



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SEVILLA

TRABAJO FIN DE MÁSTER:

**Diseño mecánico de un manipulador aéreo de 6 GDL
para la construcción de estructuras de barras con UAVs**

Realizado por

Raúl Cano Bazaga

para la obtención del título de Máster en Automática, Robótica y Telemática.

Tutor del Trabajo:

Dr. D. Guillermo Heredia Benot

Sevilla, 27 de Noviembre de 2013

Mi más sincero agradecimiento a D. Guillermo Heredia Benot por la paciencia y dedicación que ha tenido conmigo durante la realización de este trabajo (y siempre), así como a D. Aníbal Ollero Baturone, un auténtico gurú del que procuro aprender. A D. Carlos Pérez Martínez y al Centro Tecnológico FADA-CATEC, por permitirme y animarme a realizar este trabajo en el contexto del proyecto europeo ARCAS. A mis becarios Francisco Pruaño, José M^a Pereira, Ismael Timón y Juanjo Perales, que lo dieron todo. A José M^a Salinas, José M^a Barrientos y Allan Anderson, que se lo curraron. A mis compañeros Joserra, Héctor, Virginia, Álvaro, Jorge, Nico, Rosario, Amadís, Sergio, Mariluz, Carlos, Miguel Ángel, Antonio y Santos, que me ayudaron cuanto pudieron. A mis amigos Jesús Martín y José Manuel Recio, dos ingenieros extraordinarios que siempre estuvieron ahí cuando los necesité. Y por último, pero en el lugar más importante, quiero agradecer a mi familia el apoyo que desde siempre me han brindado. Gracias a todos.

Índice

1. Introducción	2
2. Estado del Arte sobre Manipuladores Aéreos.....	3
3. Prototipos y primeras pruebas.....	17
4. Definición de la plataforma aérea y la carga del manipulador	23
5. Arquitectura	25
5.1 Análisis de funcionamiento	25
5.2 Estudio de manipulabilidad	29
5.3 Evaluación previa de la motorización	33
6. Diseño	35
6.1 Base	36
6.2 Brazo.....	36
6.3 Efector Final	39
7. Modelos para el Control	40
7.1 Modelo Cinemático Directo	40
7.2 Modelo Cinemático Inverso	41
7.3 Modelo Dinámico	43
8. Conclusiones.....	44

1 Introducción

En los últimos años se ha progresado de forma significativa en la investigación y desarrollo de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para realizar tareas de manipulación aérea. Aunque la manipulación en tierra y la aérea comparten muchas características, esta última posee ciertas peculiaridades que justifican un estudio particular.

Recientemente, el proyecto europeo FP7 ARCAS (*Aerial Robotics Cooperative Assembly System*) ha propuesto el desarrollo de un sistema de robots aéreos para la construcción cooperativa de estructuras de barras. En este contexto, se ha considerado la utilización de un manipulador robótico que permita capturar, transportar y ensamblar estas barras, y que sea embarcable en un UAV de ala rotatoria. El presente Trabajo Fin de Máster tiene por objeto el diseño mecánico de dicho manipulador.

En el siguiente capítulo se presenta el estado del arte sobre manipuladores aéreos, haciendo especial énfasis en los aspectos más relacionados con el funcionamiento y la estructura mecánica de los manipuladores existentes. En el capítulo tercero se describen los dos prototipos de manipulador construidos, antes de abordar el diseño definitivo, y las pruebas realizadas con éstos para obtener experiencia acerca de la problemática propia de la manipulación aérea y su influencia en cuestiones de diseño. En el capítulo cuarto se presentan la plataforma aérea en la que se instalará el manipulador a diseñar y las barras que constituirán su carga.

El capítulo quinto se dedica a la definición de la arquitectura mecánica del manipulador, que se fundamenta en un análisis exhaustivo de su funcionamiento, un estudio del grado de manipulabilidad de las diferentes opciones posibles y una evaluación previa de la motorización requerida. El capítulo sexto se destina a la descripción del diseño mecánico del manipulador a partir de la arquitectura elegida.

Finalmente, en el capítulo séptimo se calculan los modelos cinemáticos directo e inverso necesarios para el control del manipulador, y se proporcionan el conjunto de datos básicos necesarios para formular el modelo dinámico. El octavo y último capítulo se destina a las conclusiones.

2 Estado del Arte sobre Manipuladores Aéreos

La Manipulación Aérea es una disciplina de la Robótica que se ha desarrollado ampliamente en esta última década. La popularización de los UAVs, y los primeros éxitos en la ejecución con plataformas de este tipo de tareas sin contacto físico, tales como la monitorización o las comunicaciones, ha propiciado sin duda que organismos de investigación de todo el mundo se hayan lanzado a trabajar en el desarrollarlo de plataformas que sí realizan ya tareas que involucran contacto y actuación sobre objetos del entorno.

Existen multitud de aplicaciones de la Manipulación Aérea, tales como el transporte y despliegue de cargas, la toma de muestras, el agarre en vuelo o la construcción de estructuras, entre otras. Cada uno de estos usos requiere del empleo de una plataforma aérea particular, habitualmente de ala rotatoria por su capacidad para hacer vuelo a punto fijo, y de algún elemento de manipulación, como garras, brazos u otras estructuras.

En este apartado se pretende realizar una revisión de los manipuladores aéreos diseñados, fabricados y ensayados recientemente tanto en EE.UU. como en Europa, con el fin de contar con una sólida base conceptual para afrontar el diseño mecánico del manipulador objeto del presente trabajo. Por lo tanto, se ha hecho especial énfasis en los aspectos más relacionados con el funcionamiento y la estructura mecánica de los desarrollos existentes, dejando a un lado consideraciones de carácter más electrónico o de control.

Desde un punto de vista cronológico, los desarrollos para manipulación aérea han evolucionado desde pequeñas garras con escasa movilidad, que se incorporaban bajo la plataforma para transportar objetos de poco peso y reducido tamaño, hasta manipuladores multi-articulados, que permiten acceder a un mayor rango de aplicaciones. El aumento de articulaciones en el manipulador se ha visto favorecido tanto por los progresos en su control, como por la reciente salida al mercado de nuevas plataformas aéreas de gran potencia, para las que las restricciones de peso, aunque importantes, han dejado de suponer una limitación crítica.

Este estado del arte se ha dividido, por claridad de exposición, en dos partes diferenciadas. La primera de ellas se centra en los manipuladores especialmente diseñados para

integrarlos en helicópteros autónomos. Estas plataformas tienen como ventaja principal su gran capacidad de carga y su robustez frente a perturbaciones externas como el viento, por lo que pueden asumir a bordo manipuladores más pesados destinados frecuentemente a aplicaciones de transporte y despliegue de cargas en exteriores.

En segundo lugar, se tratan los manipuladores concebidos para ser instalados en plataformas ligeras tipo quadrotor. Estas últimas, generalmente más sencillas e inocuas que los helicópteros, pueden emplearse en tareas de manipulación testeables en escenarios *indoor*. Además, por resultar más económicas, resultan apropiadas para actuaciones difíciles que impliquen un mayor riesgo de accidente.

Manipulación con helicópteros autónomos

En EE.UU., destaca principalmente un proyecto desarrollado por la **Universidad de Yale** para la captura de objetos en tierra desde un helicóptero controlado por un operador humano [1]. La plataforma elegida para los experimentos es el helicóptero eléctrico *T-Rex 600 ESP (Align RC)*, que se muestra en la Fig. 1, con una capacidad de carga de 1,8Kg. Para su estabilización se usa un sistema de control comercial *Helicommand (Captron)*, que regula la altitud con sensores inerciales y compensa la deriva con un sistema óptico.



Fig. 1. Manipulador Aéreo haciendo hovering con una carga de peso de 900g

El efector final consiste en una pinza específicamente desarrollada que se muestra en la Fig. 2. El diseño de la pinza, con menos actuadores que Grados De Libertad (GDL), permite un buen agarre de la carga debido a que, una vez sujeta ésta con los eslabones más cercanos a ella, el resto de eslabones pueden adaptarse pasivamente a su forma. La pinza está accionada por dos servomotores de radiocontrol *HSR-5990TG (Hitec)* que operan en paralelo y están controlados por un microprocesador a bordo. El montaje completo de la pinza, incluyendo los servos, las baterías y la transmisión tiene un peso algo menor de 750g.

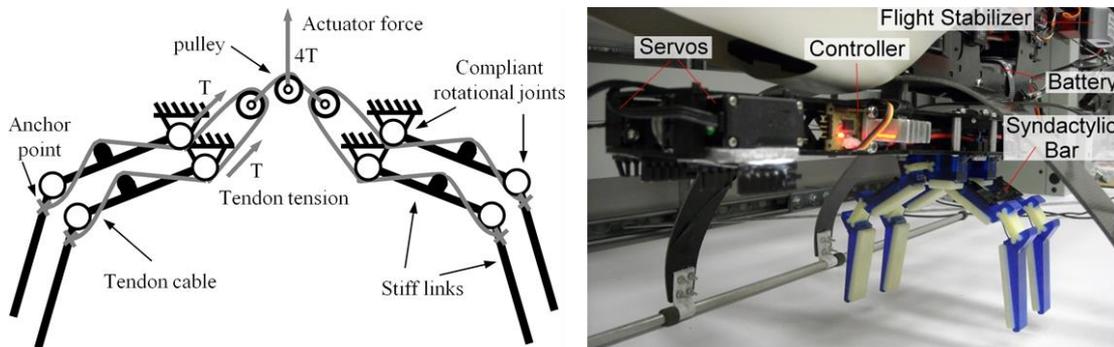


Fig. 2. Esquema mecánico de la pinza (izq.) y pinza instalada bajo el helicóptero entre los skids de aterrizaje (der.)

Se realizaron experimentos para comprobar diversos aspectos de la funcionalidad del sistema: la precisión de la plataforma en el aterrizaje, la capacidad del efector final para agarrar variedad de objetos, así como su fiabilidad para coger un mismo objeto repetidamente (Fig. 3). En este sentido, se midió un error medio en el aterrizaje de unos 64mm con una desviación estándar de 55mm para una muestra estadística de 49 intentos; se demostró que el sistema era capaz de agarrar una gran diversidad de objetos, incluyendo bloques, bolas, botellas y cilindros, en el rango entre 160 y 900g; y se encontró que los objetos con formas más complejas eran bien atrapados en el 67% de las ocasiones, mientras que los más sencillos eran atrapados correctamente el 100% de las veces.



Fig. 3. Imagen tomada desde una cámara a bordo para medir la precisión en el aterrizaje (izq.), diversos objetos para comprobar la capacidad de adaptación de la pinza en el agarre (cen.) y trayectoria de vuelo del helicóptero para la captura de la carga (der.)

En Europa, el proyecto FP6 **AWARE** (*Autonomous self-deploying and operation of Wireless sensor-actuator networks cooperating with AeRial objEcts*) desarrolló un sistema para la cooperación de robots aéreos con una red inalámbrica de sensores/actuadores en tierra [2]. El proyecto conseguía, en primer lugar, el establecimiento de la red de sensores en tierra usando helicópteros, como el de la Fig. 4, que de forma autónoma transportaban los nodos y los lanzaban en los lugares asignados. Esta aplicación resulta especialmente relevante en entornos naturales, sin una infraestructura preexistente, o urbanos donde la infraestructura ha sido dañada o destruida.

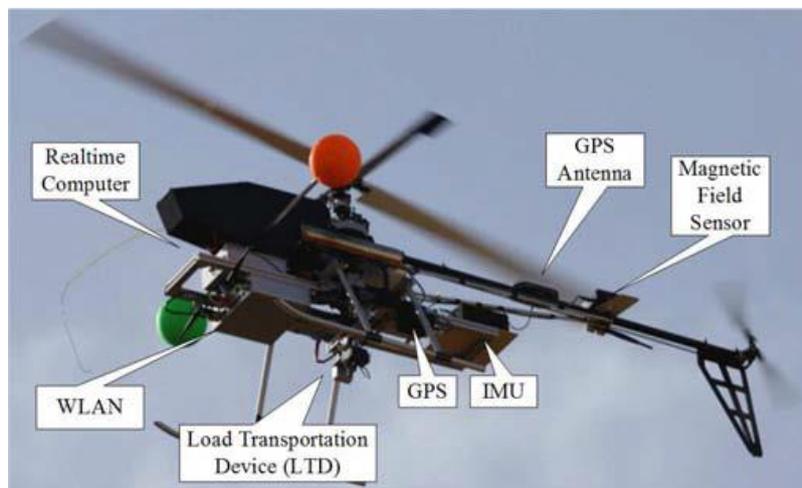


Fig. 4. Helicóptero TUB-H usado en el proyecto AWARE

El sistema de lanzamiento de cargas, desarrollado por el *Technische Universität Berlin*, se muestra en la Fig. 5. La funcionalidad de este sistema es similar a la de las máquinas expendedoras tipo *vending*: una anilla metálica se amarra a la carga mediante un peque-

ño cable y también se inserta en un muelle de acero. La rotación del muelle en sentido horario desplaza la anilla, y por tanto la carga, y permite situarla sobre la longitud el muelle en el lugar que se desee. Durante la maniobra de lanzamiento, el muelle gira en sentido anti horario y va soltando cada una de las cargas en el orden contrario en que fueron introducidas en el muelle. Este procedimiento permite, por tanto, el lanzamiento ordenado de varios objetos desde el helicóptero.

