

## **AUTONOMOUS GUIDANCE AND CONTROL OF QUAD-ROTOR AERIAL VEHICLE FOR VINEYARD IMAGE ACQUISITION**

Rico Azagra, J.; Suanes Foncea, S.; Nájera Canal, S.; Gil-Martínez, M.

Universidad de La Rioja

This paper details the design of an autonomous system for the guidance and control of an unmanned aerial vehicle of four rotors. The robot mission is the acquisition of high resolution images of farmland, vineyards in particular, devoted to a precision agriculture. Using low-cost technologies, the crops can be monitored closely and more often to optimize field-level management, what improves the product quality with a lower environmental impact.

The system operation is hierarchical. Once scheduled the flight strategy according to GPS assignments, trajectories are generated to achieve progressively the target points with the maximum reliability and speed. The orientation of the aerial vehicle is inner controlled, which regulates the speed and movement direction onto two axes, according to the marked path and without exceeding the limits of flight stability. All this requires firstly the identification of mathematical models, to perform simulation tests and to apply the control theory. Feedback controllers are designed in the frequency domain. Guidance and control algorithms are implemented in a microcontroller device.

**Keywords:** *Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Trajectory Tracking; Control Engineering; Precision Agriculture*

## **GUIADO Y CONTROL AUTÓNOMOS DE UN VEHÍCULO AÉREO CUATRI-ROTOR PARA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE VIÑEDOS**

Este artículo presenta un sistema de guiado y control autónomos de un vehículo aéreo no tripulado de cuatro rotores. La finalidad del robot será la captura periódica de imágenes de alta resolución del terreno agrícola, en particular cultivos de vid, al servicio de una agricultura de precisión. El empleo de tecnologías de bajo coste, permitirá una supervisión cercana y frecuente de los cultivos para gestionar su tratamiento más adecuado, lo que redundará en una mejor calidad del producto con un menor impacto ambiental.

La operación del sistema es jerárquica. Fijada la estrategia de vuelo, de acuerdo a posicionado geoespacial deseado, se generan las trayectorias para alcanzar progresivamente las coordenadas objetivo con la máxima fiabilidad y rapidez. Internamente se controla la orientación de cuatri-rotor, lo cual regula la velocidad y sentido del desplazamiento en dos ejes, para seguir la trayectoria marcada sin superar los límites de estabilidad de vuelo. Todo ello, exige primeramente la identificación de modelos matemáticos, sobre los que realizar pruebas de simulación, y en los que se apoya la teoría de control. El diseño de los controladores realimentados se realiza en el dominio de la frecuencia. Los algoritmos de guiado y control se implementan digitalmente en un micro-controlador.

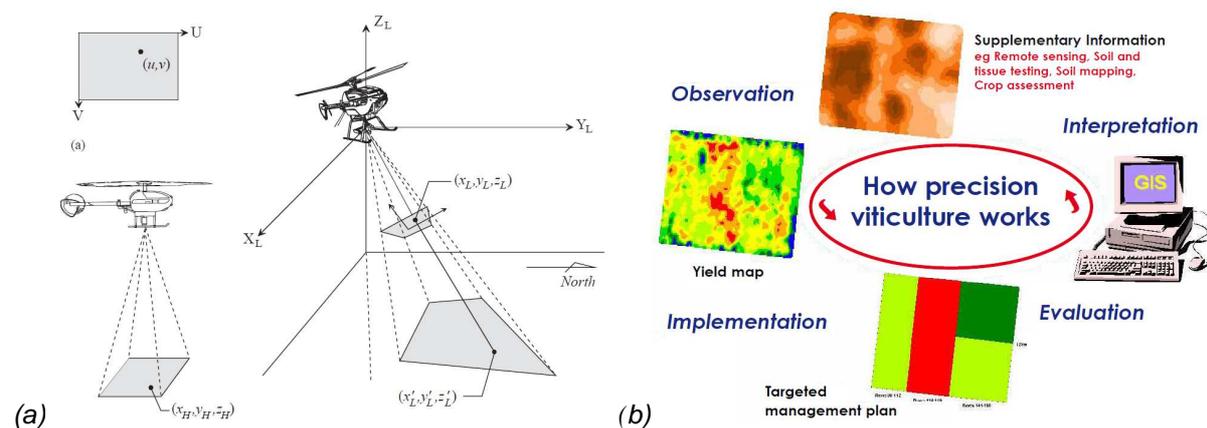
**Palabras clave:** *Vehículo aéreo no tripulado (UAV); Seguimiento de trayectorias; Ingeniería de control; Agricultura de precisión*

Correspondencia: silvano.najerac@unirioja.es

## 1. Introducción

*Agricultura de precisión* es la denominación que integra a numerosas técnicas innovadoras aplicadas a la gestión de cultivos. En particular, la viticultura de precisión pretende adoptar medidas agrícolas específicas sobre cultivos homogéneos de viñedos con el objetivo de conseguir cantidades y calidades de uvas previamente definidas mediante la toma de decisiones económica y ambientalmente adecuadas. En esta línea la inspección aérea ha revolucionado los estudios sobre las plantaciones. Actualmente las imágenes aéreas suelen obtenerse mediante satélites, lo que presenta los inconvenientes de un elevado coste, una ventana temporal pequeña y una alta dependencia de las condiciones de visibilidad. Una segunda alternativa son los aviones tripulados, los cuales tienen también un coste alto, debido a la escasa oferta en el mercado de compañías que proporcionen dicho servicio. La tercera opción es el uso de vehículos aéreos no tripulados conocidos como UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*). Éstos, dotados en su mayoría de cámaras de alta resolución, unido a su capacidad de realizar vuelos de forma segura a muy baja altura, se han convertido en la opción más razonable para obtener dichas imágenes.

