

Cooperación helicóptero autónomo-robot móvil terrestre para aplicaciones de búsqueda y localización

Iván Maza, Antidio Viguria, Aníbal Ollero

Dept. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Superior de Ingenieros

Universidad de Sevilla. 41092 Sevilla

{imaza,antidio,aollero}@cartuja.us.es

Resumen

Este artículo presenta un sistema para la cooperación entre robots heterogéneos (aéreos y terrestres) que están interaccionando con otros objetos en entornos exteriores. El sistema permite la ejecución de misiones de forma centralizada o distribuida. Además, algunos integrantes del equipo de robots pueden proporcionar servicios de transporte, enlace de comunicaciones y localización a otros robots durante la misión. La asignación distribuida de tareas y servicios entre los robots ha sido implementada usando un enfoque basado en reglas de mercado. Finalmente, el artículo presenta un experimento con un equipo de robots heterogéneos (aéreos y terrestres) cooperando con objetos en una misión de búsqueda y localización en exteriores.

1. Introducción

En el artículo se aborda la cooperación entre múltiples robots en escenarios que involucran también diversos objetos con ciertas capacidades computacionales embebidas. Los objetos pueden variar en tamaño y capacidad, desde pequeños sensores hasta vehículos autónomos, incluyendo PDAs y otro tipo de equipos portátiles para funciones tales como la percepción del entorno, la planificación y el guiado. Concretamente, en el marco del *Proyecto CROMAT* subvencionado por el Plan Nacional de I+D, el subproyecto en el que han participado los autores ha tenido por objeto el desarrollo

de un sistema integrado helicóptero autónomo-robot móvil terrestre.

En general, se pueden considerar diferentes subredes coexistiendo en el entorno. En particular, varios autores han estudiado conjuntamente en los últimos años sistemas constituidos por robots y redes de sensores inalámbricas. De esta manera, los robots pueden ser considerados como nodos móviles de la red de sensores interactuando con los nodos estáticos [3, 5, 4]. Además, también es posible considerar sensores y actuadores inalámbricos interactuando con robots que transportan dispositivos para actuar en el entorno. Los autores de este artículo también participan en la *Acción Coordinada Embedded Wisents*, recientemente subvencionada por la Comisión Europea dentro del Programa IST, que tiene por objeto el estudio de las redes de sensores inalámbricas y los objetos cooperativos.

El artículo está organizado de la siguiente manera. La sección 2 introduce un escenario de búsqueda y rescate en el que los objetos cooperativos son valiosos de cara a la ejecución de las misiones. La sección 3 presenta la arquitectura de un sistema diseñado para la cooperación distribuida entre robots, que ha sido probada en algunos experimentos realizados durante este año. En la sección 4 se presenta el método usado para la asignación distribuida de tareas y servicios. La sección 5 presenta los resultados experimentales obtenidos con un helicóptero y un vehículo terrestre. Las últimas secciones están dedicadas a las conclusiones y las referencias.

2. Objetos cooperativos en escenarios de búsqueda y rescate

Para clarificar los conceptos mencionados anteriormente se va a describir un escenario de búsqueda y rescate de víctimas tras una catástrofe. El escenario involucra distintos tipos de objetos cooperativos de diferente tamaño y características. De esta manera, se pueden emplear por ejemplo dispositivos de asistencia personal (PDAs) para actualizar la información del entorno y guiar al personal de búsqueda. Para tareas de teleoperación es conveniente el uso de ordenadores portables de campo y portátiles. Estas computadoras son útiles también a bordo de los propios vehículos. También se pueden integrar sistemas de posicionamiento por satélites con PDAs, ordenadores portables y portátiles para conocer en tiempo real la posición absoluta de personas y vehículos.

En los Centros de Control y Monitorización ubicados en la zona o en los puestos de los equipos de intervención se pueden emplear computadoras equipadas con programas para sistematizar las labores de búsqueda de las posibles víctimas. Dichos programas incluirían sistemas de información geográfica, planificación operacional e interfaces hombre-máquina.

