

Sistema Basado en el Empleo Vehículos Aéreos no Tripulados para la Lucha Contra Incendios Forestales

A. Ollero¹, J.R. Martínez-de Dios¹, L. Merino², F. Caballero¹ y D.X. Viegas³

Resumen

En el artículo se presenta el sistema desarrollado en el proyecto “COMETS: Real-time coordination and control of multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles” del programa IST de la Comisión Europea y su aplicación a la detección y monitorización de incendios forestales. Este sistema hace posible la coordinación de múltiples UAVs, permitiendo integrar vehículos de diversas características y explotar sus complementariedades. En COMETS pueden integrarse tanto vehículos completamente autónomos como teleoperados por un piloto remoto al cual se le suministran las ayudas necesarias para facilitar el pilotaje y permitir la integración en el sistema de múltiples UAVs. En COMETS se han realizado experimentos y demostraciones generales en Lousã y Gestosa, cerca de Coimbra (Portugal), en los meses de Mayo de 2003, 2004 y 2005, siendo el primer sistema multi-UAV que se ha demostrado con fuegos reales. En el artículo se presentan resultados de dichos experimentos de detección y monitorización de incendios. Asimismo, se analizan estos resultados y se estudian las posibilidades de aplicación futura, en condiciones operacionales, de sistemas basados en el empleo de UAVs.

1. Introducción

Los medios aéreos juegan un papel importante en la lucha contra incendios. Además de para el transporte de brigadas se emplean cada vez más para monitorización de incendios y en algunos países para detección y para la evaluación del área quemada.

Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) tienen ventajas sobre los medios tradicionales en muchas aplicaciones. Evitan el riesgo de la tripulación en vuelos con poca visibilidad o en condiciones climatológicas adversas y su coste es inferior. Los UAVs pueden ser empleados para transmitir imágenes y datos a un centro de control en tierra. Los UAVs también pueden llevar hardware con potencia computacional suficiente para procesar imágenes y datos y realizar de forma autónoma funciones de detección y medida de objetos y eventos.

En la última década, el uso de UAVs ha despertado gran interés. Las aplicaciones militares son bien conocidas. Recientemente los avances en la

¹ Grupo de Robótica, Visión y Control, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, Avda. Camino de España sn, 41092, Sevilla, España, {aollero, jdedios, caba}@cartuja.us.es

² Grupo de Robótica, Visión y Control, Escuela Politécnica Superior, Universidad Pablo de Olavide, Crta. Utrera, km. 1, 41013, Sevilla España, lmercab@upo.es

³ Depto. de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Pinhal de Marrocos, 3030-201, Coimbra (Portugal), xavier.viegas@dem.uc.pt

miniaturización de sensores, computadores y sistemas de comunicación (Ollero y Merino, 2004) han propiciado el empleo de esta tecnología en cada vez más aplicaciones civiles, tales como la gestión de situaciones de alarma, la inspección en sitios no accesibles, vigilancia, y búsqueda y rescate. La maniobrabilidad de los UAVs les permite obtener mejores vistas que los medios aéreos tradicionales y además sin riesgos para la tripulación.

En este artículo se estudian las posibilidades de la aplicación de esta tecnología a los incendios forestales. Se muestran los resultados obtenidos en el proyecto “COMETS: *Real-time coordination and control of multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles*” (IST-2001-34304) del programa IST de la Comisión Europea. El objetivo principal del proyecto COMETS es el de desarrollar una plataforma para la coordinación y control de múltiples UAVs, (Ollero y otros, 2005). El sistema COMETS es el primero que ha sido demostrado en detección y monitorización automáticas de incendios forestales.

En la Sección 2 se exponen las posibles aplicaciones de UAVs en la lucha contra incendios. En la Sección 3 se describe el sistema de múltiples UAVs empleado en el proyecto COMETS. En la Sección 4 se muestran algunos resultados experimentales obtenidos en COMETS. Las Conclusiones, Agradecimientos y Referencias Bibliográficas son las últimas Secciones.