**Figura 1: Adquisición de datos en un espacio de trabajo basado en retículas y composición del mapa del viñedo, (a) (Sugiura, Noguchi, & Ishii, 2005), (b) (Bramley & Williams, 2001)**



Al ser los UAVs aeronaves que vuelan sin tripulación humana a bordo, están dotados del equipamiento necesario (unidades de proceso de datos, sensores, control automático, sistemas de comunicación,...) para desempeñar la misión de vuelo de manera autónoma. Recientemente, el interés por los sistemas no tripulados ha crecido tanto entre la comunidad científica como académica, debido a la multitud de aplicaciones potenciales (Valavani, 2011). Se ha pasado de objetivos puramente militares a múltiples aplicaciones civiles de tipo industrial, de emergencia, de exploración, o como es el caso que nos ocupa, de tipo agrícola. Los UAVs fueron utilizados por primera vez en agricultura durante los años 80s en Japón para la fumigación de cultivos (Inc., 2002). Hoy su empleo es mayoritariamente para la adquisición de imágenes con el propósito de hacer mapas de los campos de cultivo a partir de técnicas de mosaico (véase Figura 1). Estos mapas son utilizados, junto con otras técnicas, para identificar brotes de malas hierbas en diversas plantaciones, encontrar irregularidades en el sistema de fertilización, o hacer un análisis de madurez del cultivo (S. R. Herwitz et al., 2003, 2004; López-Granados, 2010). También se han usado UAVs en viñedos para el análisis de suelos, problemas de plagas, estudios de madurez de los frutos (Johnson et al., 2003), y para monitorizar las temperaturas nocturnas para la prevención de heladas (S. Herwitz et al., 2004). Otros autores también han presentado el desarrollo de plataformas aéreas dedicadas a la teledetección para el mapeo en ámbito general (Sugiura

et al., 2005). La construcción de mapas 3D georreferenciados empleando UAV han sido discutidas en: (Iwahori T., Noguchi N., Ishii K., 2005; Rovira-Más, Zhang, & Reid, 2005).

Las plataformas convencionales de adquisición de imágenes de cultivos, entre las que se encuentran los satélites y los vuelos tripulados consiguen una resolución máxima de 50 cm/píxel. Los dispositivos no tripulados son capaces de acercarse más al terreno, obteniéndose de esta forma una mayor resolución. Ciertos estudios sobre la adecuación de imágenes de satélites y vuelos tripulados, convergen en problemas causados por la poca homogeneidad de las plantaciones o por la vegetación de las parcelas colindantes. Estas desventajas pueden minorarse si se dispone de imágenes capturadas a distancias más cercanas al terreno o de mayor resolución, como las tomadas por vehículos no tripulados. La versatilidad del sistema UAV se realiza por el hecho de que los datos pueden ser adquiridos con un coste de operación bajo al ritmo que demande el ciclo vegetativo en estudio.

En resumen, el uso de UAVs presenta diversas ventajas respecto a los sistemas tradicionales (imágenes de satélite o vuelos tripulados) (Zarco-tejada, Berni, Suarez, & Fereres, 2008). Entre ellas destacaremos su bajo coste en la obtención de imágenes y la posibilidad de conseguir imágenes de muy alta definición en función de la altura del vuelo y la calidad de la cámara fotográfica utilizada, que puede realizar capturas tanto en la banda visible, como en la infrarroja o térmica. También presentan un transporte sencillo y una total disponibilidad, así como una menor dependencia de los factores climáticos y por tanto, la posibilidad de trabajar en días nublados o con lluvia.

Dentro de los UAVs, destacaremos los mini-UAVs (en adelante MAVs - *Micro Aerial Vehicles*) que incluyen desde aquellas aeronaves con menos de 15 cm de extensión de alas o rotor hasta aquellos vehículos voladores con una carga útil hasta 10kg (Valavani, 2011). Y dentro de la categoría de los MAVs este trabajo se centra sobre dispositivos de cuatro-rotores, que denominaremos cuadricópteros o cuatrirrotores. Su característica esencial es que todos los grados de libertad del fuselaje se controlan a través de la velocidad de rotación de cuatro motores.

Bajo estas premisas, este trabajo describe en las siguientes secciones la forma de llevar a cabo el control autónomo de vehículos aéreos de cuatro rotores.

## 2. Objetivos

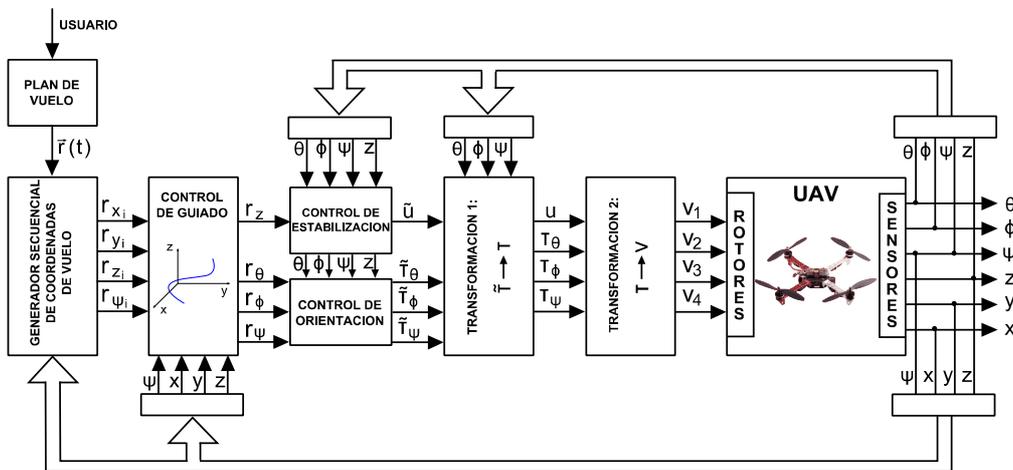
La realización autónoma de tareas por parte del cuatrirrotor responde al esquema de control que se muestra en la Figura 2, cuyos elementos se describen a continuación. El punto de partida es el desarrollo de un planificador de vuelo, en este caso con el fin de realizar fotografías aéreas del viñedo de forma estructurada. Almacenados los datos, posteriormente se realizaría una composición por mosaicos del mapa final, y mediante el adecuado uso de herramientas software de tratamiento de imágenes, se interpretaría en términos agrícolas el estado del viñedo. Sea cual sea la misión de vuelo, ésta se traduce en una trayectoria espacio-temporal que designamos con el vector  $\vec{r}(t) = r_x(t)\vec{i} + r_y(t)\vec{j} + r_z(t)\vec{k}$ , donde  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  son vectores unitarios y ortogonales en las tres direcciones espaciales principales.

