

## Proyecto AWARE. Integración de Vehículos Aéreos no Tripulados con Redes Inalámbricas de Sensores y Actuadores

A. Ollero<sup>a,b</sup>, I. Maza<sup>a,\*</sup>, A. Rodríguez-Castaño<sup>a</sup>, J.R. Martínez-de Dios<sup>a</sup>, F. Caballero<sup>a</sup>, J. Capitán<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Robótica, Visión y Control, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla, España

<sup>b</sup>Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales, CATEC, Parque Tecnológico Aeroespacial de Andalucía Aerópolis; La Rinconada-Sevilla, España

### Resumen

En este artículo se resumen los resultados obtenidos en el proyecto AWARE coordinado por el Grupo de Robótica Visión y Control (GRVC) de la Universidad de Sevilla y financiado por la Comisión Europea en el VI Programa Marco (IST-2006-33579). El artículo describe brevemente la arquitectura desarrollada para la cooperación autónoma descentralizada entre vehículos aéreos no tripulados, redes inalámbricas de sensores/actuadores y redes de cámaras en tierra. Todo el desarrollo fue validado mediante experimentos de campo con helicópteros equipados con dispositivos heterogéneos tales como cámaras visuales y de infrarrojos, e instrumentos para el transporte y despliegue de sensores y otras cargas. Copyright © 2012 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

**Palabras Clave:** Robótica aérea, Redes inalámbricas de sensores y actuadores, Arquitecturas descentralizadas

### 1. Introducción

El trabajo descrito en este artículo ha sido desarrollado en el marco del proyecto AWARE<sup>1</sup> (Junio 2006 – Septiembre 2009) financiado por la Comisión Europea en el VI Programa Marco. El consorcio, coordinado por el Grupo de Robótica, Visión y Control (GRVC) de la Universidad de Sevilla, ha incluido también a los siguientes socios: Universidad Técnica de Berlín (Alemania), la empresa de cinematografía Flying-Cam (Bélgica), la Universidad de Twente (Holanda), la Universidad de Stuttgart (Alemania), la empresa SELEX Sensors and Airborne Systems (Reino Unido), el Grupo Industrial Iturri (España) y la Universidad de Bonn (Alemania).

El proyecto AWARE tenía como objetivo principal el desarrollo y demostración de una plataforma para la cooperación descentralizada de vehículos aéreos autónomos con redes terrestres inalámbricas de sensores y actuadores. Dicha plataforma debería operar de forma robusta y escalable en entornos en los que no hay infraestructuras, o en situaciones en las que dichas infraestructuras han sido dañadas o destruidas. La escalabilidad con el número de vehículos y sensores se logró gracias

al diseño descentralizado de la arquitectura. Asimismo, el sistema tiene capacidades de auto-despliegue, auto-configuración y auto-reparación por medio del uso de helicópteros autónomos cooperativos. Las plataformas desarrolladas previamente en los proyectos ANSER (Sukkarieh et al., 2003) y COMETS (Ollero et al., 2005) se pueden mencionar como trabajos relacionados.

Se consideraron dos escenarios para la validación del sistema AWARE en condiciones cercanas a su explotación: gestión de catástrofes/seguridad civil y aplicaciones de filmación. Tanto la arquitectura como todas las técnicas, sistemas y funcionalidades desarrolladas en el proyecto AWARE se han validado en un escenario de experimentación ubicado en los terrenos de la fábrica Protect Fire del Grupo Industrial Iturri en Utrera (Sevilla).

En este artículo se resumen brevemente las actividades principales desarrolladas en el marco del proyecto. Dado que la capacidad de auto-despliegue de la plataforma requiere el uso de vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles* -UAVs- en inglés), la Sección 2 presenta la arquitectura adoptada para la cooperación entre ellos de cara a la ejecución de las diferentes misiones. Dicha arquitectura ha sido desarrollada íntegramente por el GRVC. Por otro lado, los resultados con la red inalámbrica de sensores en tierra se describen en la Sección 3, mientras que la Sección 4 se dedica a las herramientas de percepción desarrolladas para la plataforma por el GRVC. Las misiones ejecutadas para la validación de los componentes presentados en los apartados anteriores se describen en la Sección 5. Finalmente, la Sección 6 resume los principales re-

\* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: [aollero@cartuja.us.es](mailto:aollero@cartuja.us.es) (A. Ollero), [imaza@us.es](mailto:imaza@us.es) (I. Maza), [castano@us.es](mailto:castano@us.es) (A. Rodríguez-Castaño), [jdedios@cartuja.us.es](mailto:jdedios@cartuja.us.es) (J.R. Martínez-de Dios), [fcaballero@us.es](mailto:fcaballero@us.es) (F. Caballero), [jescap@cartuja.us.es](mailto:jescap@cartuja.us.es) (J. Capitán)

<sup>1</sup><http://www.aware-project.net>

sultados del proyecto, destacando la transferencia tecnológica hacia el tejido industrial. En ese sentido, el proyecto AWARE fue galardonado en 2010 con uno de los premios europeos de robótica concedidos por EURON/EUROP por la transferencia de tecnología derivada (*EURON/EUROP Robotics Technology Transfer Award*).

## 2. Arquitectura para la cooperación entre UAVs

Como se ha mencionado con anterioridad, la plataforma tiene capacidades de auto-despliegue por medio del uso de helicópteros autónomos cooperativos con capacidad para transporte de cargas. Estos UAVs también se emplean para la localización y seguimiento cooperativos de objetos móviles empleando las técnicas de fusión sensorial que aparecen en la Sección 4. Por tanto, la arquitectura adoptada para la cooperación entre ellos juega un papel fundamental en el funcionamiento de la plataforma.

Se diseñó e implementó una arquitectura descentralizada (ver Fig. 1) para la coordinación y cooperación autónoma de múltiples vehículos aéreos no tripulados. En cada UAV, hay dos niveles: la capa de toma de decisiones a bordo (ODL) y la capa ejecutiva (EL). La primera capa se encarga de las decisiones de alto nivel de manera descentralizada y la segunda de la ejecución de las tareas elementales (despegar, aterrizar y visitar una posición). En la interfaz entre las dos capas, la ODL envía tareas elementales y recibe el estado de ejecución de cada una, así como el estado del propio UAV. El proceso de decisión descentralizado se logra mediante el intercambio de mensajes entre las ODLs de distintos UAVs.

La arquitectura del ODL (Maza et al., 2011a) está compuesta por diferentes módulos que resuelven los problemas habituales que surgen durante la ejecución de misiones multi-propósito, tales como la descomposición de tareas complejas, la asignación de tareas, la detección y resolución de conflictos, etc. Uno de los principales objetivos en el diseño de la arquitectura fue imponer pocos requisitos a las capacidades ejecutivas de los vehículos autónomos que se quisieran integrar en la plataforma. Básicamente, esos vehículos deberían ser capaces de moverse a una determinada localización y activar/desactivar su carga útil cuando fuera requerido. De esta manera, es posible integrar vehículos de diferentes fabricantes y grupos de investigación en la arquitectura desarrollada, permitiendo su uso en diversas aplicaciones multi-UAV.

