

COORDINACIÓN DE DOS DRONES MEDIANTE UN SENSOR DE ALTITUD/ORIENTACIÓN MONOCULAR

COORDINATION OF TWO DRONES THROUGH AN ALTITUDE/ORIENTATION MONOCULAR SENSOR

Nelson Edgardo Arias Méndez

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
arias.200910906@gmail.com

Jonatan Uziel Alvarez Muñoz

Institut Polytechnique des Sciences Avancées, Francia
jonatan.alvarez@ipsa.fr

Juan Antonio Escareño Castro

Institut Polytechnique des Sciences Avancées, Francia
juan-antonio.escareno@ipsa.fr

Amparo Dora Palomino Merino

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
ampalomino@gmail.com

Maria Aurora Diozcora Vargas Treviño

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
auroravargast@hotmail.com

Resumen

En este trabajo se describe la coordinación entre dos drones: un cuadri-rotor (dron esclavo) y un tri-rotor (dron maestro) este último con movimiento de inclinación en los motores. Este movimiento especial será usado para hacer control de seguimiento. Se presenta un consensus de vuelo en desplazamiento no holonómico del dron maestro en términos de posición y ángulo. El dron maestro es controlado utilizando una PC mediante dos transceptores RF con los que se reciben las ganancias de control y las posiciones deseadas. En el dron esclavo se precargan las ganancias de control y únicamente se tienen los valores de referencia la distancia entre drones (D) y la posición (u, v) en el plano de la imagen. Se pretende simular un sistema de tren aéreo usando una cámara por dron esclavo mediante el uso de un algoritmo de cuatro puntos para detectar los

ángulos de Euler y la posición cartesiana en el plano de la imagen de la cámara. Finalmente se muestran las gráficas en la sección de resultados, donde se analizarán las respuestas de control utilizando la cámara y sin ella.

Palabra(s) Clave: Control, Visión, Robótica.

Abstract

In this paper it is described the coordination between two drones: one quadrotor (slave) and one trirotor (master) with tilt movement in the motors. This special movement of the first will be used to make a tracking control. The paper presents a non-holonomic displacement towards a consensus in flight and in terms of the position and the angle. The master drone is controlled via Radio Frequency (RF) with two transceptors using a PC who gives the syntonization parameters for the drone and the desired positions. The slave drone have preloaded the control parameters and the control inputs are the desired positions (u, v) and D the distance between drones. In this work, we pretend simulate an aerial train system using a camera per drone slave through the detection of four points to get the Euler angles and the Cartesian position from the camera. Finally the graphs of responses are showed in the results, where is analyzed the control responses using the camera and without it.

Keywords: Control, Vision, Robotics.

1. Introducción

El desarrollo de sistemas robóticos aéreos ha sido de gran auge en los últimos años, debido a ello se han implementado nuevas estrategias de control que mejoren la sustentabilidad de este tipo de robots. También se ha buscado que dichos sistemas sean colaborativos creando enjambres que realizan operaciones coordinadas entre sí, con el objetivo de realizar tareas específicas en las que no se tengan las condiciones de acceso terrestre o en algunas ocasiones marítimos (Abdessameud & Tayebi, 2009) (Ren, 2007) (Ren & Beard, 2008) (Chen & Leader, (2006)).

Es por ello que a lo largo de este documento se indagará sobre una técnica de coordinación, utilizando proyecciones mediante un algoritmo de visión con una cámara que permita coordinar un dron esclavo y un dron maestro. Esta estrategia permitirá que se puedan tener desde uno hasta n drones esclavos manipulando únicamente un dron maestro. Esta forma de control hará que se tenga un sistema de tren aéreo que permitirá, desde cargar objetos pesados hasta servir como medio de transporte, en el caso de hacerse un prototipo a una escala mayor. Una característica especial del dron maestro es que es un dron tri-rotor con motores inclinables. Esta configuración especial cede la posibilidad de que el dron maestro no tenga que inclinarse para desplazarse hacia adelante y hacia atrás, y permitiendo que se tengan 3 grados de libertad más.

