

MANIPULADOR AÉREO CON BRAZOS ANTROPOMÓRFICOS DE ARTICULACIONES FLEXIBLES

Alejandro Suárez Fernández-Miranda
Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, asuarezfm@us.es

Guillermo Heredia Benot, Aníbal Ollero Baturone
Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, guiller@us.es, aollero@us.es

Resumen

Este artículo presenta el primer robot manipulador aéreo con dos brazos antropomórficos diseñado para aplicarse en tareas de inspección y mantenimiento en entornos industriales de difícil acceso para operarios humanos. El robot consiste en una plataforma aérea multirrotor equipada con dos brazos antropomórficos ultraligeros, así como el sistema de control integrado de la plataforma y los brazos. Una de las principales características del manipulador es la flexibilidad mecánica proporcionada en todas las articulaciones, lo que aumenta la seguridad en las interacciones físicas con el entorno y la protección del propio robot. Para ello se ha introducido un compacto y simple mecanismo de transmisión por muelle entre el eje del servo y el enlace de salida. La estructura en aluminio de los brazos ha sido cuidadosamente diseñada de forma que los actuadores estén aislados frente a cargas radiales y axiales que los puedan dañar. El manipulador desarrollado ha sido validado a través de experimentos en base fija y en pruebas de vuelo en exteriores.

Palabras Clave: manipulación aérea, manipulador bi-brazo, diseño antropomórfico, deflexión articular.

1 INTRODUCCIÓN

Dentro de la robótica, el campo de la manipulación aérea tiene por objetivo desarrollar sistemas aéreos no tripulados (UAV's, *Unmanned Aerial Vehicles*) equipados con uno o múltiples brazos robóticos que proporcionen cierta destreza para la realización de tareas en lugares de difícil acceso o alto riesgo para humanos. Considérese por ejemplo la inspección y reparación de grietas en palas de aerogeneradores mediante cámaras, la detección y reparación de fugas de líquido o gas en tuberías de la industria química, la inspección por contacto en puentes, así como el mantenimiento de torres de alta tensión. La solución convencional planteada en estos escenarios consiste en el transporte y despliegue de operarios montados en grúas o colgados de arneses para alcanzar el espacio de trabajo. Este tipo de tareas, aun siendo de

corta duración, conllevan riesgo para los trabajadores y pueden suponer un coste significativo para las empresas debido al número de recursos involucrados, especialmente si se deben realizar periódicamente.

La manipulación aérea es un área de investigación muy reciente que ha centrado la atención de diversos grupos de investigación y empresas internacionales, en cuyo nacimiento ha jugado un importante papel el proyecto ARCAS [3] financiado por la Comisión Europea. Actualmente, los proyectos AEROARMS [1], financiado también por la Comisión Europea, y el proyecto AEROMAIN, en los cuáles se encuadra este trabajo, siguen contribuyendo de forma notable al campo de la manipulación aérea. El objetivo de estos proyectos es el desarrollo de sistemas robóticos con capacidades de manipulación y percepción avanzadas para la inspección y mantenimiento en entornos industriales. Las plataformas utilizadas son de tipo helicóptero o multirrotor, éstas en sus distintas variantes: quadrotor, hexarotor u octotoror. En [9], se presenta la integración de un robot industrial de siete grados de libertad en un helicóptero autónomo, mientras que en [14] se describe un helicóptero con manipulador flexible para el agarre y transporte de objetos. Se han desarrollado varios prototipos de manipuladores aéreos basados en plataforma de tipo quadrotor, integrando brazos articulados de dos, tres, cinco o seis grados de libertad [8][7][5][6]. En [10] se propone un dispositivo de pocos grados de libertad para cerrar una válvula mediante manipulación dual, y en [19] se presentó por primera vez un manipulador bi-brazo de tamaño humano, antecedente directo del que se presenta en este artículo. Recientemente se han presentado algunos prototipos de manipuladores flexibles para su aplicación en robótica aérea [4]. En [18] se analiza la interacción de una articulación flexible en contacto con el entorno. En [16] se demuestra la aplicación de la flexibilidad mecánica de la articulación del codo para la estimación del peso de los objetos y para la detección y reacción frente a colisiones, mientras que en [17] se amplía el trabajo anterior a la estimación y control de par y fuerza de contacto y a la localización de obstáculos con baja energía de impacto. Desde un punto de vista teórico, el modelado y control [11] de un robot de base flotante equipado con uno o más manipuladores

robóticos [13] es un problema complejo debido al acoplamiento dinámico entre la plataforma aérea y el manipulador, y al carácter intrínsecamente inestable de los vehículos aéreos de tipo multirrotor [12].

La principal aportación de este trabajo es presentar las características y experimentos de un manipulador aéreo equipado con dos brazos antropomórficos de cuatro grados de libertad diseñado para manipulación dual y desarrollado en el Grupo de Robótica, Visión y Control (GRVC) de la Universidad de Sevilla. Este robot es el primero de sus características desarrollado en el mundo. En la Figura 1 se muestra una imagen del manipulador realizando una operación de agarre con dos manos en vuelo en exteriores.



