este caso, uno de los vehículos actuaba de líder y no tenía que preocuparse de mantener la formación. Esto nos indica que el sistema es heterogéneo. Los vehículos estaban equipados con GPS y esto permitía conocer con relativa exactitud la posición de cada uno. En cuanto al mecanismo de comunicación el proyecto desarrolló varias técnicas siendo las más empleadas las basadas en comunicación explícita.



Figura 6: Equipo de cuatro camiones militares propiedad de DARPA durante el proyecto *Demo II Project* (izquierda) y formaciones en línea, columna, diamante y cuña (derecha)

3.3. Gestión de almacenamiento

En grandes centros de distribución, almacenes o pequeños negocios con gran volumen de movimiento de productos es habitual dedicar mucho tiempo a la gestión del inventario. Esta gestión involucra tareas de llenado de determinados compartimentos o vaciado cuando los clientes lo solicitan. Un equipo de robots cooperantes puede ser una muy buena solución para este problema, liberando a las personas de esta tarea repetitiva y mejorando la eficiencia de la gestión de los recursos. Cuando disponemos de varios agentes compartiendo el mismo medio también pueden surgir colisiones. Este problema puede interpretarse como un problema de acceso a un recurso (carreteras, aire, etc.) y se puede resolver mediante reglas, prioridades o comunicación. Desde otro punto de vista también puede verse como un problema de planificación de movimientos entre varios robots.

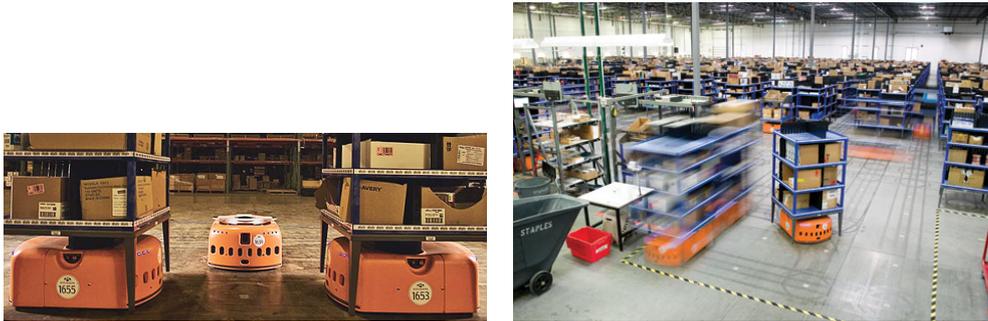


Figura 7: Robots de *Kiva Systems* (izquierda) e instalaciones en Denver (derecha) donde los robots realizan trabajos de almacén

La empresa *Kiva Systems*[33; 39] ofrece al mercado de los centros de distribución un equipo de cientos de robots formando un enjambre (*swarm*) para encargarse del inventario. Esta empresa afincada en Boston ha desarrollado un sistema que permite transportar estanterías de carga a diferentes sitios de un almacén de manera coordinada. *Kiva Systems* no ha publicado datos concretos sobre la tecnología de control de los robots, ni de su diseño mecánico o su algoritmo de asignación de recursos. Sin embargo, los resultados que han obtenido hablan por sí solos y se podría decir que representan la punta de lanza en cuanto a resultados reales en este área se refiere.

3.4. Manipulación coordinada

Hay muchos trabajos sobre este tema consistente en arrastrar cajas usando varios robots con brazos, o de manera más genérica, manipular objetos entre varios agentes. Un dato interesante de esta especialidad es que la cooperación puede llevarse a cabo sin que cada robot sepa de la existencia del resto. Algunos trabajos interesantes en esta línea son [59] y [67].

En la figura 8 podemos observar los experimentos realizados por Joel M. Espósito en [28], donde plantea la cuestión del posicionamiento de nuevos miembros a la hora de transportar coordinadamente objetos. En su caso, los robots son grandes grupos de barcos autónomos a escala. Su trabajo está inspirado en la literatura actual sobre manipulación y agarre de objetos con manos robóticas. Su enfoque es genuino porque afronta el problema con un control distribuido y utilizando un equipo de robots, equipados con módulos de comunicación inalámbrica para intercambiar información entre ellos.