2. UAVs para lucha contra incendios

Los UAVs son vehículos aéreos que pueden ser controlados de forma remota o son capaces de realizar tareas de forma autónoma. Los UAVs se diferencian de los vehículos tradicionales de control remoto en que como mínimo contienen funcionalidades para la adquisición y transmisión de datos. Algunos UAVs están equipados con instrumentación suficiente para su tele-operación fuera del campo de vista. Otros son completamente autónomos y pueden realizar tareas tales como seguimiento de trayectorias, aterrizaje y despegue autónomo, detección automática de eventos, y seguimiento.

En los últimos años se han desarrollado una gran variedad de UAVs. Los HALE UAVs (*High Altitude Long Endurance UAVs*) operan en altitudes superiores a 10 Km, con una autonomía de hasta varios meses. Típicamente se trata de UAVs basados en plataformas de alas fija o dirigibles de grandes dimensiones. Permiten llevar una considerable carga y ofrecen resoluciones espaciales y temporales superiores a las de los satélites. Se prevé que dirigibles como el *Global Observer* de la NASA o el *Stratospheric Airship* de Lockheed-Martin estén disponibles en los próximos 5 años.

El UAV Predator de *General Atomics* es un ejemplo de UAV tipo MALE (*Medium Altitude Long Endurance*). Los UAVs llamados tácticos, como el Pioneer de *Pioneer UAV Inc.*, tienen mayor maniobrabilidad pero menor capacidad de carga. Pueden llevar sensores ligeros y cámaras para realizar observaciones locales.

En los últimos años se han desarrollado los UAVs llamados “orgánicos”, de bajo peso, tales como el *Pointer* y el *Dragon Eye* de *AeroVironment*. Son capaces de transportar cámaras y sensores muy ligeros. Estos UAVs solo pueden volar a distancias muy cortas. También se han desarrollado dirigibles autónomos que pueden ser empleados para proporcionar vistas globales de la escena o actuar como repetidores de comunicaciones. Sin embargo estos dirigibles solo pueden emplearse

con una velocidad del viento baja, lo que hace difícil su empleo en incendios forestales.

Los UAVs pueden ser aplicados en un gran número de actividades relacionadas con la lucha contra incendios, como ha sido resaltado por numerosos autores. Para actividades pre-incendio, son útiles para la obtención de mapas tales como mapas de riesgo, de stress hídrico o de vegetación, empleando para ello sensores como los Lidars, (Wehr y Lohr, 1999) y (Lefsky y otros, 1999) con resoluciones superiores a las de los satélites. También se pueden emplear para la obtención de mapas 3D del terreno (Lacroix y otros, 2003). Los mapas obtenidos mediante satélites o con UAVS tipo HALE pueden ser complementados con información de mayor resolución (para zonas de especial interés o protegidas) obtenida con UAVs pequeños de bajo coste.

Los UAVs también pueden ser utilizados para actividades post-incendio tales como supervisión de cenizas activas, estimación de daños y área quemada mediante mapas de alta resolución.

Para vigilancia de incendios se han empleado UAVs de bajo coste que transmiten imágenes a un centro de control, (Restas, 2006). Los UAVs también representan una alternativa para detección automática de incendios. Los UAVs de tipo HALE y estratosféricos pueden realizar funciones similares a la actualmente realizada por satélites pero con mayores resoluciones temporales y espaciales. Los UAVs tácticos pueden emplearse para confirmar y localizar los fuegos con mayor precisión. Dichos UAVs también pueden monitorizar los incendios, calcular automáticamente el frente de llamas en las imágenes, geo-referenciarlo y transmitirlo a un centro de control. La idea de colaboración de diferentes plataformas y sensores se ilustra en la Figura 1.

