

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MAQUETA DE UN HELICÓPTERO DE 4 ROTORES PARA UN LABORATORIO DE CONTROL

L. Acosta, J. Toledo, G.N. Marichal, S. Hernández, J. N. Rodríguez, S. Torres
Departamento de Física Fund. y Exp., Electrónica y Sistemas, Universidad de La Laguna
La Laguna 38271. Tenerife.
jonay@cyc.dfis.ull.es

Resumen

En este artículo se presenta un prototipo de helicóptero de 4 rotores. Se analizan las diferentes facetas de su construcción haciendo hincapié en el diseño mecánico, diseño del sistema sensorial y de actuación como en el control del prototipo. En el artículo se presentan las dificultades con las que nos hemos encontrado en el diseño del sistema y las diferentes soluciones a los mismos. La maqueta resultante constituye una plataforma de experimentación tanto desde el punto de vista didáctico como en el campo de la investigación en ingeniería de control.

Palabras Clave: Control, Robótica.

1 INTRODUCCIÓN .

El helicóptero [1] [2] en comparación con otros aparatos aeronáuticos tiene la comodidad de trabajar fácilmente en tres dimensiones, al poder producir movimiento en cualquiera de los tres ejes de una forma segura y precisa.

La razón por la cual se opta por un helicóptero de cuatro rotores, es que este tipo de modelo elimina la complicación mecánica en la construcción del rotor principal de un helicóptero convencional. Existen varios tipos de rotores para los helicópteros normales. Aunque generalmente en todos estos tipos, la elevación y el resto de movimientos posibles del aparato, no dependen sólo de la velocidad de giro del rotor, sino también del ángulo de ataque de las palas (paso colectivo) y de su inclinación mediante el plato cíclico.

En un helicóptero de cuatro rotores, todos los movimientos, y desplazamientos posibles del aparato se controlan únicamente con las velocidades de giro de cada rotor, concretamente con las combinaciones de velocidades de giro de los cuatro rotores. De esta manera simplificamos muchísimo los problemas mecánicos que encontraríamos en la construcción de los rotores [3] [4].

Además con esta estructura podemos realizar cualquier movimiento en 3 dimensiones (rotaciones y traslaciones, en cualquier eje) [5] [6] [7].

Comenzaremos en la sección 2 por describir el prototipo, para en la sección 3 concentrarnos en los ensayos realizados, presentando las conclusiones en la sección 4.

2 PROTOTIPO

En la Figura 1 y Figura 2 se muestra el prototipo desarrollado. Los componentes que forman la estructura externa del helicóptero, son los siguientes:

- Dos tubos en forma de cruz.
- Cuatro motores con dos aspas cada uno.
- Un sensor de ultrasonidos en cada extremo de la cruz.
- Placa incorporada donde se encuentran los demás componentes electrónicos.



Figura 1 – Fotografía del prototipo



Figura 2 – Fotografía del prototipo en vuelo

Descripción mecánica

El tamaño de cada pala del rotor es de 18 cm y es necesario dejar una distancia entre cada rotor de al menos 10 cm, para evitar turbulencias o que el movimiento de un rotor afecte al otro. La fibra de carbono es el material adecuado para la fabricación del helicóptero. En concreto para el chasis, se ha utilizado un tubo de carbono de 8 milímetros de diámetro exterior. Para que la unión en cruz de las dos piezas de 65 cm de longitud, quede a 90 grados perfectos, se hace uso de una pieza utilizada para la construcción de cometas. Además se refuerza esta unión mediante el arrollamiento de un hilo unidireccional de fibra de carbono, pegado con cianocrilato de secado casi instantáneo.

Una parte importante del chasis es la unión con los motores. Para la fabricación de estas piezas se disponen varias láminas de fibra de carbono pegadas entre si, hasta conseguir una lámina lo suficientemente rígida como para enganchar en ella el motor y que la pieza no se doble. Luego se le da la siguiente forma para poder fijar el motor sobre ella. En la Figura 3 se muestra un croquis del sistema, expresando todas las unidades están expresadas en milímetros.