Los sistemas autónomos son valiosos para la vigilancia de una zona y para misiones de detección y localización de objetos de interés. Los vehículos terrestres son utilizados normalmente para estas labores, pero presentan inconvenientes para su empleo en determinados escenarios cuando hay restricciones de movilidad. Por tanto, el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) es también útil para las actividades mencionadas. Por ejemplo, el *Proyecto COMETS* de la Comisión Europea (IST-2001-34304) [2] ha demostrado la posible aplicación de múltiples vehículos aéreos no tripulados en labores de detección y monitorización de incendios forestales.

Este artículo está relacionado con la cooperación de robots aéreos y terrestres en un escenario de búsqueda y rescate de víctimas. Sin embargo, la cooperación con otros objetos del entorno también ha sido considerada. En particular, la misión de búsqueda y localiza-

ción finalizaría llamando a equipos de rescate o intervención. Estos equipos podrían estar constituidos por robots y personal equipado con dispositivos de guiado (tales como PDAs, portátiles, etc.).

3. Arquitectura del sistema

3.1. Arquitectura global

La arquitectura global del sistema (ver Figura 1) está constituida por tres bloques fundamentales: el centro de control, la red de comunicaciones, el equipo de robots.

El Centro de Control proporciona medios para el envío de misiones, preparación de planes de manera centralizada (cuando es necesario), y monitorización de la ejecución de las tareas por parte de los robots. También incluye la Estación de Monitorización de Alarmas, la cual se ocupa del procesado de la percepción cooperativa, y el procesado específico de las actividades asociadas al tratamiento de imágenes (por ejemplo, la detección de fuego). Finalmente, hay una base de datos en la que se guarda toda la información relacionada con la ejecución de cada misión.

La Red de Comunicaciones da soporte a todas las comunicaciones entre los distintos componentes del sistema. Esta red soporta las transmisiones de petición/estado de tareas, y el envío de datos, tales como imágenes o telemetría procedente de los robots. Hasta la capa de red, todos los componentes del sistema usan comunicaciones homogéneas (protocolo 802.11b). Sin embargo, las capas superiores pueden ser heterogéneas, de modo que en cada robot las comunicaciones pueden estar programadas de forma distinta (empleando BBCS, sockets, etc.). Concretamente, los robots HERO2 y Romeo-4R emplean para sus comunicaciones el denominado BBCS (*BlackBoard Communication System*), que es un sistema recientemente desarrollado por la Universidad Técnica de Berlín [7]. Se trata de un sistema robusto de comunicaciones implementado por medio de una memoria compartida de forma distribuida, llamada *BlackBoard* (pizarra), en la que cada nodo de la red tiene un

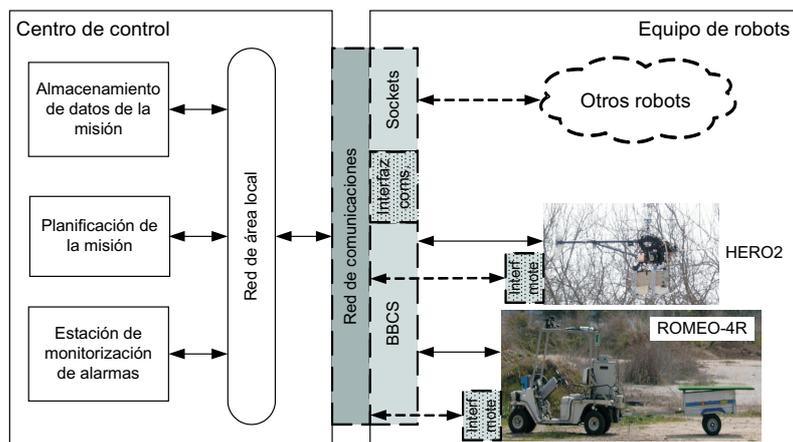


Figura 1: Arquitectura Global ilustrada con los vehículos usados en el experimento descrito en la Sección 5: Romeo-4R con remolque (plataforma de despegue y aterrizaje) y HERO2 de la Universidad de Sevilla

copia local de la parte de la pizarra a la que está accediendo.