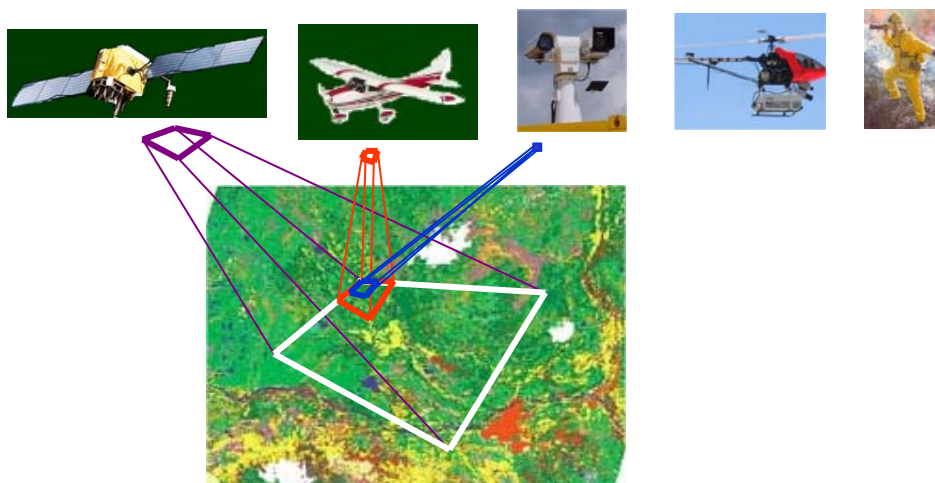


Figura 1—Cooperación entre múltiples plataformas y sensores de diferentes resoluciones para la lucha contra incendios.

Los métodos más empleados de detección automática de incendios se basan en sistemas en tierra. Los sistemas de detección automática aún tienen problemas de fiabilidad en algunas condiciones. El empleo de UAVs puede superar dichas limitaciones empleando esquemas de detección, confirmación y localización cooperativos con varios UAVs como se presenta en la siguiente Sección.

El UAV ALTUS, una evolución del UAV Predator, se ha empleado en experimentos de detección de fuegos, (Ambrosia, 2003). En ese caso se empleó un único UAV de altas prestaciones y elevado coste..

3. Sistema de múltiples UAVs heterogéneos para lucha contra incendios

En el proyecto COMETS se emplean varios UAVs heterogéneos de bajo coste que cooperan para realizar acciones de forma cooperativa, (Ollero y otros, 2005). La heterogeneidad de los UAVs y sensores a bordo incrementa la complejidad de los sistemas y de su control pero proporciona claras ventajas tales como la posibilidad de explotar las complementariedades de distintos UAVs con propiedades de movilidad y maniobrabilidad diferentes, así como con sensores distintos con diversas capacidades que permiten obtener información desde diferentes puntos de vista. .

La cooperación de flotas UAVs tiene muchas posibilidades para la lucha contra incendios. Por ejemplo, se puede utilizar una flota de UAVs para vigilar una zona permitiendo establecer prioridades entre los UAVs dependiendo del interés de las regiones. Los UAVs diferentes se pueden emplear para realizar tareas complementarias. Por ejemplo, se pueden utilizar UAVs tácticos para localizar de forma precisa alarmas generadas por HALE UAVs. Además, los datos tomados por diferentes UAVs se pueden utilizar para confirmar las alarmas de incendios y reducir la tasa de falsas alarmas. Como se sabe, uno de los problemas de la detección automática de incendios forestales es la alta tasa de falsas alarmas originadas entre otros por reflexiones solares, objetos calientes y actividades humanas, (Ollero y otros, 1999). La fusión de datos de diferentes sensores se ha empleado con éxito para reducir el número de falsas alarmas en detección de incendios forestales, (Arrue y otros, 2000).

El sistema multi-UAV desarrollado en el proyecto COMETS fue demostrado en la detección y monitorización automáticas de incendios. La misión de detección de incendios se descompuso en las siguientes etapas: vigilancia, detección, confirmación, observación y medida del fuego. La misión es muy similar (en otra escala) a las operaciones de detección de fuego desarrolladas por los servicios de extinción de incendios que emplean medios aéreos tripulados.

En el sistema COMETS, la vigilancia se realiza repartiendo el área de vigilancia entre los UAVs disponibles considerando las capacidades de cada UAV (tiempo y distancia de vuelo), maniobrabilidad y sensores a bordo. Durante la vigilancia cada UAV aplica técnicas de detección automáticas de incendios mediante los sensores disponibles en cada UAV.

En la demostración de COMETS se emplearon tres UAVs diferentes: el helicóptero Marvin (Remus y otros, 2002), el dirigible Karma (Lacroix y otros, 2003) y el helicóptero Heliv. Marvin es un helicóptero autónomo desarrollado por el *Real-Time Systems & Robotics Group* de la Universidad Técnica de Berlín. Karma es un dirigible desarrollado por el LAAS (*Laboratoire d'Architecture et d'Analyse des Systèmes*) en Toulouse. Heliv es la evolución de un helicóptero de control remoto de la empresa española Helivisión que fue adaptado por el *Grupo de Robótica, Visión y Control de la Universidad de Sevilla* que le añadió funciones de percepción automática, comunicaciones y control de vuelo.