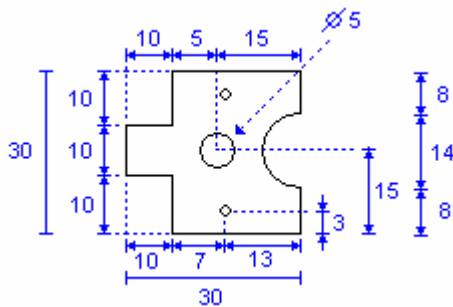


Figura 3 – Croquis del Sistema

El último detalle que se incorpora al chasis, son los patines del helicóptero. Debido también a las peculiaridades del prototipo, los patines no se parecen a los de un helicóptero normal. Concretamente, para nuestro modelo, los patines tienen una doble función, aparte de servir de apoyo

para el despegue o aterrizaje, mantienen el chasis a una determinada altura.

Al igual que el chasis, las palas de los rotores también están fabricadas en fibra de carbono. En el caso del chasis se consiguieron en el mercado los tubos de carbono, pero las palas tuvieron que ser fabricadas a medida a partir de un tejido de fibra de carbono.

Una característica de la fibra de carbono es que esta es prácticamente irrompible, cuando las tensiones se generan en la misma dirección de las fibras. Pero cuando las tensiones se producen a 90° de la dirección de las fibras, estas se rompen muy fácilmente. Por lo tanto es muy importante el ángulo de colocación de las fibras. En nuestro caso, como se tiene un tejido en forma de malla, lo ideal es disponer el tejido a 45° con respecto a las palas. Así se ofrecerá una buena resistencia a las tensiones.

Las palas están pegadas sobre una "T" que va unida al eje del motor. Esta "T" está hecha mediante la unión de dos piezas de una varilla de fibra de carbono de 3 mm de grosor. La unión se refuerza con hilo de fibra de carbono y adhesivo de cianocrilato.

Es importante que el rotor quede perfectamente equilibrado y que los ángulos de ataque de las dos palas del rotor sean iguales. De lo contrario se producirían vibraciones que dificultarían mucho el vuelo y estabilidad del aparato. El peso de cada pala debe estar entre 4 y 5 gramos.

El peso del conjunto del motor junto con las palas y la "T" que las sujeta es de 32.5 gramos. Por lo tanto los cuatro motores juntos añadirán al peso de la estructura un total de 130 gramos. Entonces el peso total del helicóptero sin la electrónica de control debe estar entorno a los 267 gramos (el peso total de la estructura, incluido el cableado tanto para la alimentación de los motores como los del bus I²C y los sensores es de 93 gramos).

El peso de cada sensor de Ultrasonidos es de 11 gramos. Como hay cuatro sensores. El peso total del chasis, junto con los sensores, es de 137 gramos.

Sistema de actuación

Se han escogido cuatro motores de corriente continua. Estos motores están diseñados especialmente para aeromodelismo, en concreto por GWS1 y corresponden al modelo IPS-DX-EXC. Los cuatro motores tienen cada uno una reductora que va acoplada al motor y a la hélice, esta reductora es de 10.7:1. Este tipo de motores tiene unas características adecuadas para aplicaciones de aeromodelismo, como su reducido peso de 29,92 g, además de proporcionar una alta velocidad de giro

En la Figura 4 se observa un perspectiva transversal del prototipo donde se aprecian claramente los motores señalados.



Figura 4 – Fotografía transversal del prototipo

Junto con los motores se hace necesario utilizar algún tipo de driver de motor que permita un acoplamiento electrónico adecuado entre el microcontrolador y los motores. En este caso hemos elegido el MOSFET IRF7456. El mosfet es de tecnología SMD, por lo tanto tiene unas dimensiones muy reducidas de un tamaño en milímetros de 4.98 x 6.20 x 1.75. La gran ventaja de este componente es que puede soportar hasta un total de 16 A siendo SMD, esto nos permite soportar una alta intensidad en unas dimensiones muy pequeñas. Esta cualidad es posible debido a que la resistencia interna es muy pequeña en torno a 0.0065Ω , lo que hace innecesario el uso de disipadores.

