
CAPÍTULO 1

PRUEBAS DEL CONTROLADOR

El controlador diseñado se comporta adecuadamente en lo que respecta a las simulaciones, sin embargo debido a que la caracterización del sistema puede contener errores se proceden a realizar algunas pruebas sobre los subsistemas que componen al sistema global. Estas pruebas son de utilidad para verificar el correcto funcionamiento del controlador diseñado y/o para realizar los ajustes que sean necesarios en el mismo.

1.1. Control del subsistema del Roll

Para lograr el correcto funcionamiento del cuadricóptero es fundamental que el control sobre los ángulos de Pitch y de Roll se comporte de buena forma. A modo de ejemplo, es imposible lograr el equilibrio mecánico si dichos ángulos difieren de cero. Por dicha razón, previo a realizar pruebas sobre el sistema completo es necesario asegurarnos que los subsistemas del Roll y del Pitch funcionan correctamente. De acuerdo al modelo físico del sistema desarrollado en ?? ni el Roll ni el Pitch son subsistemas independientes entre sí, además ambos dependen de la velocidad angular según \vec{k}_q . Sin embargo, dichos ángulos toman valores cercanos a cero en las trayectorias de interés, en este caso se puede realizar la aproximación de que ambos sistemas son independientes.

A partir de esta consideración se procede a fijar al cuadricóptero sobre dos guías como se muestra en la figura 1.1, de forma de eliminar todos los grados de libertad del sistema excepto el ángulo de Roll y la velocidad angular correspondiente al eje de rotación del Roll. Se realizan dos pruebas: la primera consiste en que el sistema alcance la posición de equilibrio ($\psi = 0$), la segunda consiste en alejar al sistema del equilibrio y lograr que vuelva al punto de equilibrio.



Figura 1.1: Dispositivo de prueba de Roll

El controlador posee dos terminos proporcionales: uno para el ángulo ψ y el otro para la velocidad angular ω_{qx} y un término integral asociado a la integral de ψ . El modelo de este subsistema es el siguiente:

$$\begin{pmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\omega}_{qx} \\ \dot{\psi}_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{MgL'}{I_{xx}} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_2 \\ \omega_4 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Donde b y $\frac{MgL'}{I_{xx}}$ son los obtenidos en la sección ?? . La matriz de realimentación obtenida trabajando con las matrices Q y R definidas en 1.3 es:

$$K = \begin{pmatrix} 44,43 & 10,78 & 21,36 \\ -44,430 & -10,78 & -21,36 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

$$Q = \begin{pmatrix} 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{pmatrix} \quad R = \begin{pmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

En la figura 1.2 se observa la respuesta del ángulo de Roll en lazo cerrado. Con el setpoint fijo en $\psi = 0$ se observa que el módulo del ángulo es siempre inferior a los 2° a excepción del arranque y en un pico cerca de los 23 segundos. En este sentido se puede afirmar que el control implementado es exitoso, ya que logra el objetivo planteado. Puede observarse además que una vez que el controlador comienza a actuar se produce un cambio en el ángulo alcanzando un valor cercano a los 5° . Este error es producido por la diferencia del empuje de los motores frente a una misma orden. El control integral es el encargado de corregir esta diferencia en aproximadamente 2,5 segundos, un tiempo que es considerado aceptable.