En relación a los módulos desarrollados en la arquitectura interna del ODL (ver Fig. 1), cabe mencionar que el trabajo se ha focalizado principalmente en los módulos encargados de las siguientes funciones:

- Descomposición de tareas complejas en tareas elementales ejecutables por el UAV directamente (módulo de descomposición de planes). Se han desarrollado algoritmos que permiten descomponer distintos tipos de tareas, tales como la vigilancia de una zona (Maza and Ollero, 2007) o la monitorización de un objeto (Maza et al., 2010a).
- Asignación de tareas de manera distribuida (módulo gestor de asignación de tareas). Una vez definida la misión

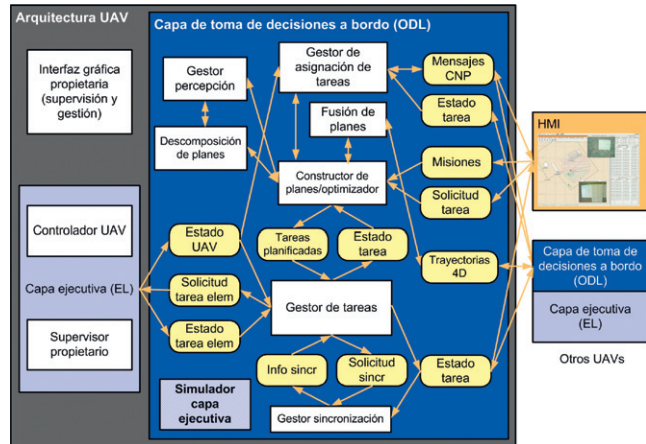


Figura 1: Arquitectura descentralizada adoptada para la coordinación y cooperación autónoma de múltiples vehículos aéreos no tripulados. Los distintos módulos software se representan mediante cajas en blanco y las interfaces de datos mediante elipses. En esta sección se describen los módulos en cuyo desarrollo se ha focalizado la investigación en el marco del proyecto.

a ejecutar por el equipo de UAVs, es necesario decidir qué UAV se va a encargar de cada tarea. Se han desarrollado varios algoritmos (Viguria et al., 2007, 2008) durante el proyecto para la asignación distribuida de tareas. Dichos métodos están basados en economías de mercado, al igual que otros trabajos previos en el área (Dias and Stentz, 2002; Gerkey and Matarić, 2002; Lemaire et al., 2004; Xu et al., 2006). El objetivo era encontrar soluciones que minimizaran el coste global definido como la suma de todos los costes individuales suponiendo tareas independientes. Entre las estrategias desarrolladas, se seleccionó el algoritmo denominado SIT (Viguria et al., 2007) para su utilización en la plataforma AWARE por presentar el mejor compromiso entre el número de mensajes intercambiados necesarios y la proximidad al óptimo de la solución obtenida. El algoritmo se basa en un mecanismo de subasta de tareas con dos tipos de rol que son jugados dinámicamente por los UAVs: subastador y pujadores. En cada subasta solamente hay un subastador y el proceso se abre durante un periodo de tiempo en el que se consideran todas las pujas recibidas. La mejor puja recibida se incrementa en un determinado porcentaje (usualmente el 1 %) para evitar transacciones que no mejoren significativamente la solución.

En el proceso de negociación, cada UAV puja por la tarea con el coste de insertarla dentro de su plan local (coste marginal). Consideremos que el  $i$ -ésimo UAV tiene un plan local  $\mathcal{P}_i$  consistente en un conjunto de  $n$  tareas de movimiento ordenadas con coste total  $C_i$ . En ese momento se recibe una nueva tarea  $\tau$ . Si esta tarea se inserta en la posición  $j$ -ésima del plan  $\mathcal{P}_i$ , entonces se genera un nuevo plan  $\mathcal{P}_i(\tau^j)$  con coste  $C_i(\tau^j)$ . En tal caso, el coste marginal asociado  $\mu^j$  viene dado por

$$\mu^j = C_i(\tau^j) - C_i. \quad (1)$$

El módulo encargado de la construcción de planes de cada UAV calcula el punto de inserción de la nueva tarea en el plan actual. De ese modo, como la puja de cada UAV depende de su plan actual, cada vez que dicho plan cambia, la negociación continúa hasta que ninguna puja mejora la asignación global. La ejecución de la misión puede empezar cuando la negociación inicial ha terminado, pero en cualquier momento se pueden anunciar nuevas tareas. Por tanto, la negociación es dinámica en el sentido de que se gestionan también las nuevas tareas durante la ejecución. Por ejemplo, si se detecta un error en la ejecución de una tarea, puede volverse a anunciar para su reasignación.

- Detección y resolución de conflictos (módulo de fusión de planes). Una vez que cada UAV tiene un plan compuesto por tareas elementales, es necesario detectar si hay conflictos con los planes de otros miembros del equipo. Uno de los conflictos más críticos aparece cuando los UAVs comparten una misma zona y sus trayectorias se solapan en espacio y tiempo. Por tanto, se han desarrollado métodos distribuidos para la detección y resolución de conflictos entre las trayectorias de los diferentes UAVs.

Uno de los aspectos fundamentales en el diseño fue imponer pocos requisitos a los vehículos a integrar en la arquitectura. De ese modo se decidió no imponer la ejecución de una determinada trayectoria o el seguimiento de un perfil de velocidad dado durante el vuelo. Por tanto, la política implementada para evitar las colisiones entre vehículos se basa únicamente en las tareas elementales de despegar, aterrizar e ir a una posición y permanecer en vuelo estacionario allí. De esa manera, los conflictos solamente podrán existir en las transiciones de un punto de paso a otro. Teniendo en cuenta el movimiento del  $i$ -ésimo UAV se ha considerado un conjunto  $S_i = \{s_i^1, s_i^2\}$  con dos estados posibles:

- Estado  $s_i^1$ : vuelo estacionario en torno a un punto de paso  $P$ . El UAV puede estar esperando una nueva tarea que implique movimiento o esperando hasta que la ruta al siguiente punto de paso esté despejada.
- Estado  $s_i^2$ : vuelo entre los puntos de paso  $P^k$  y  $P^{k+1}$ . La ruta en línea recta  $\Delta_i^k$  entre esos puntos de paso se considera como trayectoria de referencia para el  $i$ -ésimo UAV.

Por tanto, los conflictos solamente pueden aparecer en las transiciones de los estados  $s_i^1$  a  $s_i^2$ . Así, antes de pasar al estado  $s_i^2$ , el  $i$ -ésimo UAV debe comprobar dos tipos de conflictos potenciales con el  $j$ -ésimo UAV en función de su estado actual  $s_j$ :

- Tipo A (si  $s_j = s_j^1$ ): conflicto potencial entre la próxima ruta  $\Delta_i^k$  y la posición actual del  $j$ -ésimo UAV.

- Tipo B (si  $s_j = s_j^2$ ): conflicto potencial entre la próxima ruta  $\Delta_i^k$  y la ruta  $\Delta_j^l$  que está siguiendo en ese momento el  $j$ -ésimo UAV.

