Sistema aéreo no tripulado con capacidad avanzada de manipulación.

Trujillo, Miguel Ángel[1,*], Viguria, Antidio[1], Cano, Raúl[1] y Ollero, Anibal[2].

[1] Fundación Andaluza para el Desarrollo Aeroespacial – Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales. La Rinconada (Sevilla, España). Emails: {matrujillo@catec.aero (MATS), aviguria@catec.aero (AVJ), rcano@catec.aero (RCB)}

[2] Universidad de Sevilla – Grupo de Robótica, Visión y Control (Sevilla, España). Email: aollero@us.es (AOB)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; matrujillo@catec.aero (MAT);

Abstract: Este artículo presenta una nueva tecnología que permite realizar operaciones de manipulación complejas durante el vuelo de un vehículo aéreo no tripulado de ala rotatoria. Este desarrollo tecnológico se ha llevado a cabo en el marco del proyecto europeo FP7 ARCAS y H2020 AEROARMS. Para ello se ha integrado un brazo robótico de 6 grados de libertad en un vehículo aéreo tipo multirotor. En primer lugar se detallará la configuración de la plataforma, el brazo robótico y los distintos sensores utilizados en el desarrollo del primer prototipo, a nivel mundial, de un robot manipulador aéreo que es capaz de realizar operaciones de manipulación complejas, como por ejemplo la colocación de un sensor en un lugar de difícil acceso, el cambio de una batería o incluso la realización de pequeñas reparaciones. A continuación se describirá brevemente la estrategia de control que se ha implementado y que permite compensar en tiempo real los cambios en el centro de gravedad y los efectos que el movimiento del brazo robótico tiene sobre la estabilidad de vuelo de la aeronave. Finalmente, se presentarán una serie de experimentos en vuelo donde se ha demostrado la capacidad de manipulación desde un vehículo aéreo no tripulado (UAV) mediante el montaje de una estructura a partir del acoplamiento de las distintas piezas que lo componen. En estos experimentos no involucran únicamente a un solo vehículo, sino también la realización de operaciones conjuntas entre dos vehículos no tripulados, como por ejemplo el agarre y transporte de una barra de mayor longitud entre dos vehículos aéreos no tripulados.

Keywords: robótica aérea, uas, manipulación aérea

---

1. Introducción

La manipulación aérea ha adquirido gran relevancia en los últimos años ([1], [2], [3], [4], [5] y [6]). Se han presentados diversos estudios sobre el control, diseño y planificación. La posibilidad de llegar a zonas inaccesibles y/o peligrosas, unido a las capacidades de manipulación de un brazo robótico montado a bordo, representa la nueva frontera de los robots aéreos. Un proyecto relevante a nivel mundial ha sido ARCAS (Aerial Robotics Cooperative Assembly System). Con dicho proyecto se ha demostrado como un sistema de robots aéreos cooperaban para ejecutar tareas de ensamblaje construyendo una estructura. Las tareas principales han sido la recogida de piezas de la estructura, el transporte de la misma hasta la zona de construcción evitando obstáculos y el ensamblaje de las piezas con el resto de la estructura. Por último, se demostró la capacidad de transporte cooperativo de una barra rígida entre dos manipuladores aéreos. Dicha operación requiere un control muy preciso para evitar que las perturbaciones de las aeronaves entre sí afecten negativamente a la estabilidad del sistema completo.

2. Configuración plataforma aérea

La plataforma de pruebas en interiores de ARCAS es un multi-rotor de 8 rotores dispuestos en configuración coaxial, con una envergadura de 105cm de punta a punta de pala, y una masa total de 8.2Kg (Figura 1). El autopiloto ha sido desarrollado por completo en CATEC (Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales), permitiendo un control total del hardware y software embarcado, algo que resulta de gran interés para la integración física del brazo robótico y de los algoritmos de control necesarios para desarrollar las operaciones de manipulación.

Figura 1: Plataformas aéreas utilizadas en el proyecto.

El manipulador integrado en la plataforma de interiores es de 6 grados de libertad (Figura 2) e incluye un novedoso mecanismo de compensación del centro de gravedad (CdG) mediante el movimiento de las baterías. Este mecanismo es importante para contrarrestar el movimiento del CdG de la aeronave debido al movimiento del brazo robótico (patente española P201330537). Finalmente comentar que el sistema de posicionamiento Vicon se utiliza en interiores para sustituir al GPS.