La Figura 2 muestra una fotografía de los tres UAVs en un experimento. Los UAV también son heterogéneos por los sensores que tienen instalados. Además de

los sensores apropiados para la navegación tales como GPS diferencial, giróscopos, unidades de medidas inerciales (IMUs) y otros, los principales sensores para percepción del entorno son las cámaras de infrarrojos, cámaras visuales y un sensor puntual de fuego.



Figura 2—UAVs Heliv, Marvin y Karma en un experimento en Lousã (Portugal) en Mayo 2005.

Heliv esta equipado con una cámara de infrarrojos y una cámara visual, ambas conectadas con un servidor de video, que digitaliza las imágenes y las transmite a tierra. La cámara de infrarrojos es una micro-cámara de bajo coste en la banda del infrarrojo lejano (7-14 micras).

Marvin transporta un sensor puntual de fuego. Se trata de un fotodiodo ajustado a la banda de [185-260] micras, correspondiente con la banda de radiación del fuego. La salida de dicho sensor es un escalar proporcional a la energía radiada por lo que no es posible determinar la distancia del fuego: un fuego grande pero lejano proporciona una señal similar que un fuego pequeño que está cercano.

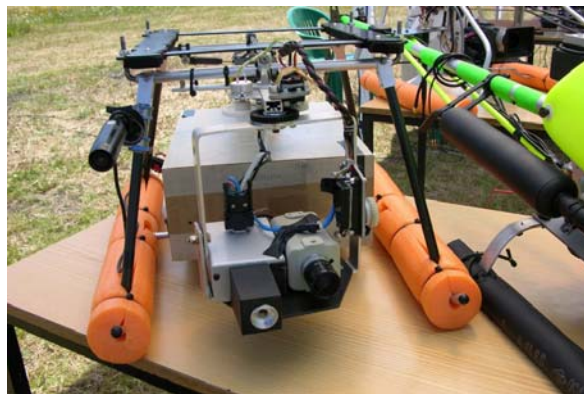


Figura 3—Unidad de orientación de cámaras instalada a bordo de Heliv con una cámara visual y una cámara de infrarrojos.

Marvin y Heliv tienen mecanismos que permiten orientar las cámaras y el sensor de fuego de forma independiente del resto del helicóptero (ver Figura 3). Estos

mecanismos contienen codificadores que permiten medir los ángulos de orientación de las cámaras.

Karma contiene cámaras que permiten obtener vistas generales tomadas desde altitudes mayores. El tamaño del dirigible le permite llevar un sistema de visión estéreo que puede utilizarse para obtener mapas del terreno.

4. Resultados experimentales

Los experimentos de demostración del proyecto COMETS consistieron en realizar con los UAVs descritos en la Sección 3 misiones de detección y observación de incendios en condiciones próximas a las operacionales. En esta Sección se muestran algunos resultados experimentales realizados en el aeródromo de Lousã y en la sierra de Gestosa (Portugal). La Figura 4 muestra una fotografía tomada en los experimentos en la sierra de Gestosa. La misión de detección y monitorización de fuegos demostrada en el proyecto COMETS tiene tres fases: vigilancia, confirmación y observación.



Figura 4—Heliv en un experimento en Gestosa (Portugal).

4.1. Vigilancia

En esta fase se utilizan los UAVs con capacidades de detección de incendios: Heliv y Marvin. Se les da órdenes de patrullar la zona de búsqueda. La zona se reparte entre los UAVs dependiendo de las características del terreno y las capacidades de detección de los sensores a bordo. El centro de control de COMETS determina la trayectoria para cada UAV.

Cada UAV mientras patrulla su zona de búsqueda, procesa los datos obtenidos aplicando técnicas de segmentación a las imágenes de infrarrojos e imágenes visuales y analizando los datos del sensor puntual de fuego. Los resultados de dichas técnicas se emplean para generar una estimación de la probabilidad de incendio en cada posición de la zona de búsqueda tomando celdas con un tamaño de 1 m^2 .

