

Plataforma para el control visual de un sistema con dos rotores en configuración coaxial

LORETO-GÓMEZ, Gerardo†*, SÁNCHEZ-SUÁREZ, Isahi', MORALES-MORFÍN, Marcela y MEDINA-MEZA, Erick Benjamin

*Instituto Tecnológico Superior de Uruapan
Universidad Politécnica de Uruapan*

Recibido 9 de Octubre, 2017; Aceptado 27 de Noviembre, 2017

Resumen

La configuración de un helicóptero coaxial utiliza dos rotores sobre un mismo eje que giran en direcciones opuestas con el objetivo de balancear los pares generados y proporcionar un mayor empuje vertical. En este artículo se presenta el desarrollo de una plataforma experimental que permite estudiar las características de vuelo estacionario de los helicópteros coaxiales así como su despegue y aterrizaje vertical. El sistema de dos rotores en configuración coaxial que integran la plataforma puede posicionarse automáticamente a una altura deseada medida a través de un sistema de visión integrado por una cámara RGB y una tarjeta comercial marca UDOO QUAD que realiza el procesamiento de la visión. Finalmente, la información de posición es enviada a una computadora personal que implementa el algoritmo de control constituido por un arreglo de dos controladores PI en estructura de cascada, el lazo externo controla la altura de vuelo y el lazo interno controla la velocidad de cada uno de los rotores. El diseño mecánico, el hardware y los algoritmos de procesamiento de visión y de control son presentados en detalle. Los resultados experimentales demuestran la viabilidad de la plataforma propuesta para poder utilizarse con fines didácticos y de investigación.

Helicóptero coaxial, control visual, vehículo aéreo no tripulados

Abstract

The configuration of a coaxial helicopter uses two rotors on the same axis that rotate in opposite directions in order to balance the generated pairs and provide a greater vertical thrust. This article presents the development of an experimental platform to study the stationary flight characteristics of coaxial helicopters as well as their vertical take-off and landing. The system of two rotors in coaxial configuration that integrate the platform can be automatically positioned at a desired height measured through a vision system integrated by an RGB camera and a UDOO QUAD commercial card that performs the vision processing. Finally, the position information is sent to a personal computer that implements the control algorithm consisting of an arrangement of two PI controllers in a cascade structure, the outer loop controls the flight height and the internal loop controls the speed of each rotors. The mechanical design, the hardware and the algorithms of vision processing and control are presented in detail. The experimental results demonstrate the feasibility of the proposed platform to be used for didactic and research purposes.

Helicopter coaxial, visual control, unmanned aerial vehicle

Citación: LORETO-GÓMEZ, Gerardo, SÁNCHEZ-SUÁREZ, Isahi, MORALES-MORFÍN, Marcela y MEDINA-MEZA, Erick Benjamin. Plataforma para el control visual de un sistema con dos rotores en configuración coaxial. Revista de Energías Renovables 2017. 1-3:51-58

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: gerardoloreto@tecuruapan.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Actualmente, existe un creciente interés en los vehículos aéreos no tripulados (VANT), en particular, los denominados de ala rotativa (Liu, Peter, et al., 2014). Las características más notables son su capacidad de estar suspendido sin que la aeronave se desplace, cambiar su orientación en vuelo suspendido, poder avanzar o moverse lateralmente manteniendo su altura y la habilidad para despegar y aterrizar de manera vertical (VTOL – del inglés *Vertical Take-Off and Landing*), (Intwala, A., & Parikh, Y., 2015). Los VANT de ala rotativa se pueden diferenciar por el número de rotores y la configuración que asuman (tándem, coaxiales, helicópteros, cuadricópteros, entre otros), (Gupta, S. G., et al., 2013).