El equipo de robots engloba a los robots en sí mismos junto con las capacidades de decisión distribuidas que se encuentran a bordo. Cuando las capacidades autónomas de decisión son delegadas al equipo de robots (modo de alta autonomía), la capa CNP (ver Figura 2) se activa, y los robots negocian entre ellos la asignación de tareas de manera dinámica empleando el denominado *Contract Net Protocol* (ver [8]) mientras construyen sus planes locales.

El sistema podría interactuar también con una red de sensores. Para ello cada robot simplemente tendría que estar equipado con un “mote” conectado a su puerto serie. Este “mote” funcionaría como interfaz de comunicaciones (ver Figura 1) con otros nodos desplegados en el entorno.

3.2. Arquitectura del equipo de robots

La arquitectura del equipo de robots (ver Figura 2) soporta dos niveles de autonomía:

- Modo de *baja autonomía*: un módulo supervisor maneja tareas sencillas y secuencias de tareas, mientras éstas son solicitadas desde el centro de control. Este módu-

lo también maneja el estado de las tareas y del robot que son transmitidos durante la ejecución de la misión.

- Modo de *alta autonomía*: un módulo CNP permite negociar de forma autónoma la asignación de tareas de forma distribuida usando una variación del protocolo Contract Net mientras se construye el plan a ejecutar. Respecto a este módulo, la asignación de tareas puede ser renegociada dinámicamente intentando converger hacia una distribución óptima de tareas entre los robots, en función de las capacidades, requerimientos y restricciones individuales de estos. En este modo, el centro de control debería sólo proporcionar una lista de tareas elementales para que sean ejecutadas por el equipo de robots.

En ambos modos se asume que cada robot puede manejar secuencias ordenadas de tareas elementales, y devolver el estado de la ejecución de las tareas. El módulo que se encarga de proporcionar esta funcionalidad se denomina *Control de ejecución de tareas* (ver Figura 2).

El conjunto de tareas posibles se corresponden con las tareas y servicios que se indican en el Apartado 4. Cada tarea tiene cierta infor-

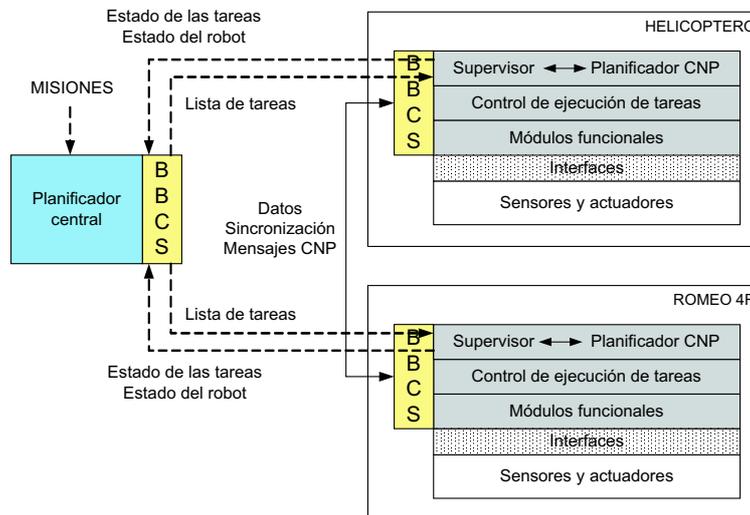


Figura 2: Arquitectura detallada del equipo de robots (línea discontinua se corresponde con el modo de baja autonomía)

mación asociada (estado y operación a realizar) y un número de identificación único, que son utilizados por el módulo mencionado anteriormente para el manejo de las tareas. A continuación se detallan los posibles valores que puede tomar el estado y las operaciones posibles a realizar con cada tarea:

- Estado de la tarea:
 1. **Encolada:** tarea en cola y lista para ser ejecutada cuando hayan terminado las anteriores.
 2. **En ejecución:** tarea ejecutándose en ese momento.
 3. **Abortada:** tarea abortada por medio de una orden *Abortar*.
 4. **Finalizada:** tarea terminada .
- Operaciones a realizar sobre una tarea:
 - **Iniciar:** indica que la tarea correspondiente debe ser ejecutada en cuanto sea posible.
 - **Abortar:** aborta una tarea en ejecución o encolada.

- **Suprimir:** se deja de transmitir el estado correspondiente a la tarea especificada.