Figura 1: Manipulador aéreo bi-brazo realizando una operación de agarre en vuelo.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma. La Sección 2 describe el manipulador aéreo de brazos antropomórficos, planteando en la Sección 3 el modelo cinemático y dinámico de los brazos de articulaciones flexibles. Los modos de operación implementados se detallan en la Sección 4. En la Sección 5 se presentan los resultados experimentales, y las conclusiones en la Sección 6.

2 MANIPULADOR AÉREO CON BRAZOS ANTROMÓRFICOS

El manipulador aéreo desarrollado se muestra en la Figura 1. La plataforma aérea es un hexarotor del fabricante Drone Tools equipado con un ordenador Intel NUC donde se ejecuta el programa de control de los brazos y el módulo de visión, una cámara ZED para el guiado visual de los brazos, un enlace radio en la banda de 5.8 GHz, y los brazos antropomórficos con articulaciones flexibles desarrollado en el Grupo de Robótica, Visión y Control de la Universidad de Sevilla. Este manipulador bi-brazo ultraligero ha sido diseñado específicamente para su uso en aplicaciones de manipulación aérea en exteriores. Se introduce aquí el término ultraligero para destacar la diferencia de peso de estos brazos (1.3 kg en total) con respecto a los manipuladores “lightweight” (~15 kg por brazo) utilizados en la industrial (KUKA, DLR).

Los brazos han sido diseñados siguiendo un enfoque bioinspirado, eligiendo una configuración cinemática antropomórfica de cuatro grados de libertad (tres de hombro y codo), siendo además de tamaño humano. Esto permite replicar de forma inmediata e intuitiva los movimientos de un operador humano en el robot. Los actuadores utilizados son los servos Herkulex del fabricante coreano Dongbu Robot, modelos DRS-0101, y DRS-0201, mientras que la estructura ha sido fabricada en aluminio a partir de secciones de perfil plano de diferentes espesores. La Figura 2 muestra el manipulador con más detalle. Una de las principales características del diseño es la flexibilidad mecánica de todas las articulaciones. Un mecanismo de doble muelle con palanca ha sido integrado entre el eje del servo y el enlace de salida de cada articulación. Este mecanismo de transmisión elástica permite estimar y controlar el esfuerzo de cada articulación midiendo la deflexión de los muelles, lo que resulta de especial interés durante la interacción física del manipulador aéreo con el entorno. La rotación relativa del enlace de salida con respecto al eje del servo, denominada aquí como deflexión, es posible gracias a una pareja de cojinetes esféricos del fabricante igus® fijados a la estructura de aluminio. Por otra parte, se impuso como condición de diseño que los ejes de las cuatro articulaciones de cortasen en un punto, de forma que la resolución de la cinemática se simplificase y fuese analítica. El efector final consiste en una herramienta simple de agarre con un micro-ruptor frontal para detectar el contacto físico con los objetos.

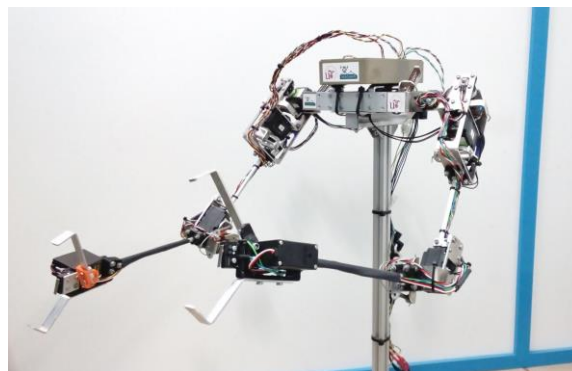


Figura 2: Manipulador antropomórfico bi-brazo de articulaciones flexibles.

Las especificaciones más destacadas del manipulador se recogen en la Tabla 1, mientras que en la Figura 3 se representa la arquitectura hardware/software. Aquí el componente principal es el gestor de tareas, el cuál implementa los modos de operación descritos en la Sección 4. La plataforma hexarotor proporciona una carga máxima de 2.5 kg, con un tiempo de vuelo en torno a 15 minutos llevando el manipulador bi-brazo.

Tabla 1: Especificaciones del manipulador bi-brazo

Peso total	1.3 [kg]
Capacidad carga	~0.2 [kg] cada brazo

Nº articulaciones	3 hombro + 1 codo
Dimensiones	Alcance máximo: 50 [cm] Separación brazos: 32 [cm]
Rango de rotación	$\pm 90, [-10, 90], \pm 90, \pm 120$ [°]
Par de bloqueo	24, 24, 12, 24 [kg·cm]
Deflexión máxima	± 15 [grados]

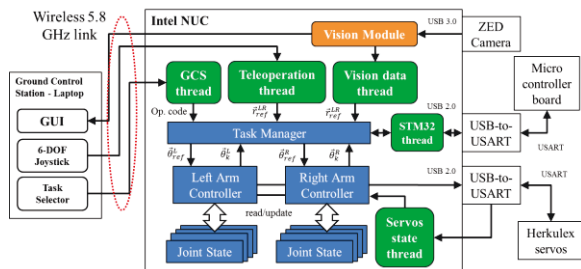


Figura 3: Arquitectura software y componentes del manipulador bi-brazo antropomórfico.