Para la toma de una imagen, el cuatrirrotor debe alcanzar cierta coordenada espacial, estabilizarse en dicha posición, y orientarse adecuadamente en función de la ubicación de la cámara. Esto responde a generar tres coordenadas hacia los niveles de control inferiores que van cambiando secuencialmente, es decir:  $(r_{x_{i-1}}, r_{y_{i-1}}, r_{z_{i-1}}, r_{\psi_{i-1}}) \rightarrow (r_{x_i}, r_{y_i}, r_{z_i}, r_{\psi_i})$ . El paso a un nuevo punto obedece a que el dispositivo haya llegado previamente al anterior y capturado la imagen. Por ello, además del plan de vuelo, el generador de coordenadas

utiliza la medida que entregan los sensores sobre la posición y orientación actuales del vehículo  $(x, y, z, \psi)$ .

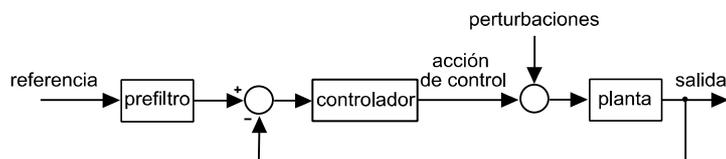
A partir de este punto, entran en juego las técnicas de control realimentado, que se ocupan del control del guiado y los controles de estabilización y orientación. De forma muy resumida, podría explicitarse como distintos lazos de control como el de la Figura 3, donde existe una referencia a seguir, una salida medida y una acción de control generada por un controlador adecuadamente diseñado para conseguir que la salida siga a la referencia, suponiéndose que el sistema es lineal. La complejidad, reside en que existen diversos lazos anidados, así como interacciones cruzadas entre las salidas y las acciones de control (carácter multivariable), y relaciones no lineales entre las variables físicas (planta no lineal), que hacen que el desarrollo de los controladores y pre-filtros no sea una tarea fácil. Posteriormente se analizan en detalle estos sub-sistemas.

**Figura 2: Estructura de control autónomo del cuatrirrotor**



A grandes rasgos, los objetivos de control se dividen en dos: (a) el guiado o seguimiento de trayectorias, que persigue que la posición real  $(x, y, z)$  coincida con la deseada  $(r_x, r_y, r_z)$ , y (b) la estabilización y orientación del vehículo. La estabilización debe mantener la coordenada en altura deseada  $(z=r_z)$ , compensándose el peso del vehículo con la pertinente fuerza aerodinámica ascendente generada por las hélices. Esta labor está fuertemente acoplada y de forma no lineal con la orientación del vehículo según  $\theta$  y  $\phi$ . La orientación  $\psi$  o giro alrededor del eje vertical debe realizarse de acuerdo a su consigna  $r_\psi$ . Y los ángulos de orientación  $\theta$  y  $\phi$ , alrededor de los ejes horizontales, deben obedecer a sus consignas  $r_\theta$  y  $r_\phi$ . Nótese que precisamente estos ángulos son los responsables del avance del vehículo en las direcciones  $x$  e  $y$  (que buscan alcanzar sus objetivos  $r_x$  y  $r_y$ ), y sus interacciones son altas y no lineales. Tanto el guiado como la estabilización además de responder a cambios en sus referencias, deben mantener éstas a pesar de las múltiples perturbaciones que afectan al dispositivo, como por ejemplo las ráfagas de viento. Nótese como los efectores finales responsables del movimiento del vehículo son cuatro rotores, comandados por fuentes de tensión controladas  $(V_1, V_2, V_3, V_4)$ .

**Figura 3. Lazo básico de control realimentado**



### 3. Desarrollo

#### 3.1 Hardware de UAV (sensores y telemetría)

La adquisición de imágenes mediante un dispositivo UAV cuatrirrotor implica la utilización de un hardware específico capaz tanto de controlar el vehículo como de recoger fotografías del terreno, almacenarlas y/o enviarlas de forma inalámbrica a un servidor, junto a metadatos provenientes de otros sensores para su georreferenciación en el espacio. Para ello, la tecnología actual nos brinda soluciones electrónicas variadas que se pueden clasificar según su funcionalidad en los siguientes grupos: sistemas embebidos de control del vehículo, sensores y cámaras para la captura de imágenes, módulos de georreferenciación y módulos de comunicaciones inalámbricas.

Los sistemas embebidos son una solución electrónica para el desarrollo de estas plataformas. Actualmente existen módulos microprocesados que integran la sensórica básica para un vuelo controlado (acelerómetros, brújulas de 3 ejes, barómetros, sonar, etc.), además de un procesador suficientemente potente para realizar en tiempo real tareas de control de vuelo y de gestión de los datos proporcionados por los sensores. Se integran en muchos de estos sistemas procesadores ARM (*Advanced RISC Machine*) de 32 bits de hasta 1GHz con coprocesadores dedicados de video, que son capaces de manejar los datos de alta resolución provenientes de las cámaras y gestionar al mismo tiempo el control del vehículo.

Entre los sensores más populares actualmente para el control del vehículo, se encuentran las denominadas IMU (*Inertial Measurement Unit*). Son elementos electrónicos que contienen todos los sensores necesarios para el gobierno del vehículo, como acelerómetros, brújulas y giroscopios, y que se comunican con el microprocesador central para que éste efectúe su tarea de cálculo para la estabilización, orientación y guiado (según el esquema de control de la Figura 2). Además de estos sensores básicos, se emplean módulos de georreferenciación GPS que obtienen la localización del vehículo en tiempo real de forma absoluta según la red GPS de posicionamiento global. Si el vehículo no cuenta con este tipo de módulos, puede geolocalizarse de forma relativa a partir de un punto de origen conocido (con error acumulado como contrapartida) mediante sus sensores de posicionamiento de la IMU.

Entre las tecnologías de captura de imágenes tanto fijas como en movimiento se encuentran todas las tipologías de sensores de imagen del mercado: ultravioletas, infrarrojas, térmicas, de espectro visible, multiespectrales, de sensibilidad amplificada o multisensor. En función de la aplicación, se utilizará un tipo de cámara u otra. Así como dependiendo de la aplicación, se necesitará un servo para el movimiento de la cámara en ciertos ejes, o por el contrario se usará una cámara de orientación fija.