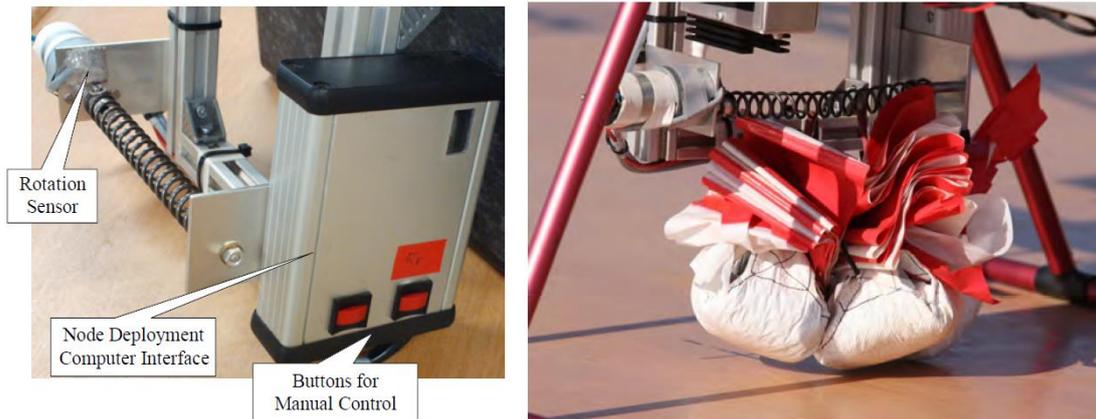


Fig. 5. Diferentes componentes del sistema de lanzamiento de carga (izq.) y sistema cargado con sensores (der.)

El proyecto desarrolló asimismo nuevas técnicas de control para el transporte de cargas mediante helicópteros autónomos, realizándose por primera vez en el mundo el transporte de forma cooperativa con múltiples robots. La carga, que un único helicóptero no era capaz de transportar debido a restricciones de capacidad, se suspendía de tres helicópteros mediante cuerdas. En concreto, esta última demostración, que se muestra en la Fig. 6, consistió en el transporte y lanzamiento de la carga sobre la parte superior de una estructura de 12m de altura. El experimento fue realizado con vientos de más de 35km/h y se consiguió una precisión en el posicionamiento de la carga de 0,5m.



Fig. 6. Transporte de carga suspendida mediante cuerdas con un solo UAV (izq.) y con múltiples (der.)

El sistema de transporte de la carga, especialmente diseñado para suspender ésta mediante cuerdas desde uno o varios helicópteros, se muestra en la Fig. 7. El sistema está formado por una junta Cardan, con un encóder magnético conectado a cada eje, sobre la que se instala un sensor de fuerza y el mecanismo para el amarre de la cuerda. Este mecanismo se compone de un perno insertado en un tubo y fijado a él mediante un pasador. Cuando este último se saca de su alojamiento, desplazándolo mediante un pequeño motor, el perno se sale del tubo y la carga se suelta. Los encóders magnéticos permiten medir la orientación relativa de las cuerdas respecto del fuselaje del UAV. Con esta información y la medida de la tensión en la cuerda, es posible calcular las fuerzas y momentos que la carga transmite al UAV.

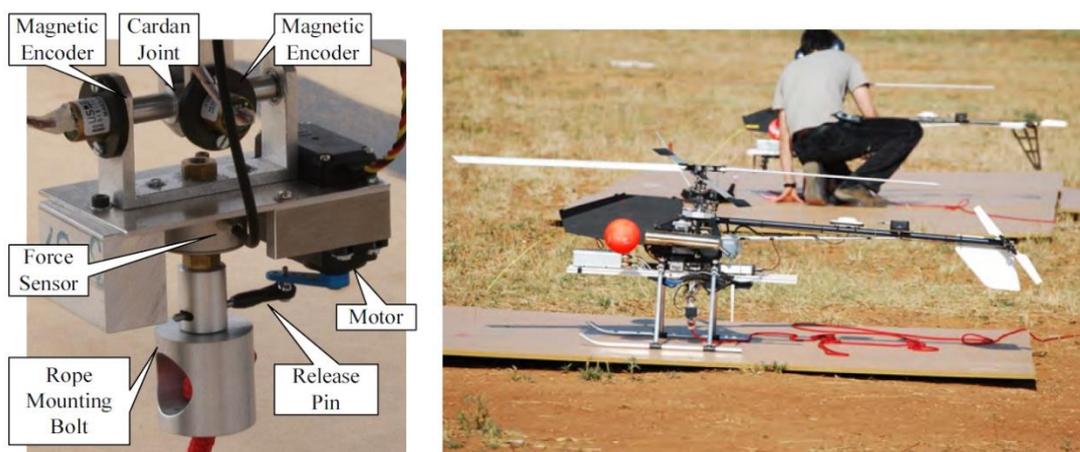


Fig. 7. Diferentes componentes del sistema de transporte de carga (izq.) y helicóptero equipado con dicho sistema, situado en el tren de aterrizaje

Más recientemente, el proyecto FP7 **PLANET** (*Platform for the Deployment and Operation of Heterogeneous Networked Cooperating Objects*), que de cierta forma continúa los trabajos comenzados en el proyecto AWARE, ha presentado algunos resultados en relación con el posicionamiento preciso y la retirada de nodos en redes de sensores [3]. En concreto, se han realizado experimentos *outdoor* para atrapar desde un helicóptero autónomo objetos que se encuentran en el suelo. El helicóptero va equipado con una mano mecánica montada sobre una junta Cardan que compensa los movimientos del helicóptero según los ángulos *pitch* y *roll*. Para la navegación, se usa una GPS diferencial y una IMU para la estimación de la orientación. La estimación de la posición de la carga respecto al helicóptero se realiza mediante un sistema de procesamiento de imágenes que se encuentra a bordo. En el experimento mostrado en la Fig. 8, el helicóptero atrapa un objeto pegado al suelo con cinta adhesiva. La interacción genera fuerzas y pares sobre el helicóptero que el sistema de control es capaz de compensar satisfactoriamente.



Fig. 8. Experimento *outdoor* para atrapar desde un helicóptero autónomo objetos que se encuentran en el suelo.

Actualmente, el proyecto FP7 **ARCAS** también ha hecho progresos en cuanto a la manipulación aérea [4]. A bordo de un helicóptero autónomo se ha incorporado el brazo robótico *Light Weight Robot* (LWR), mostrado en la Fig. 9, desarrollado conjuntamente por la empresa KUKA y el centro de investigación alemán DLR. Los primeros análisis han demostrado que un control completamente desacoplado del helicóptero y el manipulador es problemático, pues puede dar lugar a oscilaciones de baja frecuencia no amortiguadas. Resulta por tanto necesario una integración, al menos en el nivel cinemático, entre ambos controladores.



Fig. 9. Helicópteros autónomos con el brazo LWR III KUKA-DLR

Adicionalmente, se han realizado experimentos, para atrapar una barra en tierra desde el helicóptero usando el LWR (Fig. 10). Este brazo, con unos 15kg de peso y una capacidad de carga de unos 7kg, posee 7 GDL sensorizados en fuerza. Para evitar las oscilaciones de baja frecuencia antes descritas, se ha desarrollado un sistema de control específico que acopla en el nivel cinemático el control del helicóptero y el manipulador, y que permite mover el centro de gravedad (CDG) de este último únicamente en el plano vertical del helicóptero.



Fig. 10. Experimento para atrapar una barra en tierra con un helicóptero autónomo y el manipulador LWR, usando control por visión

Manipulación con quadrotor y otras plataformas

Diversas universidades de EE.UU. han trabajado en proyectos relacionados con la manipulación aérea desde quadrotors. Son conocidos los trabajos de la **Universidad de Drexel** en el campo de los manipuladores hiper-redundantes. En [5], se construye un manipulador de este tipo con 9 GDL a partir de la concatenación de servomotores comerciales *Dynamixel (Robotis)* unidos por herrajes. El efector final consiste en una pinza especialmente diseñada con 2 GDL y un solo grado de control. Un único servomotor *Dynamixel* gestiona la apertura y cierre de la pinza, mientras que un mecanismo de muelles permite que sus dedos articulados se adapten pasivamente a la forma del objeto atrapado. Tanto el manipulador como el efector se muestran en la Fig. 11.

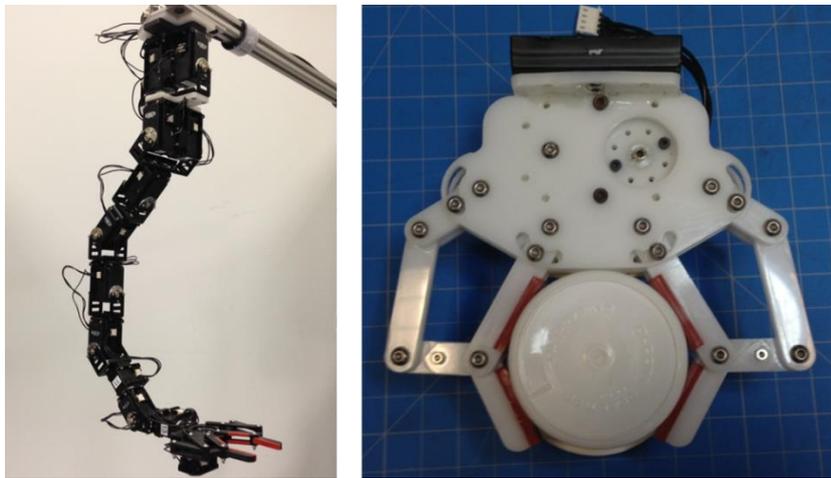


Fig. 11. Manipulador hiper-redundante diseñado para instalarlo en un UAV (izq.) con un efector tipo pinza (der.)

Una aplicación del manipulador redundante es su uso para interactuar con un objeto mediante toda su estructura, en vez de servir únicamente para posicionar el efector final (Fig. 12 (izq.)). Para realizar esta función es necesario un control híbrido posición-fuerza: además de la consigna de posición, los pares comandados a cada servo permiten a los eslabones presionar contra los objetos de su entorno. La existencia de 9 GDL en el manipulador hace posible que éste pueda ser usado de la manera descrita, lo cual es algo que los manipuladores de 6 o 7 GDL no pueden hacer, incluso aunque empleasen para ello los GDL de la plataforma aérea en la que se encuentran instalados. Tal forma de manipulación amplía la tipología de objetos que pueden ser capturados y eventualmente puede proporcionar la capacidad para realizar *perching*.

Otra demostración de la capacidad de un manipulador hiper-redundante es su uso para recoger bloques insertados en un eje para introducirlos en el eje vecino (Fig. 12 (der.)). La ejecución de esta operación requiere del conocimiento previo de las posiciones de los ejes de origen y destino, así como de la altura de los ejes. De esta forma, pueden calcularse una serie de puntos de paso que sirvan de referencia en las distintas etapas del proceso.

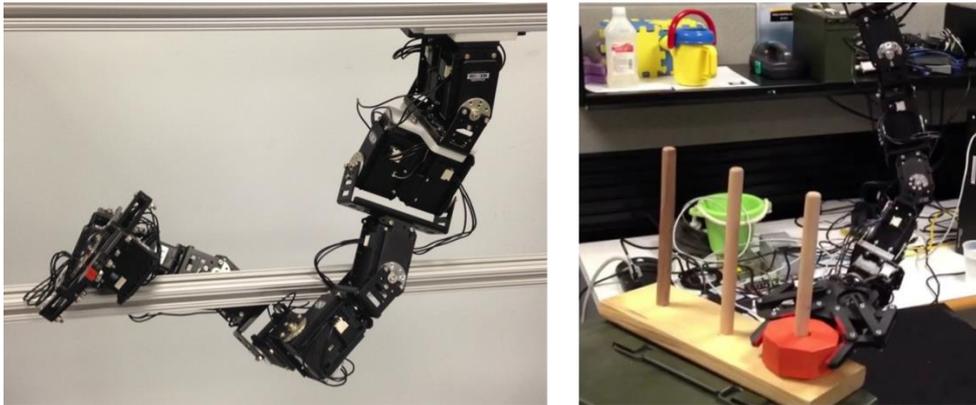


Fig. 12. Manipulador hiper-redundante utilizado para interactuar con el entorno (izq.) y para transferir un bloque entre distintas posiciones (der.).

La **Universidad de Pensilvania** cuenta también con diversos trabajos en el campo de la manipulación aérea con quadrotors. En [6], se investigan sistemas en los que grupos de éstos construyen una estructura tridimensional a partir de pequeños componentes con forma de viga. Para la validación experimental de los trabajos desarrollados se emplean quadrotors *Hummingbird* (*Ascending Technologies*) como plataforma aérea. Estos quadrotors pesan unos 500g, incluyendo la batería, y tienen una autonomía sin cargas adicionales de 20min. La carga de pago máxima es de 500g. Cada uno de los quadrotors está equipado con una pinza instalada en su parte inferior, especialmente diseñada para atrapar, transportar y ensamblar los elementos de construcción mencionados (Fig. 13). Esta pinza posee un solo GDL que consiste en un par de garras accionadas por un sencillo mecanismo actuado mediante un servomotor. El material empleado para su fabricación es una resina acrílica con una lámina de espuma en algunos lugares para incrementar la fricción.