3 MODELO DEL MANIPULADOR

En esta sección se presenta el modelado geométrico y cinemático del manipulador antropomórfico bi-brazo, cubriendo también en parte el modelado dinámico. El modelo completo del manipulador aéreo está fuera del alcance de este trabajo.

La posición de una articulación flexible se determina a partir de tres variables relacionadas:

- La posición angular del eje del servo, θ_j^i
- La posición angular del enlace de salida, q_j^i
- El ángulo de deflexión, $\Delta\theta_j^i = q_j^i - \theta_j^i$

Se usará el superíndice $i = \{1, 2\}$ para indicar el brazo y el subíndice $j = \{1, 2, 3, 4\}$ para la articulación. El modelo cinemático se definirá a partir del ángulo q_j^i .

3.1 MODELO GEOMÉTRICO

Los sistemas de coordenadas, variables articulares, el criterio de signo asociado, las longitudes y vectores de posición del manipulador bi-brazo antropomórfico se han representado gráficamente en la Figura 4. En este modelo, L_1 y L_2 son las longitudes de los enlaces del brazo y antebrazo, mientras que D representa la separación entre los brazos. Se denotará por q_1^i, q_2^i, q_3^i y q_4^i al ángulo de rotación de las articulaciones del brazo i -ésimo siguiendo el orden: flexión-extensión (pitch), aducción-abducción (roll), rotación medial-lateral (yaw) de hombro, y flexión-extensión (pitch) del codo. El sentido de giro positivo se obtiene por la regla de la mano derecha, de forma que el pulgar apunta en la dirección positiva del eje de rotación y los las yemas de dedos indican el sentido positivo de giro. Las ecuaciones del modelo cinemático se referirán al sistema de ejes $\{X^i_0 Y^i_0 Z^i_0\}$ asociado a cada brazo. Por último, se denotará por r^i, r^i_{ref} y e^i a la posición del efector final, la posición de referencia, y el error de posición, respectivamente.

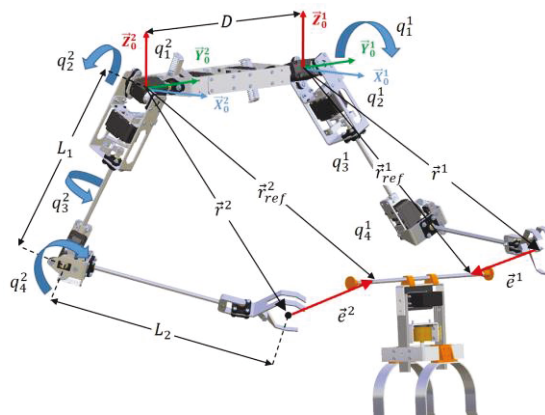


Figura 4: Modelo geométrico del manipulador de brazos antropomórficos. Vista renderizada.

3.2 MODELO CINEMÁTICO

Para la presentación del modelo cinemático directo e inverso se tendrá en cuenta el hecho de que ambos brazos son idénticos en términos de configuración cinemática y tamaño, por lo que las ecuaciones se referirán a un sistema de coordenadas generalizado $\{X^i_0 Y^i_0 Z^i_0\}$.

3.2.1. MODELO CINEMÁTICO DIRECTO

En el modelo cinemático directo, el espacio articular se transforma al espacio Cartesiano por medio de la función $F_i: \mathcal{R}^4 \rightarrow \mathcal{R}^3$. La posición del punto central de agarre r^i se calculará multiplicando las matrices de transformación de cada articulación, ${}^{j-1}_j T(q_j^i)$:

$$r^i(q^i) = F_i(q^i) = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \left(\prod_{j=1}^4 {}^{j-1}_j T(q_j^i) \right) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -L_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Las matrices de transformación vienen dadas por:

$${}^0_1 T_1(q_1^i) = \begin{bmatrix} c_1^i & 0 & s_1^i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_1^i & 0 & c_1^i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1_2 T_2(q_2^i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2^i & -s_2^i & 0 \\ 0 & s_2^i & c_2^i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2_3 T_3(q_3^i) = \begin{bmatrix} c_3^i & -s_3^i & 0 & 0 \\ s_3^i & c_3^i & 0 & 0 \\ 0 & s_2^i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3_4 T_4(q_4^i) = \begin{bmatrix} c_4^i & 0 & s_4^i & 0 \\ 0 & 1 & -s_4^i & 0 \\ -s_4^i & 0 & c_4^i & -L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde $c_j^i = \cos(q_j^i)$, y $s_j^i = \sin(q_j^i)$.