Tanto para la transmisión de imágenes como para la telemetría en línea del UAV, es necesario un sistema de comunicación inalámbrica. Actualmente existen soluciones de mayor o menor alcance en función del ancho de banda y la confiabilidad de la comunicación. Así mismo, nos encontramos con protocolos y sistemas de comunicación inalámbrica como XBee, Wi-Fi, RF plana, UHF y otras comunicaciones de protocolo abierto recientemente aparecidas como 3DR.

No hay que olvidar que la estructura de un vehículo de cuatro rotores debe disponer de motores suficientemente potentes como para elevar todos los elementos del sistema, así como baterías de suficiente capacidad para proporcionar al vehículo suficiente autonomía. De esta forma, todos los sistemas comentados anteriormente son conectados a la misma batería que alimenta los motores.

### 3.2 Guiado del cuadricóptero

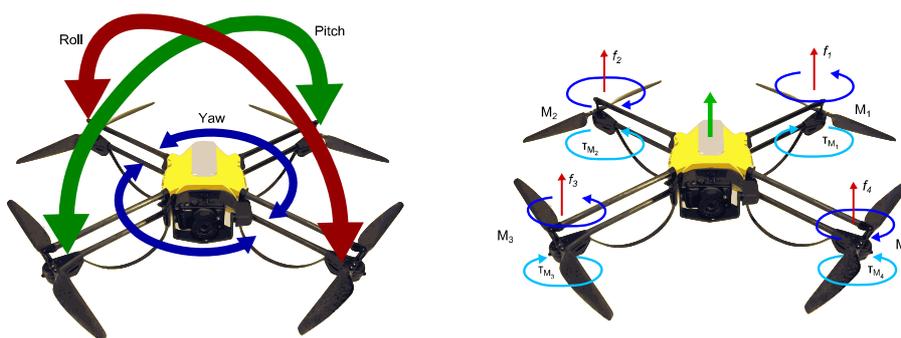
De acuerdo a la estructura jerárquica de la Figura 2, el guiado del vehículo implica que la posición espacial del dispositivo y su orientación respecto a un eje vertical de giro, es decir  $(z, x, y, \psi)$ , sigan con la dinámica adecuada a sus referencias  $(r_z, r_x, r_y, r_\psi)$ . Esto garantiza el posicionamiento del vehículo y su orientación para la captura de la imagen sobre el viñedo. Para ello, es preciso emplear lazos de control como el de la Figura 3 para cada objetivo: que la salida  $x$  siga a su referencia  $r_x$ , y así sucesivamente para las otras tres variables. Las acciones de control calculadas  $r_z, r_\theta, r_\phi,$  y  $r_\psi$  se enviarán a los lazos internos de control de estabilización y orientación, responsables de conseguir tras un cierto tiempo:  $z=r_z, \theta=r_\theta, \phi=r_\phi, \psi=r_\psi$ . Los sistemas dinámicos (plantas) a tener en cuenta para el diseño de los controladores de guiado se calculan a partir de las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento del vehículo que se describen en la siguiente sección.

Si se parte de un dispositivo cuatrirrotor que dispone de un sistema de control de estabilización y orientación no accesibles por el usuario, el modelo dinámico para el diseño del control de guiado es desconocido. Por tanto, no siendo posible el empleo de las ecuaciones descritas en la siguiente sección, se precisa realizar una identificación experimental del comportamiento  $(z, x, y, \psi)$  al variar  $(r_z, r_\theta, r_\phi, r_\psi)$ . Este es el caso del cuatrirrotor ARDrone de Parrot ("Parrot ARDrone," 2012). Los resultados de la identificación experimental para el diseño de los controladores de guiado en el plano de este vehículo, y su desempeño final se explican en la Sección 4.

### 3.3 Orientación y estabilización del cuadricóptero

La orientación y estabilización del UAV de cuatro rotores corresponde con el nivel más interno de la estructura jerárquica que compone el sistema de vuelo. En concreto, este subsistema está compuesto por los bloques: control de estabilización, control de orientación, transformación 1 y transformación 2, dentro del esquema global de la Figura 2. El objetivo de estos elementos es realizar una gestión adecuada de las acciones de control (tensiones en los motores)  $v_1, v_2, v_3, v_4$ ; de forma que se alcancen los objetivos demandados por el nivel superior (control de guiado):  $z=r_z, \theta=r_\theta, \phi=r_\phi, \psi=r_\psi$ .

Figura 4: Esquema de movimientos, fuerzas y pares de cuadricóptero



Para poder entender el funcionamiento de este subsistema debemos conocer cómo funciona en última instancia un cuatrirrotor como el de la Figura 4. El control del mismo se realiza modificando la velocidad angular de los cuatro motores que componen el sistema ( $M_1, M_2, M_3, M_4$ ) y que son gobernados empleando las acciones de control  $(v_1, v_2, v_3, v_4)$ . La fuerza de sustentación  $f_i$  producida por el motor  $M_i$  es proporcional al cuadrado de su velocidad de giro  $\omega_i$ , cumpliéndose  $f_i = \omega_i^2 k$ . Si no tenemos en cuenta el comportamiento dinámico del motor, podemos expresar la velocidad de giro en función de una constante proporcional que

relaciona la tensión aplicada  $v_i$  con la velocidad angular  $\omega_i$ . Por tanto, la fuerza  $f_i$  obtenida para una tensión de entrada  $v_i$  está determinada por:

$$f_i = k\omega_i^2 = k(v_i k_v)^2 = k k_v^2 v_i^2 \quad (1)$$

La suma de las fuerzas  $f_i$  generadas por los motores determina la fuerza de sustentación total  $u$  en (2), encargada de compensar el peso del UAV y de garantizar su estabilización a una altura determinada.