En los últimos años, la mayor parte del desarrollo de vehículos aéreos no tripulados se ha centrado en su variante de cuatro rotores dispuestos en las extremidades de una cruz. La gran popularidad de este tipo de vehículo, conocido como cuadricóptero, se debe a su gran maniobrabilidad y relativa facilidad de control (Amin, R., et al., 2016). A diferencia del cuadricóptero, los helicópteros coaxiales son aeronaves con dos rotores que giran en sentido opuesto sobre un mismo eje. Esta característica le permite consumir menos potencia para una carga dada y su construcción es más compacta en comparación con un cuadricóptero. No obstante, tiene la desventaja de ser mecánicamente más complejo, debido a que el eje principal tiene que proporcionar propulsión y control, de forma simultánea, a los dos rotores que giran en sentido opuesto (Prior, S. D., 2010).

La particularidad del VANT coaxial se fundamenta en el uso de dos rotores en contra rotación, que compensan y anulan el par resultante sobre el fuselaje de la aeronave.

Esto le permite poder prescindir del rotor de cola, necesario en los helicópteros convencionales para contrarrestar el par generado por el rotor principal. Al tener dos rotores principales, toda la potencia se emplea en generar sustentación, aumentando así la eficiencia energética de estos vehículos (Huerzeler, C., et al., 2013).

Los VANT de ala rotativa desde un punto de vista de la teoría de control, son sistemas intrínsecamente inestables, no lineales, multi-variables, con dinámicas complejas y altamente acopladas, por lo tanto, el desarrollo de nuevos algoritmos de control que permitan un vuelo estable para diferentes aplicaciones resulta un problema de interés actual.

En este contexto, este trabajo presenta el desarrollo de una plataforma experimental basada en un sistema que incluya un VANT en configuración coaxial, un software de control y de procesamiento de datos que permita el tratamiento de la información de navegación y control de vuelo del vehículo en tiempo real con el objetivo de poder probar una amplia gama de estrategias y métodos de control lineal y no lineal. Particularmente, en este trabajo se presenta el diseño mecánico y de control, así como la validación del funcionamiento de la plataforma al implementar un algoritmo de control constituido por un arreglo de dos controladores PI en estructura de cascada que permiten estabilizar el sistema a una altura deseada utilizando información proveniente del sistema de visión (Flores-montes, M., et al., 2017).

El trabajo se encuentra organizado en 4 secciones. La sección 2 presenta la descripción general del sistema mecánico, del sistema de visión y del sistema de control de la plataforma.

En la sección 3 se muestran los resultados experimentales preliminares obtenidos para el control de uno de los dos grados de libertad que tiene la plataforma y que corresponde al grado de posición en la altura del VANT. Finalmente, las conclusiones y posibles trabajos a futuro del artículo son discutidos en la sección 4.

Descripción general de la plataforma

La metodología de diseño de la plataforma se realizó en tres fases. La primera consideró como primer paso un estudio bibliográfico de los trabajos realizados en el diseño de las diferentes configuraciones y estructuras que se han implementado para un VANT axial, con el fin de conocer esfuerzos realizados anteriormente y con ello poder distinguir adecuadamente la aportación del diseño que se presenta. En la segunda etapa se diseñó y se implementaron cada uno de los tres elementos que integran la plataforma, esto es, el sistema mecánico, el sistema de visión y finalmente el sistema de control. Finalmente, la última etapa consistió en la puesta a punto de la plataforma mediante la programación de dos algoritmos de control PI en configuración en cascada. A continuación, se describe el diseño de los diferentes sistemas que integran la plataforma.

Sistema mecánico

Estructuralmente, la plataforma es básicamente un marco en el cual dos de sus extremos pertenecen a las guías por las cuales el VANT se desplazará de manera vertical mediante dos rodamientos lineales, estas guías tienen un largo de 60 cm y un diámetro de 16 mm, el material del marco está fabricado de aluminio, ver figura 1.



Figura 1 Sistema mecánico VANT coaxial.