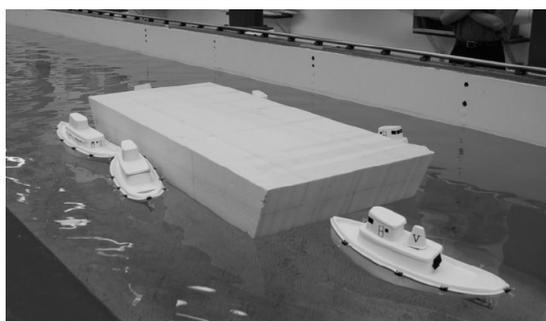


Figura 8: Seis barcos autónomos remolcando de manera coordinada una barcaza simulada

En [13] se puede encontrar otro ejemplo donde dos brazos manipuladores industriales cooperan para trabajar sobre el mismo objeto. Esta necesidad surge para soportar objetos muy grandes o pesados que de manera individual no podrían sujetarse. El trabajo explora los mecanismos para trazar trayectorias compatibles con los dos manipuladores y que eviten cualquier obstáculo.

3.5. Fútbol robótico

El fútbol robótico es un campo de pruebas interesante que está cobrando mayor interés año a año. Además del reto tecnológico que requiere desarrollar un sistema completo perceptivo, locomotor, estratégico, que incluya autolocalización y cooperación entre sus miembros, tiene el ingrediente extra de ser competitivo. Un equipo de robots se enfrenta a otro equipo con objetivos opuestos a los tuyos. Desde el punto de vista de coordinación es un escenario muy propicio a establecer roles entre los miembros de cada equipo (portero, defensor, delantero, etc.) con estrategias de posicionamiento y comportamientos específicos.

La percepción también se beneficia de la cooperación (como veremos en la sección 3.7) y la estimación de los objetos interesantes del partido, como la pelota, pueden realizarse de manera más precisa intercambiando información entre varios robots.

Existe otra variante del fútbol robótico con las mismas reglas pero con diferente entorno: Un entorno virtual simulado. Los simuladores como [48] proporcionan una excelente plataforma para trabajar con sistemas multiagente. Simulan los limitados sistemas perceptivos de los robots, permiten comunicar información entre los miembros del equipo utilizando primitivas de tipo *say*, e incluso se simulan los errores habituales tanto en los comandos de movimiento como en las capturas sensoriales. Los simuladores Stage y Gazebo [64] son otro ejemplo de simuladores de referencia con capacidades de comunicación entre robots. En particular Gazebo permite simular comunicaciones entre equipos de robots y Stage permite simular comunicaciones dentro de grupos muy numerosos o enjambres.

3.6. Construcción distribuida de mapas

La construcción de mapas es una tarea ampliamente trabajada en el campo de la Robótica. Consiste en la creación conjunta de un modelo del entorno. Abarca subtarefas como la exploración, que persigue deambular por el entorno descubriendo y percibiendo sus características más relevantes. La construcción de mapas también requiere incorporar algoritmos de auto-localización para enriquecer el mapa de manera adecuada. En el capítulo III del libro *Probabilistic Robotics* [65] se hace un repaso muy detallado de las técnicas probabilísticas de construcción de mapas.



Figura 9: Simulador *Soccer server* empleado en la competición RoboCup (izquierda) e instante de un partido de una competición organizada por la FIRA (derecha)

El problema de explorar el entorno es ampliamente conocido y existen muchas técnicas para conseguirlo usando un solo robot. Sin embargo, la ventaja asociado al uso de un equipo de robots es clara: Se mejora el tiempo de exploración debido al reparto de las zonas a explorar. Atajar el problema usando un grupo de robots resulta algo más complejo por la dificultad añadida de tener que coordinarlos.

En [16] presentaron un sistema cuya cuestión clave era hacia dónde dirigir cada robot. Esta técnica utiliza un mapa de celdas de probabilidad. El entorno se divide en celdas o casillas y se almacena en cada una la probabilidad de que en ella haya un obstáculo. También se propone la definición de celda frontera como aquella que limita con otra de la que no se conoce ningún dato (aún está sin explorar). El objetivo del algoritmo es asignar celdas frontera a los robots para que viajen hasta ellas. Esta asignación no la realizan los propios robots, sino un agente externo que recibe la información sensorial de cada individuo.