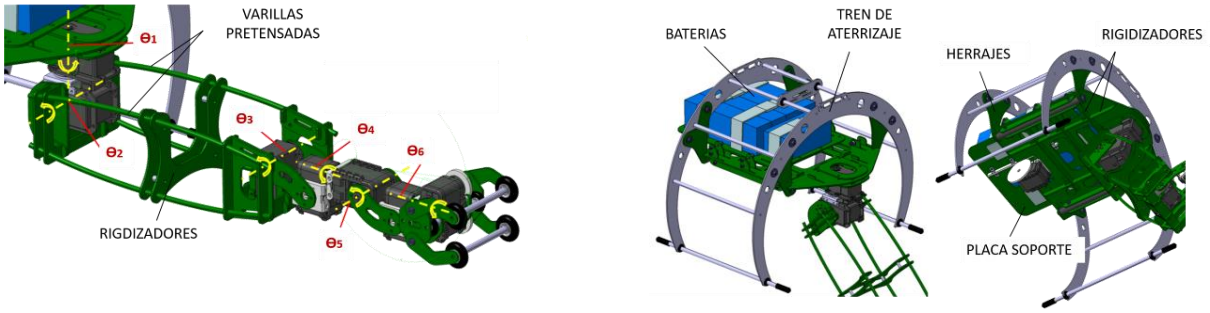

Figura 2: Brazo manipulador con 6 grados de libertad con un efector final diseñado para el agarre, transporte e inserción de barras. En la parte derecha se muestra el soporte del brazo.

3. Estrategia de control

En el proyecto ARCAS, el control preciso del sistema completo brazo-UAV es crucial para realizar las operaciones. Generalmente se puede abordar el problema de control del manipulador de dos formas. La primera considera el multi-rotor y el brazo robótico como una entidad única, por lo que el controlador es diseñado basándose en el sistema dinámico completo. La segunda considera el multi-rotor y el brazo robótico como dos sistemas independientes en el que los efectos del brazo sobre el multi-rotor se consideran como perturbaciones externas y viceversa. Esta última solución es útil en el caso en el que la dinámica del brazo no sea suficiente para compensar los errores de posicionamiento de la aeronave.

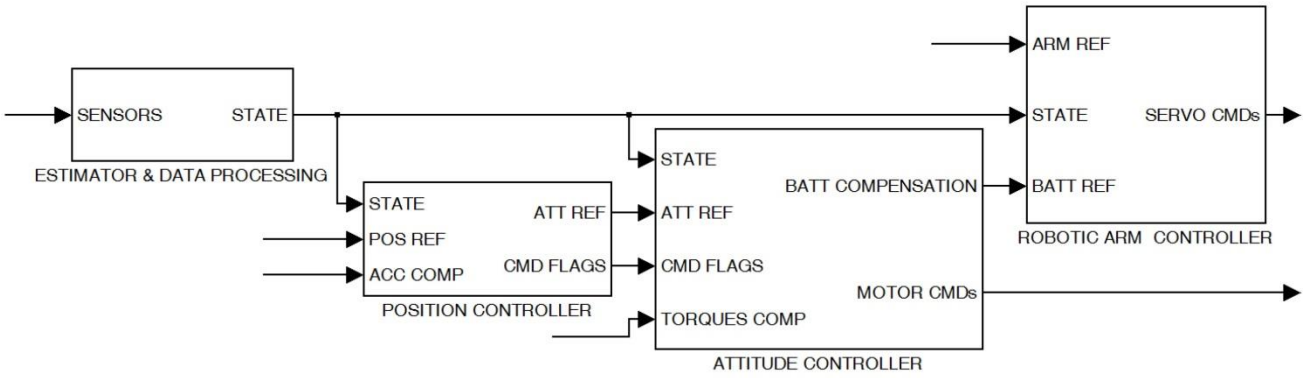

Figura 3: Arquitectura de control del manipulador aéreo.