$$u = \sum_{i=1}^4 f_i \quad (2)$$

Para lograr giros en los ángulos de Euler: *pitch*  $\theta$  (alrededor del eje Y, que produce desplazamiento en el eje X), *roll*  $\phi$  (alrededor del eje X, que produce desplazamiento en el eje Y), *yaw*  $\psi$  (alrededor del eje Z) debemos generar los momentos:  $\tau_\theta, \tau_\phi, \tau_\psi$ . Los momentos de *pitch* y *roll* están determinados por la diferencia entre las fuerzas  $f_i$  generadas por dos motores enfrentados y la distancia  $2L$  entre los mismos. De este modo, definimos el momento de *pitch* como  $\tau_\theta = (f_2 - f_4)L$  y el de *roll* como  $\tau_\phi = (f_1 - f_3)L$ . El momento de *yaw* está determinado en (3), por la relación entre las fuerzas tangenciales (no confundir con  $f_i$ ) generadas por cada uno de motores  $M_i$  (Castillo, García, Lozano, & Albertos, 2007); téngase en cuenta que  $M_2$  y  $M_4$  giran en sentido horario, y  $M_1$  y  $M_3$  en sentido anti-horario.

$$\tau_\psi = \sum_{i=1}^4 \tau_{M_i} \quad (3)$$

Podemos simplificar el sistema de control de vuelo empleando como acciones de control la fuerza de sustentación y los momentos en los ejes de Euler. Para ello empleamos el bloque *Transformación 2* en la Figura 2 cuya misión es convertir las acciones calculadas por el controlador  $(u, \tau_\theta, \tau_\phi, \tau_\psi)$  en tensiones  $(v_1, v_2, v_3, v_4)$  de entrada a los motores.

Conocido el comportamiento básico del UAV podemos calcular las ecuaciones que definen su comportamiento dinámico (4)-(9), obtenidas aplicando la mecánica de Euler-Lagrange (O'Reilly, 2008) al sistema con seis grados de libertad.

$$m\ddot{x} = -u \sin \theta \quad (4)$$

$$m\ddot{y} = u \cos \theta \sin \phi \quad (5)$$

$$m\ddot{z} = u \cos \theta \cos \phi - mg \quad (6)$$

$$\tau_\theta = \ddot{\theta} \quad (7)$$

$$\tau_\phi = \ddot{\phi} \quad (8)$$

$$\tau_\psi = \ddot{\psi} \quad (9)$$

Como se puede observar, las ecuaciones (7)-(9) definen una relación directa entre los ángulos de Euler y los pares  $\tilde{\tau} = (\tilde{\tau}_\theta, \tilde{\tau}_\phi, \tilde{\tau}_\psi)$  que están relacionados con  $\tau = (\tau_\theta, \tau_\phi, \tau_\psi)$  mediante la expresión:

$$\tilde{\tau} = \mathbf{J}^{-1}(\tau - \mathbf{C}\dot{\eta}) \quad (10)$$

donde  $\eta = (\theta, \phi, \psi)$  representa el vector de ángulos de Euler,  $\mathbf{J}$  representa la matriz de inercia y  $\mathbf{C} = \mathbf{C}(\eta, \dot{\eta})$  representa la matriz de Coriolis (Castillo et al., 2007). El bloque

*Transformación 1* realiza la conversión  $\tilde{\mathbf{T}} \rightarrow \mathbf{T}$ . Nótese (Figura 2) como el elemento *Transformación 1* necesita de las medidas  $(\theta, \phi, \psi)$  para los cálculos.

El subsistema de control de estabilización o control de la altura de vuelo, es el encargado de garantizar que la altura  $z$  sea la deseada  $r_z$ . Para ello, se trabaja con la ecuación no-lineal (6). Se propone el empleo de una nueva acción de control  $\tilde{u}$ , determinada por (11), gracias a la cual obtenemos el modelo lineal representado por (12).

$$\tilde{u} = u \cos \theta \cos \phi - mg \Leftrightarrow u = \frac{\tilde{u} + mg}{\cos \theta \cos \phi} \quad (11)$$

$$m\ddot{z} = \frac{\tilde{u} + mg}{\cos \theta \cos \phi} \cos \theta \cos \phi - mg = \tilde{u} \quad (12)$$

Esta transformación es incluida en el bloque *Transformación 1*; y como en el caso anterior, demanda una medida precisa de los ángulos de Euler  $(\theta, \phi, \psi)$ . Gracias a esta modificación se independiza el control de la altura  $z$  del control de los desplazamientos  $x$  e  $y$  (que dependerán de  $\theta$  y  $\phi$ ). Además se consigue un modelo lineal de comportamiento  $z(t)$  al variar  $\tilde{u}(t)$ , que facilita el diseño del controlador.

Debemos destacar que el empleo de la transformación (11) implica un cambio en las ecuaciones (4)-(5), que determinan el desplazamiento en el plano  $(x, y)$ , obteniéndose:

$$m\ddot{x} = -(\tilde{u} + mg) \frac{1}{\cos \theta \cos \phi} \sin \theta = -(\tilde{u} + mg) \frac{\tan \theta}{\cos \phi} \quad (13)$$

$$m\ddot{y} = (\tilde{u} + mg) \frac{1}{\cos \theta \cos \phi} \cos \theta \sin \phi = (\tilde{u} + mg) \tan \phi \quad (14)$$

Podemos comprobar como en este caso existe un acoplamiento entre el control de estabilización ( $z=r_z$  variando  $\tilde{u}$ ) y el desplazamiento  $y$  de (14) que pretendemos gobernar, mediante la variación de  $\phi$ . Del mismo modo, el desplazamiento  $x$  a gobernar mediante la variación de  $\theta$ , se encuentra acoplado con las acciones  $\tilde{u}$ . Parte de estos problemas pueden ser solucionados si el UAV trabaja a altura constante ( $r_z=cte.$ ), puesto que en estos casos  $\tilde{u} = cte$ , desapareciendo la influencia de la variación de  $\tilde{u}$  en el control de movimiento en  $x$  y en  $y$ . Sin embargo, nótese como persiste la influencia cruzada desde  $\phi$  hasta  $x$ .

Entonces, el subsistema de control del guiado debe calcular los controladores para gobernar el comportamiento dictado por (12)-(14), presuponiendo que  $\theta = r_\theta$ ,  $\phi = r_\phi$ ,  $\psi = r_\psi$  de lo que se encarga el subsistema de orientación. Este último a su vez, debe calcular los controladores para gobernar los sistemas (7)-(9).