2. Métodos

Modelo dinámico de un dron tri-rotor en configuración no holonómica

Como se comentó con anterioridad, el dron tri-rotor tiene un movimiento de inclinación especial (figura 1b) que conlleva a tener un modelo matemático distinto al comúnmente usado (ecuaciones 1 y 2) (Escareño, 2008) (Vianna, 2007).

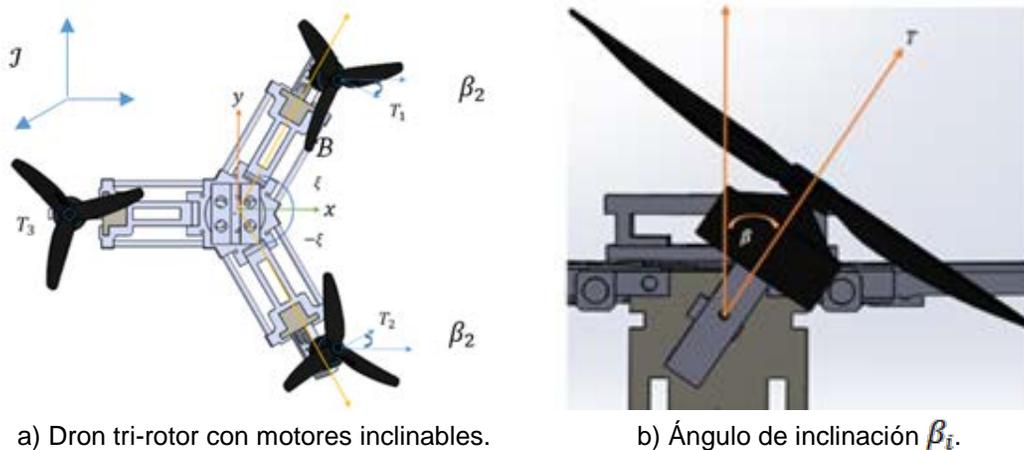


Figura 1 Modelo dinámico.

$$I \left[\mathbf{w}_n \ddot{\eta} + \frac{\partial W_n}{\partial \phi} + \frac{\partial W_n}{\partial \theta} \dot{\theta} \right] + \mathbf{w}_n \dot{\eta} \times I \mathbf{w}_n \dot{\eta} = \Gamma^B \quad (1)$$

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = R(0,0,\psi)(T_1^B + T_2^B + T_3^B) - m \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde \mathcal{W}_n es la matriz que relaciona los ángulos de *Euler* en el cuerpo \mathcal{B} hacia el sistema de referencia inercial \mathcal{J} , I matriz de inercias (que no es diagonal debido a que el modelo no es simétrico), η es el vector de posición angular $(\phi, \theta, \psi)^T$ y T_i^B son las fuerzas ejercidas por cada actuador. Como se observa en el sistema de traslación, la matriz de rotación $\mathcal{R}(\ast)$ solo tiene componentes en ψ para que el sistema se encuentre en configuración no holonómica, el diagrama del dron tri-rotor se muestra en la figura 1a).

El vector Γ^B representa el producto cruz $\mathbf{l} \times T_i^B$ donde \mathbf{l} es la distancia desde el centro hasta cada uno de los tres extremos donde se encuentran los motores, y T_i representa las componentes de fuerza (ecuaciones 3, 4 y 5).

$$T_1^B = \begin{bmatrix} C_{(\xi)} & S_{(\xi)} & 0 \\ -S_{(\xi)} & C_{(\xi)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_{(\beta_1+\beta_2)} & -S_{(\beta_1+\beta_2)} \\ 0 & S_{(\beta_2)} & C_{(\beta_2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_2^B = \begin{bmatrix} C_{(\xi)} & -S_{(\xi)} & 0 \\ S_{(\xi)} & C_{(\xi)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_{(\beta_1-\beta_2)} & -S_{(\beta_1-\beta_2)} \\ 0 & S_{(\beta_1-\beta_2)} & C_{(\beta_1-\beta_2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_3^B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_{(\beta_1)} & -S_{(\beta_1)} \\ 0 & S_{(\beta_1)} & C_{(\beta_1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

En las ecuaciones 3, 4 y 5 $C_{(\ast)}$ y $S_{(\ast)}$ denotan el coseno y seno del ángulo, el ángulo de inclinación β_1 define el movimiento en *yaw* mientras que β_2 que es el ángulo que controla el desplazamiento en el eje \mathbf{x} definido en la figura 1.