La gestión de las tareas se ha implementado mediante dos colas: una para las tareas y otra para los estados. El modo de funcionamiento del módulo de *Control de ejecución de tareas* es el siguiente:

1. Se reciben todas las tareas nuevas y se actúa en función de la operación a realizar con cada una:
 - **Iniciar:** se pone la tarea al final de la cola de tareas a ejecutar. Por otra parte, se inicializa el estado de la misma e igualmente se pone al final de la cola de estados.
 - **Abortar:** se busca la tarea en la cola y se elimina. El estado de la tarea eliminada pasa a tomar el valor **abortada**.
 - **Suprimir:** se busca el estado de la tarea y se elimina de la cola.
2. A continuación se intenta leer la siguiente tarea a ejecutar de la cola:

- Si en ese momento no hay más tareas, entonces se le ordena al robot que pare (vuelo estacionario en el caso del helicóptero).
 - Si hay una tarea esperando, se le cambia el estado a **en ejecución** y se calculan los parámetros necesarios para su ejecución.
3. Se llama a la función que controla el movimiento del robot.
 4. Si la tarea ha terminado, se cambia el estado de ésta a **finalizada**.
 5. Finalmente, se manda el estado de las tareas por medio de la red de comunicaciones.

Por último, hay que señalar que la asignación de tareas en caso de emplear el sistema en modo de baja autonomía se hace directamente desde el Centro de Control mediante una sencilla interfaz de usuario. El operador puede asignar de manera dinámica nuevas tareas a cada robot en cualquier momento y el módulo de *Control de ejecución de tareas* se encargará de gestionarlas adecuadamente.

4. Asignación distribuida de tareas/servicios

En esta sección se describe el proceso de asignación de tareas y servicios empleado en caso de configurar el sistema en modo de alta autonomía (ver Sección 2).

4.1. Tareas y servicios

Para la realización del experimento que se describe en la Sección 5 se ha seleccionado el siguiente subconjunto de tareas:

- Tarea **ir-a(P)**: Visitar un punto P dado por sus coordenadas GPS.
- Tarea **explorar-area(A)**: Rastrear un área A dada por un polígono convexo buscando objetos de interés (fuego en el caso del experimento que se describe en la Sección 5). El planificador local del robot calcula una secuencia de puntos de paso que

permiten cubrir el área de interés de una manera sencilla y eficiente. El patrón de barrido empleado consiste en una rejilla compuesta por filas perpendiculares a la dirección de barrido [6]. Durante el recorrido, el robot debe enviar imágenes a la Estación de Monitorización de Alarmas.

Bajo determinadas condiciones, algunas tareas pueden requerir algún servicio de otro robot. Entre los servicios considerados, se pueden citar:

- Servicio **transportar(P)**: Algunos robots (por ejemplo el robot Romeo-4R en el experimento descrito en la Sección 5) están equipados con plataformas que permiten el transporte de robots aéreos desde una localización inicial hasta un punto P.
- Servicio **enlace-comunicaciones(CRP)**: Durante la ejecución de una tarea **explorar-area**, la Estación de Monitorización de Alarmas debe recibir continuamente imágenes del área rastreada, de modo que si el alcance de las comunicaciones no permite este enlace, otro robot (o una cadena de robots), debe moverse a un punto **CRP** para proporcionar el servicio **enlace-comunicaciones**.
- Servicio **localización**: Durante la ejecución de una tarea **explorar-area**, el robot comunica sus posiciones GPS a través del "Interfaz mote" mencionado en la Sección 3.1. En [4], se demuestra que esto permite la localización en exteriores de los nodos de una red de sensores sin necesidad de comunicaciones entre los distintos nodos.

4.2. Enfoque basado en economías de mercado

En el enfoque clásico basado en economías de mercado, la asignación de tareas y servicios puede verse como un proceso incremental. Cada tarea es ofrecida a los robots, y cada robot puede pujar por ella empleando el coste de insertar esa tarea en su plan. El proveedor de la tarea la asigna de cara a minimizar el coste global para todo el sistema (este robot también puede pujar por la tarea que ofrece). El

proceso completo se repite ofreciendo de nuevo todas las tareas hasta que ningún robot compra tareas. En nuestro sistema, el operador define el conjunto de tareas a ejecutar mediante la Estación de Planificación de Misiones en el Centro de Control.