Por tanto, el problema a resolver puede formularse como: evitar los conflictos de tipo A y B en las transiciones  $s_i^1 \rightarrow s_i^2 \forall i = 1, \dots, n$  donde  $n$  es el número total de UAVs. El algoritmo distribuido desarrollado para garantizar que no se produce ningún conflicto en ninguna transición se describe en (Maza et al., 2011a).

La implementación distribuida de la arquitectura ofrece una mayor robustez y escalabilidad en comparación con un esquema centralizado. Por contra, presenta importantes retos relacionados con la naturaleza asíncrona de los eventos y de los mensajes intercambiados entre las distintas aeronaves. Al respecto de las comunicaciones, en el proyecto se ha desarrollado un *middleware* que tiene como objetivo abstraer las particularidades de los sistemas heterogéneos para ofrecer una comunicación transparente entre ellos, incluso si hay cambios de topología y existen nodos móviles (Gil et al., 2007).

Se ha llevado a cabo la implementación software tanto de la arquitectura multi-UAV como de la interfaz persona-máquina (Human Machine Interface -HMI- en inglés) de la plataforma. Esta última aplicación ha sido diseñada teniendo en cuenta las capacidades autónomas de la misma y la posibilidad de integrar múltiples modalidades sensoriales en la interfaz (Maza et al., 2010b).

La plataforma empleada en el proyecto AWARE estaba compuesta por un total de cinco helicópteros autónomos: cuatro helicópteros tipo *TUB-H* (ver Fig. 2(a)) de la *Technische Universität Berlin* (TUB) y un modelo de la empresa belga Flying-Cam (ver Fig. 2(b)). Estos helicópteros se mejoraron durante el proyecto incorporando nuevo hardware y desarrollando nuevos sistemas de control. En el proyecto se desarrolló también un nuevo helicóptero, el FC III E SARAH (Electric Special Aerial Response Autonomous Helicopter), primer helicóptero eléctrico con una carga útil de 7 Kg.

Como se muestra en la Sección 5, los helicópteros del tipo *TUB-H* son capaces de transportar cargas suspendidas mediante un sistema de control que es capaz de cancelar las oscilaciones de la carga en el transporte y compensar la influencia del viento depositándolas en las localizaciones planificadas (ver Fig. 3).

### 3. Red inalámbrica de sensores en tierra

En el sistema AWARE se emplearon sensores en UAVs - cámaras visuales y de infrarrojos-, una red de cámaras fijas y sensores en los nodos de la red inalámbrica de sensores. Los sensores empleados contienen un alto grado de heterogeneidad en magnitudes físicas, precisión y movilidad (sensores estáticos y móviles).

La red de cámaras fijas empleada en AWARE estaba formada por nodos con cámaras visuales o de infrarrojos, sistemas computacionales con capacidades moderadas y comunicaciones de un ancho de banda significativo. En base a esta red se



(a) Helicópteros autónomos tipo *TUB-HH* (Technische Universität Berlin)



(b) Helicóptero autónomo modelo FC III<sup>E</sup> SARAH (empresa Flying-Cam)

Figura 2: Helicópteros autónomos empleados para la demostración de la plataforma desarrollada.



Figura 3: Transporte de carga mediante un helicóptero autónomo.

podieron aplicar técnicas de percepción cooperativa y filtrado de información de cierta complejidad, ver Sección 4.

También se empleó una red inalámbrica de sensores (*Wireless Sensor Networks* -WSN- en inglés) formada por un alto número de nodos de muy reducida capacidad sensorial, computacional y de comunicación. El reducido tamaño, coste y consumo energético de los nodos son tres de las características principales de las WSN. En la literatura pueden encontrarse un gran número de técnicas y algoritmos cooperativos que les dotan de gran flexibilidad, robustez y tolerancia ante fallos (Akyildiz et al., 2002). Estas características y la alimentación en base a baterías, facilitan su despliegue rápido y eficiente, siendo adecuadas para situaciones de emergencia, donde la infraestructura pre-existente puede estar dañada.

En particular se emplearon nodos *Series 800* de *Ambient* así como *nodes Mica2* de *Xbow*. Ambos tipos de nodos estaban dotados de sensores de temperatura y humedad adecuados para aplicaciones relacionadas con la detección y monitorización de incendios. En la Fig. 4 se muestran algunos de estos sensores desplegados en el escenario de validación del proyecto.

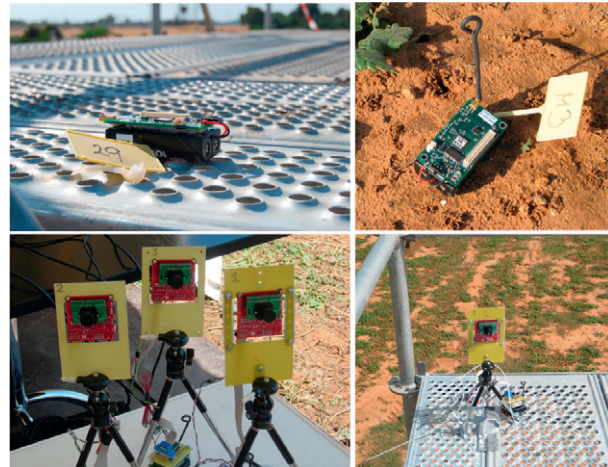


Figura 4: Nodos de la red de sensores inalámbrica empleados en el escenario de trabajo.

En el diseño de la red se prestó atención especial a la movilidad de los nodos. Dicha red estaba formada por unos nodos estáticos localizados en el escenario y por nodos móviles transportados por personas y por UAVs.

La torre de protocolos de la red WSN desarrollada por la Universidad de Twente, fue diseñada para soportar los niveles de movilidad, dinamismo y robustez requeridos en los escenarios del proyecto (Erman-Tuysuz et al., 2008). El enrutamiento de comunicaciones entre los nodos estáticos se llevaba a cabo mediante métodos distribuidos basados en la minimización de funciones de coste que tenían en cuenta la calidad del enlace entre los nodos estáticos (Woo et al., 2003) entre otros factores. En cuanto a los nodos móviles, periódicamente transmitían mensajes baliza para solicitar respuesta de los nodos estáticos. A partir de dichas respuestas, los nodos móviles pueden seleccionar el nodo estático con el que mantienen mejor calidad del enlace en dicho instante.

La red de sensores estaba integrada con el resto de la pla-

taforma por medio del *middleware* de comunicaciones mencionado en la sección anterior. En la estación de monitorización se recibían las lecturas de los sensores de los nodos WSN y se podían lanzar solicitudes a nodos concretos empleando métodos de filtrado por valor y por área (seleccionando aquellas lecturas por encima de un determinado umbral o dentro de un cierto área). Dicha integración permitía la realización de tareas cooperativas, tales como detección de fuego o seguimiento de bomberos. Para ello, se utilizaron los métodos estadísticos que se presentan en la Sección 4 para la fusión de medidas procedentes de diferentes tipos de sensores: cámaras visuales e infrarrojas, sensores de temperatura y detectores de humo.