3.2.2. MODELO CINEMÁTICO INVERSO

La restricción de diseño de los brazos haciendo que los ejes de rotación de las articulaciones se corten en un punto permite obtener solución analítica para el modelo cinemático inverso. Sin embargo, la función $\Omega_i: \mathcal{R}^3 \rightarrow \mathcal{R}^4$ que permite obtener el valor de las variables articulares a partir de una posición deseada del efector final, presenta infinitas soluciones debido al grado de libertad redundante. El enfoque adoptado en este trabajo es fijar el valor de la articulación roll

del hombro, de forma que $q_2^i = \varphi_i$. El ángulo de giro de esta articulación se ajustará según la operación del brazo, como se verá en la Sección 4. Una vez fijado este ángulo, es posible llegar a una ecuación trigonométrica para calcular el ángulo pitch del hombro (solución omitida por espacio):

$$x^i \cdot \sin(q_1^i) + z^i \cdot \cos(q_1^i) = w_i \quad (3)$$

$$w_i = \frac{L_2^2 - (L_1^2 + x_i^2 + z_i^2) + 2 \cdot L_1 \cdot y_i \cdot \sin(q_2^i)}{2 \cdot L_1 \cdot \cos(q_2^i)} \quad (4)$$

Seguidamente, el ángulo yaw del hombro; esto es, la rotación en torno al enlace del brazo, es calculada:

$$q_3^i = \text{atan2}(a^i, b^i) \quad (5)$$

$$a^i = x_i \cdot s_1^i \cdot s_2^i + y_i \cdot c_2^i + z_i \cdot c_1^i \cdot s_2^i \quad (6)$$

$$b^i = x_i \cdot c_1^i - z_i \cdot s_1^i \quad (7)$$

Por último, la posición articular del codo se obtiene a partir de la posición cartesiana del efector final y de las longitudes de los dos enlaces:

$$q_4^i = -\cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}} \right) \quad (8)$$

3.3 MODELO DINÁMICO

Este apartado introduce brevemente el modelado de manipuladores robóticos de articulaciones flexibles. Para una explicación más en detalle se recomienda el artículo [2]. Como se indicó anteriormente, el ángulo de deflexión se define como la diferencia entre el ángulo del eje del servo y la posición angular del enlace de salida. El mecanismo de transmisión por muelle-palanca introducido en las articulaciones se asimilará a un amortiguador caracterizado por sus constantes de rigidez k_j^i y fricción d_j^i . Suponiendo que la deflexión es proporcional al par rotacional de la articulación, lo cuál es aceptable teniendo en cuenta la relación entre la compresión del muelle y la longitud de la palanca, se tiene que:

$$\tau_j^i = k_j^i \cdot \Delta\theta_j^i + d_j^i \cdot (\dot{q}_j^i - \dot{\theta}_j^i) \quad (9)$$

La derivación de las ecuaciones del modelo dinámico parte del Lagrangiano y de la ecuación generalizada para la fuerza y los pares, donde además de la energía cinética de los actuadores y de los enlaces de salida, se tiene en cuenta la energía potencial elástica de los muelles. Al final, es posible llegar a la formulación matricial típica con los términos de inercia, Coriolis y gravedad, solo que a diferencia de un manipulador de articulaciones rígidas, el modelo se descompone en

dos partes: una ecuación para la dinámica del motor y otra para la dinámica de los enlaces:

$$\mathbf{B}_i(\boldsymbol{\theta}^i)\ddot{\boldsymbol{\theta}}^i + \boldsymbol{\tau}^i = \boldsymbol{\tau}_m^i - \boldsymbol{\tau}_f^i \quad (10)$$

$$\mathbf{M}_i(\mathbf{q}^i)\ddot{\mathbf{q}}^i + \mathbf{C}_i(\mathbf{q}^i, \dot{\mathbf{q}}^i) + \mathbf{G}_i(\mathbf{q}^i) = \boldsymbol{\tau}^i + \boldsymbol{\tau}_{ext}^i \quad (11)$$

En las expresiones anteriores, \mathbf{B}_i y \mathbf{M}_i denotan las matrices generalizadas de inercia de los ejes de los servos y de los enlaces del brazo, respectivamente, \mathbf{C}_i es el vector de par asociado a fuerzas centrífugas y de Coriolis, mientras que \mathbf{G}_i es el par gravitatorio. El par generado por el motor, $\boldsymbol{\tau}_m^i$, se gasta en compensar la fricción de la reductora, $\boldsymbol{\tau}_f^i$, en acelerar el eje de salida del servo y en la transmisión de movimiento a los enlaces a través de los muelles, $\boldsymbol{\tau}^i$. Por último, $\boldsymbol{\tau}_{ext}^i$ representa el par de las articulaciones debido a fuerzas externas, típicamente fuerzas de contacto.

4 MODOS DE OPERACIÓN DEL MANIPULADOR

Esta sección describe algunas operaciones básicas que el manipulador implementa para poder llevar a cabo diferentes tareas de manipulación aérea que involucren el agarre o bien la instalación de sensores, instrumentos o cualquier otro dispositivo.