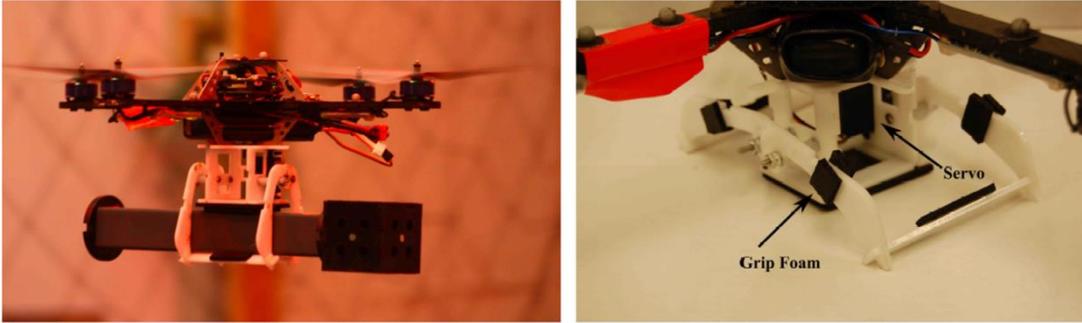


Fig. 13. Quadrotor transportando una unidad básica de construcción (izq.) y efecto final tipo pinza (der.)

Con este elemento de manipulación se realizan experimentos para construir estructuras empleando varios quadrotors trabajando en paralelo, como se muestra en la Fig. 14. Para facilitar la inserción de los elementos de construcción, éstos se dotan de pequeños imanes. Se desarrollan algoritmos para la evitación de colisiones y se estudia la influencia del número de quadrotors utilizados para optimizar los tiempos de trabajo.

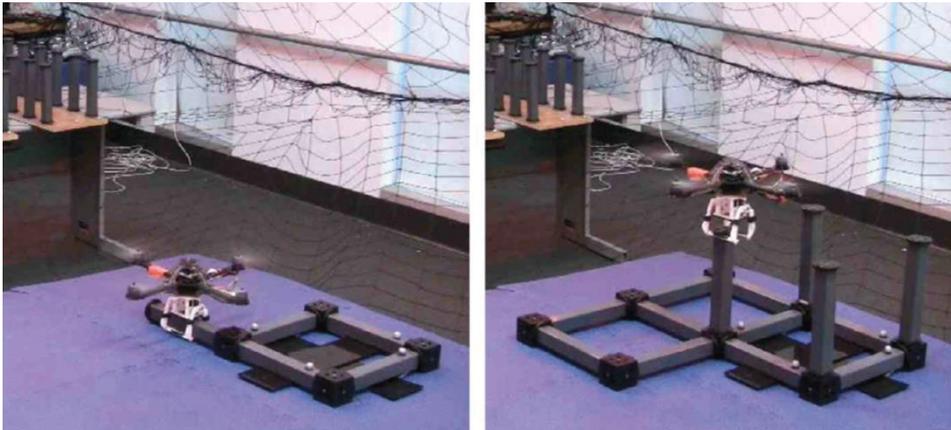


Fig. 14. Ensamblaje horizontal (izq.) y vertical (der.) de componentes

Por otra parte, en [7] se exploran los retos asociados a la captura de objetos con un quadrotor que se desplaza respecto a él a una gran velocidad. Para ello se emplea un efector tipo pinza con tres dedos actuados por un único servomotor. Los dedos se construyen con plástico ABS cortado por láser y se cubren con *Dycem*, una goma de alta fricción que mejora el agarre. Aunque el diseño realizado facilita la captura de objetos con formas arbitrarias, por sí solo no puede conseguir que los dedos se cierren suficientemente rápido sobre la carga a atrapar si el quadrotor está en movimiento rápido. Es necesario reducir la velocidad relativa entre la pinza y el objeto. Usando como inspiración la for-

ma en que el águila pliega sus patas hacia atrás justo antes de la captura de su presa con las garras, se diseña y fabrica un brazo de un solo GDL que también rota en el momento previo a la captura y consigue así disminuir la velocidad relativa (Fig. 15).



Fig. 15. Comparativa entre la forma de atrapar presas de un águila y la captura de objetos por un quadrotor moviéndose a 3m/s

Buscando formas alternativas de realizar la captura de objetos con el quadrotor, en [8] se analiza un mecanismo especialmente concebido para atrapar cuerpos que no tienen puntos de fijación bien definidos o incluso sólo tienen accesibles superficies planas, y que están hechos de madera, espuma, tela u otro material deformable. Este mecanismo está formado por una pinza, actuada por un servomotor, con unas microespinas que penetran en la superficie del material clavándose en él. Las microespinas son anzuelos de pesca comerciales mientras que el resto de la pinza se fabrica con un material polimérico mediante técnicas de prototipado rápido. Con este tipo de pinza se realizan experimentos de recogida y transporte de cargas incluso de forma cooperativa entre varios quadrotors (Fig. 16).



Fig. 16. Pinza con microespinas (izq.) y 4 quadrotors transportando una carga con este mecanismo de agarre (der.)

Otros trabajos destacados de universidades americanas son el manipulador de cinemática paralela de 6 GDL diseñado por la **Universidad de Denver**, con objeto de aplicar y resistir fuerzas en direcciones arbitrarias [9]; y el manipulador de 3 GDL desarrollado por la **Universidad Johns Hopkins** para probar controladores que permitan considerar el efecto desestabilizador del movimiento del brazo sobre la plataforma aérea [10].



Fig. 17. Manipulador de cinemática paralela de 6 GDL (izq.) y brazo de 3 GDL con elevada longitud y pero respecto a la plataforma aérea sobre el que se instala (der.)

En Europa, durante el recientemente finalizado proyecto europeo **AIRobots** (*Innovative Aerial Service Robots for Remote Inspection by Contact*), se desarrolló un sistema de manipulación versátil para la inspección de estructuras industriales con un UAV [11]. Como se muestra en la Fig. 18, este sistema está integrado por una plataforma aérea tipo *ducted fan* sobre la que se instala una estructura delta de 3 GDL que actúa como manipulador.



Fig. 18. UAV *Ducted-fan* en contacto estable con una superficie vertical (izq.) usando para ello un manipulador tipo delta con cinemática paralela (der.)

El efector final para la inspección se encuentra montado sobre una junta Cardan que cuenta con un pequeño actuador para el movimiento *roll*, un elemento de acomodación en la dirección de interacción y 2 GDL pasivos adicionales. El sistema completo tiene por tanto 7 GDL, además de los propios del UAV, y aunque la manipulabilidad del conjunto es muy reducida resulta suficiente para realizar un contacto estable con una superficie vertical mientras se realiza la inspección (técnica de ultrasonidos).

En el inicio del proyecto europeo **ARCAS** también se han hecho algunos avances en el control de un quadrotor equipado con un brazo robótico de 3 GDL mediante un controlador *Variable Parameter Integral Backstepping* (VPIB) [12]. Este controlador incluía un término *feedforward* que ayudaba a compensar el par de perturbación generado por el brazo cuando se desplazaba su CDG. El quadrotor utilizado cuenta con una configuración estándar y un peso de 980g, incluidas las baterías, el controlador y los sensores.

El manipulador, de unos 500g, se encuentra instalado bajo el quadrotor y tiene una carga de peso de 200g. Los experimentos, realizados *outdoor* (Fig. 19), consistieron en mover el brazo robótico varias veces, desde la posición vertical apuntando hacia abajo hasta la horizontal extendida, mientras que el quadrotor se encontraba volando. Inicialmente se probó a realizar esta maniobra de desestabilización de la plataforma con un controlador PID que no consideraba los efectos del brazo y luego con el controlador VPIB desarrollado. Se comprobó que este último era consistentemente mejor, siendo los ángulos de actitud más estables respecto a lo conseguido con el controlador PID.

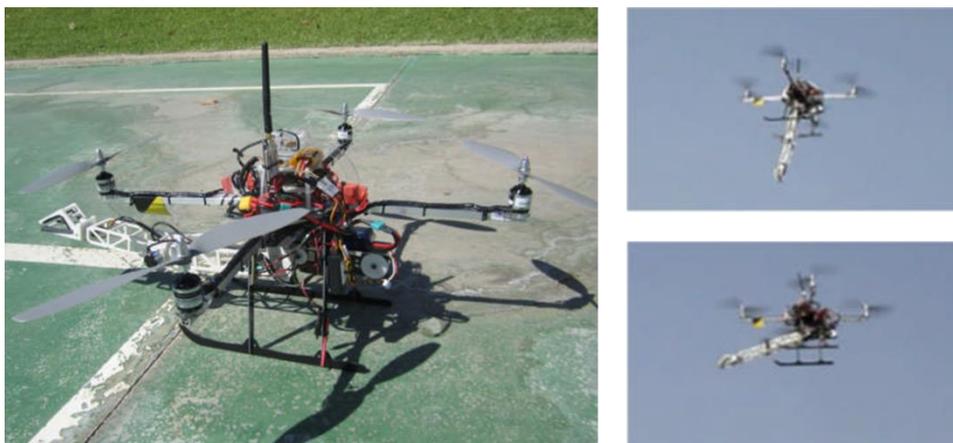


Fig. 19. Quadrotor con manipulador de 3 GDL a bordo (izq.) y pruebas de vuelo con el manipulador apuntando hacia abajo y completamente extendido (der.)

3 Prototipos y primeras pruebas

Las tres funcionalidades básicas exigibles al manipulador aéreo que se pretende diseñar para su empleo como constructor de estructuras de barras son:

- la *captura*, consistente en el acercamiento del manipulador a la barra objetivo y su agarre mediante el efector final;
- el *transporte*, que comprende el desplazamiento de la barra desde su lugar de almacenamiento hasta el lugar de construcción; y
- el *ensamblaje* de la barra, cuya finalidad es instalarla en el emplazamiento asignado dentro de la estructura a construir.

Estas capacidades se pondrán en práctica de forma cíclica durante el proceso constructivo, como se observa en la Fig. 20, de forma que una vez que la barra ha sido recogida, transportada y finalmente ensamblada, el manipulador aéreo regresará a su lugar de almacenamiento para recoger una nueva y repetir el proceso.

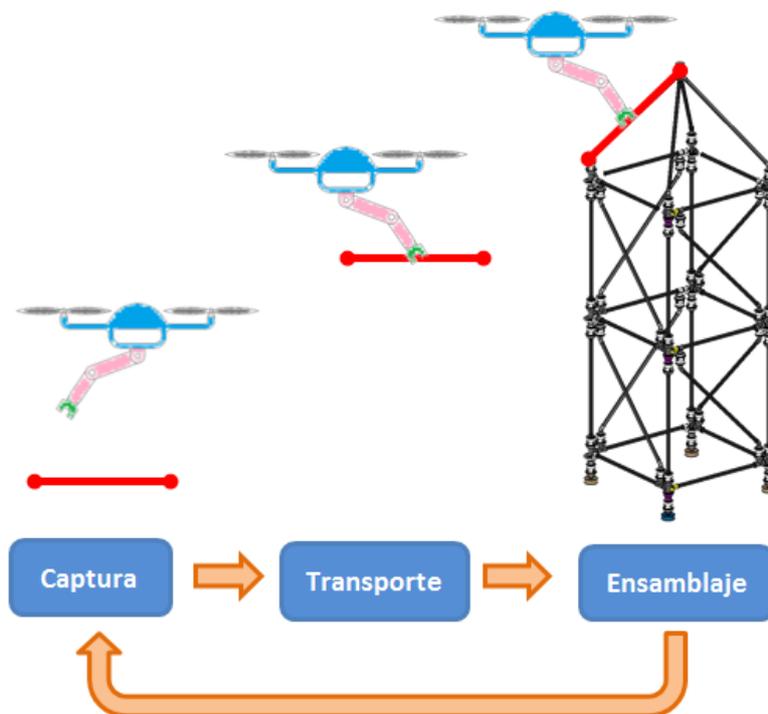


Fig. 20. Las tres funcionalidades básicas del manipulador en el proceso constructivo

Con objeto de realizar una primera aproximación al diseño mecánico del manipulador y obtener algo de experiencia en la problemática de la manipulación aérea durante la construcción de estructuras de barras, se diseñan, fabrican y testean dos prototipos. Las pruebas son todas *indoor* y se realizan en una zona de ensayos o *testbed* (15x15x6m) con un sistema VICON para la localización de objetos en su interior en tiempo real.

Prototipo 1

El primer prototipo, mostrado en la Fig. 21, consiste en un manipulador muy simple fabricado en poliamida usando técnicas de prototipado rápido. El manipulador posee 3 GDL (hombro + codo + muñeca) y una masa total de 500g. Se emplea un efector final tipo pinza para la manipulación de la barra.

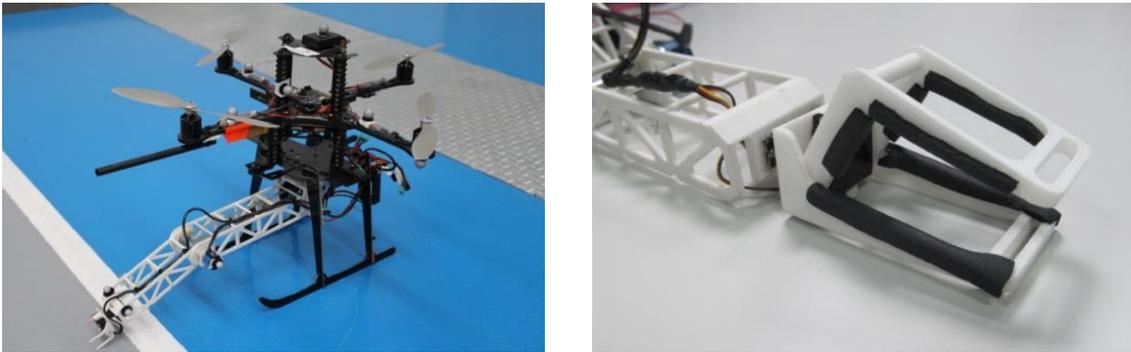


Fig. 21. Prototipo 1 del Manipulador. Para los experimentos se emplea un cuadrótor Pelican (máxima carga de peso de 500g aprox.)