Debemos tener en cuenta que el control del guiado puede seguir dos estrategias diferentes para controlar la posición en el plano  $(x, y)$ . La primera consiste en generar las consignas adecuadas para los ángulos *pitch*  $r_\theta$  y *roll*  $r_\phi$ , manteniendo nula la referencia para *yaw*  $r_\psi = 0$ . En este caso, los ángulos  $(\theta, \phi)$  son las acciones de control aplicadas en (13)-(14) produciendo desplazamientos en  $(x, y)$ . La otra alternativa es mantener el desplazamiento en uno de los ejes nulo  $r_y=0$  y controlar el movimiento con el ángulo de *yaw*  $r_\psi$  y el avance en el eje  $x$  de acuerdo a  $r_x$ . En este caso emplearemos el giro en *yaw* para apuntar en la dirección adecuada y avanzaremos en  $x$  mediante la modificación de  $\theta$ . La selección de una

u otra alternativa se realiza al diseñar el control del guiado. Los elementos situados en un nivel inferior de la escala jerárquica son independientes de la estrategia seleccionada.

#### 4. Resultados: guiado de cuatrirrotor ARDrone en el plano XY

Los resultados obtenidos hasta el momento incluyen el control del guiado de un vehículo cuatrirrotor en el plano XY. Se trata del dispositivo comercial ARDrone fabricado por Parrot ("Parrot ARDrone," 2012). Orientado como producto de ocio no tiene accesible la gestión de los lazos internos de control de estabilización y orientación. Por ello, simplemente se dispone de acelerómetros que miden el desplazamiento  $(x,y)$  del vehículo, y sus velocidades asociadas  $(v_x, v_y)$ . Todas las variables descritas son dinámicas, es decir dependen del tiempo  $(x(t), y(t), \dots)$ , aunque por simplicidad se omite la expresión explícita de esta dependencia. Las únicas actuaciones sobre el vehículo son las consignas de *pitch* y *roll*,  $(r_\theta, r_\phi)$ , que se envían a los lazos internos, no accesibles, y que garantizan  $\theta=r_\theta$  y  $\phi=r_\phi$ . Si el vehículo gira de acuerdo a estas orientaciones las fuerzas aerodinámicas ejercidas por las hélices provoca el movimiento  $(x,y)$  en el plano que queremos gobernar para que siga las consignas deseadas  $(r_x, r_y)$ .

Para diseñar el control oportuno, es necesario primero deducir el modelo que relaciona la actuación  $(r_\theta, r_\phi)$  con el desplazamiento  $(x,y)$ . A partir de los ensayos oportunos sobre el sistema real, y aplicando reglas de identificación dinámica de modelos, se obtuvo un modelo multivariable no-lineal del sistema a controlar como el que se representa en la Figura 5.

Figura 5: Modelo multivariable no-lineal del guiado en un plano

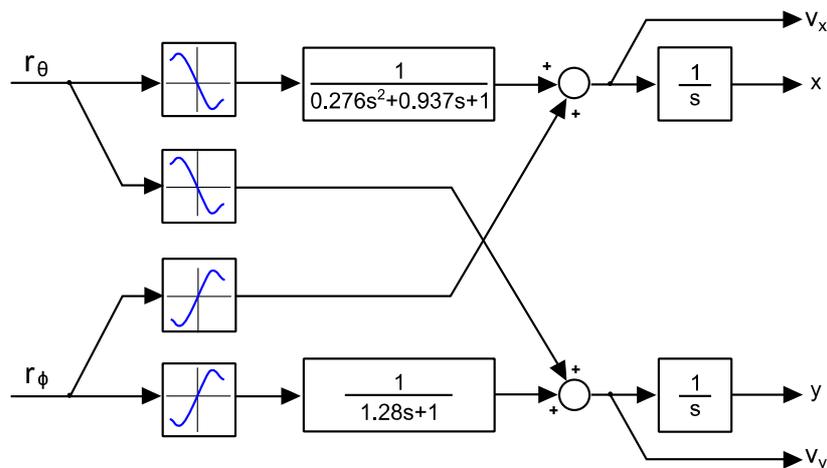
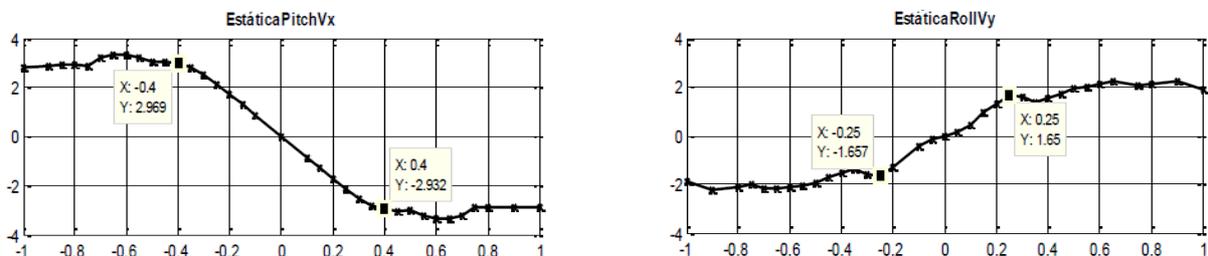


Figura 6: Características estáticas principales



Cabe destacar que las curvas estáticas muestran la relación estacionaria entre entradas-salidas, advirtiéndose claros comportamientos de saturación a partir de cierto ángulo de giro. Las estáticas principales se muestran en la Figura 6. Las estáticas cruzadas muestran un leve acoplamiento, lo que apunta a un desacoplamiento casi perfecto conseguido con el

control interno no accesible. Conjuntando la ganancia estática de la zona lineal de operación, y la dinámica de evolución de los desplazamientos frente a cambios en las orientaciones, se llega a unos modelos nominales expresados como funciones de transferencia en la variable de Laplace:

$$P_x(s) = \frac{X(s)}{R_\theta(s)} = \frac{-8.6}{(0.2758s^2 + 0.9373s + 1)s} \quad (15)$$