Modelo dinámico de un dron cuadri-rotor

El dron esclavo es el que posee la cámara con la cual se realizará el seguimiento y es un dron de cuatro hélices. Las ecuaciones matemáticas de este

vehículo se han estudiado ampliamente en la literatura siendo el método más usual el de *Newton-Euler*. En las ecuaciones 6 se presenta un modelo simplificado (Vianna, 2007).

$$\begin{aligned}\dot{\xi} &= \mathbf{v} \\ m\dot{\mathbf{v}} &= R_J \mathbf{F}_B \\ \dot{R}_J &= R_J S(\omega) \\ J\dot{\omega} &= -\omega \times J\omega + \boldsymbol{\tau}_b\end{aligned}\quad (6)$$

donde \mathbf{v} representa la velocidad en el plano (x, y, z) , R_I la matriz de rotación en el plano inercial \mathbf{F}_b y $\boldsymbol{\tau}_b$ las fuerzas y pares externos aplicados al cuerpo (ecuación 7) y finalmente $R_I S(\omega)$ determinan la orientación del dron. En la figura se muestra al dron esclavo figura 2.

$$\boldsymbol{\tau}_b = \begin{bmatrix} (f_1 + f_2) - (f_3 + f_4) \\ (f_1 + f_3) - (f_2 + f_4) \\ \sum_{i=1}^4 \mathcal{J}M_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2) - (\Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ \ell b(\Omega_1^2 + \Omega_3^2) - (\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \\ k_t((\Omega_1^2 + \Omega_2^2) - (\Omega_3^2 + \Omega_4^2)) \end{bmatrix}\quad (7)$$

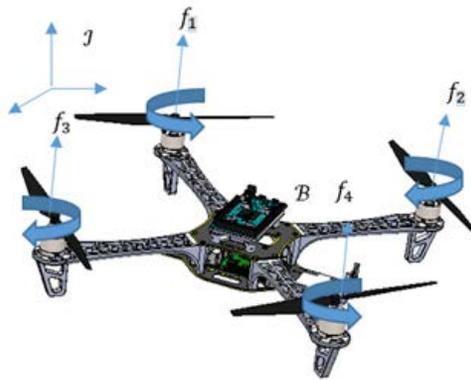


Figura 2 Dron cuadri-rotor.

En la ecuación 7 ℓ es la distancia desde centro hacia cada extremo, $\Omega_{i=1,\dots,4}$ representa la velocidad de cada motor con respecto a su eje, b es el coeficiente de empuje aplicado a cada motor y k_t es la constante que relaciona el esfuerzo de torsión con el cuadrado de la velocidad de cada motor.

Sensor Monocular

La adquisición de la posición del dron maestro se efectúa mediante una cámara con la que se consigue la posición y orientación en el espacio del dron maestro. La ecuación 8 muestra el modelo **pinhole**, con este se forma una vista de escena proyectando los puntos 3D en el plano de la imagen utilizando una transformación de perspectiva, mientras que el modelo reducido se muestra en la ecuación 9 (Birchfield & Tomasi, (1998)) (Zhang, (2000)).

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$sm' = AR[t]M' \quad (9)$$

Donde:

X, Y, Z : Son las coordenadas de un punto 3D en el espacio de coordenadas del mundo.

u, v : Son las coordenadas de la proyección del punto en pixeles.

A : Es la matriz de parámetros intrínsecos de la cámara.