Este sistema es claramente centralizado, pues la asignación de las celdas la calcula y ordena un agente externo y no los propios robots. El sistema es heterogéneo al existir esta unidad de procesamiento central. En cuanto a la comunicación se emplea comunicación explícita para asignar celdas frontera a cada robot. Además cada robot tiene que localizarse dentro del escenario y comunicar al resto su posición y el mapa actual que lleva registrado. En principio, todos los robots deberían manejar aproximadamente el mismo mapa en un instante determinado.

Relacionado con este ámbito se encuentra el problema de la localización cooperativa. Tiene como fin el utilizar al resto de miembros del grupo consiguiendo una mejora de la autolocalización. Es habitual que el rendimiento en navegación aumente si la localización es más precisa. En [57] proponen que la exploración del entorno se haga en parejas de robots. Cada robot está equipado con algún tipo de sensor de seguimiento para mantener la atención en su compañero. El entorno es modelado mediante una aproximación polinomial, es decir, se simplifica el entorno modelándolo como segmentos rectos. La estrategia propuesta en este artículo consiste en que uno de los robots permanece detenido mientras el otro comienza a explorar el entorno. El robot que navega siempre

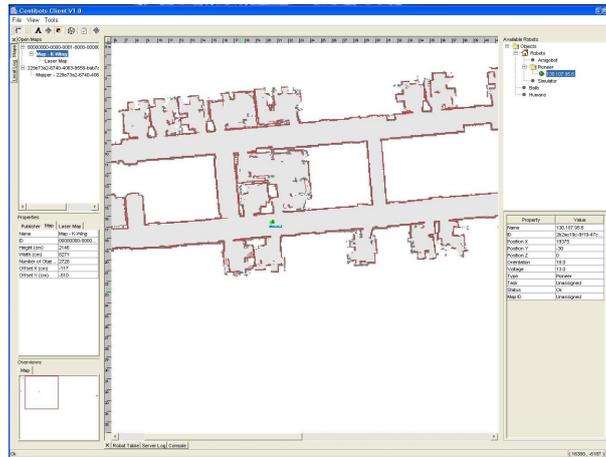


Figura 10: Mapa creado dentro del proyecto Centibots por un enjambre de robots

observa al robot detenido. Este proceso va alternándose periódicamente. En la figura 11 podemos observar la imagen real obtenida por uno de los robots del experimento.

Los dos robots van confeccionando un mapa y éste va enriqueciéndose por la línea que une ambos robots. Si durante la exploración se deja de ver al robot estático, significa que ha aparecido un obstáculo. Este agente estático actúa de baliza para el que va explorando el entorno con el fin de corregir los errores odométricos.

Los robots están equipados con líneas negras alrededor de su chasis. La separación entre ellas, junto con la distancia estimada recorrida, son los parámetros con los que se corrige la odometría. Por supuesto, el sensor encargado de visualizar estas marcas es una cámara.



Figura 11: Imagen obtenida por el robot que monitoriza a su compañero

Otro ejemplo que hace énfasis en la localización y construcción de mapas en vehículos no tripulados debajo del agua se detalla en [69]. A pesar de disponer de un grupo de robots, sólo algunos de ellos son los encargados de confeccionar el mapa y estimar las posiciones del resto

de miembros del equipo. El entorno donde se desenvuelven estos vehículos hace imposible el uso de sensores láser y GPS. La estimación de la posición se realiza mediante sensores acústicos. El artículo presenta un grupo de robots heterogéneos y centralizado que disponen de este tipo de sensores y distingue entre dos jerarquías de individuos: Maestros y esclavos. Los maestros disponen de mejores sensores y de un sistema acústico para interrogar al resto de robots y compartir información. Los esclavos tienen sensores más limitados y no disponen de la capacidad de forzar una interacción. El algoritmo utilizado emplea una extensión del filtro de Kalman, que junto con las observaciones realizadas por el resto de robots se usan para construir el mapa y corregir las posiciones de cada uno. Es necesario utilizar algoritmos de correspondencia para mezclar los datos procedentes de varias fuentes.

3.7. Percepción distribuida

Otra aplicación típica es el uso de varios robots para percibir objetos. Las ventajas de los equipos de robots en estas aplicaciones son la mayor superficie de cobertura, la mejor precisión obtenida, mayor robustez ante fluctuaciones en la estimación, etc. Una de las aplicaciones de la percepción distribuida son las tareas de vigilancia o seguridad. Dentro de las aplicaciones de seguridad un aspecto importante consiste en visualizar y realizar seguimiento de objetos móviles. La cuestión clave en este tipo de sistemas reside en dónde colocar los sensores de visión o atención.