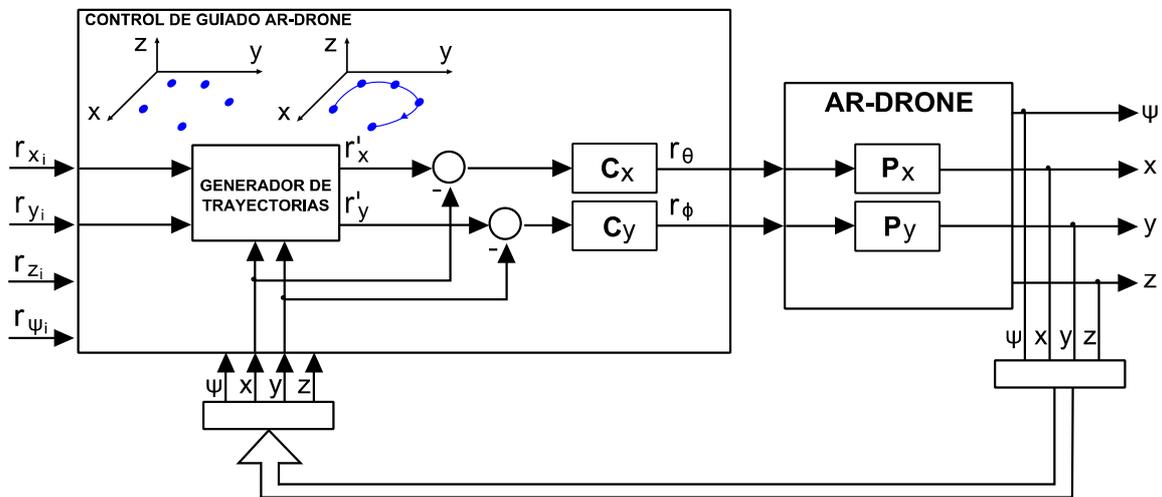
$$P_y(s) = \frac{Y(s)}{R_\phi(s)} = \frac{6.45}{(1.28s + 1)s} \quad (16)$$

Para ellos se diseñan unos controladores apropiados  $C_x(s)$  y  $C_y(s)$  de acuerdo a la estructura de control de la Figura 7.

$$C_x(s) = \frac{0.35 \left( \frac{s}{1.8} + 1 \right) \left( \frac{1}{1.4^2} s^2 + \frac{2 \times 0.7}{1.4} s + 1 \right)}{s \left( \frac{s}{6.6} + 1 \right) \left( \frac{1}{7.0^2} s^2 + \frac{2 \times 0.56}{7.0} s + 1 \right)} \quad (17)$$

$$C_y(s) = \frac{0.3 \left( \frac{1}{0.97} s + 1 \right) \left( \frac{1}{0.70} s + 1 \right)}{s \left( \frac{1}{5.5^2} s^2 + \frac{2 \times 0.69}{5.5} s + 1 \right)} \quad (18)$$

Figura 7: Estructura de control realimentado

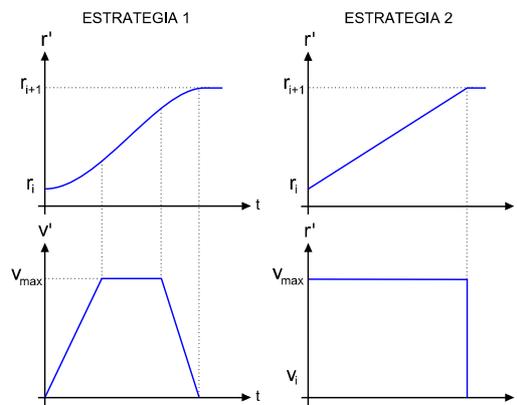


Para coordinar que el desplazamiento desde cierta posición  $(r_{xi}, r_{yi})$  a otra  $(r_{xi+1}, r_{yi+1})$  se realice de acuerdo a la trayectoria recta que une ambos puntos, las referencias a los lazos de control realimentado  $(r'_x, r'_y)$  no pueden ser cualesquiera. Además, existen limitaciones en los máximos ángulos girados y por tanto las velocidades máximas de desplazamiento. Por todo ello, para que el vehículo pueda recorrer la distancia entre dos puntos de una manera precisa y rápida es necesario establecer una trayectoria de guiado. Para generar dicha trayectoria se ha diseñado un *generador de trayectorias*, emplazado como indica la Figura 7, que implementa dos estrategias (ilustradas en la Figura 8):

- a. Desplazamientos a larga distancia. Se utilizan parábolas como referencia de posición, para ocasionar en el vehículo una aceleración progresiva en el inicio del desplazamiento y una deceleración progresiva cuando se aproxima a su destino. Durante el resto de tiempo el vehículo se desplaza a velocidad constante siguiendo una rampa como referencia de posición. En la generación de la trayectoria se utiliza una función matemática parábola-recta-parábola.
- b. Desplazamientos a corta distancia. El vehículo se desplaza a velocidad constante. En la generación de la trayectoria solo se utilizan rampas hasta llegar al punto destino.

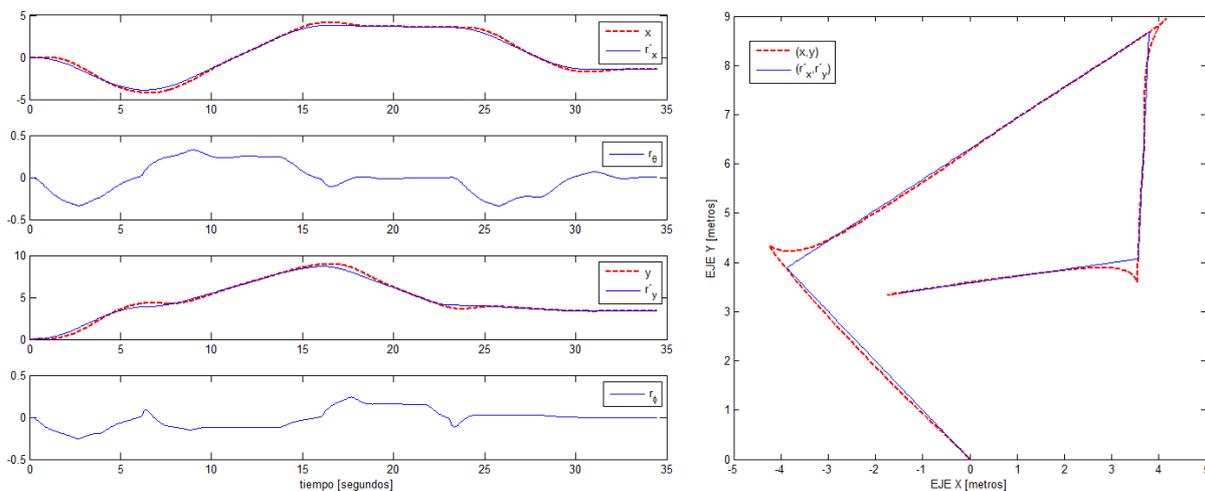
Los parámetros de las rampas y parábolas de posición deben ser consecuentes con un desplazamiento según trayectorias rectas entre puntos origen y destino, con un tiempo apropiado de avance, y considerando las limitaciones de los actuadores. Los controladores  $C_x$  y  $C_y$  diseñados condicionan también sus parámetros.