(C_x, C_y) : Es un punto principal que generalmente esta al centro de la imagen.

(f_x, f_y) : Son las distancias focales expresadas en unidades de pixeles.

$R[t]$: Es la matriz de parámetros extrínsecos

m' : Es el vector de coordenadas en el plano de la imagen

M : Es el vector de coordenadas en el mundo.

El dron maestro es ubicado por el dron esclavo mediante un objeto de contorno negro y relleno blanco de forma cuadrada de **11.2 cm** por lado, se utiliza una cámara con resolución de 256×256 pixeles, con la cual se detectan los vértices (figura 3a). El objeto será colocado en la parte trasera del dron tri-rotor de modo que mantenga su ángulo de inclinación en **pitch** y **roll** casi constante (debido a la configuración no holonómica), esto hará que la medición de distancia y posición angular del dron esclavo no se vea afectada. El procesamiento para la detección

del objeto se realiza en el entorno **Python** utilizando la librería **OpenCV** mediante la función **cv2.findContours()**.

Para obtener la distancia \mathcal{D} (la cual representa la distancia del dron maestro y el dron esclavo) se realiza una caracterización en función de la norma euclidiana $|\mathcal{N}|$ a partir del centro del objeto (u_c, v_c) en la imagen hacia uno de los vértices. Esta forma es válida si los ángulos son constantes o casi constantes (ya que las variaciones son pequeñas). Se debe considerar que para avanzar o retroceder el dron esclavo debe modificar su ángulo de inclinación y este se restringe a 5° para evitar grandes perturbaciones en la medición de la distancia.

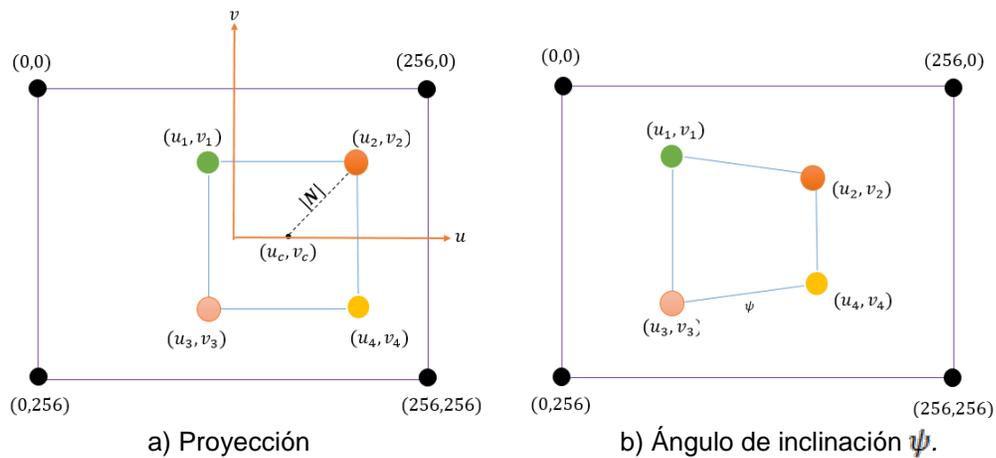


Figura 3 Figura detectada en la cámara.

En la ecuación 10 se puede observar que \mathcal{D} es una función de $|\mathcal{N}|$.

$$\mathcal{D} = 0.026|\mathcal{N}|^2 - 4.2078|\mathcal{N}| + 227.88 \quad (10)$$

En cuanto al posicionamiento angular solo se requiere el ángulo ψ (figura 3b), ya que es el único que se necesita para el seguimiento en configuración no holonómica. Este ángulo se adquiere mediante el modelo de la cámara despejando la matriz $R[t]$, por lo que se utiliza la función **cv2.SolvePnP()** que retorna el vector de traslación en el espacio del mundo real y el vector de rotación (El vector de traslación es despreciado ya que no es tan preciso a comparación de caracterizar la distancia).