Un primer ejemplo detallado en [54] estudia el uso de un conjunto de robots para llevar a cabo esta tarea y minimizar el tiempo en el que algún objetivo escape a la atención de los sensores. El artículo establece una métrica que corresponde con el número medio de objetivos que están siendo seguidos por al menos un robot. Esta métrica es la que trata de maximizar el algoritmo propuesto. El trabajo define tres franjas concéntricas alrededor de cada robot:

1. Área sensorial: Zona alrededor de cada miembro del equipo que son capaces de percibir los sensores.
2. Área de predicción de seguimiento: Zona intermedia donde se sitúan objetos que no son directamente visibles por el robot pero si lo son por otros miembros.
3. Área de comunicación: Límite exterior que marca la frontera hasta la que es posible emitir señales para interactuar con el resto de robots. Este concepto es muy importante en las redes de sensores, pues define el alcance comunicativo de cada robot. Se debería garantizar que siempre existieran varios robots dentro de este área, para no romper en ningún caso la cadena de comunicación.

Cada robot monitoriza los objetos contenidos en su área de atención sensorial y envía al resto de individuos las posiciones de cada objeto. Con los datos recibidos del resto de robots, se realiza un seguimiento virtual de los objetos que no son directamente visibles pero que están situados dentro del área de predicción. Estos objetos situados en el área de predicción influyen en las decisiones de movimiento de cada robot.

Otro segundo ejemplo de estimación distribuida lo presenta Ashley Stroupe en [61]. Propone una técnica para fusionar diferentes estimaciones independientes y en un marco de referencia común, procedentes de varios robots móviles. Está basada en filtros Bayesianos y permite manejar la incertidumbre de manera analítica modelando las observaciones y la posición del observador como distribuciones gaussianas. Este proceso es muy eficiente computacionalmente debido a que puede implementarse con sencillas operaciones matriciales.

Un tercer ejemplo de estimación de objetos distribuida se puede encontrar en [24]. Ahora se emplean filtros de Kalman para mantener una estimación compartida de la pelota entre los

miembros de un equipo de la liga de robots de tamaño medio de la Robocup. De esta manera, el rango limitado de visión local se amplía y se transforma a un sistema de referencia global y compartido por el resto de compañeros del grupo.

En [37] se describe otra aplicación compuesta de cámaras fijas repartidas por el techo de una habitación. Se basa en un sistema centralizado que recoge la información de cada cámara y mantiene una estimación de la posición en tres dimensiones de las personas que hay en la habitación. Su objetivo es monitorizar la posición de las mismas para detectar situaciones de desvanecimiento o caídas. Está especialmente ideada para personas mayores que quieren mantener su autonomía viviendo en su propia casa y disponer de un sistema de vigilancia pasivo que reduzca el tiempo de asistencia en caso de accidente.

3.8. Coordinación de actuadores

En este apartado nos vamos a focalizar en la coordinación de los actuadores principales de los robots caminantes: sus patas. Algunas aplicaciones potenciales de los robots caminantes citadas en la literatura son el transporte militar, inspección en entornos peligrosos, exploración espacial, exploraciones terrestres, exploraciones en el fondo oceánico, trabajos agrícolas, en la construcción, en la educación, para el entretenimiento, investigación básica, detección de minas antipersona, ayuda a personas dependientes, tareas de rescate. En la figura ?? se muestran algunos robots caminantes que poseen múltiples actuadores, sistema de percepción y coordinación de movimientos.

Un robot caminante debe ser físicamente capaz de atravesar los trazados irregulares y los obstáculos que existan en el terreno sobre el que se desplace. Para esto, se debe conseguir una fiabilidad en el control autónomo del robot, una alta precisión y una adecuada eficiencia. Esto es, debe haber un alto nivel de coordinación entre los actuadores que posea teniendo en consideración la fusión de todo el sistema sensorial que interactúa con el entorno. La coordinación entre los actuadores de un robot caminante, entonces, debe brindar una alta capacidad de adaptabilidad al terreno, y lo más importante en su propia seguridad y de los objetos o personas que le rodean.