En las misiones de confirmación y monitorización de incendios, la WSN se encargaba de generar las alarmas iniciales mediante sensores de humo y de temperatura. Estos métodos se validaron con buenas tasas de detección y de rechazo de falsos positivos (Maza et al., 2010a, 2011b,a). Por otro lado, en las pruebas de seguimiento de bomberos, los nodos estáticos tomaban medidas de potencia radio recibida (RSSI) del nodo móvil alojado en el vestuario del bombero. Dichas medidas se integraban con medidas del resto de sensores mediante filtros EIF que se presentan brevemente en la Sección 4 para estimar la localización de la persona.

Como se ha comentado en la Sección 2, la plataforma permite el auto-despliegue de la red de sensores de forma automática mediante los helicópteros autónomos. Los helicópteros están dotados de dispositivos que permiten transportar y depositar con precisión nodos. Esta funcionalidad se ha empleado con un doble objetivo. El primero es el de mejorar la monitorización en áreas de interés mediante el despliegue de sensores adicionales que permitan reducir la incertidumbre de las estimaciones. Por ejemplo, se realizaron experimentos donde se desplegaron nodos en zonas cercanas a un fuego previamente detectado y localizado mediante procesamiento de imágenes aéreas de infrarrojos. El segundo objetivo del despliegue es la reparación de la conectividad en la propia WSN. En escenarios de desastres son frecuentes los fallos en un cierto número de nodos. Como se ha comentado anteriormente los nodos se organizan estableciendo rutas de datos. Cuando un sensor falla, no sólo deja de tomar datos, sino que puede afectar a los canales de enrutamiento y perjudicar la comunicación en toda la red. El GRVC de la Universidad de Sevilla desarrolló técnicas de reparación basadas en el incremento de la llamada conectividad- $k$ . La conectividad- $k$  expresa el número  $k$  de rutas disjuntas entre cualquier par de nodos de una red. De ese modo, conectividad-0 significa que en la red existen nodos aislados. Se desarrollaron algoritmos que identifican el mínimo número de nodos -y de localizaciones de reparación- necesarios para que la red tenga una conectividad- $k$  deseada. Tras la ejecución del algoritmo, el helicóptero puede desplegar los nodos en las ubicaciones calculadas. También se desarrollaron algoritmos de reparación según la redundancia- $k$ , que es una medida de la redundancia de la red y por lo tanto de su robustez ante fallos de nodos.

Desde el punto de vista operativo, la Universidad Técnica de Berlín desarrolló dispositivos mecánicos para el despliegue de nodos desde los helicópteros. Por su parte, la Universidad de Twente diseñó encapsulados adecuados para los nodos WSN de

forma que las antenas permaneciesen perpendiculares al suelo tras soltarlos, ver Fig. 5.



Figura 5: Despliegue de nodos de la red de sensores inalámbrica mediante un helicóptero autónomo.

Finalmente, se evaluó de forma preliminar la integración de microcámaras tipo *CMUCAM3* (ver Fig. 6) en los nodos para ampliar las capacidades de la WSN. Se desarrollaron algoritmos simples para el seguimiento de personas, basados en Filtros de Kalman y adaptados a las reducidas capacidades computacionales disponibles en los nodos (Sanchez-Matamoros et al., 2009).



Figura 6: Nodo de la red inalámbrica compuesto por un nodo *Xbow* y un módulo *CMUCAM3*.

#### 4. Herramientas de percepción

En la plataforma AWARE, la localización y seguimiento de objetos de interés se basa en un sistema de percepción distribuido que es capaz de fusionar información procedente de los distintos sensores heterogéneos disponibles. En concreto, el algoritmo utilizado (Capitan et al., 2009; Capitán et al., 2011) para la fusión sensorial es un filtro de información extendido (EIF) que estima de forma probabilística el estado del sistema integrando las medidas procedentes de todos los sensores. En

vez de utilizar un único filtro centralizado, se utiliza una versión descentralizada en la que se consideran los estados en instantes de tiempo pasados a la hora de fusionar. Gracias a esta técnica, se pueden mejorar las prestaciones del filtro ante comunicaciones asíncronas y sujetas a fallos, así como obtener una estimación igual a la del filtro centralizado para ciertas condiciones.

Este algoritmo de fusión sensorial se ha utilizado para distintas aplicaciones: seguimiento de bomberos; y detección y monitorización de incendios. En todos los casos, los sensores involucrados ejecutan filtros locales que procesan sus propias medidas y fusionan la información que reciben de otros componentes de la plataforma. Sin embargo, según la aplicación, los objetos de interés a localizar pueden variar, por lo que el estado a estimar también.

En el caso del seguimiento de bomberos, el estado a estimar por los filtros descentralizados es la posición y velocidad de las personas. Para obtener medidas sobre dichas posiciones se utilizan cámaras a bordo de los helicópteros, cámaras fijas en tierra, y la red inalámbrica de sensores (el bombero lleva un nodo de dicha red que es capaz de obtener información sobre su posición según el nivel de señal que recibe del resto de nodos).

En el caso de la monitorización de incendios, el estado a estimar es la posición del fuego o alarma. Para detectar dicho fuego se utilizan los sensores de la red inalámbrica, que pueden detectar humo y/o altas temperaturas. Asimismo, se han utilizado algoritmos de detección automática de fuego con las cámaras visuales y de infrarrojos a bordo de los helicópteros y en tierra.

En particular, se hicieron experimentos de seguimiento automático de bomberos y monitorización de incendios empleando uno y dos helicópteros, dos cámaras en tierra y una red inalámbrica de sensores (Maza et al., 2010a, 2011b,a). En la Fig. 7 se muestran los resultados correspondientes al seguimiento de un bombero utilizando información procedente de los distintos sensores. A pesar de las limitaciones del sistema de comunicaciones, puede apreciarse que la estimación descentralizada es siempre cercana (errores inferiores a un metro) a la que se obtendría con un filtro centralizado. El sistema se beneficia del uso de sensores heterogéneos: los nodos de la red inalámbrica generan medidas con mucho ruido pero que permiten inicializar la estimación; las cámaras permiten obtener una mayor precisión gracias a la triangulación desde distintos enfoques. En (Maza et al., 2011a) se detallan más experimentos utilizando los distintos sensores por separado para realizar el beneficio de la fusión sensorial.

También se han desarrollado nuevas técnicas de localización de nodos de la red de sensores basadas en la interacción de éstos con los robots aéreos o terrestres que se encuentran en un área. Estas técnicas permiten explotar convenientemente los sistemas de posicionamiento de los robots y trasladar dicha información a los nodos de la red que se encuentren en los alrededores mediante la intensidad de señal recibida. Dicha información es integrada utilizando un filtro de partículas especialmente diseñado para esta aplicación (Caballero et al., 2008a,b).