4.1 POSICIONES DE OPERACIÓN

El movimiento de los brazos robóticos instalados en la base de la plataforma aérea se verá restringido por el tren de aterrizaje y por obstáculos en el entorno. En primer lugar, durante las operaciones de despegue y aterrizaje, los brazos deberán estar en una posición tal que, tanto el codo como el efector final, queden por encima del plano del suelo, es decir, por encima del tren de aterrizaje. Atendiendo a la Figura 5, la forma más inmediata de elevar los brazos para alcanzar esta configuración es mediante la rotación de la segunda articulación del hombro (ángulo roll), y doblando el codo para contraer el antebrazo:

$$\mathbf{q}_{despegue}^{1,2} = \left[0 \quad \pm \frac{\pi}{2} \quad 0 \quad -\frac{\pi}{2} \right]^T \quad (12)$$

Puesto que la operación de aterrizaje resulta más crítica que la de despegue en términos de seguridad, es conveniente definir una posición de referencia de los brazos que permita pasar de forma rápida y fiable de la postura habitual de manipulación a la posición de despegue. Esta posición de operación, mostrada en la Figura 5, se ha definido para evitar que los brazos choquen entre ellos o con el tren de aterrizaje durante el movimiento de recogida. La posición articular es:

$$\mathbf{q}_{operación}^{1,2} = \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad -\frac{\pi}{2} \right]^T \quad (13)$$



Figura 5: Posición de despegue/aterriaje (izquierda) y posición de operación (derecha).

4.2 OPERACIÓN MANUAL

En ciertas aplicaciones será necesario que el operador del manipulador pueda guiar manualmente el efector final, por ejemplo para agarrar algún objeto o para interactuar con un dispositivo o sensor. Por ello, se ha desarrollado un modo de operación que permite desplazar el efector final de ambos brazos en el espacio cartesiano de forma simultánea utilizando un único joystick. El esquema de control implementado es el que se muestra en la Figura 6. El ratón de seis grados de libertad Space Navigator de 3DConnexion sirve de interfaz de control para el usuario, generando a su salida la referencia de velocidad cartesiana que, al ser integrada, pasa a ser una referencia incremental de posición. A ésta se le añade la posición actual del efector final calculada a partir del modelo cinemático directo descrito en la Sección 3.2. Las referencias de posición cartesiana se transforman seguidamente al espacio articular aplicando el modelo cinemático inverso. Los controladores de bajo nivel de ambos brazos se encargan de generar una trayectoria suave aprovechando el perfil de velocidad trapezoidal que cada servo genera internamente. Los tres grados de libertad de orientación del ratón permiten ajustar la posición relativa de un brazo respecto a otro. Esto es, lo que se controla es la orientación del segmento imaginario que une el efector final de ambos brazos, rotando entorno al punto medio de dicho segmento.

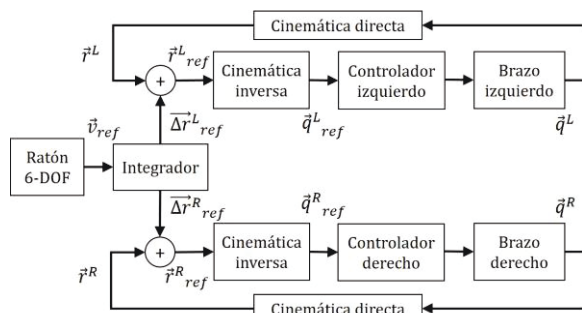


Figura 6: Esquema de guiado manual del efector final izquierdo y derecho con un único joystick de 6-DOF.

4.3 GUIADO VISUAL

El agarre de un objeto en vuelo realizado de forma manual por un operador en tierra puede ser inviable si la plataforma aérea se ve afectada por oscilaciones debido al viento o a otros efectos aerodinámicos y de

control. Téngase en cuenta que las operaciones de manipulación sobre base móvil requieren de un cierto nivel de coordinación, destreza y velocidad que los humanos no pueden alcanzar a no ser que se tengan un entrenamiento intensivo especializado. Por este motivo, se ha desarrollado en este trabajo un sistema de guiado visual para el agarre de un objeto con asas. El algoritmo de visión utilizado [15] proporciona los puntos de agarre 3D relativos a los ejes de la cámara, transformados luego al sistema de ejes de cada brazo. El método de guiado consiste en aproximar el efector final al respectivo punto de agarre con velocidad constante y siguiendo la dirección del vector de error, definido como:

$$e^i = r_{obj}^i - r^i \tag{14}$$

Aquí r^i y r_{obj}^i son la posición actual y objetivo dada por visión del efector final del i -ésimo brazo. En cada iteración del controlador, la referencia de posición se calculará de la siguiente forma:

$$r_{ref}^i = r^i + v \cdot T \cdot \frac{e^i}{\|e^i\|} + r_G^i \tag{15}$$

En la ecuación anterior, v es la velocidad deseada de aproximación al punto de agarre, T es el período de control, mientras que el término r_G^i compensa las deflexiones estáticas por gravedad. El esquema de control implementado es muy similar al descrito en la Figura 6: las referencias de posición cartesianas son transformadas a referencias articulares aplicando el modelo cinemático inverso. Luego, el controlador de cada brazo genera los comandos de movimiento que son enviados a cada uno de los servos.