Se realizan diversos experimentos para determinar cómo la existencia del manipulador afecta a la controlabilidad de la plataforma aérea.

Experimento 1: Se miden las perturbaciones que tienen lugar durante el régimen transitorio hasta el equilibrio cuando se desplaza la plataforma desde un punto del testbed A (5, 7, 1.5) m a otro B (6, 6, 2) m con el brazo en configuración acodada soportando una barra de 85g. En la Fig. 22 se muestra la evolución de la posición del CDG de la plataforma en la dirección X (dirección horizontal en el plano vertical que contiene al manipulador) durante su desplazamiento entre A y B, para diferentes posiciones de cogida de la barra (a $L/2$ del borde, a $L/3$ y a $L/4$). Se observa que cuanto más descentrada es la cogida, mayor es la perturbación, el tiempo para su atenuación y el error en régimen permanente.

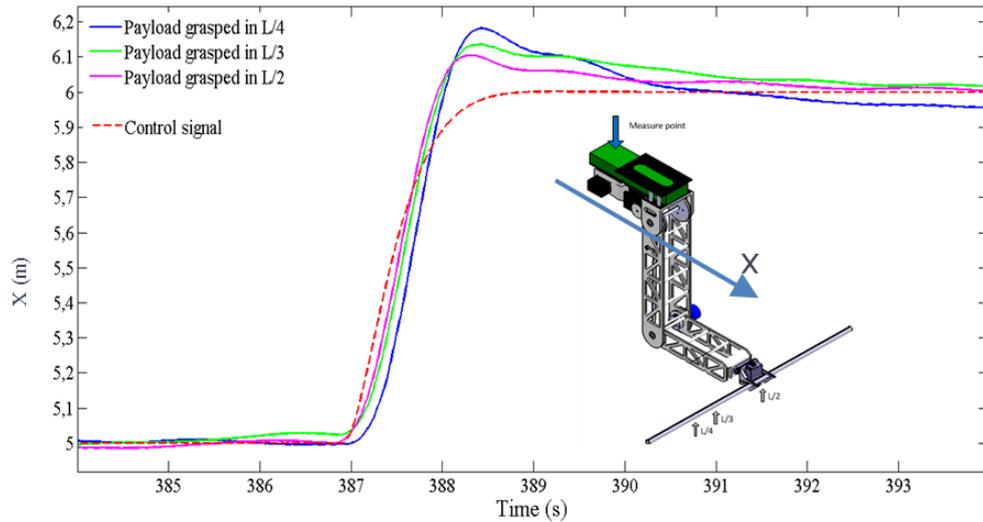


Fig. 22. Experimento 1 con Prototipo 1

- **Experimento 2:** Se miden las perturbaciones que tienen lugar durante el régimen transitorio hasta el equilibrio cuando se modifica la configuración del manipulador sin barra desde la horizontal extendida hasta la vertical hacia el suelo, con la plataforma aérea en vuelo a punto fijo. En la Fig. 23 se muestra la evolución de la posición del CDG de la plataforma en la dirección X durante este cambio de configuración. Inicialmente se observa un movimiento brusco de la plataforma hacia atrás que aleja ésta unos 25cm de la referencia. Tras varios segundos la plataforma vuelve a la referencia y se estabiliza.

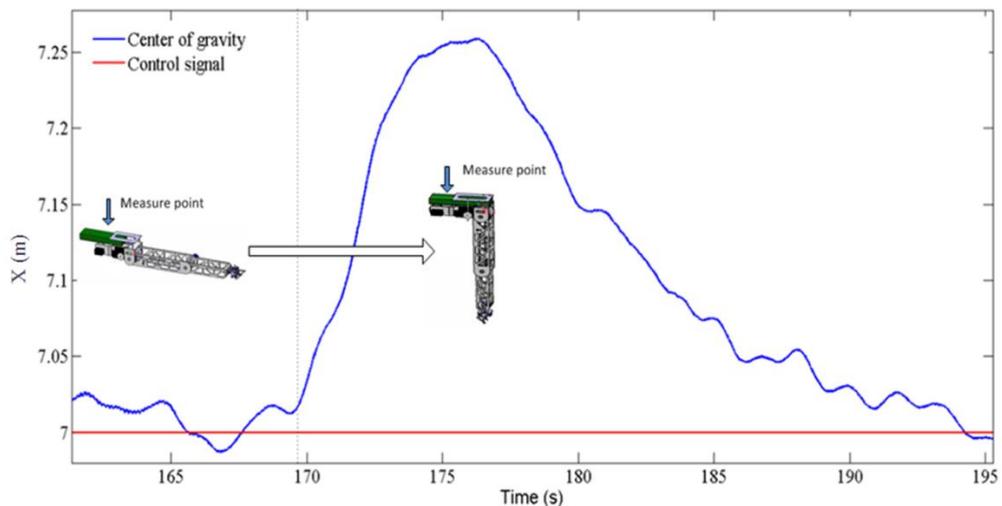


Fig. 23. Experimento 2 con Prototipo 1

- **Experimento 3:** Se miden las vibraciones que tienen lugar con el manipulador en vuelo a punto fijo, sin barra y horizontalmente extendido. En la Fig. 24 se puede apreciar que las vibraciones son más erráticas y de mayor amplitud en el efector final que en el CDG de la plataforma.

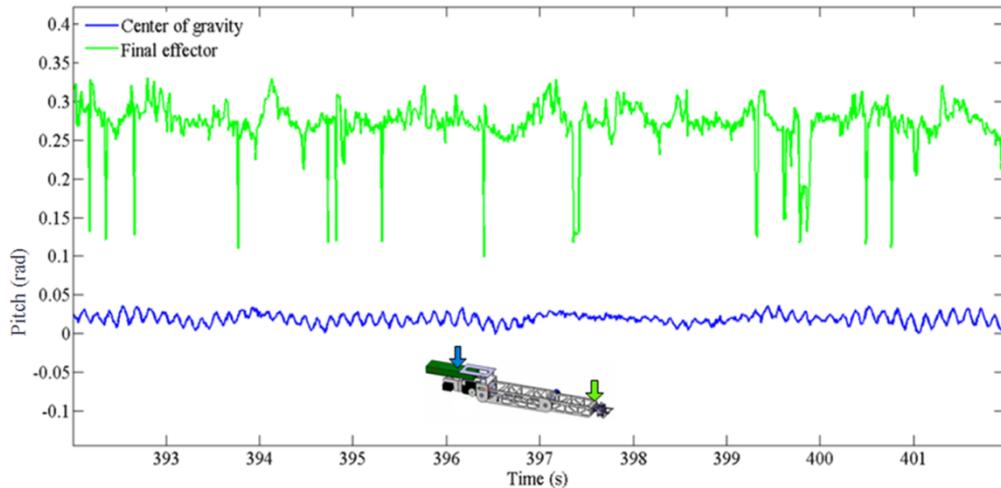


Fig. 24. Experimento 3 con Prototipo 1

Prototipo 2

El segundo prototipo, mostrado en la Fig. 25, consiste en un manipulador fabricado con CFRP para obtener una estructura más rígida. El manipulador posee 2 GDL (hombro + muñeca) y una masa total de 800g. El diseño de la pinza es más apropiado para el tipo de carga utilizada, pues permite un mejor agarre de la barra con un contacto en tres puntos (ruedas de goma), y ayuda a su autocentrado. Para conseguir un mejor compromiso entre el peso y la rigidez del manipulador la estructura de este último se construye a partir de varillas de CFRP pretensadas.



Fig. 25. Prototipo 2 del Manipulador. Para los experimentos se emplea un octocóptero ADX

Con este segundo prototipo se realizan diversas pruebas enfocadas a la manipulación de barras. En concreto, se realizan con éxito experimentos en los que tiene lugar la captura, el transporte y el ensamblaje de barras verticales y horizontales de forma completamente autónoma para la construcción de pequeñas estructuras (Fig. 26).



Fig. 26. Construcción autónoma con el prototipo 2 del manipulador aéreo de un pórtico con dos barras verticales y una barra horizontal

A continuación se recogen algunas **conclusiones generales** sobre la problemática de la manipulación aérea a partir de la experiencia obtenida en los experimentos con los dos prototipos:

Peso y longitud del manipulador. La carga máxima asumible por un UAV suele ser en general muy limitada. Esta capacidad se ve además drásticamente reducida cuando la masa de la carga se encuentra muy alejada del CDG de la plataforma, como ocurriría en el caso de un manipulador con una gran longitud. Por otra parte, cargas con masas elevadas y descentradas dificultan enormemente la estabilización de la plataforma y merman gravemente su maniobrabilidad. Por todo ello, y porque frecuentemente no se puede invertir toda la capacidad de carga de la plataforma aérea en el manipulador, sino que es necesario incorporar otros equipos para la misión, el peso del manipulador será un factor importante a considerar durante el diseño.

Configuración compacta del manipulador. Si el lugar en el que se encuentran las barras a recoger por el manipulador se encuentra muy alejado del lugar de construcción, resul-

tará conveniente que el manipulador pueda adoptar una configuración compacta durante el proceso de transporte. Esto evitará que la barra sufra el impacto fortuito de algún obstáculo y reducirá la resistencia aerodinámica del conjunto, lo que redundará en un aumento de la autonomía de vuelo. Esta configuración compacta también podrá ser adoptada por el manipulador en situaciones en las que no se encuentre en uso, lo que mejorará la controlabilidad de la plataforma aérea y facilitará su acceso a lugares angostos.

Incertidumbre en el posicionamiento de la plataforma. Cuando el UAV de ala rotatoria se mantiene en vuelo a punto fijo, no se encuentra completamente estable, sino que aparecen pequeñas oscilaciones en torno a la referencia de control de todos sus GDL. Estas oscilaciones, originadas en su mayor parte por asimetrías electro-mecánicas y turbulencias de la corriente de aire de entrada a los rotores de la plataforma aérea, pueden producir dificultades a la hora de posicionar y orientar el efector final del manipulador. La dinámica de los robots manipuladores suele ser más rápida que la de las plataformas aéreas y por lo tanto son mucho más ágiles a la hora de compensar este tipo de perturbaciones. No obstante, la dinámica del manipulador está fuertemente acoplada con la de la plataforma aérea [12] [13] y sería necesario encontrar un compromiso entre la rapidez de movimientos del brazo y las reacciones que provoca en la plataforma. En cualquier caso, resulta de gran utilidad realizar un diseño del manipulador que facilite la compensación de estas oscilaciones, pues esta destreza se convierte en un factor determinante en aquellas maniobras en las que se requiere una gran precisión.

Perturbaciones por el desplazamiento del CDG del manipulador. Cuando un manipulador a bordo de un UAV cambia de configuración, la posición de su CDG varía, generando un par de vuelco. En UAVs de ala rotatoria, este par de vuelco produce una inclinación del plano de las hélices, lo que induce además un desplazamiento de la plataforma aérea completa. La perturbación descrita se hace especialmente patente en los casos en que la masa conjunta del manipulador y de la carga es representativa frente a la masa del UAV. En plataformas pesadas con manipuladores ligeros la perturbación es prácticamente insignificante. El sistema de control del UAV puede utilizarse para compensar el efecto de esta perturbación, por lo que no resulta estrictamente necesario realizar para ello un desarrollo mecánico específico.

4 Definición de la plataforma aérea y la carga del manipulador

Tras los buenos resultados en los experimentos realizados con el Prototipo 2 del Manipulador montado sobre la plataforma octocópter ADX, se decide emplear esta misma plataforma para el desarrollo del manipulador definitivo (Fig. 27). Su máxima carga de peso es de 2kg aproximadamente, mientras que su envergadura (distancia máxima entre puntas de palas en hélices opuestas) es de 1m.



Fig. 27. Plataforma octocópter ADX utilizada para manipulador definitivo

El tren de aterrizaje de la plataforma tiene una geometría que permite albergar bajo ésta al manipulador que se diseñe. Asimismo, cuenta con varios orificios en su cuaderna delantera y trasera donde puede resultar sencillo amarrarlo.

Por otra parte, la carga prevista para el manipulador está constituida por barras verticales y horizontales, que se muestran en la Fig. 28, de unos 500mm de longitud y un peso máximo de 100g. Están formadas ambas por un tubo de fibra de carbono de 20mm de diámetro exterior y unos conectores de poliamida, en sus extremos, fabricados con técnicas de prototipado rápido.



Fig. 28. Barras verticales y horizontales usadas como cargas del manipulador definitivo

Como consigna general, el manipulador se diseñará con un peso máximo de 1,5kg, lo que permitirá un margen de 500g hasta los 2kg de su capacidad máxima. Respecto a la longitud del manipulador, se considerará un alcance máximo de unos 500mm, lo que permitirá manipular la barra no sólo por debajo de la plataforma aérea, sino también a la misma altura, sin riesgo de colisionar con sus hélices.

5 Arquitectura

La definición de la arquitectura mecánica del manipulador se fundamenta sobre un análisis exhaustivo de su funcionamiento, un estudio de manipulabilidad de las diferentes arquitecturas posibles y una evaluación previa de la motorización requerida.

5.1 Análisis de funcionamiento

La identificación del tipo de articulaciones que es necesario implementar en el manipulador se realiza a partir del análisis de su funcionamiento durante las fases de captura, transporte y ensamblaje de la barra.