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, la estructura central donde se montan los motores y que se mueve de manera vertical debido al empuje que ejercen las hélices se fabricó mediante impresión 3D. El desplazamiento vertical es permitido debido a que la estructura central se acopla al marco a través de los rodamientos lineales permitiendo así el despegue, sustentación y aterrizaje del VANT, ver figura 2.



Figura 2 Estructura central VANT coaxial.

Fuente: Elaboración propia

La estructura central además permite habilitar un grado de libertad correspondiente a la orientación. Este grado de orientación se define mediante la rotación que se genera por la diferencia de pares entre los dos rotores.

Para permitir esta rotación se diseñó un mecanismo de orientación en el cual los dos rotores se sujetan sobre un eje con soportes para la sujeción de los motores fabricado mediante impresión 3D. El eje se fija a la estructura central mediante rodamientos, de esta forma, si un rotor genera mayor par que con respecto al otro se presenta una rotación del mecanismo, ver figura 3.



Figura 3 Mecanismo para la orientación del VANT

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, la plataforma contiene dos grados de libertad, el primero correspondiente a la posición en altura y el segundo correspondiente a la orientación del VANT con respecto al eje vertical.

Sistema de visión

El sistema de visión se encuentra constituido por una cámara RGB, modelo Microsoft LifeCam HD-5000 y una tarjeta UDOO QUAD que se puede utilizar tanto con Android como con Linux, combina un procesador compatible con Arduino. Es una tarjeta equipada con un procesador ARM i.MX6 Freescale, y una sección compatible con Arduino embebido basado en procesador ATMEL SAM3X8E ARM. UDOO funciona a 3.3V y la tensión máxima que los pines de E/S pueden manejar es 3.3V, ver figura 4.

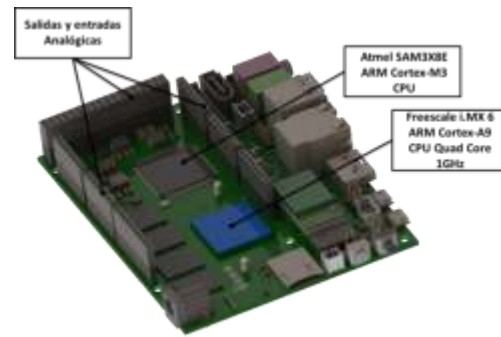


Figura 4 Tarjeta UDDO QUAD

Fuente: Elaboración propia

La imagen se procesa y se obtiene las coordenadas del centroide de una figura geométrica que puede ser de cualquier color y que está unido a la estructura central del VANT. El procesamiento de la imagen se realiza a través de la librería openCV, debido a que tiene una gran variedad de algoritmos de procesamiento de imagen que facilitan el proceso de obtención del centroide de la figura geométrica unida al VANT. El algoritmo para el procesamiento de la imagen se describe en diagrama de flujo de la figura 5. Inicialmente, la imagen se transforma de RGB al espacio-color HVS, donde HSV hace referencia a Matiz, Saturación y Valor, se trata de una transformación no lineal del espacio de color Rojo, Verde y Azul (RGB), con el objetivo de filtrar todos los demás objetos en la imagen presente y solamente detectar la forma geométrica unida al VANT.

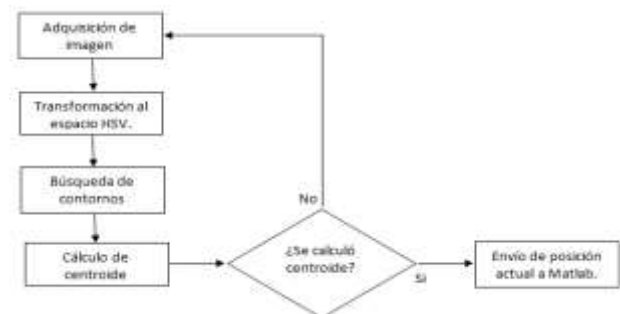


Figura 5 Diagrama de flujo para el procesamiento de imagen.