La solución identificada para el proyecto ha sido la de usar una arquitectura de control modular multicapa. Dicha arquitectura busca reducir los efectos de los movimientos del brazo robótico, dado que dichos movimientos provocan desplazamientos del CdG. La arquitectura se compone de tres capas, empleándose un control típico de un multi-rotor basado en PIDs. La primera capa se basa en el movimiento de las baterías anteriormente descrito que compensa el desplazamiento del CdG generado por el brazo. La segunda capa hace uso del equilibrio estático de momentos debido al desplazamiento del CdG y, por último, la tercera capa realiza un equilibrio dinámico de momentos. Las dos últimas capas generan momentos de equilibrio mediante el uso de los motores de vuelo de la plataforma. En la Figura 3 se detalla la arquitectura de control de la aeronave en conjunto con el brazo manipulador. Se puede apreciar como el controlador básico de un multi-rotor se ha adaptado añadiendo compensaciones de momentos. En [1] se pueden encontrar más detalles de la estrategia de control.

4. Resultados y discusión

Los métodos de control desarrollados en el apartado anterior se han integrado y validado en el testbed de interiores del CATEC con dimensiones 15x15x5 metros, dotado del sistema VICON (ver Figura 4).

Figura 4: Escenario de pruebas en el proyecto ARCAS.

El experimento de validación más relevante ha sido el del agarre, transporte y despliegue preciso de una barra rígida de algo más de 4 metros de largo. Las aeronaves tenían que cooperar durante el transporte para evitar conjuntamente un obstáculo que se encontraba en la trayectoria estimada de la barra. A su vez, las trayectorias de las aeronaves tuvieron que planificarse con precisión para mantener una distancia constante entre ambos manipuladores aéreos para evitar la transmisión de fuerzas indeseadas. Dichas fuerzas desestabilizarían la aeronave provocando la pérdida de control total de las mismas en caso de no soltar la carga.

Los controladores de las aeronaves deben comunicarse para permitir el control preciso necesario de la operación. Para llevarla a cabo los multi-rotores se acercan a los extremos de la barra y despliegan el brazo manipulador. Una vez desplegado ejecutan un control preciso que les permite mantener la posición de las garras en una posición muy precisa en el espacio a pesar de las perturbaciones inducidas, las cuales, debido a la cercanía de las aeronaves entre sí, eran bastante considerables.

Figura 5: Agarre y transporte de la barra por parte de las dos aeronaves del proyecto ARCAS.

Una vez que ambas aeronaves están preparadas para realizar el agarre, lo ejecutan de manera coordinada. Durante este proceso se tienen en cuenta multitud de factores para asegurar que no se produzca ningún fallo: errores de posicionamiento de la aeronave y el efector final del brazo, errores en el control de los grados de libertad del brazo, errores de actitud en la aeronave, etc. Dichos errores

están siempre monitorizados por una máquina de estados que controla la ejecución y coordinación de ambas aeronaves.

Durante el transporte de la barra rígida se ejecutan en paralelo las trayectorias predefinidas para cada aeronave de forma que eviten los obstáculos (ver Figura 5). Los controladores deben realizar ajustes controlados de las posiciones de los brazos robóticos para mantener el sistema estable aunque se produzcan perturbaciones en cada aeronave debidas al viento en forma de vórtices generados por el otro robot y fuerzas transmitidas por la barra.