Respecto al proceso de **captura**, si la barra objetivo se encuentra siempre preparada con una posición y orientación similares, el manipulador adquirirá una misma configuración de sus articulaciones para atraparla. Si por el contrario, la barra se encuentra cada vez con una colocación distinta, la maniobra de recogida sí podría requerir de mayores habilidades de manipulación. En cualquier caso, estas habilidades resultarán mucho más críticas en la fase de ensamblaje de la barra, debido a la alta precisión requerida y a la existencia de fuerzas de contacto relevantes, por lo que será esta otra fase la que se analice con mayor detalle.

Para el cumplimiento del requisito de un **transporte** seguro y eficiente de la barra mediante una configuración compacta del manipulador, se propone la implementación de dos articulaciones tipo *pitch*, una en la base del manipulador que permita a éste retraerse bajo la plataforma, y otra aproximadamente en su punto medio para poder plegar el manipulador sobre sí mismo y reducir su longitud efectiva.

En el proceso de **ensamblaje** de la barra, que se muestra en la Fig. 29, el manipulador aéreo comenzará por posicionarse en las inmediaciones del emplazamiento (1), manteniendo una distancia de seguridad que le permita una manipulación libre de obstáculos. Seguidamente, el manipulador se configurará para colocar la barra con la misma orientación que tendrá una vez instalada (2). Estando la plataforma aérea ya estabilizada, el manipulador se situará lentamente a la misma altura del emplazamiento final y en frente

suya (3), manteniendo una distancia lo menor posible al mismo sin riesgo de colisiones. A continuación, el manipulador se extenderá desplazando al efector final horizontalmente en línea recta y sin variar su orientación hasta colocar la barra justo sobre la embocadura en la que deba insertarse (4). Finalmente, cuando la plataforma vuelva a estabilizarse, el efector realizará un movimiento lineal vertical para insertar la barra (5).

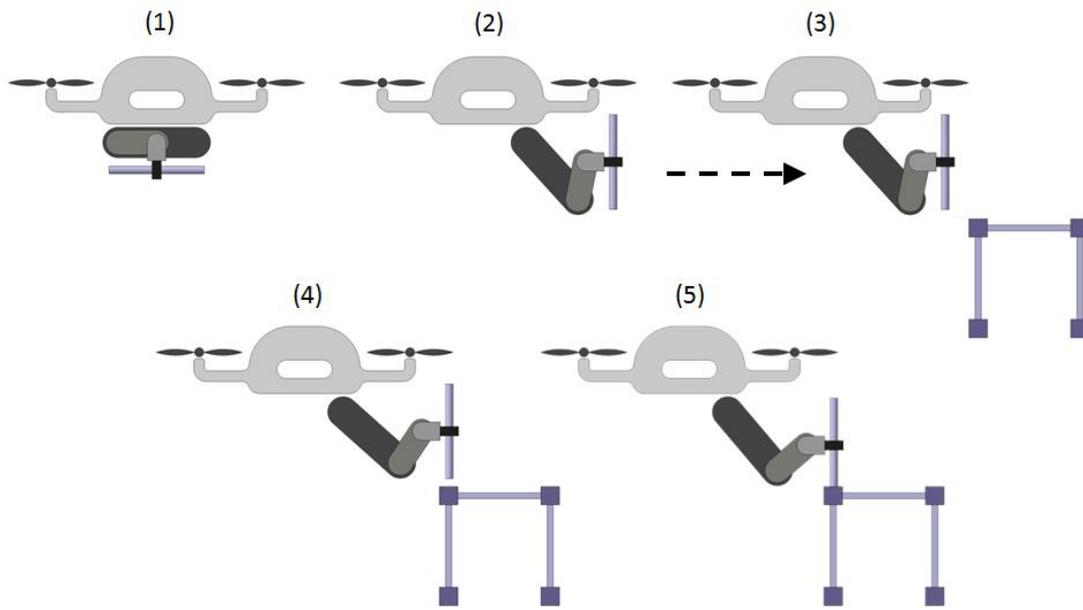


Fig. 29. Proceso de ensamblaje de la barra

En general, los desplazamientos rectilíneos precisos de la barra, tanto los de avance horizontal como vertical, deben ser realizados con los GDL del manipulador y no con los de la plataforma aérea, pues estos últimos son más difíciles de controlar. En este sentido, se decide la implementación de tres articulaciones tipo *pitch* que permitan estos desplazamientos lineales de la barra sin variar su orientación.

Para reducir en lo posible las perturbaciones inducidas en la plataforma por el desplazamiento del CDG del manipulador cuando éste se extiende horizontalmente en el posicionamiento final, se propone el uso de un sistema automático que compense este desplazamiento con otro en sentido contrario de algún cuerpo pesado que se encuentre a bordo. Si la masa del cuerpo es elevada, sólo será necesario un desplazamiento pequeño para mantener fijo el CDG del conjunto.

Por otra parte, una operación que el manipulador realizará con frecuencia será la rotación de la barra para orientarla en el plano del efector final. Una articulación tipo *roll* puede utilizarse con este fin, pero es recomendable que esté situado al final de la cadena cinemática para evitar, por una parte, tener que mover también otras articulaciones cuando haya que realizar esta rotación y, por otra, tener que sacar el manipulador del plano de trabajo vertical, lo que producirá sin duda cierta desestabilización de la plataforma aérea, debido a la mayor dificultad de compensar mediante el sistema de control de dicha plataforma aérea movimientos fuera de este plano vertical [13]. No obstante, dado que será inevitable que existan pequeñas oscilaciones de la plataforma en esta dirección, se requiere igualmente la presencia de una articulación tipo *yaw* que permita corregirlas.

El número mínimo de GDL de un manipulador para conseguir una alcanzabilidad completa en posición y orientación es de seis. Un mayor número de GDL supondría la existencia de múltiples soluciones, lo que podría resultar muy beneficioso en el caso de abundancia de obstáculos. Dado que éste no es el caso de estudio y que, además, el empleo de más GDL, implementados físicamente mediante articulaciones, redundaría en un mayor peso y dificultad de control del manipulador, se decide emplear únicamente seis. No obstante, la plataforma aérea utilizada ya posee cuatro GDL, por lo que en teoría podrían incluso sustituirse alguno de los seis planteados para el manipulador. Sin embargo, la dinámica de éste se espera que sea bastante más rápida que la de la plataforma aérea, por lo que los GDL sustituidos tendrían un movimiento apreciablemente más lento en comparación con el del resto de GDL del manipulador.

Finalmente, aunque desde un punto de vista teórico el Modelo Cinemático Inverso del manipulador puede calcularse para toda cadena cinemática simple de seis GDL proporcionados por pares de rotación, no puede asegurarse que sea posible obtenerlo analíticamente (Fig. 30). Los métodos numéricos para la resolución de este problema son una alternativa común, pero resultan más lentos cuando se implementan en un sistema de control y frecuentemente ocasionan problemas de convergencia, por lo que no se recomiendan en aplicaciones de tiempo real con elevadas frecuencias de muestreo. Por otra parte, debido a que la solución del problema puede no ser única, la expresión analítica tiene la ventaja adicional de poder incluir estrategias de programación sencillas para elegir la solución más conveniente de entre todas las posibles.

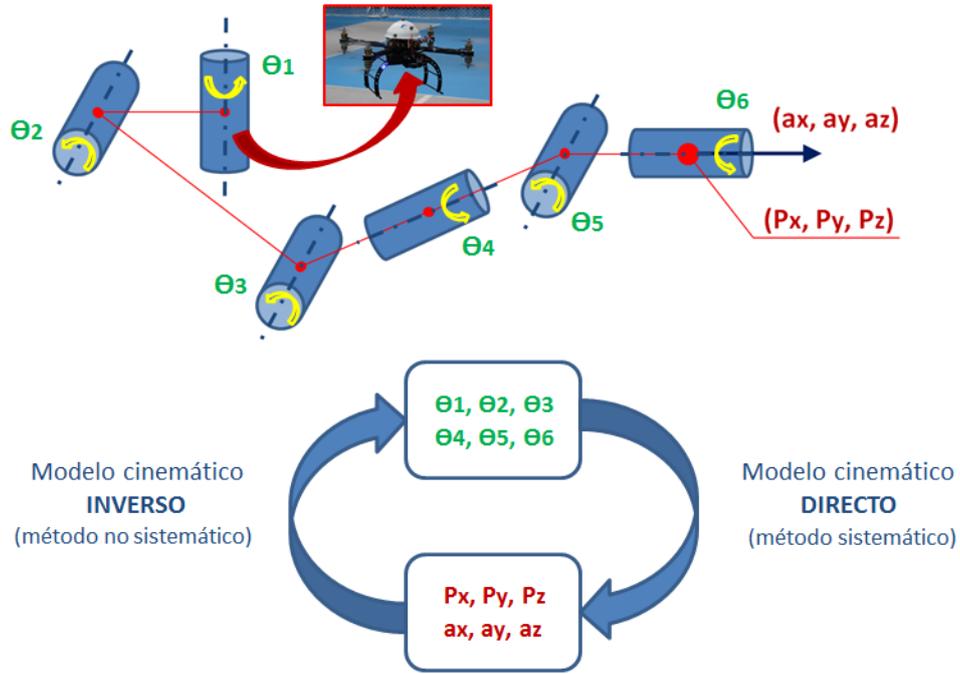


Fig. 30. Cálculo no sistemático del Modelo Cinemático Inverso

Por lo tanto, con objeto de obtener una expresión analítica del Modelo Cinemático Inverso, se recurre al método de cálculo desarrollado por Pieper [14], que exige como condición que los ejes de tres articulaciones consecutivas se intersecten en un punto o sean paralelos. En concreto, se decide que las articulaciones 4, 5 y 6 del manipulador sean respectivamente *roll-pitch-roll* y por lo tanto se intersecten un punto (Fig. 31), pues esta arquitectura, muy extendida entre los manipuladores industriales, concuerda además perfectamente con el resto de consideraciones hechas acerca del tipo de articulaciones necesarias.

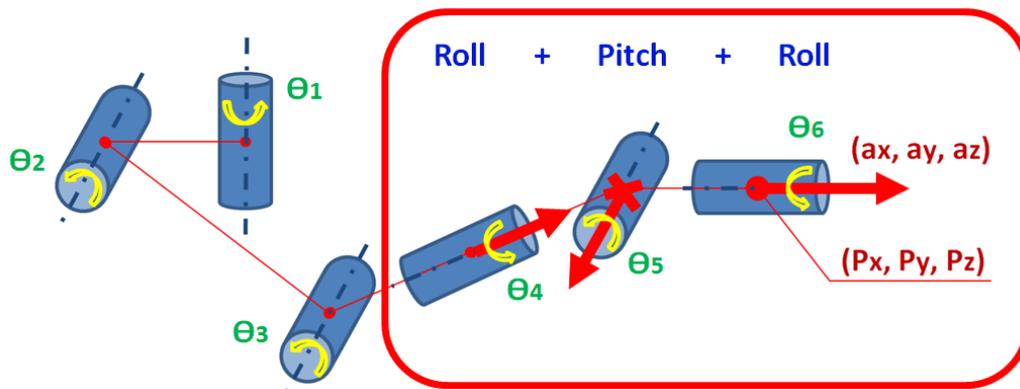


Fig. 31. Los ejes de las tres últimas articulaciones 4, 5 y 6 se intersectan en un punto para asegurar una solución analítica del Modelo Cinemático Inverso mediante el método de Pieper

5.2 Estudio de manipulabilidad

Del análisis de funcionamiento anterior, surge una arquitectura principal en cuanto a la elección y al orden de los GDL empleados. Sin embargo, aparecen dos soluciones respecto a la disposición de éstos. En la primera de ellas, la distribución de los GDL, desde la base del manipulador hasta el efector final, sería *yaw-pitch/pitch-roll-pitch-roll*. Entre la primera y la segunda articulación tipo *pitch* se situaría una estructura alargada (designada por “/”) para dotar al manipulador de una longitud adicional que le permitiese superar la envergadura de la plataforma y evitar colisiones de la barra con las hélices. En la segunda solución, la secuencia sería *yaw-pitch-pitch/roll-pitch-roll* y la estructura alargada se encontraría entre la segunda articulación tipo *pitch* y la primera tipo *roll*.

En este apartado, se estudiará el grado de manipulabilidad de cada una de las soluciones propuestas para elegir la más favorable como la de diseño. En concreto, se analizará la destreza del manipulador para mover el efector final en direcciones arbitrarias con igual facilidad, pues esta capacidad resulta determinante para corregir la incertidumbre en el posicionamiento de la plataforma cuando ésta se encuentra en vuelo a punto fijo.

Para ilustrar el concepto de destreza, se define el vector $\mathbf{q} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$, que contiene las variables articulares del manipulador, y el vector $\mathbf{r} = [p_x, p_y, p_z, a_x, a_y, a_z]^T$, que describe la posición y orientación del efector final. La relación cinemática entre \mathbf{q} y \mathbf{r} vendrá dada por

$$\mathbf{r} = f_r(\mathbf{q}),$$

mientras que la relación entre el vector velocidad \mathbf{v} correspondiente a \mathbf{r} y las velocidades articulares $\dot{\mathbf{q}}$ será

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}},$$

donde $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ es la matriz Jacobiana de dimensiones 6×6 , que en lo sucesivo se escribirá como \mathbf{J} . Si se considera el conjunto de todas las velocidades del efector final \mathbf{v} que ocurren cuando la norma euclídea de las velocidades articulares $\dot{\mathbf{q}}$ dada por

$$\|\dot{\mathbf{q}}\| = \sqrt{\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2 + \dot{q}_4^2 + \dot{q}_5^2 + \dot{q}_6^2},$$

satisface $\|\dot{\mathbf{q}}\| \leq 1$, se puede demostrar [15] que este conjunto \mathbf{v} está formado por un elipsoide en el espacio euclídeo de 6 dimensiones. Los valores de $\dot{\mathbf{q}}$ tales que $\|\dot{\mathbf{q}}\| = 1$ corresponden a los valores de \mathbf{v} que definen la superficie exterior del elipsoide.