A continuación se implementa la función **cv2.Rodriguez()** que convierte el vector de rotación en la matriz de rotación R (ecuaciones 8 y 9) sin el vector de traslación, de esta se utilizan las ecuaciones 11, 12 y 13 para transformar los coeficientes de la matriz a los ángulos de *Euler*.

$$\psi_v = \text{atan2}\left(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}\right) \quad (11)$$

$$\phi_v = \text{atan2}(r_{21}, r_{11}) \quad (12)$$

$$\theta_v = \text{atan2}(r_{32}, r_{33}) \quad (13)$$

El subíndice v denota que es el ángulo obtenido mediante la perspectiva de la cámara.

Control

Para el control del dron maestro se eligió utilizar el controlador PD como se muestra en las ecuaciones 14, 15, 16, 17, 18 y 19.

$$U_{\phi_1} = \mathcal{K}p_{\phi_1}e_{\phi_1} - \mathcal{K}d_{\phi_1}\dot{\phi}_1 \quad (14)$$

$$U_{\theta_1} = \mathcal{K}p_{\theta_1}e_{\theta_1} - \mathcal{K}d_{\theta_1}\dot{\theta}_1 \quad (15)$$

$$U_{\psi_1} = \mathcal{K}p_{\psi_1}e_{\psi_1} - \mathcal{K}d_{\psi_1}\dot{\psi}_1 \quad (16)$$

$$e_{\phi_1} = \phi_{d1} - \phi_1 \quad (17)$$

$$e_{\theta_1} = \theta_{d1} - \theta_1 \quad (18)$$

$$e_{\psi_1} = \psi_{d1} - \psi_1 \quad (19)$$

En las ecuaciones 17 y 18 $\theta_{d1} = 0$ y $\phi_{d1} = 0$ en todo instante de tiempo debido a la configuración no holonómica. La variable e_* denota el error de posición angular (ecuaciones 17, 18 y 19). Únicamente ángulo ψ_{d1} es modificado y equivalente a $\beta_1 = U_{\psi}$, mientras que el desplazamiento en x que esta en función del ángulo de inclinación β_2 ; la suma de ambos ángulos está saturada en 30° , y las ecuaciones 20, 21 y 22 son las variables de posición hacia los servomecanismos S_* que manipulan la inclinación.

$$S_1 = \beta_1 + \beta_2 \quad (20)$$

$$S_2 = \beta_1 - \beta_2 \quad (21)$$

$$S_3 = \beta_1 \quad (22)$$

No existe una ecuación de control para el desplazamiento en x del dron tri-rotor (figura 1a) ya que se manipula por medio de un control remoto. En cuanto al dron esclavo se tienen las ecuaciones 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 y 34.

$$U_{\phi 2} = \mathcal{K}p_{\phi 2}e_{\phi 2} - \mathcal{K}d_{\phi 2}\dot{\phi}^2 \quad (23)$$

$$U_{\theta 2} = \mathcal{K}p_{\theta 2}e_{\theta 2} - \mathcal{K}d_{\theta 2}\dot{\theta}^2 \quad (24)$$

$$U_{\psi 2} = \mathcal{K}p_{\psi 2}e_{\psi 2} - \mathcal{K}d_{\psi 2}\dot{\psi}^2 \quad (25)$$

$$e_{\phi 2} = \phi_{d2} - \phi_2 \quad (26)$$

$$e_{\theta 2} = \theta_{d2} - \theta_2 \quad (27)$$

$$e_{\psi 2} = \psi_d - \psi_v \quad (28)$$

En esta ocasión ϕ_{d2} y θ_{d2} las ecuaciones 29 y 30 llevan de forma implícita una ecuación de control, ya que la inclinación en ambos ángulos puede generar avance/retroceso o movimiento hacia los lados (movimiento lateral), mientras que el movimiento que controla la elevación está dado por el control en el **trust** (**empuje**) que es el mismo para todos los motores (ecuación 31). La ecuación 28 $\psi_d = 0$ en todo instante de tiempo para mantener al dron esclavo en dirección al maestro.