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, una vez que se filtró la imagen, solo se muestra el área que ocupa el objeto a ser rastreado se procedió a encontrar los contornos de la figura que sirve de referencia de la posición del VANT, a través del algoritmo *findContours* que contiene la librería openCV, donde la imagen binaria (blanco y negro) se procesa teniendo como referencia el cambio de un color a otro. Finalmente, teniendo la imagen filtrada y con sus contornos definidos se procedió a calcular el centroide de la referencia mediante el algoritmo *moments* de la librería openCV, ver figura 6.



Figura 6. Filtrado final de la imagen.

Fuente: Elaboración propia

Sistema de control

El algoritmo de control implementado solo permite controlar la altura y no la orientación del VANT, consiste de dos controladores en configuración de cascada siendo el controlador de posición el control de lazo externo y un lazo de control interno para el control de velocidad de los rotores.

La programación del control es llevada a cabo dentro del entorno de Matlab a través de la creación de una interface gráfica para el usuario. En la figura 7 se muestra el diagrama de bloques del algoritmo para el control de la altura del VANT, en donde $d(t)$ representa la altura deseada expresada en pixeles, $a(t)$ es la altura proporcionada por el sistema de visión, $e(t)$ representa el error entre la posición deseada y la actual y $u(t)$ es la señal de control que representa las rpm deseadas para los rotores.

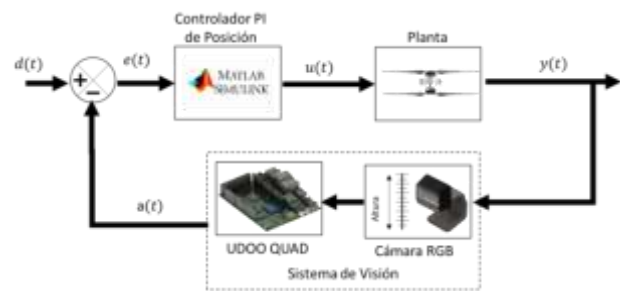


Figura 7 Diagrama de bloques para control de posición.

Fuente: Elaboración propia

La siguiente fórmula describe la implementación del lazo de control PI externo:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \tag{1}$$

En el bloque *Planta* se implementa el lazo de control interno para la velocidad de los motores, en la figura 8 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al control de las rpm para cada motor, en donde $r(t)$ representa las rpm deseada provenientes del lazo externo, $x(t)$ son las rpm estimadas, $ev(t)$ representa el error entre las rpm deseada y las rpm estimadas y $v(t)$ es la señal de control que representa el PWM enviado a cada rotor.

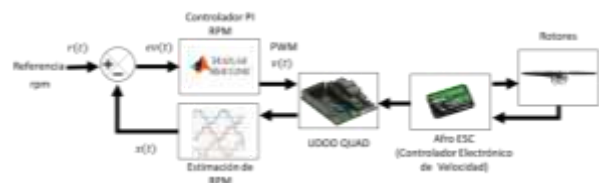


Figura 8 Diagrama de bloques para control de velocidad

Fuente: Elaboración propia

La siguiente fórmula describe la implementación del lazo de control PI interno:

$$v(t) = k_{pi} ev(t) + k_{ii} \int_0^t ev(t) dt \tag{2}$$

Para llevar a cabo el proceso de control de los motores se utilizó un controlador de velocidad electrónico (ESC del inglés *Electronic Speed Control*), este dispositivo permite controlar los motores sin escobillas de corriente directa, al controlar las conmutaciones de las fases del motor con un método muy simple como puede ser PWM, PPM o incluso I2C, para nuestro caso es necesario tener un ESC con conexiones a I2C, tal es el caso de la versión AFRO, este cuenta con los pines libres para llevar a cabo la comunicación I2C, por este medio se manda la consigna de un valor a un registro interno del microcontrolador y este hace el procesamiento para hacer girar el motor. En este proyecto se usó el Afro ESC 30A, los motores *Turnigy 4206 530kv Brushless Multi-Rotor Motor* y para la generación de empuje en este sistema las dos hélices utilizadas, una para la generación de empuje en sentido de las manecillas de reloj y otra para la generación de empuje en sentido contrario a las manecillas del reloj fueron del modelo *Multirotor Carbon Fiber T-Style Propeller 15x5.5*, cuya construcción es de un tipo de fibra de carbono de alta calidad.