Sistema sensorial

1. Giróscopos.

Se dispone de tres giróscopos, uno para cada eje de giro. El giróscopo que utilizamos para nuestro prototipo es el modelo ENC-03J de la marca Murata. Sus dimensiones son bastante reducidas: 26 x 27 x 11.3 milímetros, y su peso es de sólo 4.8 gramos.

2. Acelerómetros.

Se dispone de dos acelerómetros de dos ejes, por lo que se tiene redundancia en uno de los ejes.

En concreto, el acelerómetro del que se dispone para poder realizar las pruebas es un ADXL202E del fabricante “Analog Devices”.

El ADXL202E es un acelerómetro de bajo costo, capaz de medir aceleraciones en dos ejes con salidas digitales. Mide aceleraciones en un rango de $\pm 2 g$, y puede medir tanto aceleración dinámica (por ejemplo las vibraciones) como aceleración estática (gravedad).

Sus características más relevantes son las siguientes:

- Sensor de Aceleración de dos ejes en un solo circuito integrado.
- Resolución de 2mg a 60 Hz.
- Baja potencia < 0.6 mA.
- Interfaz directa para microcontroladores a través de una salida tipo “Duty Cycle”.
- Ajuste del Ancho de Banda (BW) con un solo condensador.
- Opera con una alimentación simple de 3 V a 5.25 V.
- Sobrevive a impactos de hasta 1000 g.

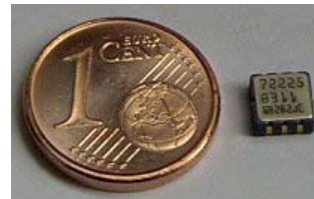


Figura 5 – Comparación de tamaño del acelerómetro con una moneda.

3. Ultrasonidos.

Se han elegido los módulos SRF08. Como características más relevantes podemos indicar la posibilidad de usarlos con un bus I²C que permite más fácilmente la comunicación de varios ultrasonidos con el respectivo microcontrolador y sobre todo el reducido consumo. Mientras otros sensores como el SRF04 necesitan una corriente máxima de 50 mA para nuestro sensor se ha reducido a una corriente nominal de unos 15 mA y sobre los 3 mA en modo reposo.

Realmente con tres sensores se puede determinar el plano en que está el prototipo.

4. Microcontrolador

El microcontrolador elegido para esta aplicación ha sido el PIC 18F6680. Una de las características por las que se ha escogido es por la gran cantidad de conversores analógicos–digitales, ya que disponemos de varios sensores.

El microcontrolador se puede programar vía ICSP en la propia placa.

El microcontrolador transmite los datos de los sensores por la UART a un ordenador PC y recibe los comandos en forma de anchura de las PWM que se necesitan generar para el control de los motores.

La comunicación puede realizarse de manera inalámbrica de manera sencilla y robusta haciendo uso de los sistemas inalámbricos de MICROCHIP (RFPIC), que permiten un ancho de banda de 80Kbs, suficiente para la dinámica del prototipo.

5. Sistema de alimentación

Se han utilizado baterías de polímero de litio de la casa Kokam que disponen de dos células de 3.7 V y 1500 mAh. conectadas en serie. Las características más importantes de estas baterías son que además de proporcionar un intensidad adecuada para el consumo previsto (aproximadamente unos 8A), su peso y tamaño se ajustan en gran medida a los requerimientos de un prototipo para el vuelo como el presentado. Sus dimensiones son de 78x40x13 mm, mientras que su peso es de 81 gramos.

En la Figura 6 presentamos una fotografía de la placa electrónica horizontal desarrollada donde se alojan la mayoría de componentes indicados.