En el proyecto también se han desarrollado técnicas de vi-

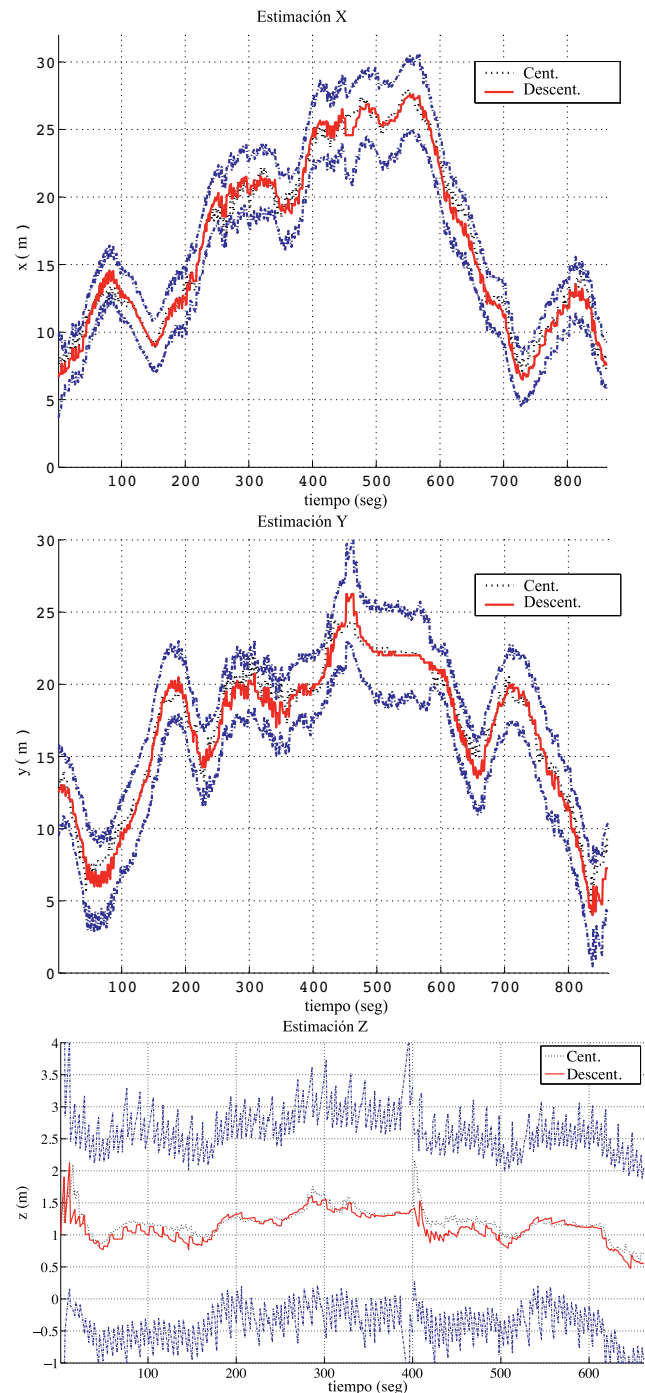


Figura 7: Estimación de posición de un bombero utilizando la aproximación descentralizada empleada en el proyecto AWARE (línea roja sólida). Se muestra también la estimación calculada utilizando un filtro centralizado (línea negra discontinua) como referencia. Se puede ver como la estimación distribuida está siempre dentro del intervalo de confianza dado por  $3\sigma$  (línea azul discontinua).

sión por computador para asistir a la navegación autónoma de los vehículos aéreos (Caballero et al., 2009). Se trata de sistemas de odometría visual monocular basados en el cálculo de modelos de transformación planos (homografías), que aportan información de posicionamiento suficiente para hacer frente a posibles degradaciones temporales del GPS.

## 5. Validación de la plataforma

El proceso de validación se llevó a cabo en las instalaciones de la empresa Protec-Fire (grupo Iturri) en Utrera (Sevilla) e incluyó varias misiones multi-UAV para aplicaciones de seguridad en un entorno urbano simulado (ver Fig. 8):



Figura 8: Escenario de validación del proyecto AWARE en las instalaciones de Protec-Fire (Grupo Iturri) en Utrera, Sevilla. La fotografía muestra la estructura usada para simular un edificio.

- Seguimiento de personas<sup>2</sup>. Se trata de seguir a una o varias personas mediante el uso de distintos sensores desplegados (ver Sección 4).
- Vigilancia con múltiples UAVs<sup>3</sup>. En la vigilancia cooperativa, la plataforma divide automáticamente el área correspondiente asignando sub-áreas a cada uno de los UAVs en base a sus capacidades. A continuación se generan patrones en zig-zag para cada sub-área teniendo en cuenta los modelos de los sensores a bordo y del terreno. Todos estos cálculos son llevados a cabo por el módulo de descomposición de planes (ver Sección 2). Las distintas trayectorias se ejecutan simultáneamente de manera segura gracias al módulo de fusión de planes de la arquitectura. Las herramientas de percepción detectan y geo-localizan objetos de interés (tales como barriles) durante el vuelo.
- Confirmación, monitorización y extinción de incendios<sup>4</sup>. En estas misiones, la detección inicial del foco se lleva a cabo mediante la red de sensores inalámbrica. A continuación se efectúa la confirmación y monitorización automáticas mediante los UAVs equipados con cámaras de

infrarrojos. En base a las coordenadas calculadas por las herramientas de percepción, se activa el sistema de extinción de fuegos. Se trata de un camión de bomberos equipado con un cañón de agua automatizado (ver Fig. 9), que permite dirigir el chorro hacia el objetivo a partir de sus coordenadas.



Figura 9: Sistema automatizado de extinción empleado en las misiones de confirmación, monitorización y extinción de incendios.

- Transporte y despliegue de cargas con varios UAVs<sup>5</sup>. La misión consiste en transportar mediante helicópteros autónomos diversas cargas, tales como sensores o cámaras, a localizaciones calculadas por la plataforma. Esta aplicación tiene gran interés práctico debido al incremento exponencial del precio de los helicópteros en función de la carga útil que son capaces de transportar. Conviene tener en cuenta que, mientras que en el control de un helicóptero desacoplado, la dinámica de orientación del helicóptero tiene una influencia bien conocida en la traslación, este no es el caso cuando existe una carga suspendida y acoplada a los tres helicópteros. En efecto la orientación también depende de la traslación lo que complica de forma muy importante el diseño del sistema de control. En este caso es necesario considerar en el control de las velocidades angulares de cada helicóptero, el efecto de las velocidades lineales y angulares de los otros helicópteros y el movimiento de la carga. Sin embargo, el empleo de un sensor que permite medir la dirección (en dos ángulos) y la intensidad de la fuerza permite desacoplar el control de la orientación haciendo posible el empleo de controladores independientes del número de helicópteros (Bernard et al., 2011).