**Figura 8: Estrategias en generador de referencias de posición y velocidad**



La implementación del generador de referencias y de los controladores se realizó en tiempo discreto y lenguaje de programación C++ con un tiempo de muestreo de 0.06 segundos. Se utilizaron herramientas facilitadas en el *benchmark* de control propuesto por el Grupo de Ingeniería de Control de CEA (Comité Español de automática) (véanse detalles en ("Concursos CEA," 2013) y (Blasco, Gilberto, & Sergio, 2013). Algunos de los resultados obtenidos se ilustran en la Figura 9.

**Figura 9: Generación y control del seguimiento de trayectorias de ARDrone**



## 5. Conclusiones

Se ha presentado el guiado y control de estabilización y orientación de un vehículo aéreo de cuatro rotores, que de forma autónoma debe alcanzar distintos puntos espaciales planificados con el fin de en futuros trabajos capturar imágenes aéreas de viñedos.

Para ello, se ha descrito en detalle el esquema jerárquico de control que incluye en su nivel exterior el control del desplazamiento espacial del cuatrirrotor, y en el interior los controles de su orientación y estabilización que condicionarán el desplazamiento. Para el diseño de los elementos de control, se han detallado las ecuaciones dinámicas no lineales y de carácter multivariable que describen el comportamiento del cuatrirrotor, y el modo adecuado de manipularlas para obtener sistemas lineales y con el mayor desacoplamiento posible.

Se ilustran también algunos resultados sobre el guiado en un plano de un dispositivo cuatrirrotor comercial. En particular se muestra el modelado dinámico del desplazamiento del dispositivo, el posterior diseño de los controladores, y de la estrategia de generación de trayectorias.

En futuros trabajos se pretende llevar a cabo para cuadricópteros específicos: los controles internos de estabilización y orientación; el desempeño de la misión de vuelo con la captura de imágenes del viñedo.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Gobierno de La Rioja la ayuda prestada en el proyecto de investigación IMPULSA 2010/01 dentro del Plan Riojano de I+D+i 2008-2011.

## Referencias

- Blasco, X., Gilberto, R.-M., & Sergio, G.-N. (2013). Resultados del Concurso de Ingeniería de Control 2012 y Convocatoria 2013 . *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 10, 240–244.
- Bramley, R., & Williams, S. (2001). A PROTOCOL FOR THE CONSTRUCTION OF YIELD MAPS FROM DATA COLLECTED USING COMMERCIALY AVAILABLE GRAPE YIELD MONITORS. *Precision viticulture. Cooperative Research Centre for Viticulture, Adelaide*.
- Castillo, P., García, P., Lozano, R., & Albertos, P. (2007). Modelado y Estabilización de un Helicóptero con Cuatro Rotores. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 4(1), 41–57.
- Concursos CEA. (2013). Retrieved from <http://www.ceautomatica.es/og/ingenieria-de-control/concursos>
- Herwitz, S., Allmendinger, K., Slye, R., Dunagan, S., Lobitz, B., Johnson, L., & Brass, J. (2004). Nighttime UAV Vineyard Mission: Challenges of See-and-Avoid in the NAS. *AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference, Workshop and Exhibit* (pp. 1–4). American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:doi:10.2514/6.2004-6417
- Herwitz, S. R., Dunagan, S., Sullivan, D., Higgins, R., Johnson, L., Zheng, J., Slye, R., et al. (2003). Solar-powered UAV Mission for Agricultural Decision Support. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03*, 3, 1692–1694.

- Herwitz, S. R., Johnson, L. ., Dunagan, S. ., Higgins, R. ., Sullivan, D. ., Zheng, J., Lobitz, B. ., et al. (2004). Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(1), 49–61. doi:10.1016/j.compag.2004.02.006
- Inc., Y. (2002). Yamaha autonomous-flight unmanned helicopter deployed for observation illegal dumping around mt. fuji. Retrieved from <http://www.yamaha-motor.co.jp/global/news/2002/02/06/sky.html>
- Iwahori T., Noguchi N., Ishii K., S. R. (2005). Development of 3-D GIS Map Generation System Using an Unmanned Helicopter. *ASAE Annual International Meeting 2005*, (051020).
- Johnson, L. F., Herwitz, S., Dunagan, S., Lobitz, B., Sullivan, D., & Slye, R. (2003). Collection of Ultra High Spatial and Spectral Resolution Image Data over California Vineyards with a Small UAV. *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment*.
- López-Granados, F. (2010). Weed detection for site-specific weed management: mapping and real-time approaches. *Weed Research*, 51(1), 1–11. doi:10.1111/j.1365-3180.2010.00829.x
- O'Reilly, O. M. (2008). *Intermediate Dynamics for Engineers: A Unified Treatment of Newton-Euler and Lagrangian Mechanics*. Cambridge University Press.
- Parrot ARDrone. (2012). Retrieved from <http://ardrone2.parrot.com/>
- Rovira-Más, F., Zhang, Q., & Reid, J. F. (2005). Creation of Three-dimensional Crop Maps based on Aerial Stereoimages. *Biosystems Engineering*, 90(3), 251–259. doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.11.013
- Sugiura, R., Noguchi, N., & Ishii, K. (2005). Remote-sensing Technology for Vegetation Monitoring using an Unmanned Helicopter. *Biosystems Engineering*, 90(4), 369–379. doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.12.011
- Valavani, K. P. (2011). *Unmanned Aerial Vehicles*. Springer.
- Zarco-tejada, P. J., Berni, J. A. J., Suarez, L., & Fereres, E. (2008). A new era in remote sensing of crops with unmanned robots. *SPIE Newsroom*, 2–4.