4.4 AGARRE POR CONTACTO MECÁNICO

La fiabilidad de una operación de agarre puede ser incrementada incorporando mecanismos de detección de contacto, de forma que el efector final se cierre al producirse un cambio de nivel en un micro-ruptor. En la Figura 2 se puede ver este mecanismo instalado en la parte delantera del servo de la mano. No obstante, este modo de operación debe complementarse con el modo manual para abrir el efector final cuando sea conveniente.

5 RESULTADOS

5.1 GUIADO VISUAL Y AGARRE

El método de agarre descrito en la Sección 4.3 se ha evaluado experimentalmente en base fija antes de ser aplicado en vuelo (ver Sección 5.4). El objeto a coger era una caja de plástico con una barra circular de 8 mm de sección y 35 cm de largo instalada sobre ella a modo de asa. Los extremos de la barra se cerraron

con dos piezas cuadradas de plástico para evitar el deslizamiento. Se instaló una cámara ZED sobre la estructura de los hombros orientada 45 grados hacia abajo, proporcionando un campo de visión horizontal de 120 grados. El algoritmo de visión [15] utiliza un modelo del objeto basado en características visuales aprendido previamente para detectarlo y localizarlo. Los puntos de agarre sobre las asas se obtienen a partir del sistema de referencia asociado a la caja.

La trayectoria seguida por cada uno de los brazos, así como la referencia de control y la posición objetivo dada por el módulo de visión durante el experimento de guiado visual y agarre se representa en la Figura 7. Los brazos parten de la posición de operación dada por la ecuación (13), alcanzando el objetivo situado enfrente en tres segundos. Se impuso una velocidad deseada de $v = 0.2$ m/s, siendo el período de control de $T = 0.1$ segundos. Aunque la tasa de control pueda parecer baja, hay que tener en cuenta que se trata de una referencia de posición en un sistema mecánico, y que el controlador interno de cada servo se ejecuta a 100 Hz aproximadamente.

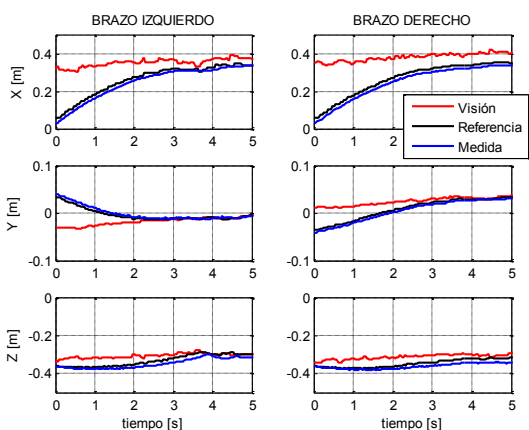


Figura 7: Trayectoria cartesiana del efector final en el experimento de agarre con realimentación visual.

El cierre del efector final en este experimento se hizo de forma manual utilizando los botones del ratón de seis grados de libertad Space Navigator, conmutando de abierto a cerrado con cada pulsación.

5.2 RESPUESTA A IMPACTO DE LAS ARTICULACIONES FLEXIBLES

El objetivo de este experimento es mostrar el efecto de las articulaciones flexibles cuando el efector final sufre el impacto de un objeto de 62 gramos de peso al caer desde una altura de 57 cm, lo que corresponde a una energía potencial de 0.35 J. En la Figura 8 se ha representado la aceleración del efector final, medida con un acelerómetro instalado en la base del mismo, junto con la medida de deflexión de la articulación de codo y hombro dada por los potenciómetros. Como

se ve, los muelles actúan como filtro paso-baja, de forma que las componentes de alta frecuencia de la aceleración no son transmitidas al eje del servo, lo que resulta conveniente para proteger al actuador.

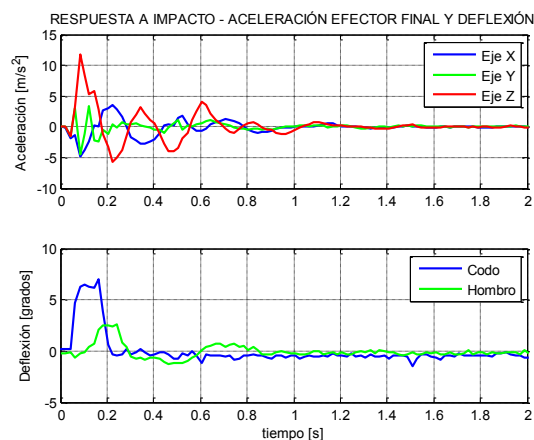


Figura 8: Respuesta a impacto del brazo izquierdo: aceleración del efector final y deflexión articular.