En Diciembre de 2007 se validó el sistema de transporte cooperativo de cargas por primera vez. En Mayo de 2009 se realizó otra demostración con rachas de viento de 35 km/h, próximas a la velocidad máxima de los helicópteros. En dichas pruebas se depositó una carga consistente en una cámara con posicionador en la parte superior de la estructura (ver Fig. 10) tras declararse una alarma de

<sup>2</sup><http://www.aware-project.net/videos/firemen.avi>

<sup>3</sup><http://www.aware-project.net/videos/surv.avi>

<sup>4</sup><http://www.aware-project.net/videos/ir.avi>

<sup>5</sup><http://www.aware-project.net/videos/aware.mov>

incendio en la misma (Maza et al., 2011a; Bernard et al., 2011). El objetivo era ofrecer imágenes en tiempo real para monitorizar las operaciones de los bomberos y el estado de las víctimas en la azotea de la estructura.



Figura 10: Transporte cooperativo de una carga mediante 3 UAVs.

La Fig. 11 muestra las trayectorias 2-D seguidas por los tres helicópteros tipo *TUB-H* y por la cámara transportada. La formación es un triángulo equilátero con una distancia de 8 m entre los helicópteros. El peso de la carga compuesta por la cámara, las baterías y la caja era aproximadamente de 5 Kg. A pesar de las malas condiciones meteorológicas, la carga permaneció en los límites de la azotea durante el despliegue de la carga.

La Fig. 12 complementa los datos de vuelo presentados en la Fig. 11 mostrando los valores de las coordenadas

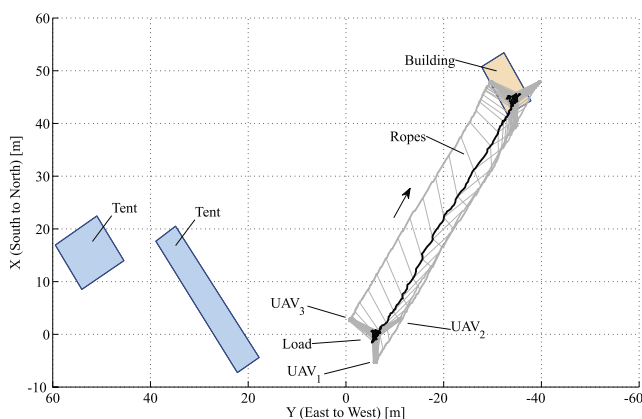


Figura 11: Trayectoria seguida por los tres helicópteros transportando la cámara en el plano  $x-y$ . Las trayectorias de la carga y los helicópteros se han representado en negro y gris respectivamente. La flecha indica la dirección del transporte de carga.

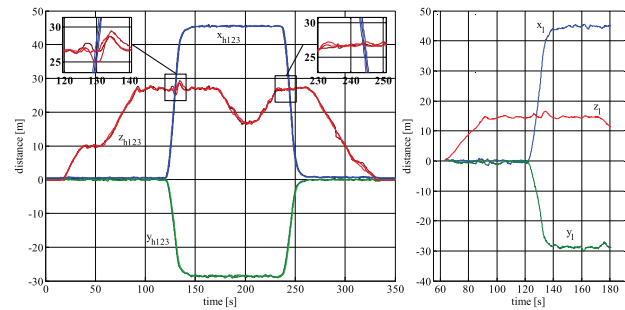


Figura 12: Valores de las coordenadas  $x$ ,  $y$  y  $z$  de los helicópteros (izquierda) y de la carga (derecha) durante la misión. Para cada helicóptero y para la carga, las coordenadas se han dibujado respecto a un origen relativo (la posición de despegue del helicóptero correspondiente o de levantamiento de la carga). Las trayectorias de los helicópteros no presentan desviaciones significativas entre ellas.

$x$ ,  $y$  y  $z$  de los helicópteros y la carga durante la misión. El movimiento de la carga se muestra desde el momento en que se levanta del suelo hasta que es depositada en la azotea. Para cada helicóptero y para la carga, las coordenadas se han dibujado respecto a un origen relativo (la posición de despegue del helicóptero correspondiente o de levantamiento de la carga). La correspondencia en cualquier caso el movimiento de los helicópteros se puede tratar de manera conjunta. Las trayectorias seguidas por los mismos prácticamente no presentan desviación relativa entre ellas, lo cual indica que preservaron su formación durante todo el vuelo. El peso adicional de la carga no afectó significativamente, demostrando la robustez del controlador de traslación. La fuerte aceleración de los helicópteros en el intervalo [120 s, 140 s] ocasionó una desviación en altitud. En cualquier caso, no se apreciaron otros efectos colaterales significativos aparte de esta desviación. No se apreció ninguna perturbación significativa en la altitud durante el vuelo de vuelta a la zona de despegue en el intervalo [240 s, 260 s].

En cuanto a la interfaz persona-máquina empleada en todas esas misiones, la Figura 13 muestra su aspecto en un instante de la misión de seguimiento de personas comentada anteriormente. El usuario tiene disponible información diversa: mapa de la zona, localización de los UAVs (representada mediante una flecha), proyección del campo de visión de la cámara del UAV sobre el terreno, telemetría del UAV, localización de las personas (representada mediante una elipse de incertidumbre), imágenes enviadas por la cámara del UAV, etc.

En el proyecto, además de un gran número de experimentos parciales, se realizaron tres experimentos generales (uno cada año) donde se adquirió experiencia práctica necesaria para los desarrollos. Al final del proyecto se realizó una demostración a la que asistieron 38 expertos invitados entre los que se incluían: los revisores de la Comisión Europea, responsables de gestión en emergencias como Guardia Civil, Fuerzas Armadas, Bomberos, Ejército del Aire, etc., así como responsables de empresas y centros tecnológicos interesados tales como Aries



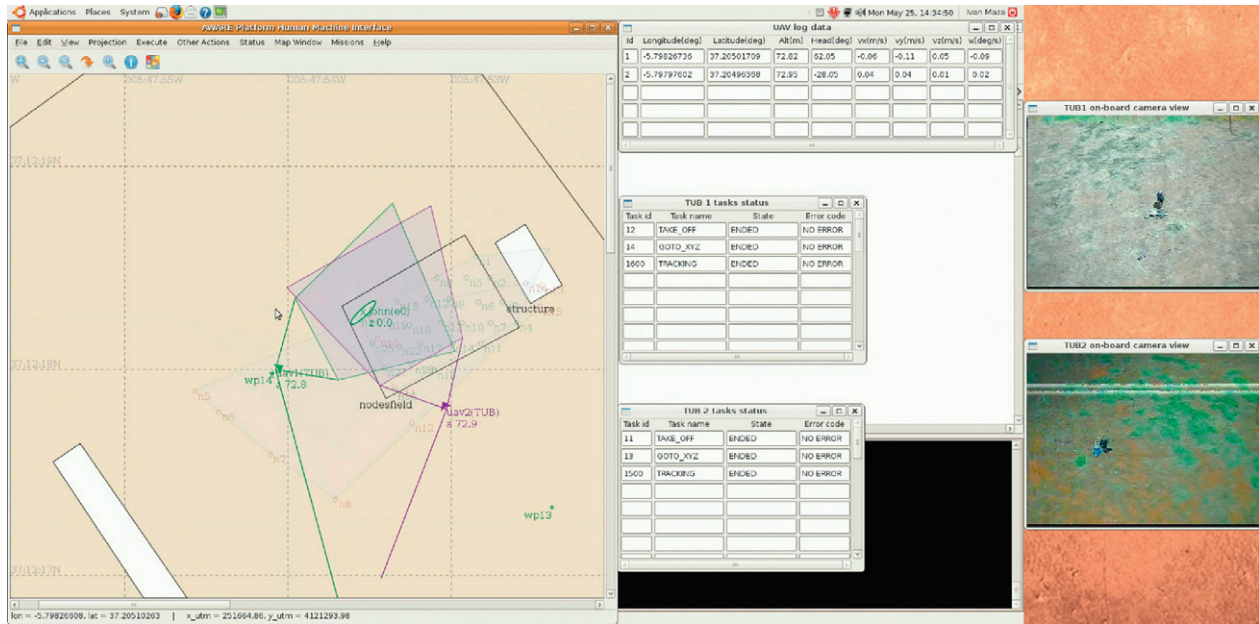


Figura 13: Captura de pantalla de la interfaz persona-máquina de la plataforma durante la ejecución de una misión de seguimiento de personas.