El valor del registro mencionado anteriormente hace referencia a un contador que registra el número de conmutaciones realizadas, el Afro ESC desconoce las revoluciones mecánicas (360 grados), solo tiene en cuenta las revoluciones eléctricas; estas revoluciones consisten en 6 conmutaciones realizadas por el motor, cada revolución eléctrica está marcada por 2 imanes permanentes los cuales se encuentran en la carcasa del motor (polos del motor). Los polos del motor pueden ser identificados en las especificaciones del motor o contándolos físicamente; esto es, conociendo que cada polo corresponde a una bobina del motor. Teniendo en cuenta como se incrementa el valor de ese registro, se puede realizar una estimación de las rpm de los motores.

En el caso del motor seleccionado contiene 12 polos, en realidad para saber las revoluciones mecánicas (360 grados) es necesario dividirlo sobre 2 (debido a las revoluciones eléctricas) y multiplicarlo por el valor del registro leído, además de dividirlo sobre el tiempo en el que se llevó a cabo desde la última vez que este registro fue leído (el registro se reinicia cada vez que este se lee). La siguiente fórmula permite realiza una estimación muy simple de las revoluciones actuales del motor:

$$RPM = \frac{\text{Valor_del_registro} \left(\frac{\text{Numero_de_polos}}{2} \right)}{\text{tiempo_de_ultima_lectura}} \quad (3)$$

Por otra parte, la función del microcontrolador SAM3X8E de la tarjeta UDOO QUAD es la de controlar los dos rotores al mismo tiempo, ver figura 9.

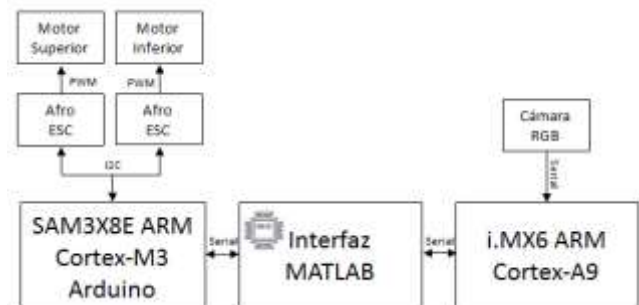


Figura 9 Diagrama de bloques para control con la tarjeta UDOO QUAD

Fuente: *Elaboración propia*

Teniendo en cuenta que solo se controla la altura y no la rotación del VANT, las consignas de control hacia los motores son iguales, por lo que solo se hace la estimación de las revoluciones actuales de un solo motor haciendo la consideración de que estas serán las mismas en ambos rotores ignorando cualquier perturbación externa que pudiera existir.

La figura 10 muestra la imagen de la interfaz gráfica programada en Matlab para la plataforma.

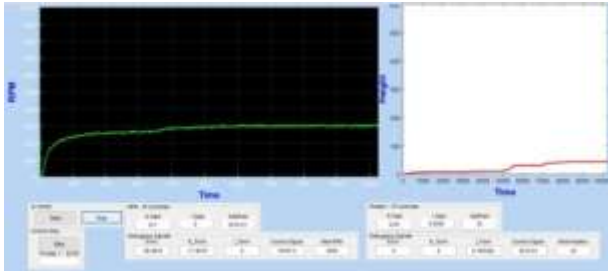


Figura 10 Interfaz GUI de Matlab.