5.3 GUIADO MANUAL CON AGARRE EN CADENA CINEMÁTICA CERRADA

Este experimento describe una aplicación interesante de la flexibilidad articular mecánica en combinación con el guiado visual en condiciones de agarre. Nótese que si el punto de agarre del objeto coincide con la posición del propio efector final, el vector de error de la ecuación (14) representaría la deflexión mecánica en el espacio cartesiano del manipulador. Esto exige que la posición r^j se calcule teniendo en cuenta únicamente las posiciones articulares de los servos sin considerar la deflexión articular; es decir, que se trata de un manipulador rígido equivalente.

Cuando el modo de operación de guiado visual está activo, el efecto que se produce es el de un control de impedancia en el espacio cartesiano, ya que el objetivo de control es anular la deflexión (fuerza) mecánica de los muelles del manipulador. En la Figura 9 se puede ver la trayectoria del efector final del brazo izquierdo cuando el objeto agarrado es guiado manualmente, primero de arriba abajo (eje Z), luego de izquierda a derecha (eje Y), con pequeños desplazamientos en el eje X. Lo que ocurre es lo siguiente. El manipulador se encuentra inicialmente agarrando el objeto sin que se aplique ninguna fuerza externa sobre él, por lo que $e^j = 0$ y la deflexión será nula. En un momento dado, el objeto es empujado, lo causa la deflexión instantánea de las articulaciones. El módulo de visión mide un desplazamiento del punto de agarre (el cual coincide con el efector final) con respecto al instante anterior, por lo que el vector de error e^j deja de ser nulo. Entonces el método de guiado descrito en la Sección 4.3 actúa sobre los brazos para corregir esta desviación, haciendo que la

deflexión tiende a cero y facilitando el guiado de los brazos mientras agarran el objeto.

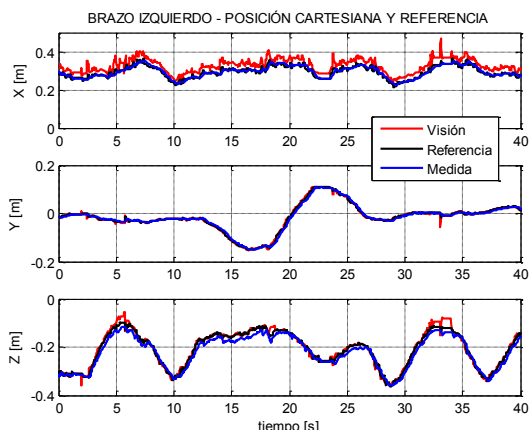


Figura 9: Posición del efector final izquierdo (azul) y del punto de agarre dado por visión (rojo). El brazo sigue el objeto agarrado cuando es desplazado.

5.4 EXPERIMENTOS EN VUELO

El manipulador aéreo de brazos antropomórficos fue evaluado en un experimento de vuelo en exteriores cuyo objetivo era coger un instrumento de inspección instalado sobre una tubería de PVC controlando los dos brazos con el algoritmo de guiado visual descrito en la Sección 5.1. Una vez agarrado, el instrumento se lleva hasta la zona de recogida donde se suelta en una caja, operando los brazos manualmente con el método presentado en la Sección 4.2. Las fases del experimento se han representado en la Figura 10 y en la Figura 11. El manipulador parte de la posición de despegue con los brazos recogidos por encima del suelo en la configuración dada por la Ecuación (12). Una vez la plataforma entra en el espacio de trabajo, los brazos pasan a la posición de operación dada por la Ecuación (13). Seguidamente se activa el modo de guiado visual de los brazos mientras el piloto del UAV acerca la plataforma a la tubería sobre la que está instalado el objeto. Una vez los brazos consiguen agarrar el objeto por sus asas, por seguridad los brazos se llevan de nuevo a la posición de operación. El UAV se guía entonces hacia la zona en la que se depositará el instrumento, operando los brazos con el ratón. Por razones de seguridad, en los experimentos se dispuso una cuerda pasante por polea por encima de la plataforma aérea para que al tirar de ella se evitase el impacto en caso de fallo, sin que afectase de forma significativa a la dinámica del sistema.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado la viabilidad de los robots aéreos con dos brazos robóticos aplicados a la manipulación dual en vuelo, presentando un sistema

compuesto por una plataforma hexarotor equipada con dos brazos antropomórficos de articulaciones flexibles. Las principales características de los brazos son el bajo peso (1.3 kg), la capacidad de deflexión articular y la robustez mecánica. El artículo cubre el modelado cinemático, introduciendo la dinámica del manipulador de articulaciones flexibles, así como los modos de operación de los brazos. Los experimentos realizados demuestran que la deflexión mecánica no sólo aumenta la seguridad en las interacciones físicas con el entorno, sino que amplía las capacidades del manipulador, permitiendo la estimación y control de fuerzas de contacto o la detección de colisiones.