La Figura 5 muestra algunos resultados de la fase de detección con Marvin. Se muestra el estado de las alarmas de fuego detectadas por el sensor de fuego de Marvin. El color blanco significa alta probabilidad de fuego y el color negro baja probabilidad. Durante el experimento se detectan las tres alarmas que se señalan en la Figura 5. Esta figura corresponde a un mapa geo-referenciado del aeródromo de Lousã. Los ejes muestran las coordenadas UTM en metros. De las tres alarmas que se

muestran_ solo una de ellas se corresponde con fuego. La posición real del fuego está marcada con un cuadrado.

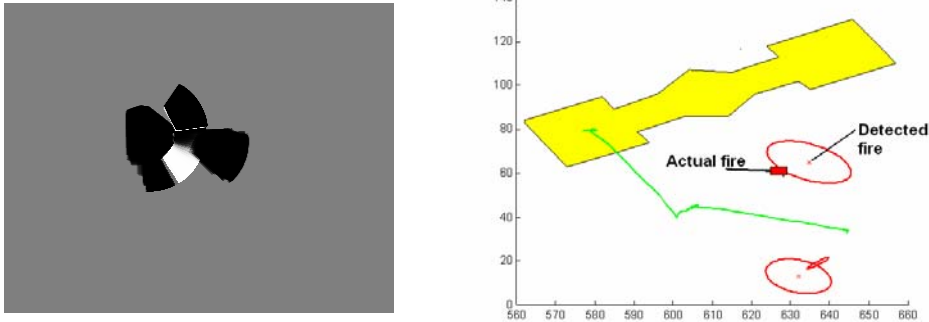


Figura 5—Estado de las alarmas detectadas por el sensor de fuego de Marvin. Blanco significa alta probabilidad de fuego y negro baja. A la derecha se muestran las alarmas detectadas sobre un mapa geo-referenciado. Las elipses representan la incertidumbre en la localización de las alarmas y el cuadrado es la posición real del fuego controlado. La trayectoria de Marvin se dibuja en color verde.

4.2. Confirmación y localización precisa

Cuando una o más alarmas son detectadas comienza la fase de confirmación. El centro de control de COMETS re-planifica las tareas para los UAVs. Para la confirmación ordena a otro UAV, distinto al que detectó la alarma, que se aproxime a la alarma para su confirmación empleando sus propios sensores.

En este experimento se ordena a Heliv que acuda a la posición de alarma. Heliv toma imágenes de infrarrojos (Figura 6) y aplica técnicas de segmentación descritas en (Martínez-de Dios y Ollero, 2006) que le permiten detectar los fuegos en las imágenes. En la imagen de la derecha se destaca en color blanco puro el fuego detectado en la imagen.

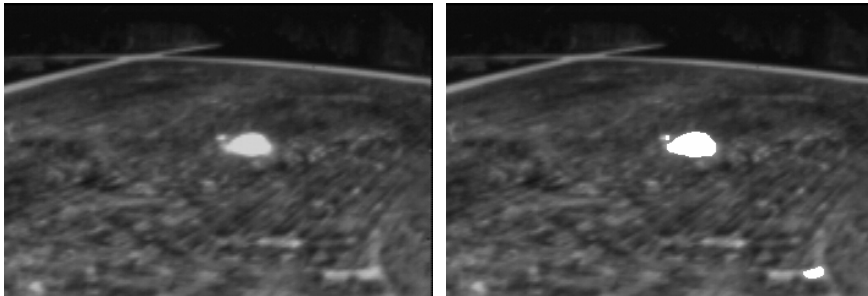


Figura 6—Imagen de infrarrojos de un fuego incipiente. En la imagen de la derecha se muestra en color blanco puro el fuego detectado.

Una vez que Heliv ha segmentado un fuego en las imágenes, se aplican técnicas de percepción cooperativa para fusionar los resultados de Marvin con los de Heliv, ver (Merino y otros 2006). Dos de las tres alarmas detectadas por Marvin se descartan mientras que la tercera se confirma como un incendio real. Las técnicas de percepción cooperativa permiten descartar y confirmar alarmas, y también calcular con mayor precisión la posición de las alarmas que se han confirmado. La posición

del fuego calculada entre los dos UAVs difiere en menos de 1 metro de la posición real del fuego.