Las tareas que realizan los robots caminantes cada vez son más complejas, debido a los avances que se suscitan en el campo de la robótica y, por otro lado, en las respuestas que se ofrecen a la sociedad en que vivimos. Por estas razones, las estrategias de los algoritmos de control se van modificando para que los robots desempeñen funciones que se aproximen a su símil biológico correspondiente. Para ello, el sistema de percepción del entorno y su fusión sensorial deben brindar la suficiente información para que por medio de algoritmos de control (quizás modificables de manera automática) se proporcione una coordinación de movimientos adecuada entre las diferentes partes del cuerpo del robot, para que éste ejecute una acción como si se tratase de un *ser vivo*.

Por ejemplo, estrategias de control de fuerza aplicadas al robot humanoide SILO2 para que se acomode cuando una fuerza actúa sobre él. Para ello, el robot debe *sentir* la fuerza sobre uno de sus lados provocando que el sistema de control (estructurado de manera jerárquica) mande a realizar una tarea coordinada sobre los actuadores de manera independiente, con la finalidad que el robot se evada DE (interactúe con) la fuerza, pero manteniendo una postura de estabilidad [45]. En la figura ?? se presenta una secuencia fotográfica que ilustra la aplicación de fuerza sobre el robot y su respuesta a la misma.

Otro ejemplo, es la de realización de trabajos conjuntos del robot humanoide HRP con un ser humano, en donde realiza transporte de piezas de un lugar a otro [34]. El HRP posee algoritmos de control de impedancia que actúan sobre sus brazos, pero que dependiendo de los vectores de fuerzas que se producen durante la manipulación de la pieza, el algoritmo de control jerárquico realiza un proceso coordinado para que las patas del robot se acomoden de tal forma que el

ZMP esté dentro del polígono de apoyo del humanoide manteniendo la estabilidad del mismo. La figura ?? muestra una parte de la ejecución del experimento de manipulación de un objeto con el robot.

Otro ejemplo de coordinación de movimientos, entre sistemas que pertenecen a un robot, se puede ver en Roboclimber [47]. Roboclimber es un robot cuadrúpedo de grandes dimensiones diseñado en el Instituto de Automática Industrial para que ejecute tareas de consolidación de laderas de montañas. Él posee un algoritmo de control para el seguimiento de trayectorias discontinuas de dos fases y de trayectorias continuas. También posee algoritmos de control de fuerza y de control reactivo que implementan filtros de Kalman, en donde utilizan los datos provenientes de los sensores de fuerza sobre los pies del robot, sensores de ultrasonido implementados en la parte inferior y frente del robot, sensores de presión sobre los circuitos hidráulicos de las patas del robot, para facilitar la ejecución de tareas de consolidación de laderas de montañas.

4. Conclusiones

En este artículo hemos resumido, en una primera parte, los aspectos teóricos que deben conocerse a la hora de afrontar el diseño de un sistema basado en robots o agentes cooperantes. Hemos repasado las diferentes familias de grupos cooperativos: grupos de sensores, grupos de actuadores o equipos de robots. Las ventajas de abordar una tarea usando un grupo de robots también han sido repasadas: Velocidad, robustez, coste, imposibilidad de abordar el problema de manera individual, etc. El problema de las interferencias inherente a los grupos de robots también ha sido descrito y se han propuesto algunas soluciones para lidiar con él.

Los diferentes criterios en los que podemos clasificar un sistema cooperativo también han sido revisados. Los términos como grupo homogéneo, heterogéneo, centralizado, distribuido, etc. son algunos ejemplos de la terminología introducida en la literatura y abordada en este trabajo. Se han mencionado multitud de artículos de reconocido interés, que se pueden consultar para profundizar sobre estos temas.

Resulta interesante el enfoque que tienen algunos trabajos que consideran mecanismos cooperantes aquellos que no interactúan de manera explícita. El símil con el mundo animal resulta obvio y recuerda a cómo muchas especies de animales trabajan de manera parecida (por ejemplo cuando vemos una bandada de pájaros que vuelan al unísono de manera *mágica*).

La segunda parte del trabajo muestra algunas aplicaciones paradigmáticas en distintas áreas. Hemos realizado una panorámica sobre las aplicaciones de recolección, que explotan el paralelismo de los equipos de robots que pretenden explorar el entorno en busca de objetos que capturar. El control de formaciones también ha sido revisado, destacando la influencia que tiene en este campo el entorno militar. El problema de la gestión del inventario es muy interesante porque demuestra que la robótica cooperativa tiene cabida en la industria. Empresas como *Kiva Systems* han sabido explotar las ventajas que suponen los enjambres de robots con gran éxito. Hemos repasado la manipulación coordinada de objetos con ejemplos de robots móviles y brazos fijos, que aumentan la complejidad del sistema pero permiten manipular objetos más heterogéneos.