Fuente: Elaboración propia

Resultados experimentales

La parte experimental de este proyecto consistió en realizar la sintonización de los dos controladores PI que incluyeron una zona muerta a través del método experimental variando las ganancias del controlador y la ventana de la zona muerta hasta obtener un desempeño satisfactorio en el posicionamiento del VANT. La ventana de la zona muerta está dada de manera simétrica, esto quiere decir, que tiene el mismo número de pixeles hacia arriba y hacia abajo partiendo desde la referencia deseada que en este caso es la altura deseada. La figura 11 muestra el desempeño obtenido cuando se utiliza una zona muerta de 150 pixeles de manera simétrica para una referencia deseada de altura de 150 pixeles, la escala de tiempo en la gráfica es de 1 ms. Con una ganancia proporcional de 0.3 e integral de 0.001 para el lazo interno y una ganancia proporcional de 0.25 e integral de 0.0001 para el control de lazo externo. En la figura 12 se muestra la plataforma física construida.

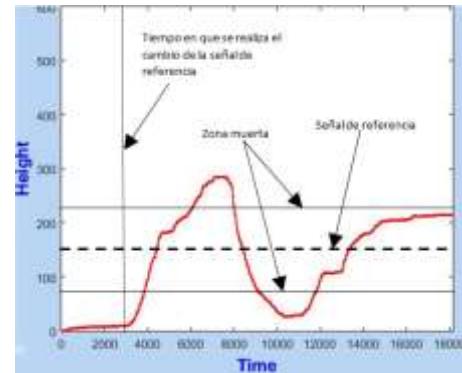


Figura 11 Respuesta en posición del VANT

Fuente: Elaboración propia



Figura 12. Plataforma física del VANT

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

El presente trabajo abordó el desarrollo de una plataforma para el control autónomo de un VANT, contemplando tanto el hardware como de software. El diseño mecánico y los algoritmos de procesamiento de visión y de control para altura de un VANT de dos grados de libertad constituida por dos rotores en configuración coaxial fueron descritos.

Los resultados experimentales preliminares en el control de la posición del VANT permitieron validar el desempeño y la flexibilidad en la implementación de algoritmos de control visual. El sistema diseñado será una herramienta ideal para la enseñanza e investigación en temas como modelado, identificación de parámetros y diseño de algoritmos de control modernos. El trabajo a futuro se concentrará en implementar el control independiente para cada motor e implementar técnicas de control para los dos grados de libertad de la plataforma, posición y orientación.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Tecnológico Nacional de México y al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por el financiamiento otorgado para la realización del proyecto. Así mismo, agradecer al Instituto Tecnológico Superior de Uruapan y a la Universidad Politécnica de Uruapan por las facilidades otorgadas para la realización del mismo.

Referencias

Intwala, A., & Parikh, Y. (2015). A Review on Vertical Take Off and Landing (VTOL) Vehicles. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)*, Vol. 2.

Liu, Peter, et al. (2014). A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering. *Smart Struct. Syst*, 13(6), 1065-1094.

Gupta, S. G., Ghonge, M. M., & Jawandhiya, P. M. (2013). Review of unmanned aircraft system (UAS). *International journal of advanced research in computer engineering & technology (IJARCET)*, 2(4), pp-1646.

Amin, R., Aijun, L., & Shamshirband, S. (2016). A review of quadrotor UAV: control methodologies and performance evaluation. *International Journal of Automation and Control*, 10(2), 87-103.

Prior, S. D. (2010). Reviewing and investigating the use of Co-Axial rotor systems in small UAVs. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2(1), 1-16.

Huerzeler, C., Alexis, K., & Siegwart, R. (2013, May). Configurable real-time simulation suite for coaxial rotor uavs. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on* (pp. 309-316). IEEE.

Flores-Montes, Miguel Ángel, Medina-Muñoz, Luis Arturo, Mayorquín-Robles, Jesús, García-Muñoz, Omar Adrián. Detección de Objetos a Color en Tiempo Real con Técnicas de Visión Artificial y Arduino. *Revista de Prototipos Tecnológicos*. 2017 3-7: 1-6.