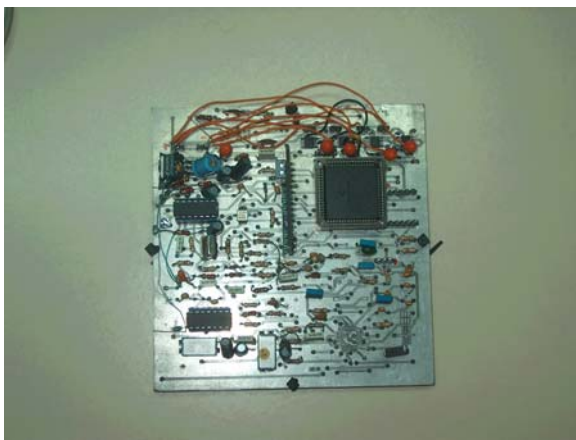


Figura 6 - Placa electrónica horizontal con Microcontrolador PIC, giróscopos y acelerómetros entre otros componentes

3 CONTROL DEL HELICÓPTERO

Este tipo de helicópteros, no necesita rotor de cola, porque las fuerzas de cada motor se contrarrestan entre sí. Entonces es importante la dirección de giro de cada rotor para mantener la estabilidad del aparato. Como existen 4 rotores, basta con hacer girar dos en un mismo sentido y otros dos en sentido contrario tal y como se muestra en la figura 7.

Otra característica de los helicópteros de cuatro rotores, es que, o bien para mantener la estabilidad, o bien para realizar cualquier tipo de maniobra, tan solo hay que actuar sobre las velocidades de giro de cada rotor.

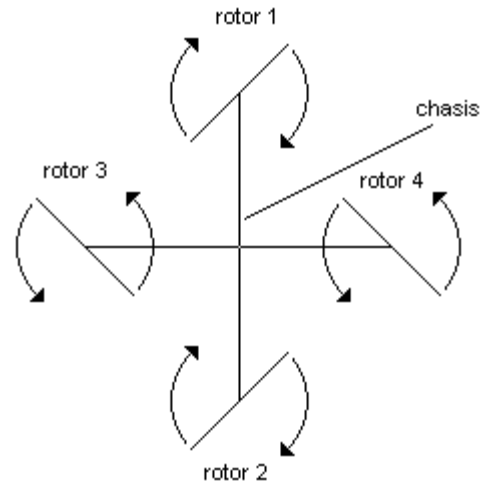


Figura 7 – Esquema del giro de los rotores

Existen tres ejes de giro que definen las distintas maniobras de un helicóptero en nuestro caso [2]. Está el eje de cabeceo o “pitch”, el eje de alabeo o “roll” y el eje de guiñada o “yaw” [8]. En la figura se pueden observar estos tres ejes. Las diferentes combinaciones de ángulos en cada uno de estos ejes, definen el estado y las maniobras del aparato en vuelo. En el helicóptero de cuatro rotores, al ser totalmente simétrico, hemos de tomar la decisión de hacer coincidir por ejemplo, el rotor 1 con la cabeza del aparato. Así se definen entonces los distintos movimientos en la siguiente figura.

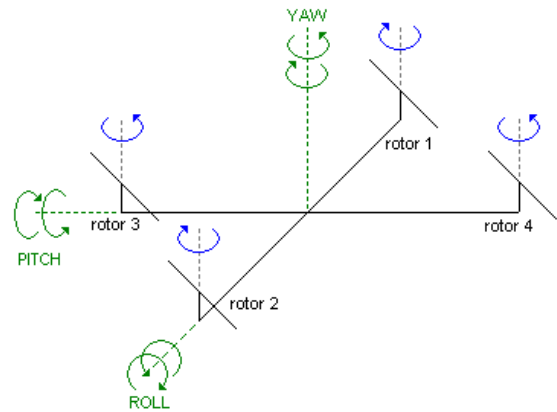


Figura 8 – Ejes de giro

Ahora, centrándose en el problema que nos concierne de mantener la estabilidad del helicóptero, se pueden producir varias situaciones sobre las que se ha de ejercer el control.

Control del Pitch

Cuando, mediante los sensores, se detecta un ángulo en el eje de pitch, hemos de actuar sobre las velocidades de los motores para devolver el helicóptero a una situación estable.

En el caso de la figura 9, se presenta un ángulo positivo en el pitch, por lo tanto habrá que aumentar la velocidad del rotor 2 y disminuir la del rotor 1 en la misma cantidad, para que las fuerzas que hacen que el helicóptero gire sobre el eje de yaw a la izquierda queden contrarrestadas sin modificar las velocidades de los rotores 3 y 4.