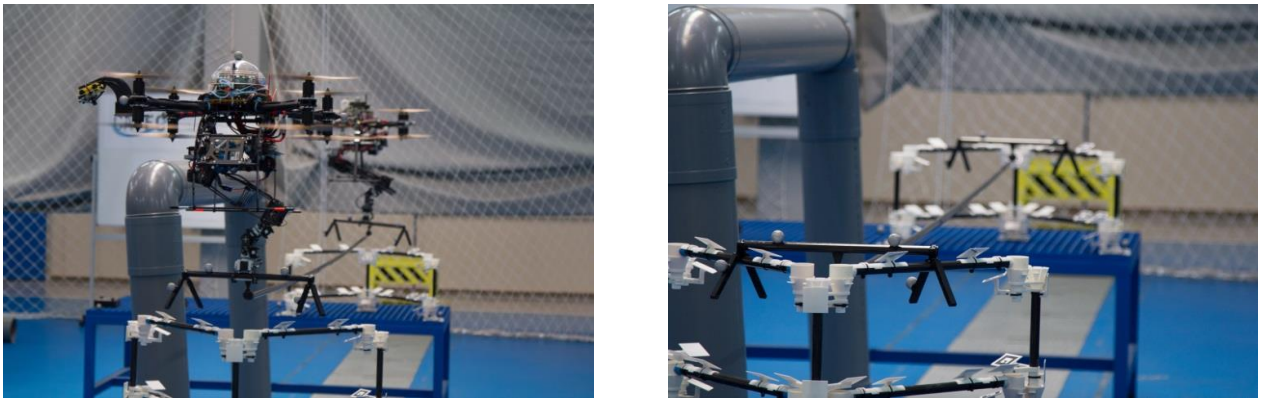

Figura 6: Despliegue de la barra rígida para conectar dos estructuras entre sí.

Una vez finalizada la fase de transporte, se ordena a los manipuladores aéreos desplegar la barra en un punto específico para conectar las dos estructuras que ya están construidas en cada mesa. Las restricciones impuestas a los errores de control para este caso son muy altas debido a que se debe asegurar una conexión correcta. Después de algunos segundos para compensar las oscilaciones, la barra se libera en el punto exacto necesario para interconectar las estructuras.

Por último, ambas plataformas retraen sus brazos de forma autónoma y navegan al punto de paso final, donde ambas plataformas aéreas aterrizan en la zona destinada a ello.

Este experimento, junto con otros varios, pueden verse en la web de ARCAS http://www.arcas-project.eu/.

5. Conclusiones

El proyecto ARCAS ha desarrollado, por primera vez a nivel mundial, robots manipuladores aéreos basados en multi-rotores con brazos robóticos de 6 grados de libertad abriendo el camino a un nuevo campo en la robótica aérea. Las aplicaciones de este tipo de dispositivos son muy amplias, pudiendo aplicarse a operaciones NRBQ, mantenimiento de equipos en zonas peligrosas o de difícil acceso e incluso instalación de sensores y equipos en lugares elevados.

La tecnología desarrollada en ARCAS ya se está aplicando, aumentado su TRL, en múltiples proyectos, entre los que cabe mencionar el proyecto Europeo de H2020 AEROARMS (http://www.aeroarms-project.eu/) que incluye la aplicación a la inspección y mantenimiento industrial, contemplando específicamente aplicaciones en industrias petroquímicas. También, en el proyecto H2020 AEROBI, se aplicarán los resultados de ARCAS para la inspección de puentes.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Proyecto Europeo del FP7 ARCAS (ICT-2011-287617) y AEROARMS (H2020-ICT con número de contrato 644271).

Los autores agradecen la colaboración de todos los socios de ARCAS, que además de CATEC y la Universidad de Sevilla son: Centro Aeroespacial Alemán (DLR), Universidad de Nápoles y asociados (Universidad de Cassino y Universidad de Basilicata), CNRS (Laboratorio LAAS), Universidad Politécnica de Cataluña (IRI-CSIC como asociado), Alstom Inspection Robotics y Space Tech.

Referencias

1. F. Ruggiero, M. Trujillo, R. Cano, H. Ascorbe, C. Perèz, V. Lippiello, A. Ollero and B. Siciliano, A multilayer control for multirotor UAVs equipped with a servo robot arm, in *Submitted to IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seattle, WA, USA, **2015**.

2. G. Heredia, A. Jimenez-Cano, I. Sanchez, D. Llorente, V. Vega, A. J. Braga y A. Ollero, Control of a multirotor outdoor aerial manipulator, de *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Chicago (USA), **2014**.

3. Suseong Kim, Seungwon Choi and H. Jin Kim, Aerial Manipulation Using a Quadrotor with a Two DOF Robotic Arm, ***2013*** *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.*

4. A. Jimenez-Cano, J. Martin, G. Heredia, A. Ollero y R. Cano, Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks, de *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013)*, Karlsruhe (Germany), **2013**.

5. Daniel Mellinger, Quentin Lindsey, Michael Shomin and Vijay Kumar, Design, Modeling, Estimation and Control for Aerial Grasping and Manipulation, ***2011*** *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.*

6. Paul E. I. Pounds, Daniel R. Bersak, and Aaron M. Dollar, Grasping From the Air: Hovering Capture and Load Stability, ***2011*** *IEEE International Conference on Robotics and Automation.*