El algoritmo de asignación de tareas empleado se basa en el *Contract Net protocol* [8], pero ha sido necesario modificarlo de cara a contemplar las relaciones entre tareas y servicios. Esas dependencias conducen a una estructura jerárquica de tareas y servicios. Dichas relaciones deben ser codificadas en los mensajes intercambiados durante el proceso de negociación. Las dependencias pueden ser temporales (requiriendo sincronización entre los robots) o estar relacionadas con un cambio en el coste de ejecución de una tarea. Además, el grado de satisfacción de una restricción asociada a una dependencia es considerada también en el cálculo del coste empleado en la puja por una tarea.

Estas técnicas han sido probadas en experimentos reales con un equipo de robots. El siguiente apartado describe uno de esos experimentos.

5. Resultados experimentales

Los experimentos se desarrollaron en el Parque del Alamillo situado en la ciudad de Sevilla empleando un equipo de robots heterogéneos compuesto por: el robot autónomo terrestre ROMEO-4R desarrollado por el GRVC de la Universidad de Sevilla (dotado de un remolque con plataforma para el aterrizaje y despegue del helicóptero) y el helicóptero HERO2 también desarrollado por el GRVC (ver Figura 3).

El objetivo de la misión consiste en detectar y localizar una víctima mediante la colaboración entre los robots y otros objetivos cooperativos del entorno.

Cabe mencionar que este experimento se desarrolló en modo de alta autonomía, de tal modo que el centro de control únicamente sirvió para la introducción manual de la lista de tareas básicas que el equipo de robots debía ejecutar. Una vez insertadas las tareas en el sistema distribuido, el módulo CNP de cada



Figura 3: Fotografía de los vehículos involucrados en los experimentos

robot se encargó de la creación de los servicios y del proceso de negociación automática para la asignación de dichas tareas y servicios.

La ejecución de la misión tuvo lugar del siguiente modo (ver Figura 4):

1. Al empezar la misión, los dos vehículos estaban situados en la posición inicial (indicadas mediante H en la Figura 4). HERO2 (línea azul) se encontraba en la plataforma de despegue/aterrizaje del remolque de ROMEO-4R (línea roja).
2. Después del proceso de negociación distribuida (ver Sección 4), HERO2 ganó las tareas **explorar-area(A)** e **ir-a(WP1)**, y ROMEO-4R ganó el servicio **transporte(WP1)** (asociado con la tarea **ir-a(WP1)**) y el servicio **enlace-comunicaciones(CR)** (asociado a la tarea **explorar-area(A)**).
3. La primera tarea en ejecutarse fue **ir-a(WP1)**, de tal modo que ROMEO-4R se movió a las coordenadas WP1 (ver Figura 4) transportando a HERO2 sobre la plataforma de despegue/aterrizaje. Tras alcanzar el punto WP1, se completó la primera tarea y su servicio asociado. HERO2 comenzó la ejecución de la tarea **explorar-area(A)** despegando y volando hacia la zona A. ROMEO-4R ejecutó el servicio asociado a esta tarea y se movió

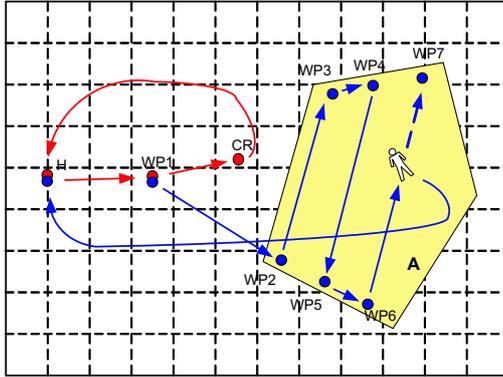


Figura 4: Esquema de la misión de búsqueda y rescate.

al punto CR (Figura 4) para hacer de enlace de comunicaciones entre HERO2 y el Centro de Control.