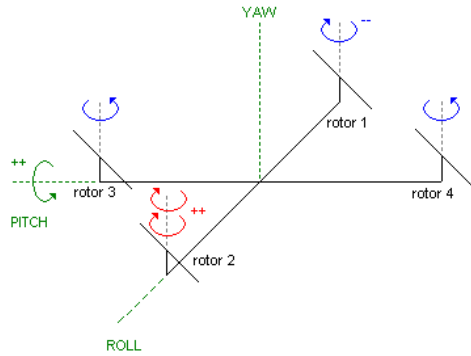


Figura 9 – Control del Pitch

Lo mismo ocurre cuando el ángulo sobre el eje de pitch es negativo, solo que habrá que aumentar la velocidad del rotor 1 y disminuir la velocidad del rotor 2.

Control del Roll

Una situación parecida a la anterior, ocurre cuando lo que se tiene es un ángulo positivo en el eje de roll. En esta situación ha de incrementarse la velocidad del rotor 3 y disminuir la velocidad del rotor 4. Cuando lo que se produce es un ángulo negativo, entonces habrá que aumentar la velocidad del rotor 4 y disminuir la velocidad del rotor 3 en la misma cantidad siempre, para que, como se explicó anteriormente, se mantenga la estabilidad, sin modificar los rotores 1 y 2.

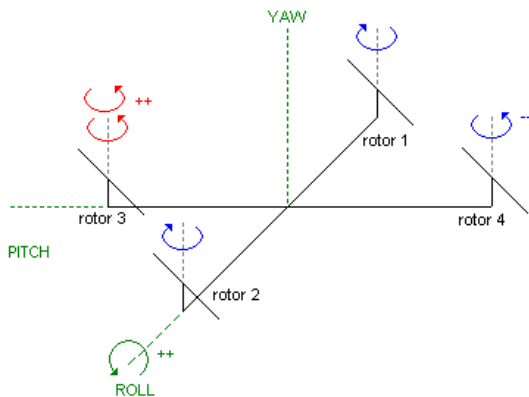


Figura 10 – Control del Roll

Control del Yaw

Una situación algo más compleja se produce cuando se detecta un ángulo positivo en el eje de yaw. Ahora en esta situación ha de modificarse las velocidades de los cuatro motores. Concretamente, hay que aumentar las velocidades de los motores 3 y 4 a la vez que disminuir las velocidades de los motores 1 y 2. Esto se hace para descompensar las fuerzas contrarias al giro de las palas y hacer que la estructura del helicóptero gire en sentido contrario al ángulo positivo en el eje de yaw. Es importante no sólo el aumento de velocidad en el rotor 3 y el rotor 4, sino también la disminución en igual medida de los otros dos rotores, para producir la misma sustentación que tenía el aparato anteriormente y este no pierda o gane altura.

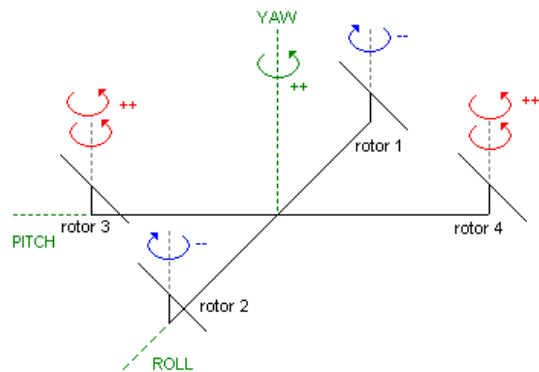


Figura 11 – Control del Yaw

Por el contrario, cuando se detecta un ángulo negativo en el eje de yaw, hay que provocar la situación contraria a la anterior. Se aumentan las velocidades de los rotores 1 y 2, y se disminuyen las velocidades de los rotores 3 y 4 en la misma magnitud.

Control de la elevación (Throttle)

El control de la elevación es, en teoría más sencillo. Aunque hay que aumentar o disminuir las velocidades de todos los motores por igual, para que el aparato se eleve o descienda respectivamente.