Sistemas, AERTEC, Boeing Research and Technology Europe, INTA, Elimco, CATEC, etc.

## 6. Conclusiones y Transferencia Tecnológica

El proyecto AWARE no solo ha logrado un importante impacto en término de resultados científicos y demostraciones tecnológicas sino que también ha tenido un importante impacto comercial. En el proyecto se han obtenido los siguientes resultados susceptibles de explotación:

- Arquitectura software descentralizada para la cooperación de múltiples UAVs.
- Herramientas para el modelado, identificación y simulación de vehículos aéreos no tripulados.
- Primer helicóptero autónomo eléctrico con una capacidad de carga de hasta 7 Kg.
- Sistemas de control para el transporte de cargas mediante uno o múltiples helicópteros acoplados.
- Middleware basado en el paradigma de publicación/suscripción para sistemas móviles heterogéneos.
- Protocolos para redes de sensores auto-organizadas y eficientes desde el punto de vista de la energía consumida.
- Herramienta para fusión de datos de manera descentralizada.
- Sistema para navegación de UAVs basado en visión.
- Detección y monitorización automática de objetivos móviles empleando UAVs y redes inalámbricas de sensores.

Los resultados del proyecto dieron lugar a productos que fueron comercializados pocos meses después de la finalización del mismo. En particular, solo cuatro meses después de su finalización, las ventas del nuevo helicóptero autónomo desarrollado en el proyecto fueron de 1.5 millones de euros para aplicaciones de cinematografía, inspección de instalaciones industriales, e investigación y prueba de nuevas tecnologías aeronáuticas. La empresa que desarrolla estos helicópteros espera tener en 5 años una producción de 250 unidades de diversos modelos con precios entre 25 K€ y 2.5 M€. De acuerdo los estudios de mercado de esta misma empresa, se espera conseguir para 2015 una cifra de 62.5 M€ en base a las ventas de estos modelos.

El impacto comercial no se limita a la venta de los mencionados helicópteros sino también a la prestación de servicios. Las ventas de dichos servicios solo cuatro meses después de la finalización del proyecto han sumado 1 M€. En particular, se ha realizado la inspección de las chimeneas de una planta de BASF en Bélgica consiguiendo una reducción de 100 veces en el coste de la inspección. Una inspección convencional requiere el apagado durante tres días de la instalación con unas pérdidas medias de un millón de euros por día. Sin embargo, la inspección realizada con el sistema desarrollado en el proyecto tiene un coste de 20 K € por día incluyendo personal, equipos y seguros. Por otro lado, los helicópteros también han sido empleados en China para aplicaciones de construcción de mapas y observación en el SCEDRC, centro de SiChuan dedicado al desarrollo y aplicación de tecnologías para emergencias producidas por terremotos. Asimismo, se han utilizado también en la World Expo en Shanghai para generar imágenes y videos de los pabellones. La cifra esperada de venta de servicios con estos helicópteros es de 5 M€ para 2015. Dicha estimación se ha llevado a cabo en base al éxito comercial obtenido en diversas ferias y exposiciones, incluyendo la feria aeronáutica de Le

Bourget y la mencionada Expo de Shanghai.

Por otra parte, una de las empresas del proyecto ha desarrollado un sistema para protección de bomberos basado en los resultados obtenidos. En este caso, se trata de redes inalámbricas de sensores con nodos móviles para monitorizar parámetros relevantes tales como niveles de COx y NOx en los incendios. Las ventas esperadas de este sistema son de 1 M€ en tres años. Esta empresa ha lanzado también proyectos de I+D industrial por valor de 8.4 M€ para desarrollar productos que utilicen las tecnologías desarrolladas en aplicaciones de protección de bomberos y fabricación de sistemas autónomos y vehículos para la lucha contra incendios.

Además de los productos mencionados, las empresas que han participado en el proyecto están desarrollando productos comerciales basados en los resultados de AWARE que integran UAVs y WSN para vigilancia y gestión de desastres. En particular, se está desarrollando un sistema para su aplicación en detección y monitorización de incendios en áreas tales como aparcamientos subterráneos y túneles mediante la creación dinámica de una red ad-hoc para monitorizar la situación y proteger a las personas. El sistema podrá aplicarse también para la protección en caso de incendios y posibles desastres en entornos industriales (tales como refinerías) donde se utilizaría para obtener medidas relacionadas con la propagación del incendio cerca de instalaciones críticas tales como tanques de combustible.

A más largo plazo las empresas participantes en el proyecto tienen previsto desarrollar sistemas para búsqueda y rescate empleando UAVs con la tecnología de transporte de cargas desarrollada en el proyecto. La idea es poder suministrar equipos de primera necesidad (máscaras de gas, comunicaciones, medicamentos, etc) a las víctimas, así como ofrecer una respuesta a amenazas químicas, biológicas, radiológicas y nucleares utilizando para ello la capacidad de transporte y despliegue de redes inalámbricas de sensores con UAVs. Otra aplicación futura es la vigilancia de fronteras y costas en localizaciones en las que los equipos fijos de monitorización resultan insuficientes e interesa el despliegue de sensores para suministrar más información. En todas estas aplicaciones se trata de sustituir medios aéreos con coste de muchos millones de euros por sistemas no tripulados, como los desarrollados en el proyecto, con un coste de decenas o cientos de miles de euros.

Los mencionados logros han sido reconocidos con el segundo premio EUROP-EURON 2010 que conceden conjuntamente la Red Europea de Robótica (EURON), la plataforma Europea de Robótica (EUROP) y la sociedad EUNITE.

Por último indicar que las líneas de investigación de AWARE tienen continuidad en dos proyectos Europeos del VII Programa Marco recientemente aprobados: EC-SAFEMOBIL y ARCAS. En el proyecto EC-SAFEMOBIL (“Estimation and Control for Safe Wireless High Mobility Cooperative Industrial Systems”) se extienden las líneas relacionadas con la percepción descentralizada empleando sensores de rango. Por otro lado, ARCAS (“Aerial Robotics Cooperative Assembly System”) profundiza en las líneas relacionadas con el transporte de cargas cooperativo con varios UAVs. En particular se pretenden desarrollar métodos de manipulación de objetos y montaje de estructuras con robots aéreos cooperativos.