$$\phi_{d2} = K_{pD}e_D - K_{dD}\dot{D} \quad (29)$$

$$\theta_{d2} = K_{pu}e_u - K_{du}\dot{u} \quad (30)$$

$$T = K_{pv}e_v - K_{dv}\dot{v} \quad (31)$$

$$e_D = D_d - D \quad (32)$$

$$e_v = v_d - v_c \quad (33)$$

$$e_u = u_d - u_c \quad (34)$$

Siendo D_d la distancia deseada igual a 110 cm, mientras que u_d la posición en pixeles $u = 127$ (que es el centro en el plano de la imagen) y u_c es la coordenada horizontal del centro de la figura detectada. De igual manera v_d es la posición $v = 127$ y v_c la coordenada vertical del centro de la figura.

3. Resultados

Las variables de posición angular del dron maestro y esclavo son medidas con un acelerómetro y un giroscopio utilizando una tarjeta **Arduino Due**, sus señales son combinadas mediante un filtro complementario y forman la posición angular filtrada. Las señales de procesamiento visual son enviadas mediante el puerto serie de una tarjeta **Raspberry Pi 3** (la cual realiza el procesamiento de imágenes) hacia la tarjeta **Arduino**. Todas las señales son enviadas hacia la PC de forma inalámbrica a través de dos transceptores RF **Xbee Pro S1**, mientras que los motores son comandados a través de los **ESC (Electronic Speed Controller)**, En cuanto el sistema maestro se tiene la misma configuración, pero sin las señales de la cámara. El diagrama de bloques del sistema maestro/esclavo se muestra en la figura 5.

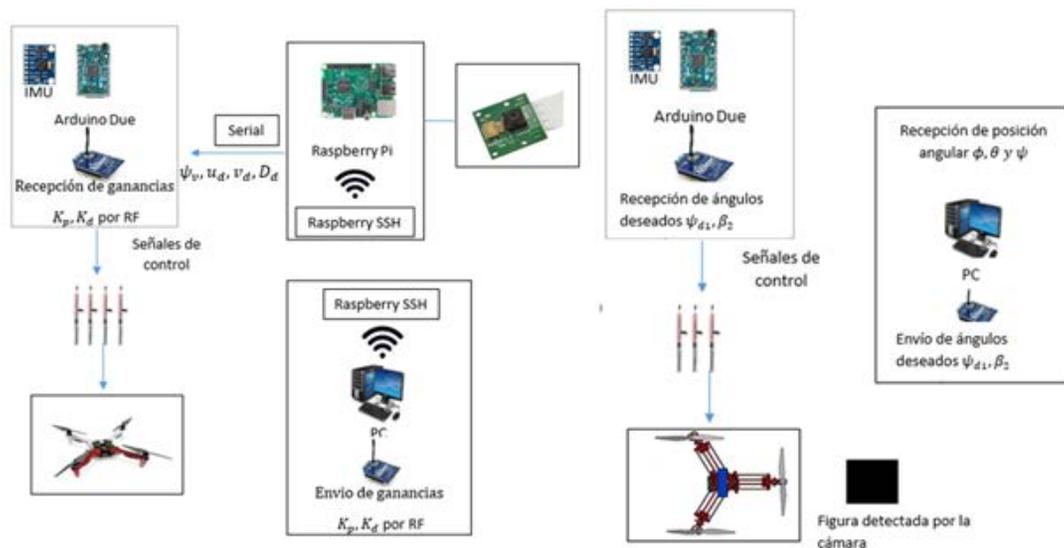


Figura 4 Diagrama de bloques del sistema maestro/esclavo.