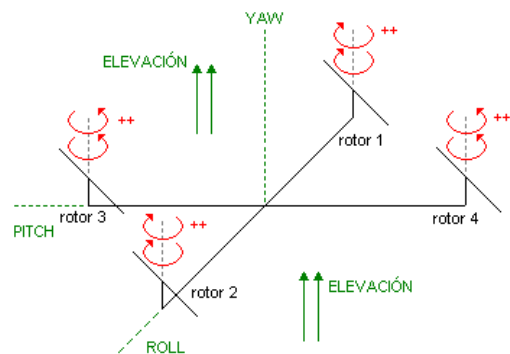


Figura 12 – Control de la elevación

Control del desplazamiento

El control del desplazamiento, es en definitiva, el mismo que el del control del ángulo de inclinación tanto en el eje de pitch como en el de roll. Por ejemplo, en el caso de la figura, se puede ver que si se aumenta la velocidad del rotor 1, se produce una inclinación positiva en el eje de pitch, esto hace que el aparato se desplace hacia atrás.

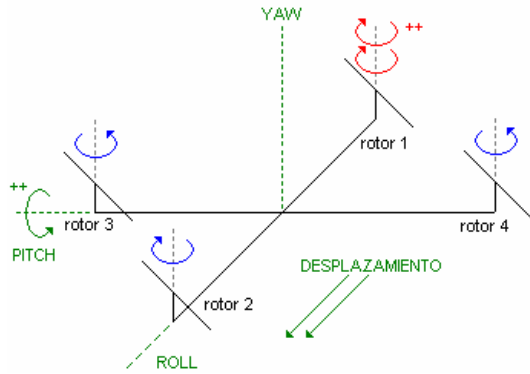


Figura 13 – Control del desplazamiento

Igual ocurre para los desplazamientos hacia delante o laterales a izquierda o derecha.

Dinámica del sistema

La Matriz R_{TH} representa la matriz de transformación entre un sistema de coordenadas fijo situado en la tierra (T), y un sistema móvil solidario a la estructura del helicóptero (H). Podemos ver la matriz definida a continuación, donde Y representa el ángulo Yaw, R el Roll y P el Pitch. Hay que notar que con $s(x)$ nos referimos al seno del ángulo y $c(y)$ al coseno del ángulo indicado.

$$R_{TH} = R_Y \cdot R_R \cdot R_P = \begin{bmatrix} c(Y)c(R) & -s(Y)c(P) + c(Y)s(R)s(P) & s(Y)s(P) + c(Y)s(R)c(P) & 0 \\ s(Y)c(R) & c(Y)c(P) + s(Y)s(R)s(P) & -c(Y)s(P) + s(Y)s(R)c(P) & 0 \\ -s(R) & c(R) & c(P)c(R) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Gracias a esta matriz se puede realizar la conversión de coordenadas entre el sistema situado en el helicóptero y el sistema estático situado en la tierra, con lo que podemos definir la cinemática directa del sistema en función de un eje de coordenadas fijo. Se trata de una matriz ortogonal por lo que se cumple

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{bmatrix} = R_{TH} \begin{bmatrix} x_H & y_H & z_H & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{TH} = R_{HT}^{-1} = R_{TH}^T$$

que la inversa de la matriz es igual a la transpuesta de esta:

Si hacemos un análisis sobre las fuerzas que influyen sobre el helicóptero podemos comprobar que desde el punto de vista del sistema de coordenadas solidario con el helicóptero las fuerzas ejercidas siempre son

$$F_H = \begin{bmatrix} F_{xT} \\ F_{yT} \\ F_{zT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{zH} \end{bmatrix}$$

paralelas al eje Z.

Ahora bien, si traducimos esta fuerza en función del eje situado en la tierra, obtenemos el siguiente resultado:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = R_{TH} F_H = \left(\sum_{i=0}^3 F_i \right) \begin{bmatrix} s(Y)s(P) + c(Y)s(R)c(P) \\ -c(Y)s(P) + s(Y)s(R)c(P) \\ c(P)c(R) \end{bmatrix}$$

En función de los cálculos anteriores podemos definir las aceleraciones de cada una de las coordenadas cartesianas, punto inicial para definir la posición del helicóptero.