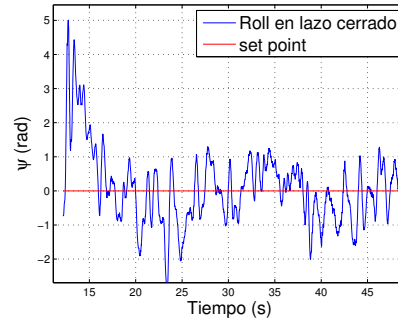


Figura 1.2: Ángulo de Roll en lazo cerrado

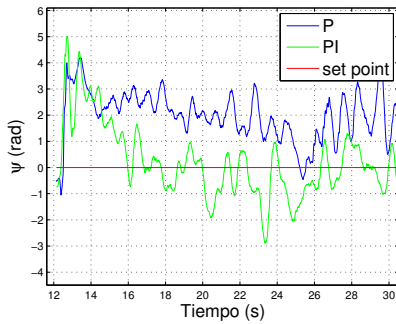


Figura 1.3: Ángulo de Roll en lazo cerrado

En la figura 1.3 se puede observar la diferencia entre utilizar un controlador puramente proporcional y un controlador proporcional con una corrección integral. El primero no logra corregir el error sistemático debido a la diferencia en el empuje de los motores alcanzando así un punto de equilibrio distinto del *set point*. El controlador con el término integral si logra corregir este error y el ángulo ψ toma valores en el entorno del *set point*.

Resulta fundamental entender como es la respuesta del sistema realimentado para apartamientos considerables respecto del equilibrio. Dicha situación puede producirse por diversas razones, un leve golpe de algún agente externo o una simple turbulencia. En la figura 1.4 puede observarse la respuesta al escalón del sistema en lazo cerrado con ángulo inicial de aproximadamente 23° y *set point* 0° . La respuesta del sistema es muy buena, ya que se logra el valor de *set point* en aproximadamente un segundo y la misma presenta un sobretiro del orden del 10 %.

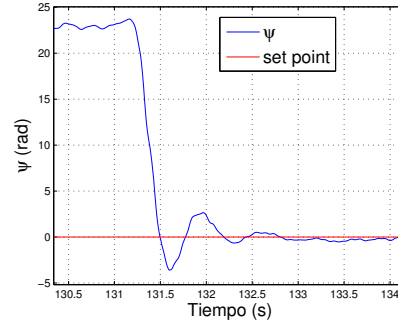


Figura 1.4: Respuesta al escalón del ángulo de Roll en lazo cerrado

Con este análisis se concluye que la matriz de realimentación obtenida es adecuada para controlar el subsistema del ángulo de Roll. El comportamiento del ángulo de Pitch es similar al de Roll y por dicho motivo no será presentado.

1.2. Control del subsistema del Yaw

De manera análoga al caso anterior, es importante verificar el buen funcionamiento del control sobre el giro en “z”, para lo cual se utiliza un dispositivo de prueba que restringe los grados de libertad del cuadricóptero. En este caso se lo sujeta con una cuerda desde arriba de los cuatro brazos de modo de realizar la fuerza lo más pareja posible. El cuadricóptero queda sujetado colgando horizontal y conserva el libre giro según “z” (θ). Se setea una velocidad de *hovering* inferior a la necesaria para levantar vuelo, de modo que el cuadricóptero no se eleve y la cuerda quede siempre tensa. Para el giro bajo estudio no es relevante el valor absoluto de la velocidad de giro de cada motor, ya que depende exclusivamente de la diferencia de velocidades angulares. Por ello los resultados de realizar las pruebas con una velocidad de *hovering* inferior a la real son extrapolables a la situación de vuelo libre, sin pérdida de generalidad.

El giro en θ es generado por un desequilibrio entre los pares ejercidos por las hélices. Si el par neto de todas las hélices resulta por ejemplo positivo, el cuadricóptero realizará un movimiento hacia los negativos, equilibrando el par, como se explica en el capítulo ??.



Figura 1.5: Dispositivo de prueba de θ

Para la estimación de θ se utiliza por un lado la integral de la velocidad angular en el eje “z” y por otro la proyección del vector del campo magnético medido sobre el plano horizontal, medidas que son combinadas en el filtro de Kalman.

El dato obtenido del magnetómetro no distingue entre giros de 360° , limitando el valor al rango $[-180^\circ - 180^\circ]$. Es necesario entonces realizar un reajuste de la medida deducida del campo magnético para lograr la continuidad en el ángulo estimado.