En la dirección del eje mayor del elipsoide, el efector final se puede mover a una alta velocidad. Por el contrario, en la dirección del eje menor del elipsoide, el efector final sólo puede moverse a una velocidad baja. Si el elipsoide se asemeja a una esfera, esto indicará que el efector final puede moverse en todas direcciones con un perfil de velocidades uniforme. Dado que este elipsoide representa la capacidad de manipulación, se le denomina *elipsoide de manipulabilidad*.

El elipsoide de manipulabilidad puede caracterizarse a partir de la descomposición en valores singulares de \mathbf{J} , dada por

$$\mathbf{J} = \mathbf{U}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{V}^T,$$

donde \mathbf{U} y \mathbf{V} son matrices ortogonales 6x6 y $\boldsymbol{\Sigma}$ es también una matriz 6x6 definida como

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & 0 & | & \\ & \cdot & & & | & \\ & & \cdot & & | & 0 \\ 0 & & & & | & \\ & & & & | & \\ & & & & \sigma_6 & | \end{bmatrix} \quad \text{con} \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_6 \geq 0,$$

siendo los escalares $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$ los valores singulares de \mathbf{J} . En concreto, los ejes principales del elipsoide de manipulabilidad vendrán dados por $\sigma_1 \mathbf{u}_1, \sigma_2 \mathbf{u}_2, \dots, \sigma_6 \mathbf{u}_6$, donde el vector \mathbf{u}_i es la i -ésima columna de la matriz \mathbf{U} .

Uno de los indicadores más representativos del grado de manipulabilidad derivado del elipsoide de manipulabilidad es su volumen, que viene dado por cw , donde

$$w = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_6, \quad c = \frac{4}{3} \pi^3$$

Dado que el coeficiente c es constante, el volumen del elipsoide es proporcional a w . Siempre ocurrirá que $w \geq 0$, siendo $w = 0$ un caso degenerado que tendrá lugar si y sólo si $\text{rango } \mathbf{J}(\mathbf{q}) < 6$, o en otras palabras, cuando el manipulador adopte una configuración singular. En este sentido, puede entenderse la manipulabilidad como una medida de la distancia a la que se encuentra la configuración \mathbf{q} del manipulador de las posibles configuraciones singulares.

En el caso de que sólo se esté interesado en la manipulabilidad en cuanto a la velocidad lineal del efector final, pero no en cuanto a su velocidad de giro, es posible obtener un elipsoide en el espacio euclídeo de tres dimensiones que ya sí es posible representar gráficamente, como se muestra en la Fig. 32. Considerando un nuevo vector posición $\mathbf{r} = [p_x, p_y, p_z]^T$, la relación entre el vector velocidad $\dot{\mathbf{r}}$ y las velocidades articulares $\dot{\mathbf{q}}$ se escribirá ahora como

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{J}_r(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}},$$

donde $\mathbf{J}_r(\mathbf{q})$ es una nueva matriz Jacobiana de dimensiones 3x6, y todo el desarrollo matemático anteriormente expuesto para el espacio de 6 dimensiones será igualmente válido sin más que sustituir \mathbf{v} por $\dot{\mathbf{r}}$ y \mathbf{J} por \mathbf{J}_r .

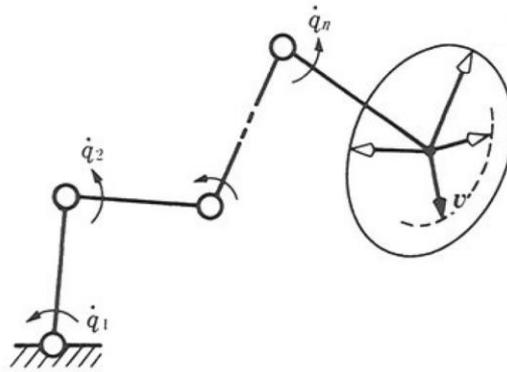


Fig. 32. Elipsoide de manipulabilidad

Por simplicidad, se decide utilizar esta última forma de evaluar la manipulabilidad para estudiar la arquitectura del manipulador. Una vez realizado su diseño definitivo, sí podría ser recomendable aplicar un criterio más completo.

En la Fig. 33 se muestran, para cada una de las secuencias propuestas, los valores del volumen V del elipsoide de manipulabilidad correspondientes a un barrido de configuraciones del manipulador en el entorno de la postura esperada de éste durante el instante de inserción de la barra. En concreto, se analizan las articulaciones tipo *pitch* en los intervalos $\theta_2 = \left[-\frac{\pi}{2}, 0\right]$, $\theta_3 = [0, \pi]$, $\theta_5 = -(\theta_3 + \theta_2)$, manteniendo el resto fijas con $\theta_1 = \theta_4 = \theta_6 = 0$. Para el estudio, se considera una longitud de 5 cm para cada eslabón y de 20 cm para la estructura alargada. El volumen mayor del elipsoide de manipulabilidad lo obtiene la solución *yaw-pitch/pitch-roll-pitch-roll*, por lo que ésta será

la elegida para el diseño del manipulador. La configuración concreta para la que se obtiene el valor máximo del volumen se representa en la Fig. 34. Esta última será considerada como la postura base en torno a la que poder realizar maniobras precisas como la inserción de la barra, pues desde ella será posible desplazar el efector final en cualquier dirección a una velocidad elevada y con un margen suficiente hasta agotar el volumen del espacio de trabajo. Por el contrario, una postura base con el manipulador completamente extendido sería desaconsejable, pues cualquier perturbación de la plataforma aérea en torno a esta configuración singular podría requerir el posicionamiento del efector final en un lugar no alcanzable por el manipulador.

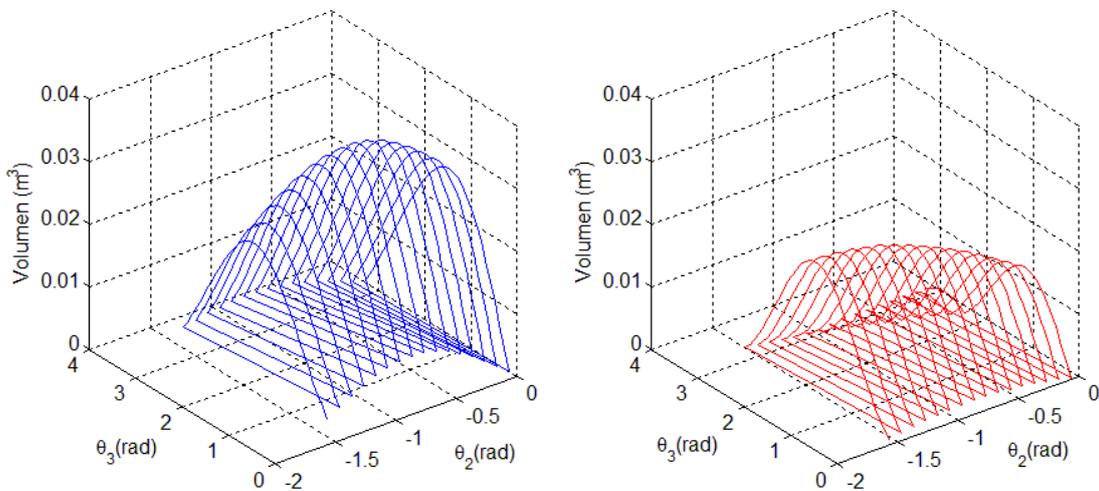


Fig. 33. Cálculo del volumen del elipsoide de manipulabilidad. El volumen máximo del elipsoide para la secuencia *yaw-pitch/pitch-roll-pitch-roll* (en azul) es de 0.0362 m^3 y el de la secuencia *yaw-pitch-pitch/roll-pitch-roll* (en rojo) es de 0.0224 m^3 .

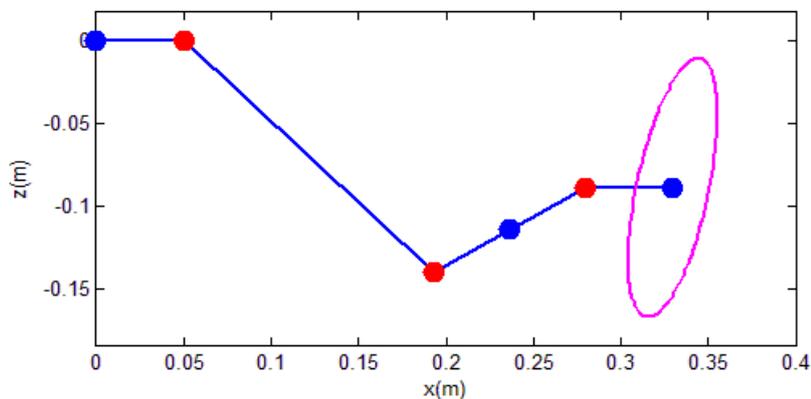


Fig. 34. Configuración del manipulador con una distribución de los GDL *yaw-pitch/pitch-roll-pitch-roll* correspondiente al caso de un volumen máximo del elipsoide de manipulabilidad. Los valores de los GDL tipo *pitch* (en rojo) para esta configuración son $\theta_2 = -0.7714 \text{ rad}$, $\theta_3 = 1.3002 \text{ rad}$ y $\theta_5 = -0.5288 \text{ rad}$. La intersección del elipsoide con el plano $y = 0$ es una elipse que se muestra a escala 1:4.

5.3 Evaluación previa de la motorización

La elección de los motores para el accionamiento de las distintas articulaciones del manipulador se justifica si los pares máximos que proporcionan pueden cubrir en cada instante la demanda prevista por su modelo dinámico. Aunque inicialmente no se cuenta con este modelo, puesto que depende, entre otros aspectos, de las inercias y la posición del CDG de cada uno de los eslabones del manipulador, se puede hacer un análisis simplificado que permita conocer una primera aproximación de los pesos y volúmenes de estos motores con la que afrontar el proceso de diseño.

El modelo dinámico del manipulador puede ser escrito en su forma general como

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{F}(\dot{\boldsymbol{\theta}}) + \boldsymbol{\tau}_c,$$

donde $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})$ es la matriz de masas del manipulador, $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$ es el vector de términos gravitatorios, $\mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ considera los efectos centrífugos y de Coriolis, $\mathbf{F}(\dot{\boldsymbol{\theta}})$ incluye los términos de fricción y $\boldsymbol{\tau}_c$ representa los pares generados por las fuerzas de contacto durante la instalación de la barra.

El efecto de la fricción suele ser bastante difícil de modelar, pero en muchos casos puede considerarse despreciable frente a los otros términos. Los efectos centrífugos y de Coriolis son reducidos siempre que las velocidades involucradas sean pequeñas, como cabe esperar en un manipulador aéreo, mientras que el término de inercia sí es relevante en los casos en que se necesiten acelerar masas elevadas que se encuentren a gran distancia del eje de la articulación.

Para la evaluación previa de la motorización, se considerarán motores con capacidad para proporcionar pares máximos $\boldsymbol{\tau}_{max}$ que cumplan

$$\boldsymbol{\tau}_{max} \geq \mathbf{I}_0 \boldsymbol{\alpha}_{ref} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}^*) + \boldsymbol{\tau}_c,$$

siendo θ^* la configuración más desfavorable del manipulador a efectos gravitatorios, α_{ref} un vector de aceleraciones angulares de referencia para cada articulación e I_0 un vector de momentos de inercia aproximados. El vector de aceleraciones α_{ref} se calcula para compensar el movimiento de oscilación de la plataforma debido a las turbulencias de la corriente de aire de entrada a los rotores. De esta forma, se espera reducir eficazmente la incertidumbre en el posicionamiento del manipulador. El vector de momentos de inercia I_0 se estima suponiendo una masa de la estructura del brazo de 150g distribuida uniformemente, así como las masas de cada uno de los motores elegidos, consideradas como masa puntuales, y asumiendo una masa aproximada del efector final de 200g. Adicionalmente, se considera una masa de 100g para la barra empleada como carga. Los pares τ_c se evalúan a partir de las fuerzas de contacto originadas durante la instalación de la barra.

En la Tabla 1 se muestra el cálculo de los pares requeridos en cada articulación para la configuración del manipulador en la que éste se encuentra extendido horizontalmente. Se seleccionan servomotores DC de la marca *Robotis* y modelo *Dynamixel*, por ser éstos de reducido peso y tamaño, y tener una geometría que permite su integración fácil con el resto de la estructura del manipulador.

Aunque la evaluación previa de la motorización pueda resultar útil para abordar el diseño mecánico del manipulador, una vez concluido éste resulta indispensable realizar un estudio completo definitivo.

Tabla 1. Cálculo de los pares requeridos en cada articulación y motorización elegida

<i>Art.</i>	<i>Tipo</i>	$I_0 \alpha_{ref}$ (Kg cm)	$G(\theta^*)$ (Kg cm)	τ_c (Kg cm)	τ_{total} (Kg cm)	τ_{max} (Kg cm)	Motor	Masa (g)
6	ROLL	-	-	6,25	6,25	8	AX18-A	55
5	PITCH	0,29	3,20	-	3,48	8	AX18-A	55
4	ROLL	-	-	6,25	6,25	8	AX18-A	55
3	PITCH	0,67	7,67	-	8,34	10	MX28-T	72
2	PITCH	2,09	23,36	-	25,45	30	MX106-T	153
1	YAW	-	-	11,25	11,25	17	MX64-T	126

6 Diseño

El manipulador está formado por tres componentes representados en la Fig. 35: la Base, que está amarrada al tren de aterrizaje de la plataforma aérea y sirve de soporte fijo al manipulador móvil; el Brazo, que contiene la cadena cinemática con los 6 GDL del manipulador; y el Efecto Final, consistente en una pinza con garras.