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x - K_x \cdot x \\ F_y - K_y \cdot y \\ F_z - mg - K_z \cdot z \end{bmatrix}$$

La dinámica de rotación de los ángulos se puede definir:

$$\ddot{P} = \frac{k(F_1 - F_2 - K_P \dot{P})}{I_x}$$

$$\ddot{R} = \frac{k(F_3 - F_4 - K_R \dot{R})}{I_y}$$

$$\ddot{Y} = \frac{k(F_3 + F_4 - F_1 - F_2 - K_Y \dot{Y})}{I_z}$$

Hay que destacar en el modelo el comportamiento de la inercia y el efecto de la velocidad angular.

Una primera estrategia de control clásica consiste en la utilización de los datos provenientes de los giróscopos para mantener estable la estructura, realizando un control de realimentación de velocidad dado que los giróscopos nos ofrecen directamente la información de las respectivas velocidades. Utilizamos los datos de los giróscopos para realizar el control en velocidad angular de cada uno de los ejes del prototipo, con esta estrategia conseguimos mantener estable la estructura.

La estrategia está basada en un controlador P.I.D. (proporcional, integral, derivado). Inicialmente la implementación fue realizada con el Paquete de Software Matlab. Sin embargo, aunque esto en un principio nos facilitó enormemente la tarea de programación, finalmente hubimos de optar por una herramienta de programación como el Visual C++. Tras una serie de pruebas se comprobó que la velocidad de respuesta del Matlab no era lo suficientemente rápida, como para controlar el sistema en tiempo real. Los parámetros del PID son ajustados manualmente.

Calculamos el comando en función de la información recibida por el sistema sensorial. Este comando se aplica a los motores implicados, para así compensar la velocidad angular detectada y conseguir velocidad angular cero. La forma de actuar es dividir el comando entre la pareja de motores, de esta manera subimos la potencia que recibe uno y disminuimos la otra, generando un par que compense el error detectado.

4 CONCLUSIONES

En este artículo se ha mostrado el desarrollo de un prototipo de helicóptero de 4 rotores. La construcción del mismo conlleva un reto desde el punto de vista de la elección adecuada de componentes en términos de consumo y peso. Finalmente, se ha elaborado una herramienta software encaminada a poder experimentar diferentes estrategias de control. La planta presentada se presta al ensayo de diferentes controladores que permiten una aplicación en tareas docentes, así como explorar nuevas técnicas de control desde el punto de vista de la investigación en control.

Referencias

- [1] Johann Borenstein, Advanced Technologies Lab, University of Michigan, "The Hoverbot: An Electrically Powered Flying Robot". <http://www-personal.engin.umich.edu/~johamb/hoverbot.htm>
- [2] M. Simons, "Model Aircraft Aerodynamics", Argus Book, London, 1987
- [3] Stephan Marti Master's Thesis, "Autonomously flying micro robot"
- [4] F. Iida, "Goal-Directed Navigation of an Autonomous Flying Robot Using Biologically Inspired Cheap Vision", Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics. 2001.
- [5] Nicoud, J.D. and Zufferey, J.C. (2002) Toward Indoor Flying Robots. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 787-792.
- [6] R.G. Austin, "The Sprite aerial robot", Industrial Robot, Vol 24 No 2, 1997, pp152-157.
- [7] J.M. McMichael, M.S. Francis, "Micro Air Vehicles, Toward a New Dimension in Flight", www.darpa.mil/tto/MAV/mav_auvsi.html
- [8] H. Goldstein, "Mecánica Clásica" Editorial Reverté, S. A. 1987
- [9] Murata Electronics North America, "Application guide for Gyrostar". <http://www.murata.com>
- [10] Microchip, "PIC186680 Data Sheet" www.microchip.com
- [11] Motores GWS www.gws.com.tw
- [10] Ultrasonidos SRF08 www.superrobotica.com/S320112.htm