Las condiciones iniciales de ambos drones es separados uno del otro a una distancia aproximada de 1 m y la cámara en dirección hacia la figura detectada. Ambos drones se inicializan en el suelo y los dos reciben la misma señal de empuje (*trust*) hacia los motores para realizar el movimiento de elevación; mientras que el dron tri-rotor es manipulado por un control remoto al mismo tiempo el dron cuadri-rotor se posiciona en el centro de la marca del maestro intentando mantenerlo en equilibrio con el control remoto. El posicionamiento angular en *roll*, *pitch* y *yaw* para ambos drones se muestra en la figura 5a, 5b y 5c respectivamente. La respuesta de control de la distancia \mathcal{D} del dron esclavo se observa en la figura 5d, y el posicionamiento en pixeles u y v en la figura 6a y 6b correspondientemente.

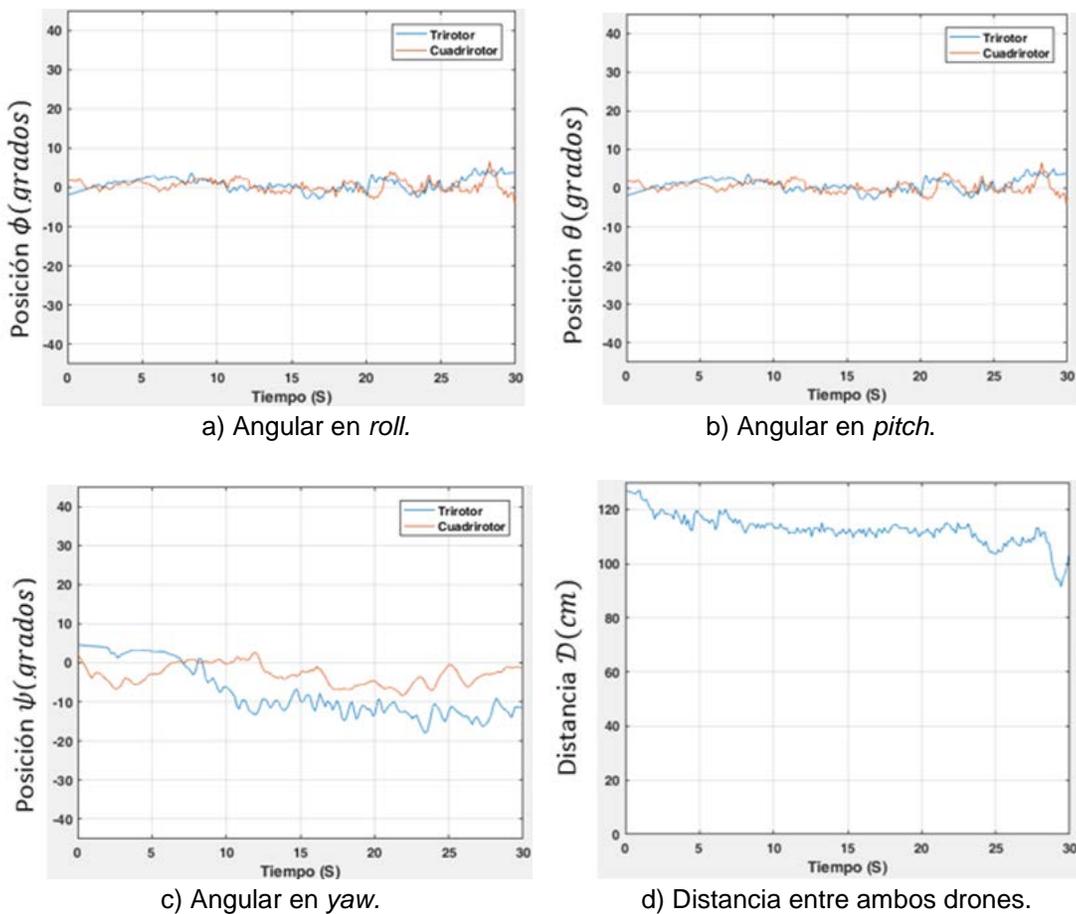


Figura 5 Posicionamiento.