El caso del fútbol robótico es una de las competiciones con más éxito de participación debido a su vistosidad y su capacidad para incluir problemas muy variados del mundo de la robótica. Para el caso de la coordinación es un entorno ideal debido a las capacidades comunicativas que se permiten entre los miembros de los equipos. Además las técnicas de asignación de tareas y estimación distribuida pueden aplicarse de manera natural, siendo sus ventajas muy evidentes y con gran impacto en el juego. La construcción distribuida de mapas también tiene numerosas ventajas asociadas al empleo de equipos de robots cooperantes. El mayor número de robots abarcan gran superficie de exploración, reducen los tiempos de confección del mapa y mejoran la

auto-localización de sus miembros. Finalmente, se han repasado las aplicaciones de vigilancia y estimación de objetos, que obtienen mejores valores en precisión, estabilidad y mayor cobertura que sus variantes mono-robot.

Referencias

- [1] A. S. A. Sanfeliu, N. Hagita, editor. *Special Issue on Network Robot Systems of Robotics and Autonomous Systems*, volume 56. Elsevier, 2008.
- [2] C. Agüero, V. Matellán, P. de las Heras, and J. M. Cañas. PERA: Routing protocol for mobile robotics. In *International Conference on Advanced Robotics*, 2003.
- [3] C. E. Agüero, V. Matellán, J. M. Cañas, and V. Gómez. Switch! dynamic roles exchange among cooperative robots. In *Proceedings of the International Workshop on Multi-Agent Robotics Systems*, 2006.
- [4] M. Ahmadi and P. Stone. Instance-based action models for fast action planning. In U. Visser, F. Ribeiro, T. Ohashi, and F. Dellaert, editors, *RoboCup-2007: Robot Soccer World Cup XI*, volume 5001 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 1–16. Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [5] R. C. Arkin. Cooperation without communication: Multiagent schema-based robot navigation. *Journal of Robotic Systems*, 9(3):351–364, 1992.
- [6] R. C. Arkin. *Behavior-Based Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. The MIT Press, May 1998.
- [7] R. C. Arkin and T. Balch. AuRA: Principles and Practice in Review. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 9:175–189, 1997.
- [8] M. Armada. Climbing and Walking from research applications. In *International Conference on Climbing and Walking Robots*, pages 39–48, 1988.
- [9] H. Asama, A. Matsumoto, and Y. Ishida. Design of an autonomous and distributed robot system: ACTRESS. In *IEEE/RSJ IROS*, pages 283–290, 1989.
- [10] T. Balch. Social Entropy: A New Metric for Learning Multi-robot Teams. In *In Proc. 10th International FLAIRS Conference (FLAIRS-97)*, pages 272–277, 1997.
- [11] T. Balch and L. E. Parker, editors. *Robot Teams: From Diversity to Polymorphism*. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2002.
- [12] G. Beni. The concept of cellular robotic system. In *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pages 57–62, 1988.
- [13] R. M. C. Bodduluri, J. M. McCarthy, and J. E. Bobrow. Planning movement for two puma manipulators holding the same object. In *The First International Symposium on Experimental Robotics I*, pages 579–593, London, UK, 1990. Springer-Verlag.
- [14] A. H. Bond and L. Gasser. An Analysis of Problems and Research in DAI. In A. H. Bond and L. Gasser, editors, *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, 1988.
- [15] S. Brin and L. Page. The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine. *Computer Networks and ISDN Systems*, 30(1–7):107–117, 1998.