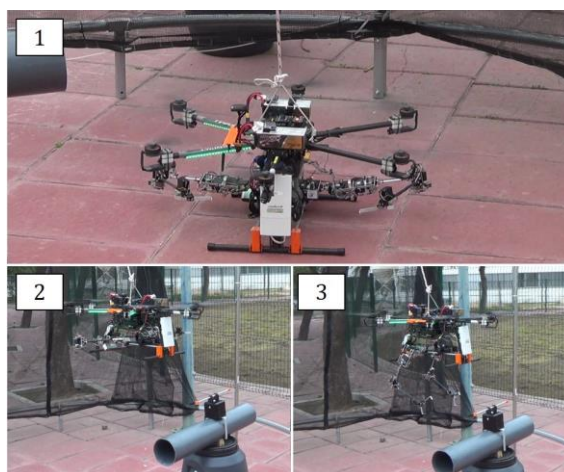


Figura 10: Despegue del manipulador aéreo (1) y transición de posición recogida (2) a operación (3).



Figura 11: Experimento de agarre: aproximación (1), agarre (2), recuperación (4) y transporte (4).

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el proyecto Español MINECO Retos AEROMAIN (DPI2014-5983-C2-1-R) así como por el proyecto AEROARMS (AERial RObotic system integrating multiple ARMS and advanced manipulation capabilities for inspection and maintenance), número de contrato 644271. La tesis de Alejandro Suárez está financiada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte a través del programa FPU.

Referencias

- [1] AEROARMS Project: Aerial RObotic system integrating multiple ARMS and advanced manipulation capabilities.
- [2] Albu-Schäffer, A., Ott, C., & Herzinger, G. (2007). A unified passivity-based control framework for position, torque and impedance control of flexible joint robots. *The International Journal of Robotics Research*, 26(1), 23-39.
- [3] ARCAS Project: Aerial Robotics Cooperative Assembly System.
- [4] Bartelds, T., Capra, A., Hamaza, S., Stramigioli, S., & Fumagalli, M. (2016). Compliant aerial manipulators: Toward a new generation of aerial robotic workers. *IEEE RAL*, 1(1), 477-483.
- [5] Bellicoso, C. D., Buonocore, L. R., Lippiello, V., & Siciliano, B. (2015, June). Design, modeling and control of a 5-DoF light-weight robot arm for aerial manipulation. In *Control and Automation (MED)*, 2015 23th Mediterranean Conference on (pp. 853-858). IE.
- [6] Cano, R., Pérez, C., Pruano, F., Ollero, A., & Heredia, G. (2013). Mechanical design of a 6-DOF aerial manipulator for assembling bar structures using UAVs. In *2nd RED-UAS 2013 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems*.
- [7] Jimenez-Cano, A. E., Martin, J., Heredia, G., Ollero, A., & Cano, R. Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2013 IEEE International Conference on (pp. 4916-4921).
- [8] Kim, S., Choi, S., & Kim, H. J. Aerial manipulation using a quadrotor with a two dof robotic arm. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2013 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 4990-4995).
- [9] Kondak, K., Huber, F., Schwarzbach, M., Laiacker, M., Sommer, D., Bejar, M., & Ollero, A. Aerial manipulation robot composed of an autonomous helicopter and a 7 DoF industrial manipulator. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2014 IEEE Int. Conf on (pp. 2107-2112).
- [10] Korpela, C., Orsag, M., & Oh, P.. Towards valve turning using a dual-arm aerial manipulator. In *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, 2014 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 3411-3416).
- [11] Mellinger, D., Lindsey, Q., Shomin, M., & Kumar, V. (2011, September). Design, modeling, estimation and control for aerial grasping and manipulation. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2011 IEEE/RSJ Int. Conference on (pp. 2668-2673). IEEE.
- [12] Orsag, M., Korpela, C., & Oh, P. (2013). Modeling and control of MM-UAV: Mobile manipulating unmanned aerial vehicle. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 1-14.
- [13] Papadopoulos, E., & Moosavian, S. A. A. (1994). Dynamics and control of space free-flyers with multiple manipulators. *Advanced robotics*, 9(6), 603-624.
- [14] Pounds, P. E., Bersak, D. R., & Dollar, A. M. (2011, May). The Yale aerial manipulator: grasping in flight. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2011 International Conference on (pp. 2974-2975). IEEE.
- [15] Ramon Soria, P., Arrue, B. C., & Ollero, A. (2017). Detection, Location and Grasping Objects Using a Stereo Sensor on UAV in Outdoor Environments. *Sensors*, 17(1), 103.
- [16] Suarez, A., Heredia, G., & Ollero, A. (2015) Lightweight compliant arm for aerial manipulation. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015 IEEE/RSJ Int. Conference on (pp. 1627-1632).
- [17] Suarez, A., Heredia, G., & Ollero, A. Lightweight compliant arm with compliant finger for aerial manipulation and grasping. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016 IEEE/RSJ International Conference on.
- [18] Yüksel, B., Mahboubi, S., Secchi, C., Bühlhoff, H. H., & Franchi, A. (2015, May). Design, identification and experimental testing of a light-weight flexible-joint arm for aerial physical interaction. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2015 IEEE Int. Conf. on (pp. 870-876). IEEE.
- [19] Youtube: "AEROARMS - Entwicklung des ersten Flug-Roboters | Automatica 2016".