4.3. Observación y medida de incendios

Si la alarma se confirma, las tareas de los UAVs son re-planificadas por el centro de control de COMETS. En este caso, se les ordena que obtengan información de la alarma. Ambos UAVs de forma sincronizada obtienen imágenes del incendio desde distintos puntos de vista.

En este experimento, a Marvin y Heliv se les da la orden que se mantengan con vuelo estacionario a una distancia del incendio y que envíen imágenes estabilizadas del fuego. El método empleado para geo-estabilizar las imágenes es el descrito en (Merino y otros, 2006). Con estas imágenes estabilizadas es posible determinar parámetros del avance del frente de llamas empleando técnicas de segmentación de fuego. La Figura 7a muestra la estación de teleoperación de Heliv con datos obtenidos del experimento. La Figura 7b muestra imágenes con el frente de llamas identificado mediante las técnicas descritas en (Merino y otros, 2006).

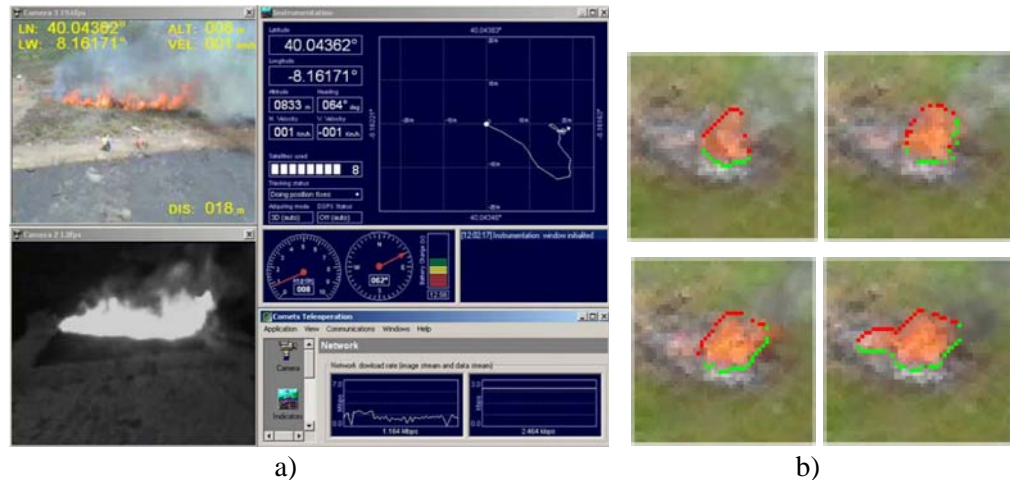


Figura 7—a) Estación de tele-operación de Heliv mostrando datos tomados durante experimentos de fuegos controlados. b) Observación de fuegos de COMETS empleando Marvin y Heliv. La evolución del frente de llamas puede obtenerse automáticamente aplicando técnicas de segmentación de fuego.

5. Conclusiones

Este artículo presenta un sistema de múltiples UAVs heterogéneos de bajo coste para la lucha contra incendios. El sistema fue desarrollado y demostrado en el proyecto “COMETS: Real-time coordination and control of multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles” del programa IST de la Comisión Europea. El sistema hace posible la coordinación de múltiples UAVs, permitiendo integrar vehículos de diversas características y explotar sus complementariedades. Asimismo, en el sistema COMETS pueden integrarse tanto vehículos completamente autónomos como teleoperados por un piloto remoto.

COMETS es el primer sistema con múltiples UAVs que ha sido demostrado en experimentos con fuegos reales controlados realizados en Lousa y Gestosa, cerca de Coimbra (Portugal), en Mayo de 2003, 2004 y 2005. En el artículo se presentan

algunos resultados de dichos experimentos de detección y monitorización de incendios.

La aplicación del sistema propuesto con varios UAVs heterogéneos de bajo coste tiene ventajas sobre otros con un único UAV de altas prestaciones y elevado coste. Además, el enfoque multi-UAV proporciona mayor robustez ante fallos y permite hacer uso de las complementariedades de diferentes UAVS.