- [16] W. Burgard, M. Moors, D. Fox, R. Simmons, and S. Thrun. Collaborative Multi-Robot Exploration. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2000.
- [17] P. Caloud, W. Choi, J. C. Latombe, C. L. Pape, and M. Yin. Indoor automation with many mobile robots. In *IEEE/RSJ IROS*, pages 67–72, 90.
- [18] Y. U. Cao, A. S. Fukunaga, and A. B. Kahng. Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions. *Autonomous Robots*, 4(1):7–23, March 1997.
- [19] M. Cazorla and V. Matellán, editors. *Special Issue on Multi-Robot Systems of Journal of Physical Agents*, volume 2. 2008.
- [20] L. Chaimowicz, V. Kumar, and M. Campos. A Paradigm for Dynamic Coordination of Multiple Robots. *Autonomous Robots*, 17(1), 2004.
- [21] S. K. Chalup, C. L. Murch, and M. J. Quinlan. Machine learning with aibo robots in the four-legged league of robocup. *Systems, Man and Cybernetics, Part C, IEEE Transactions on*, 2006.
- [22] N. Y. Chong, N. Hagita, V. Isler, K. Schilling, and D. Song, editors. *Special Issue on Networked robots: Serving the Society of Journal of Intelligent Service Robotics*. Springer, 2009.
- [23] J. P. Desai, J. Ostrowski, and V. Kumar. Controlling formations of multiple mobile robots. In *in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2864–2869, 1998.
- [24] M. Dietl, J. Gutmann, and B. Nebel. Cooperative sensing in dynamic environments. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS01)*, pages 1706–1713, 2001.
- [25] M. Dorigo, editor. *Swarm Intelligence*. Springer, 2008.
- [26] G. Dudek, M. R. M. Jenkin, and D. Wilkes. A taxonomy for multi-agent robotics. *Autonomous Robots*, 3:375–397, 1996.
- [27] E. H. Durfee. Blissful Ignorance: Knowing Just Enough to Coordinate Well. In *Proceedings of the First International Conference on Multiagent Systems, June 12-14, 1995, San Francisco, California, USA*, pages 406–413, 1995.
- [28] J. M. Esposito. Distributed grasp synthesis for swarm manipulation with applications to autonomous tugboats. *IEEE Conference on Robotics and Automation*, pages 1489–1494, 2008.
- [29] European Robotics Research Network (EURON). <http://www.euron.org/>, 2009.
- [30] A. D. J. Ferber. From tom thumb to the dockers: Some experiments with foraging robots. In *In Proceedings of the Second International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pages 451–459. MIT Press, 1992.
- [31] T. Finin and R. Fritzson. The Knowledge Query and Manipulation Language (KQML),.
- [32] T. Fukuda and S. Nakagawa. A dynamically reconfigurable robotic system (concept of a system and optimal configurations). In *International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, pages 588–595, 1987.

- [33] E. Guizzo. Three engineers, hundreds of robots, one warehouse. *Spectrum, IEEE*, 45(7):26–34, July 2008.
- [34] K. Harada, S. Kajita, F. Kanehiro, K. Fujiwara, K. Kaneko, K. Yokoi, and H. Hirukawa. Real-time planning of humanoid robot’s gait for force controlled manipulation. In *ICRA*, pages 616–622, 2004.
- [35] J. Hill and D. Culler. A wireless embedded sensor architecture for system-level optimization. Technical report, U.C. Berkeley, 2001.
- [36] iRobot Robots that make a difference. www.irobot.com, 2009.
- [37] A. P. José M. Cañas and P. Barrera. Automatic detection of high risk situations for elder persons care. In *II International Congress on Domotics, Robotics and Remote-assistance for All*, pages 313–317, 2008.
- [38] J. M. Kahn, R. H. K. A. Fellow), and K. S. J. Pister. Abstract Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust.
- [39] Kiva Systems. www.kivasystems.com, 2009.
- [40] K. Konolige, D. Fox, C. Ortiz, A. Agno, M. Eriksen, B. Limketkai, J. Ko, B. Morisset, D. Schulz, and R. Vincent. Centibots: Very large scale distributed robotic teams. In *In 9th International Symposium on Experimental Robotics*, pages 18–20. Springer Verlag, 2004.
- [41] Y. Kuniyoshi, N. Kita, S. Rougeaux, S. Sakane, M. Ishii, and M. Kakikura. Cooperation by Observation - The Framework and Basic Task Patterns. In *IEEE ICRA*, pages 767–774, 1994.
- [42] Y. Kuniyoshi, J. Rieki, M. Ishii, S. Rougeaux, N. Kita, S. Sakane, and M. Kakikura. Vision-based behaviors for multi-robot cooperation, 1994.
- [43] T. Lueth and T. Laengle. Task description, decomposition and allocation in a distributed autonomous multi-agent robot system, 1994.
- [44] M. Minsky. *The Society of Mind*. Simon and Schuster, 1985.
- [45] H. Montes. *Análisis, Diseño y Evaluación de Estrategias de Control de Fuerza en Robots Caminantes*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, 2005.
- [46] R. R. Murphy. *Introduction to AI Robotics*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2000.
- [47] S.Ñabulsi. *Diseño y control reactivo de robots caminantes sobre terreno natural*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, 2008.
- [48] I.Ñoda, C. F. I. Noda, H. Matsubara, H. Matsubara, K. Hiraki, K. Hiraki, I. Frank, and I. Frank. Soccer server: A tool for research on multiagent systems. *Applied Artificial Intelligence*, 12:233–250, 1998.
- [49] F. R. Noreils. Toward a robot architecture integrating cooperation between mobile robots: application to indoor environment. *Int. J. Rob. Res.*, 12(1):79–98, 1993.
- [50] F. of International Robo-soccer Association FIRA. www.fira.net, 2009.
- [51] L. Parker. Alliance: An architecture for fault-tolerant multi-robot cooperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(2):220–240, 1998.