Los materiales utilizados para su construcción son placas y varillas de fibra de carbono comercial y barras de aluminio. Los elementos de fijación tales como tornillos, tuercas y arandelas son en su mayoría también de aluminio con objeto de aligerar peso. En este sentido, el componente Base alcanza una masa aproximada de 650g, mientras que los componentes móviles, el Brazo y el Efecto Final, suponen una masa conjunta de 750g, siendo la masa total del manipulador, por tanto, de 1,4kg, por debajo del límite impuesto como requisito.

La longitud total del manipulador desde la primera articulación del componente Brazo, más cercana a la Base, hasta el eje de la barra en el Efecto Final es de 450mm aproximadamente. La posición del encastre del Brazo sobre la Base, desplazada unos 100mm del centro de esta última, ha permitido reducir la longitud inicial prevista de 500mm.

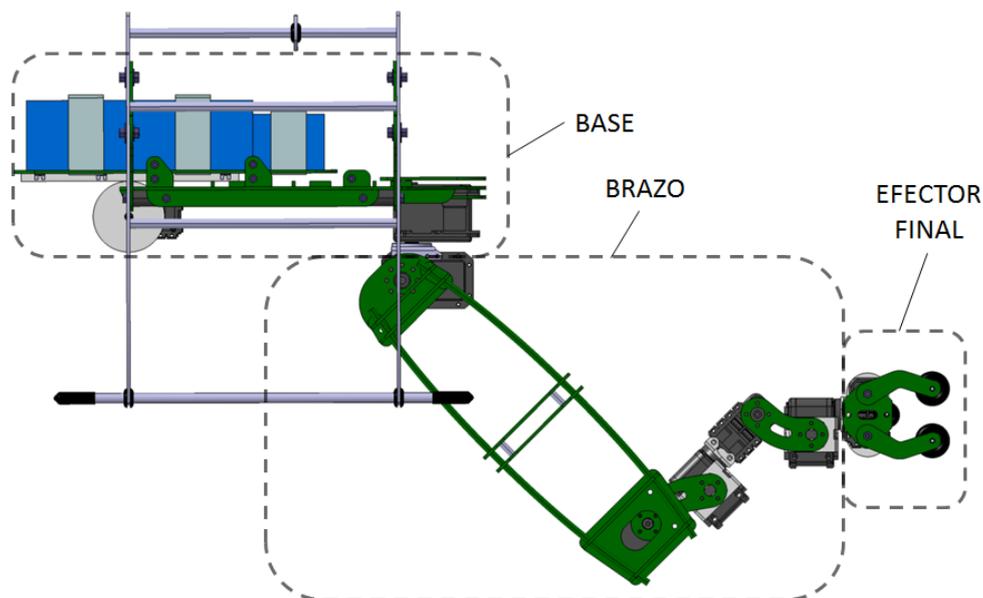


Fig. 35. Componentes del manipulador: Base, Brazo y Efecto Final

6.1 Base

La Base es un componente auxiliar que sirve de soporte fijo al Brazo móvil según se representa en la Fig. 36. El elemento principal es una placa fabricada en fibra de carbono sobre la que se instalan el resto de elementos. Está sujeta al tren de aterrizaje de la plataforma mediante cuatro herrajes y posee rigidizadores tanto longitudinales como transversales que le proporcionan una gran robustez. El componente Brazo se encuentra atornillado sobre la parte delantera de la placa y en las inmediaciones de su encastre se disponen refuerzos para incrementar la rigidez de la unión.

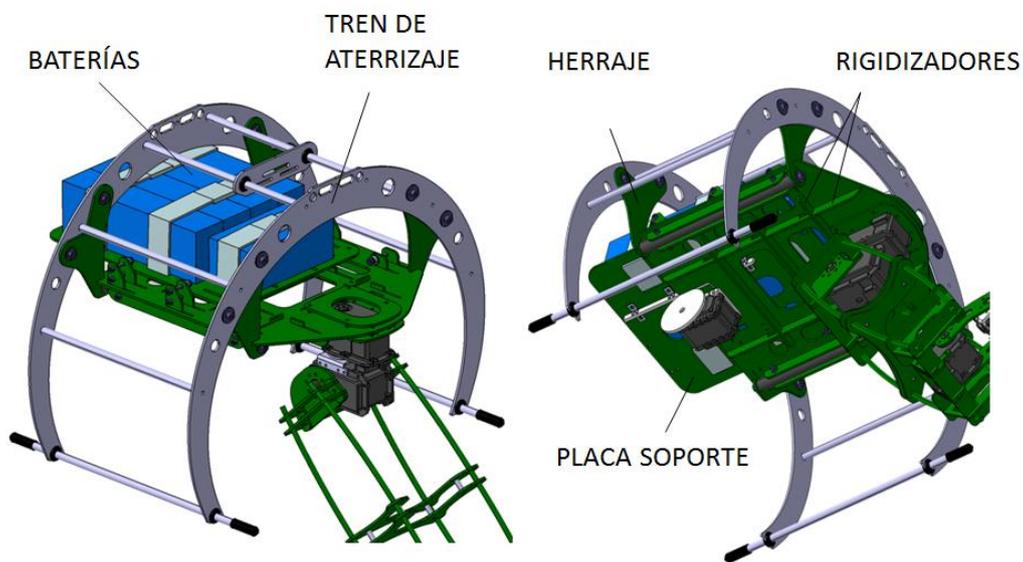


Fig. 36. Vistas superior (izq.) e inferior (der.) del componente Base del manipulador

6.2 Brazo

El Brazo es el componente articulado del manipulador que permite situar al Efecto Final con cualquier posición y orientación dentro de su espacio de trabajo. Está formado por un primer tramo con dos articulaciones motorizadas, *yaw-pitch*, seguidas por una estructura alargada en forma de “U”, fabricada en fibra de carbono. Existe un segundo tramo compuesto por una cadena de cuatro motores que accionan el resto de articulaciones, *pitch-roll-pitch-roll*, como se aprecia en la Fig. 37.

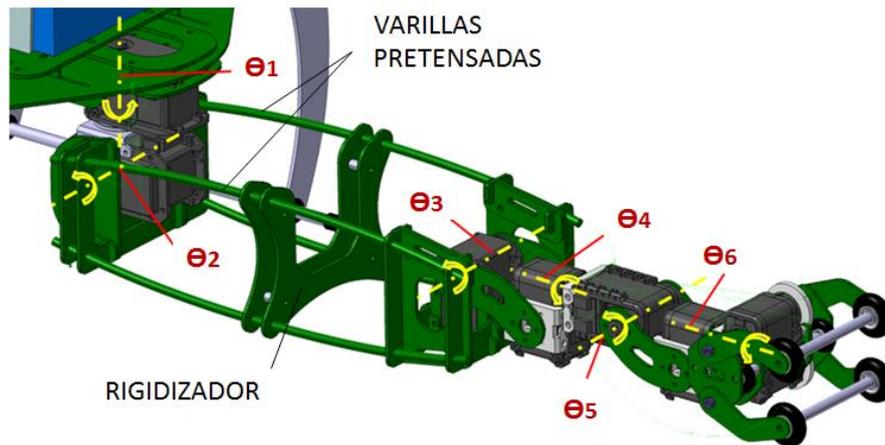


Fig. 37. Componente Brazo del manipulador y secuencia de GDL

La estructura en forma de “U” está compuesta por cuatro varillas empotradas en sus extremos que atraviesan un rigidizador situado en su parte central. La existencia del rigidizador deforma las varillas, originalmente rectas, proporcionándoles un aspecto curvo. Al encontrarse las varillas pretensadas, el conjunto se rigidiza enormemente, convirtiéndose en una estructura muy ligera y de gran longitud.

El diseño de la estructura en forma de “U” permite al manipulador adoptar una configuración compacta en situaciones en las que no se encuentre en uso o realice el transporte de carga entre lugares que se encuentren muy distantes. Una vez que el manipulador aéreo accede a los lugares de recogida de las barras o al de montaje de la estructura, puede volver a desplegarse de forma automática.

Los rangos de movimiento de cada una de las articulaciones del manipulador se muestran en la Tabla 2. Se considera como referencia que las posiciones de las articulaciones del manipulador horizontalmente extendido de la Fig. 37 corresponden a $\theta_i = 0$ para $i = 1, \dots, 6$.

Tabla 2. Rangos de movimiento permitidos para cada una de las articulaciones

Art.	Rango
1	$[-50^{\circ}, 50^{\circ}]$
2	$[-180^{\circ}, 0^{\circ}]$
3	$[0, 180^{\circ}]$
4	$[-90^{\circ}, 90^{\circ}]$
5	$[-90^{\circ}, 90^{\circ}]$
6	$[-90^{\circ}, 90^{\circ}]$

En la Fig. 38 se muestra el proceso de despliegue del manipulador desde la configuración compacta, en la que el componente Brazo se encuentra retraído, hasta la postura base. Cuando el Brazo se repliega, la estructura alargada en forma de “U” del primer tramo permite alojar en su interior la cadena de motores del segundo tramo. Para que el Efecto Final quede también recogido, es necesario retraer sus garras.

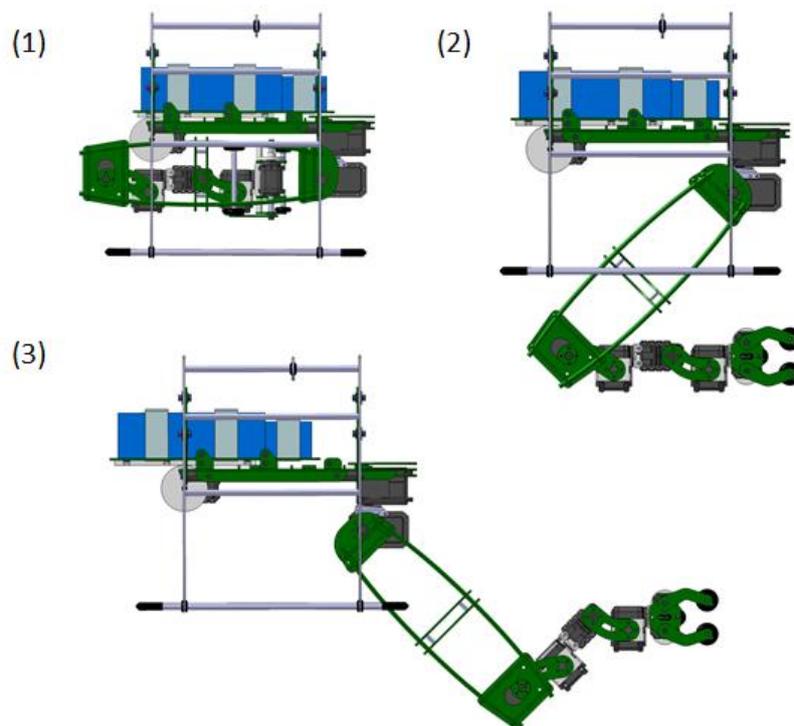


Fig. 38. Secuencia de despliegue del componente Brazo. El manipulador pasa de la configuración compacta (1) hasta la postura base (3) pasando por (2).

6.3 Efecto Final

El Efecto Final del manipulador es de tipo pinza y posee dos garras que permiten un asimiento robusto de la carga mediante presión mecánica. En la Fig. 39 se representa esta arquitectura, especialmente adaptada para el tipo de barra que se prevé utilizar.

Cada garra está formada por dos mordientes de fibra de carbono, uno superior y otro inferior. Los mordientes superiores de ambas garras, conectados entre sí para conseguir una mayor rigidez estructural, están accionados de forma directa mediante un único motor, mientras que los mordientes inferiores, también unidos, son movidos simultáneamente por este mismo motor gracias a una transmisión mediante engranajes. El contacto de la barra con cada una de las garras se produce en tres puntos que se encuentran a 120° , utilizando para el apoyo unas ruedas de goma. Esta configuración envolvente, muy resistente a perturbaciones, permite además que durante el agarre de la barra, ésta se centre de forma natural.

Por otra parte, dado que la longitud de la barra es bastante grande en comparación con el propio Efecto Final, las garras se diseñan separadas unos 80mm para aumentar la estabilidad de la cogida.

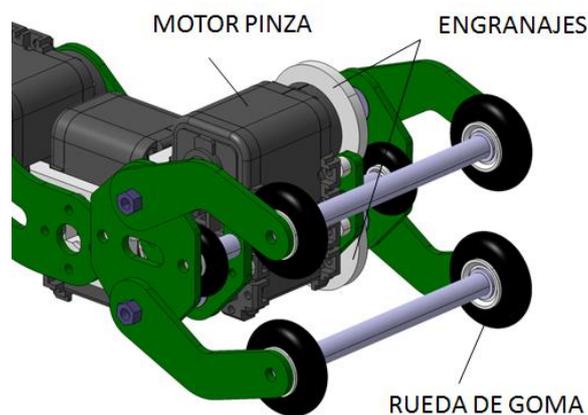


Fig. 39. Componente Efecto Final del manipulador con pinza en posición cerrada

7 Modelos para el Control

A continuación se presentan los modelos cinemáticos directo e inverso necesarios para el control del manipulador, así como el conjunto de datos básicos necesarios para formular el modelo dinámico.