## English Summary

### AWARE Project. Integration of Unmanned Aerial Vehicles with Wireless Sensor/Actuator Networks

#### Abstract

This paper summarizes the results of the AWARE project coordinated by the Robotics, Vision and Control Group (GRVC) of the University of Seville and funded by the European Commission under the VI Framework Program (IST-2006-33579). The paper briefly describes the architecture developed for the autonomous decentralized cooperation between unmanned aerial vehicles, wireless sensor/actuator networks and ground camera networks. The full approach was validated in field experiments with different autonomous helicopters equipped with heterogeneous devices on-board, such as visual/infrared cameras and instruments to transport loads and to deploy sensors. Copyright © 2012 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Keywords:

Aerial robotics Wireless sensor/actuator networks Decentralized architectures

#### Agradecimientos

El trabajo mostrado ha sido desarrollado en el marco del proyecto AWARE (*Platform for Autonomous self-deploying and operation of Wireless sensor-actuator networks cooperating with AeRial objEcts*), financiado por la Comisión Europea en el programa IST del VI Programa Marco (IST-2006-33579). Los autores agradecen el trabajo realizado a todo el equipo del proyecto.

#### Referencias

- Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramanian, Y., Cayirci, E., 2002. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine* 40, 102–114.
- Bernard, M., Kondak, K., Maza, I., Ollero, A., 2011. Autonomous transportation and deployment with aerial robots for search and rescue missions. *Journal of Field Robotics* 28 (6), 914–931.  
URL: <http://dx.doi.org/10.1002/rob.20401>  
DOI: 10.1002/rob.20401
- Caballero, F., Merino, L., Ferruz, J., Ollero, A., 2009. Unmanned aerial vehicle localization based on monocular vision and online mosaicking. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 55, 323–343.
- Caballero, F., Merino, L., Gil, P., Maza, I., Ollero, A., 2008a. A probabilistic framework for entire WSN localization using a mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems* 56 (10), 798–806.  
URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2008.06.003>  
DOI: 10.1016/j.robot.2008.06.003
- Caballero, F., Merino, L., Maza, I., Ollero, A., 2008b. A particle filtering method for wireless sensor network localization with an aerial robot beacon. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pasadena, California, USA, pp. 596–601.  
URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543271>  
DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543271
- Capitan, J., Merino, L., Caballero, F., Ollero, A., 2009. Delayed-State Information Filter for Cooperative Decentralized Tracking. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Kobe, Japan, pp. 3865–3870.

- Capitán, J., Merino, L., Caballero, F., Ollero, A., June 2011. Decentralized delayed-state information filter (ddsif): A new approach for cooperative decentralized tracking. *Robotics and Autonomous Systems* 56 (6), 376–388. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2011.02.001>
- Dias, M. B., Stentz, A., 2002. Opportunistic optimization for market-based multi-robot control. In: *Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Lausanne, Switzerland, pp. 2714–2720.
- Erman-Tuysuz, A., van Hoesel, L., J. Wu, P. H., 2008. Enabling mobility in heterogeneous wireless sensor networks cooperating with uavs for mission-critical management. *IEEE Wireless Communications Magazine* 15, 38–46.
- Gerkey, B., Mataric, M., 2002. Sold!: Auction methods for multi-robot coordination. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 18 (5), 758–768.
- Gil, P., Maza, I., Ollero, A., Marron, P. J., 2007. Data centric middleware for the integration of wireless sensor networks and mobile robots. In: *Proceedings of the 7th Conference On Mobile Robots And Competitions*. Paderne, Portugal.
- Lemaire, T., Alami, R., Lacroix, S., July 2004. A distributed tasks allocation scheme in multi-UAV context. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 4. pp. 3622 – 3627.
- Maza, I., Caballero, F., Capitan, J., de Dios, J. M., Ollero, A., July 2010a. Firemen monitoring with multiple UAVs for search and rescue missions. In: *Proc. of the IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*. Bremen, Germany, pp. 1–6. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/SSRR.2010.5981565> DOI: 10.1109/SSRR.2010.5981565
- Maza, I., Caballero, F., Capitan, J., de Dios, J. M., Ollero, A., 2011a. A distributed architecture for a robotic platform with aerial sensor transportation and self-deployment capabilities. *Journal of Field Robotics* 28 (3), 303–328. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/rob.20383> DOI: 10.1002/rob.20383
- Maza, I., Caballero, F., Capitan, J., de Dios, J. M., Ollero, A., January 2011b. Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security applications. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 61 (1), 563–585. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-010-9497-5> DOI: 10.1007/s10846-010-9497-5
- Maza, I., Caballero, F., Molina, R., na, N. P., Ollero, A., 2010b. Multimodal interface technologies for UAV ground control stations. a comparative analysis. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 57 (1–4), 371–391. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-009-9351-9> DOI: 10.1007/s10846-009-9351-9
- Maza, I., Ollero, A., 2007. *Distributed Autonomous Robotic Systems* 6. Vol. 6 of *Distributed Autonomous Robotic Systems*. Springer Verlag, Ch. Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms, pp. 221–230.
- Ollero, A., Lacroix, S., Merino, L., Gancet, J., Wiklund, J., Remuss, V., Perez, I. V., Gutierrez, L. G., Viegas, D. X., Gonzalez, M. A., Mallet, A. Alami, R., Chatila, R., Hommel, G., Colmenero, F. J., Arrue, B. C., Ferruz, J., Martinez-de Dios, J., Caballero, F., 2005. Multiple eyes in the skies. architecture and perception issues in the COMETS unmanned air vehicles project. *IEEE Robotics and Automation Magazine* 12 (2), 46–57.
- Sanchez-Matamoros, J.M., Dios, J.R.M.-d., Ollero, A., april 2009. Cooperative localization and tracking with a camera-based wsn. In: *Mechatronics, 2009. ICM 2009. IEEE International Conference on*. pp. 1–6.
- Sukkarieh, S., Nettleton, E., Kim, J.-H., Ridley, M., Goktogan, A., Durrant-Whyte, H., 2003. The anser project: Data fusion across multiple uninhabited air vehicles. *The International Journal of Robotics Research* 22 (7–8), 505–539.
- Viguria, A., Maza, I., Ollero, A., April 2007. SET: An algorithm for distributed multirobot task allocation with dynamic negotiation based on task subsets. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Rome, Italy, pp. 3339–3344. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.2007.363988> DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363988
- Viguria, A., Maza, I., Ollero, A., 2008. S+T: An algorithm for distributed multirobot task allocation based on services for improving robot cooperation. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pasadena, California, USA, pp. 3163–3168. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543692> DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543692
- Woo, A., Tong, T., Culler, D., 2003. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In: *1st ACM Intl.Conf.on Embedded networked sensor systems*. pp. 14–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/958491.958494>
- Xu, Y., Scerri, P., Sycara, K., Lewis, M., 2006. Comparing market and token-based coordination. In: *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*.