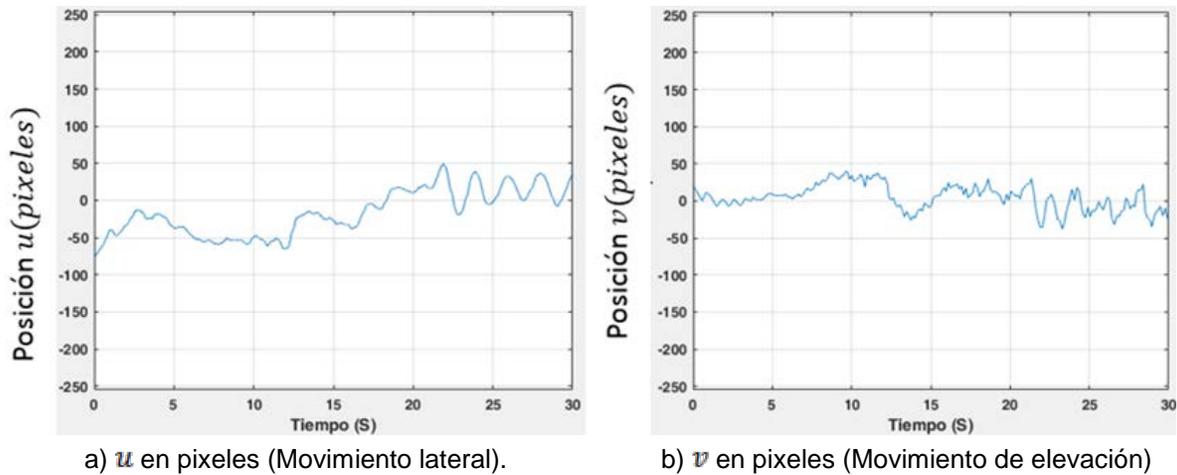


Figura 6 Posicionamiento.

4. Discusión

Como se observa en las gráficas 6 a) y 6 b) de la sección de resultados, el posicionamiento de altura y movimiento lateral del dron es realizado de tal forma en la que el dron pueda posicionarse detrás del maestro, ya que la relación de error en pixeles no es tan grande al convertirlo a centímetros, mientras que el posicionamiento en distancia que se observa en la figura 5 d) tiene grandes variaciones esto se debe al movimiento del dron esclavo que se da en el inicio para alcanzar la distancia deseada, también se observa un transitorio al final debido a que al finalizar el experimento se sostiene al dron para detenerlo. En cuanto al posicionamiento angular no se tienen grandes variaciones debido a que se intentó mantener al dron maestro en un solo punto, por lo que en trabajos futuros se planea realizar un control de trayectoria para tener mejores resultados en el comportamiento y también se planea realizar este control líder/seguidor con más de dos drones utilizando drones tri-rotor en configuración no holonómica para mejorar la respuesta de posicionamiento angular.

En cuanto al sensor monocular es posible mejorar aún más la detección del objeto mediante el uso de filtros digitales que mejoren la medición de los ángulos de *Euler* y la distancia ya que la medición puede variar según las condiciones de luminosidad.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Abdessameud, A., & Tayebi, A. (2009). Attitude synchronization of a group of spacecraft without velocity measurements. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(11), 2642-2648.
- [2] Ren, W. (2007). Formation keeping and attitude alignment for multiple spacecraft through local interactions. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 30(2), 633-638.
- [3] Ren, W., & Beard, R. W. (2008). *Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control*. London: Springer London.
- [4] Chen, X., Serrani, A., & Leader, I. B. R. (2006). *Follower Trailing Control, LNCIS 336 Group Coordination and Cooperative Control*.
- [5] Escareno-Castro, J. A. (2008). *Conception, modélisation et commande d'un drone convertible (Doctoral dissertation, Compiègne)*.
- [6] Vianna, R. G. (2007). *Modelado y control de un helicóptero Quadrotor*. de Tesis MS, Dept. Ingeniería de Sistemas y Automática, Sevilla.
- [7] Birchfield, S., & Tomasi, C. (1998). A pixel dissimilarity measure that is insensitive to image sampling. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(4), 401-406.
- [8] Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22.