4. HERO2 empezó a explorar A siguiendo una lista de puntos de paso generada por su planificador local (marcados como WP2, WP3, WP4, WP5, WP6 y WP7 en la Figura 4). Esta lista de puntos fue generada por el planificador local a partir de las características del polígono convexo A creando un patrón consistente en una rejilla compuesta por filas perpendiculares a la dirección de barrido (ver [6]).
5. Cuando HERO2 localizó a la posible víctima, envió las coordenadas GPS de la misma a la Estación de Monitorización de Alarmas (misión completada).

A continuación, se podría lanzar otra misión de búsqueda y rescate. En cualquier caso, en el experimento desarrollado, HERO2 y el vehículo terrestre volvieron a sus posiciones iniciales y HERO2 aterrizó sobre la plataforma de ROMEO-4R.

Tras acabar la misión, sería necesaria la intervención de equipos de rescate, que como se ha mencionado en la Sección 2, podrían estar constituidos por robots y personal equipado con diversos dispositivos de ayuda que harían uso de la información obtenida por los robots.

6. Conclusiones y desarrollos futuros

Este artículo presenta un sistema que permite la cooperación entre robots y otros objetos de su entorno. Involucra múltiples robots heterogéneos (aéreos y terrestres) conectados en red con objetos tales como actuadores y sensores. El sistema está basado fundamentalmente en un protocolo de negociación para la asignación distribuida de tareas y servicios entre los robots. Se han desarrollado varios experimentos para comprobar la fiabilidad del sistema en la ejecución de misiones de manera distribuida. Concretamente, se ha presentado un experimento con el helicóptero HERO2 y el robot terrestre ROMEO-4R cooperando con otros objetos del entorno en la ejecución de una misión de búsqueda y rescate.

Dentro de los desarrollos futuros se contempla la inclusión en el sistema actual de una red de sensores inalámbrica que involucre nodos estáticos y nodos móviles a bordo de los robots.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el *Proyecto CROMAT* dentro del Plan Nacional de I+D (DPI2002-04401-C03-03) y por la *Acción Coordinada Embedded Wiserents* de la Comisión Europea (IST-004400).

Los autores quieren agradecer a la Universidad Técnica de Berlín (TUB) el software (BBCS) que se ha empleado para las comunicaciones del sistema y a la Universidad de Málaga por sus contribuciones en el marco del *Proyecto CROMAT*. El primer autor también quiere agradecer al LAAS-CNRS (Toulouse - Francia) las ideas e información proporcionadas durante su estancia en 2004.

Referencias

- [1] A. Ollero, J.R. Martínez-de Dios, B.C. Arrue, L. Merino, and F. Gomez, A Perception System for Forest Fire Monitoring and Measurement, en: A. Halme, R. Chatila and E. Prassler, eds., *Proc. of*

- the 3rd International Conference on Field and Service Robotics* (Helsinki, Finland, 2001) 135–140.
- [2] A. Ollero, G. Hommel, J. Gancet, L. Gutierrez, D.X. Viegas, P. Forsen and M.A. Gonzalez, COMETS: A multiple heterogeneous UAV system, en: *Proc. of the IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics* (Bonn, Germany, 2004).
- [3] M. Batalin, G.S. Sukhatme, and M. Hattig, Mobile robot navigation using a sensor network, en: *Proc. of the 2004 International Conference on Robotics and Automation* (New Orleans, USA, 2004) 636–641.
- [4] P. Corke, R. Peterson, and D. Rus, Coordinating aerial robots and sensor networks for localization and navigation, en: *7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems* (Toulouse, France, 2004) 281–290.
- [5] P. Corke, R. Peterson, and D. Rus, Networked robots: Flying robot navigation with a sensor net, en: *Proc. of the 2003 International Symposium on Robotics Research* (Siena, Italy, 2003).
- [6] I. Maza, and A. Ollero, Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms, en: *7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems* (Toulouse, France, 2004) 211–220.
- [7] V. Remuss, M. Musial, and U.W. Brandenburg, BBCS Robust Communication system for distributed system, en: *Proc. of IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics* (Bonn, 2004).
- [8] R. G. Smith, The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver, en: *IEEE Transaction on Computers*, ser. C-29, no. 12 (1980) 1104–1113.