- [52] L. Parker. Distributed intelligence: Overview of the field and its application in multi-robot systems. *Journal of Physical Agents*, 2(1):5–14, 2008.
- [53] L. E. Parker. *Heterogeneous Multi-Robot Cooperation*. PhD thesis, MIT EECS Dept., 1994.
- [54] L. E. Parker. Distributed algorithms for multi-robot observation of multiple moving targets. *Autonomous Robots*, 12(3):231–255, 2002.
- [55] M. Phillips and M. Veloso. Robust Supporting Role in Coordinated Two-Robot Soccer Attack. In *Proceedings of the RoboCup Symposium*, 2008.
- [56] J. Rabaey, J. Ammer, J. L. D. Silva, and D. Patel. Picoradio: Ad-hoc wireless networking of ubiquitous low-energy sensor/monitor nodes. In *in Proceedings of the IEEE Computer Society Annual Workshop on VLSI*, pages 9–12, 2000.
- [57] I. Rekleitis, G. Dudek, and E. Miliotis. Multi-robot collaboration for robust exploration. In *Proceedings of International Conference in Robotics and Automation, San Francisco, CA*, 2000.
- [58] Robocup. www.robocup.org, 2009.
- [59] S. Sen, M. Sekaran, and J. Hale. Learning to Coordinate without Sharing Information. In *Proceedings of the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence*, pages 426–431, Seattle, WA, 1994.
- [60] Sixth Annual Mobile Robot Competition at Georgia Institute of Technology. <http://www.cc.gatech.edu/ai/robot-lab/research/aaai97/>, 1998.
- [61] A. Stroupe, M. C. Martin, and T. Balch. Distributed sensor fusion for object position estimation by multi-robot systems. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, May, 2001*. IEEE, May 2001.
- [62] K. Sycara. Negotiation Planning: An AI Approach. *European Journal of Operational Research*, 46(1):216–234, May 1990.
- [63] Team Chaos Team Description Paper. <http://veo.gsync.es/dipta/documentacion/index.html>, 2005.
- [64] The Player Project. <http://playerstage.sourceforge.net/>, 2009.
- [65] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox. *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. The MIT Press, September 2005.
- [66] S. Thrun, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpeny, G. Hoffmann, K. Lau, C. Oakley, M. Palatucci, V. Pratt, P. Stang, S. Strohband, C. Dupont, L.-E. Jendrossek, C. Koelen, C. Markey, C. Rummel, J. van Niekerk, E. Jensen, P. Alessandrini, G. Bradski, B. Davies, S. Ettinger, A. Kaehler, A. Nefian, and P. Mahoney. Winning the DARPA Grand Challenge. *Journal of Field Robotics*, 2006.
- [67] B. Tung and L. Kleinrock. Distributed Control Methods. In *HPDC*, pages 206–215, 1993.
- [68] J. M. Vidal and E. H. Durfee. Recursive agent modeling using limited rationality. In *Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-95)*, pages 376–383. AAAI Press, 1995.

- [69] M. R. Walter and J. J. Leonard. An experimental investigation of cooperative SLAM. In *Proceedings of the Fifth IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lisbon, Portugal*, July, 2004.
- [70] G. Werner and M. Dyer. Evolution of herding behavior in artificial animals. In *Simulation of adaptive behavior*, 1992.