7.1 Modelo Cinemático Directo

El Modelo Cinemático Directo del manipulador es fácil de obtener aplicando el bien conocido método de Denavit-Hartenberg (D-H) [16]. Los sistemas de coordenadas asociados a cada articulación y su correspondiente eslabón se representan en la Fig. 40, mientras que los parámetros de D-H se muestran en la Tabla 3. Para el desarrollo matemático se ha escogido la convención de Craig [17].

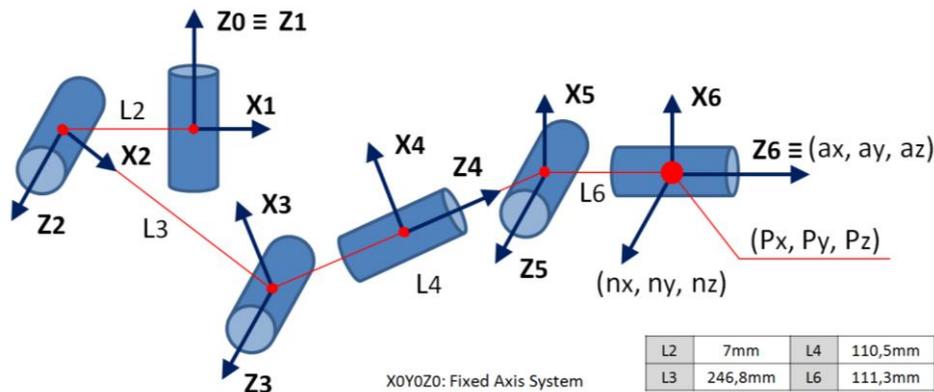


Fig. 40. Sistemas de Coordenadas del método de D-H. Los vectores (P_x, P_y, P_z) y (a_x, a_y, a_z) describen la posición y orientación del efector final respectivamente. El vector (n_x, n_y, n_z) define la rotación del efector final alrededor del eje Z_6 .

Tabla 3. Parámetros de D-H. Los orígenes de los sistemas de Coordenadas 4 y 5 se hacen coincidentes por simplicidad.

Parámetros de Denavit-Hartenberg				
Eslabón i	α_{i-1}	a_{i-1}	t_i	d_i
1	0	0	θ_1	0
2	$\pi/2$	$-L2$	θ_2	0
3	0	$L3$	$\theta_3 + \pi/2$	0
4	$\pi/2$	0	θ_4	$L4$
5	$-\pi/2$	0	θ_5	0
6	$\pi/2$	0	θ_6	$L6$

El Modelo Cinemático Directo del manipulador viene dado finalmente por el sistema de ecuaciones siguiente¹:

$$\begin{aligned}
 Px &= s_1s_4s_5L_6 + c_1((c_2c_3c_5 - s_2c_3s_5)L_6 + c_2L_4 + c_2L_3 - L_2) \\
 Py &= -c_1s_4s_5L_6 + s_1((-s_2c_3c_5 + c_2c_3s_5)L_6 + c_2L_4 + c_2L_3 - L_2) \\
 Pz &= (c_2c_3c_5 + s_2c_3s_5)L_6 + s_2L_4 + s_2L_3 \\
 \\
 ax &= (-c_1s_2c_3c_4 + s_1s_4)s_5 + (c_1c_2c_3)c_5 \\
 ay &= (-s_1s_2c_3c_4 - c_1s_4)s_5 + s_1c_2c_3c_5 \\
 az &= c_2c_3c_5 + s_2c_3s_5 \\
 \\
 nx &= ((-c_1s_2c_3c_4 + s_1s_4)c_5 - c_1c_2c_3s_5)c_6 + (c_1s_2c_3s_4 + s_1c_4)s_6 \\
 ny &= ((-s_1s_2c_3c_4 - c_1s_4)c_5 - s_1c_2c_3s_5)c_6 + (s_1s_2c_3s_4 - c_1c_4)s_6 \\
 nz &= (c_2c_3c_5 - s_2c_3s_5)c_6 - c_2c_3s_4s_6
 \end{aligned}$$

7.2 Modelo Cinemático Inverso

El Modelo Cinemático Inverso, más complejo de obtener que el Directo, se ha calculado haciendo uso de un desarrollo específico [18] que emplea el método de Pieper anteriormente descrito. Éste permite desacoplar el cálculo de las tres primeras variables articulares del robot, θ_1, θ_2 y θ_3 , de las tres últimas, θ_4, θ_5 y θ_6 , utilizando para ello la posición calculada del punto intersección de las articulaciones 4, 5 y 6.

Cálculo de θ_1, θ_2 y θ_3 . El cálculo de las tres primeras variables articulares del robot se realiza por métodos puramente geométricos, resultando:

$$\begin{aligned}
 \theta_1 &= \arctg\left(\frac{Py - L_6ay}{Px - L_6ax}\right) \\
 \theta_2 &= \arctg\left(\frac{Pz - L_6az}{\sqrt{(Px - L_6ax + L_2c_1)^2 + (Py - L_6ay + L_2s_1)^2}}\right) - \arctg\left(\frac{L_4s_3}{(L_3 + L_4c_3)}\right)
 \end{aligned}$$

¹ Se utiliza una notación simplificada para las funciones trigonométricas donde $sen(\theta_i) = si$, $cos(\theta_i) = ci$ y $cos(\theta_i + \theta_j) = cij$

$$\theta_3 = \arctg\left(\frac{\sqrt{(1 - cv^2)}}{cv}\right)$$

donde

$$cv = \frac{(Px - L6ax + L2c1)^2 + (Py - L6ay + L2s1)^2 + (Pz - L6az)^2 - L3^2 - L4^2}{2L3L4}$$

Aunque por lo general existen dos posibles soluciones para θ_3 , llamadas comúnmente *codo arriba* y *codo abajo*, en función del signo de la raíz, el rango de movimiento de θ_3 para el diseño concreto del presente manipulador no lo permite, existiendo sólo una.

Cálculo de θ_4, θ_5 y θ_6 . El cálculo de las tres últimas variables articulares del manipulador se realiza de una forma más sistemática a partir de su matriz de transformación homogénea. Denominando ${}^0\mathbf{R}$ a la submatriz de rotación de ${}^0\mathbf{T}$, se tiene que

$${}^0\mathbf{R} = {}^0\mathbf{R} {}^3\mathbf{R} {}^6\mathbf{R}$$

donde ${}^0\mathbf{R}$ es conocida por ser la orientación deseada del extremo del manipulador y ${}^3\mathbf{R}$ también lo es a partir de los valores ya obtenidos de θ_1, θ_2 y θ_3 , por lo que

$${}^3\mathbf{R} = [r_{ij}] = ({}^0\mathbf{R})^{-1} {}^6\mathbf{R}$$

tendrá todas sus componentes r_{ij} conocidas.

Por otra parte, ${}^3\mathbf{R}$ corresponde a la submatriz de rotación de la matriz de transformación homogénea ${}^3\mathbf{T}$, y por lo tanto puede calcularse como:

$${}^3\mathbf{R} = {}^3\mathbf{R} {}^4\mathbf{R} {}^5\mathbf{R} {}^6\mathbf{R}.$$

Igualando esta expresión de ${}^3\mathbf{R}$, en función de θ_4, θ_5 y θ_6 , a los valores $[r_{ij}]$ es inmediato obtener las expresiones de las tres últimas variables articulares:

$$\theta_4 = \arctg\left(\frac{s1a_x - c1a_y}{-c1s23a_x - s1s23a_y + c23a_z}\right)$$

$$\theta_5 = \arccos(c1c23a_x - s1s23a_y + s23a_z)$$

$$\theta_6 = \arctg\left(\frac{c1c23(a_y n_z - a_z n_y) + s1c23(-a_x n_z + a_z n_x) + s23(a_x n_y - a_y n_x)}{-c1c23n_x - s1c23n_y - s23n_z}\right)$$

7.3 Modelo Dinámico

Existen diferentes métodos para obtener el modelo dinámico de un manipulador. Todos ellos requieren de la información recogida en la Tabla 4, que muestra la posición del CDG, la masa y el tensor de inercia de cada eslabón. Los valores presentados han sido calculados a partir del modelo CAD del manipulador.

Tabla 4. Parámetros del modelo dinámico del manipulador. Tanto las coordenadas del CDG de cada eslabón como el tensor de inercia se expresan en su correspondiente sistema de coordenadas, definido según la tabla de parámetros de D-H. El tensor de inercia se calcula en el CDG de cada eslabón.

Link	Centro de gravedad (mm)			Masa (kg)	Tensor de Inercia (kg m ²)					
	rx	ry	rz		Ixx	Iyy	Izz	Ixy	Ixz	Iyz
1	8,249	-0,244	1,008	0,156	4,470E-05	6,028E-05	7,390E-05	-1,321E-06	1,140E-06	-4,201E-08
2	176,05	-10,797	0,126	0,225	3,256E-04	2,308E-03	2,185E-03	8,440E-06	-2,001E-06	-6,353E-07
3	-11,949	-45,579	0	0,078	2,725E-05	2,377E-05	2,863E-05	-2,556E-06	2,126E-09	1,013E-10
4	0	-0,544	-15,008	0,056	2,084E-05	1,751E-05	1,029E-05	-4,572E-10	-1,726E-09	6,286E-08
5	-12,642	-36,625	0	0,076	2,367E-05	2,273E-05	2,485E-05	-1,122E-06	-5,957E-10	3,306E-10
6	0,156	-1,881	29,814	0,134	1,511E-04	9,042E-05	1,245E-04	1,854E-07	9,989E-07	-2,729E-06

8 Conclusiones

En el presente trabajo se ha mostrado la metodología seguida en el diseño mecánico de un manipulador ligero de 6 GDL, para la construcción de estructuras de barras desde un UAV de ala rotatoria. Este manipulador se muestra en la Fig. 41 una vez fabricado. Para una elección adecuada del número, el tipo y el orden de los GDL necesarios, ha quedado patente la importancia de realizar un análisis exhaustivo del funcionamiento esperado del manipulador en cada una de las fases de construcción. El estudio de manipulabilidad resulta muy útil para decidir entre las diferentes opciones posibles, mientras que una evaluación previa de la motorización permite conocer una primera estimación de la distribución de pesos y volúmenes con la que enfrentarse al proceso de diseño. El manipulador robótico ha sido ya probado mediante teleoperación. En los próximos meses se desarrollará su sistema de control automático que se integrará en el controlador del quadrotor para la realización de pruebas en vuelo previas a la de montaje de estructuras.



Fig. 41. Manipulador Aéreo de 6 GDL desarrollado en el proyecto ARCAS

Bibliografía

- [1] P. Pounds and A. Dollar, "Aerial Grasping from a Helicopter UAV Platform", *12th International Symposium on Experimental Robotics*, 2010.
- [2] M. Bernard, K. Kondak, I. Maza and A. Ollero, "Autonomous Transportation and Deployment with Aerial Robots for Search and Rescue Missions", *Journal of Field Robotics*, Volume 28, Issue 6, pages 914931, 2011.
- [3] M. Schwarzbach, K. Kondak, L. Laiacker, C. Shih and P. Marrón, "Helicopter UAV systems for in situ measurements and sensor placement", *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2012.
- [4] A. Ollero, "Modeling and control for aerial manipulation and assembly in the ARCAS system", *2013 RSS Workshop on Aerial Manipulation*, 2013.
- [5] T. W. Danko and P. Y. Oh, "A Hyper-Redundant Manipulator for Mobile Manipulating Unmanned Aerial Vehicles", *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, 2013.
- [6] Q. Lindsey, D. Mellinger and V. Kumar, "Construction of Cubic Structures with Quadrotor", *Proceedings of Robotics: Science and Systems VII*, 2011.
- [7] J. Thomas, K. Sreenath, J. Polin and V. Kumar, "Avian-Inspired Grasping for Quadrotor Micro UAVs", *IDETC/CIE*, 2013.
- [8] D. Mellinger, Q. Lindsey, M. Shomin and V. Kumar "Design, Modeling, Estimation and Control for Aerial Grasping and Manipulation", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011.
- [9] G. Jiang and R. Voyles, "Hexrotor UAV Platform Enabling Dextrous Aerial Mobile Manipulation", *International Micro Air Vehicle Conference*, 2013.
- [10] M. Kobilarov, "Trajectory Control of a Class of Articulated Aerial Robots", *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, 2013.
- [11] A. Keemink, M. Fumagalli, S. Stramigioli and R. Carloni, "Mechanical Design of a Manipulation System for Unmanned Aerial Vehicles", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012.
- [12] J. A. E. Jimenez-Cano, J. Martin, G. Heredia, R. Cano and A. Ollero, "Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013.
- [13] K. Kondak, K. Krieger, A. Albu-Schaeffer, M. Schwarzbach, M. Laiacker, I. Maza, A. Rodriguez-Castaño and A. Ollero, "Closed loop behavior of an autonomous helicopter equipped with a robotic arm for aerial manipulation tasks", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol 10, pp 1-9, 2013.
- [14] D. L. Pieper, "The kinematics of manipulators under computer control", *Stanford Artificial Intelligence Lab., MEMO AIM-72*, 1968.
- [15] T. Yoshikawa, "Foundations Of Robotics. Analysis and Control", *Massachusetts Institute of Technology, MIT Press*, 1990.
- [16] J. Denavit, "A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices", *Journal of Applied Mechanism*, 1955.
- [17] A. Ollero, "Robótica. Manipuladores y robots móviles", *Marcombo*, 2001.
- [18] A. Barrientos, L. F. Peñín, C. Balaguer and R. Aracil, "Fundamentos de Robótica", *McGraw-Hill*, 2007.