Aunque los resultados obtenidos son prometedores aún son necesarios importantes esfuerzos de I+D para disponer de un sistema adecuado para su empleo en condiciones completamente operativas. El sistema propuesto puede integrarse con los sistemas de detección y monitorización tradicionales tales como los sistemas basados en cámaras en observatorios o en vehículos tripulados tradicionales. La integración con los sistemas de satélite también es un campo de I+D de gran interés.

6. Agradecimientos

El sistema descrito ha sido desarrollado en el proyecto “*COMETS: Real-time coordination and control of multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles*” (IST-2001-34304) financiado por la Comisión Europea en el quinto Programa Marco. Los autores agradecen la colaboración de los equipos de los miembros de COMETS del *Laboratoire d'Architecture et d'Analyse des Systèmes (LAAS)* en Toulouse y de la *Technische Universität Berlin* por las imágenes y datos y su participación en los experimentos. Los autores agradecen ADAI y su equipo de la Universidad de Coimbra (Portugal) por su apoyo en los experimentos.

La última parte de este trabajo ha sido realizada en el marco del proyecto AEROSSENS (DPI2005-02293) financiado por la Dirección General de Investigación, y SADCON financiado por la Junta de Andalucía.

Referencias bibliográficas

- Ambrosia, V.G. 2002. Remotely Piloted Vehicles as Fire Imaging Platforms: The Future Is Here!; *Wildfire Magazine*; Mayo-Junio.
- Arrue, B. C.; Ollero A.; Martínez-de Dios J.R. 2000. An Intelligent System for False Alarm Reduction in Infrared Forest-Fire Detection; *IEEE Intelligent Systems*; vol. 15; no. 3; pp. 64-73.
- Lacroix, S.; Jung I-K.; Soueres P.; Hygounenc E.; Berry J-P. 2003. The autonomous blimp project of LAAS/CNRS - Current status and research challenges; *Experimental Robotics VIII, Springer Tracts in Advanced Robotics*, 5; pp. 487-496.
- Lefsky, M.A.; Harding D.; Cohen W. B.; Parker G.; Shugart H. H. 1999. Surface Lidar Remote Sensing of Basal Area and Biomass in Deciduous Forests of Eastern Maryland, USA; *Remote Sensing of the Environment Environ*, 67; pp. 83-98.
- Martinez-de Dios, J.R.; Ollero, A. 2006. A Multiresolution-Fuzzy Method for Robust Threshold Selection in Image Segmentation; *Intelligent Automation and Soft Computing*; Vol. 12; No. 4; pp. 419-430.
- Merino, L., Caballero F.; Martínez-de Dios J.R.; Ferruz J.; Ollero, A.. 2006. A Cooperative Perception System for Multiple UAVs: Application to Automatic Detection of Forest Fires; *Journal of Field Robotics*; vol. 23; no. 3; pp. 165-184.
- Ollero, A., Arrue, B.C.; Martínez-de Dios J.R.; Murillo, J.J.. 1999. Techniques for Reducing False Alarms in Infrared Forest-Fire Automatic Detection Systems; *Control Engineering Practice*; vol. 7; no. 1; pp. 123-131.

- Ollero, A.; Merino L., 2004. Control and perception techniques for aerial robotics; Annual Reviews in Control, 28; Issue 2; pp. 167-178.
- Ollero, A.; Lacroix S.; Merino L.; Gancet J.; Wiklund J.; Remuss V; Gutierrez L.G.; Viegas D.X.; Gonzalez M.A.; Mallet A.; Alami R.; Chatila R.; Hommel G.; Colmenero F.J.; Veiga I. ; Arrue B.; Ferruz J.; Martínez-de Dios J.R.; Caballero F.. 2005. Multiple Eyes in the Skies; IEEE Robotics & Automation Magazine; vol. 12; no. 2; pp. 46-57.
- Remus, V.; Musial M.; Hommel G.; 2002. MARVIN -An Autonomous Flying Robot-Based on Mass Market; Int. Conf. Intell. Robots Systems, IROS, Workshop Aerial Robotics, pp. 23-28.
- Restas, A., 2006. Forest Fire Management Supported by UAV Based Air Reconnaissance Results of Szendro Fire Department; IEEE Intl. Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area.
- Wehr, A; Lohr U. 1999. Airborne laser scanning—an introduction and overview: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54; pp. 68–82.