

Control Autónomo de Cuadricopteros para Seguimiento de Trayectorias

Wilbert G. Aguilar

Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e
Informática Industrial, ESAII
Universitat Politècnica de Catalunya, UPC-BarcelonaTech
Barcelona, España
Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia,
Tecnología e Innovación, SENESCYT
Quito, Ecuador
wilbert.aguilar@upc.edu

Cecilio Angulo

Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e
Informática Industrial, ESAII
Universitat Politècnica de Catalunya, UPC-BarcelonaTech
Barcelona, España
cecilio.angulo@upc.edu

Ramon Costa-Castelló

Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e
Informática Industrial, ESAII
Universitat Politècnica de Catalunya, UPC-BarcelonaTech
Barcelona, España
ramon.costa@upc.edu

Luis Molina

Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e
Informática Industrial, ESAII
Universitat Politècnica de Catalunya, UPC-BarcelonaTech
Barcelona, España

Resumen— El presente artículo técnico describe brevemente la propuesta de solución al control autónomo del seguimiento de trayectoria en el plano XY para el vehículo cuatrirrotor, como parte de la primer etapa del Concurso de Ingeniería de Control 2013 organizado por el Comité Español de Automática. El vehículo cuatrirrotor es el AR.Drone 1.0 de la empresa Parrot cuyo comportamiento es no lineal. La propuesta incluye modelado del sistema, diseño del controlador, planificador y simulación de los resultados.

Palabras Clave: Control Automático, Identificación y Modelado de Sistemas, Planificación de Movimiento, Cuadricoptero.

I. INTRODUCCIÓN

El Comité Español de Automática (CEA) a través de su grupo temático en Ingeniería de Control ha organizado el Concurso de Ingeniería de Control 2013, concurso que nace con el objetivo de involucrar a los estudiantes con problemas de control sobre plataformas reales. En 2012 se llevó a cabo la primera edición del concurso en que se utilizó cuatrirrotores para la formulación del problema.

Los cuatrirrotores o cuadricópteros son vehículos aéreos de cuatro rotores coplanares cuyos movimientos dependen de la diferencia entre el par generado por cada uno de ellos [1]. Las líneas de investigación sobre las que se puede trabajar al utilizar como plataforma este tipo de vehículos es múltiple, clasificada en la literatura [2,4] generalmente en 3 principales tópicos: Control, Navegación y Guiado.

El concurso y consecuentemente el presente artículo se enfoca en el control, específicamente en el plano XY, para lo cual se considera el control interno de los motores como una caja negra [3]. Se cuenta únicamente con acceso a los datos de entrada pitch y roll, cuyas consignas varían entre las referencias normalizadas 0 y 1, y los valores de salida posición y velocidad en X y Y.



Figura 1. Esquema general de entradas y salidas del AR.Drone 1.0 (La figura pertenece a la referencia [3]).

Con ayuda de los datos facilitados por el CEA se estimará el modelo que relacione las entradas angulares de pitch y roll con las velocidades y posiciones en el plano XY (figura 1). Es importante mencionar que el eje z siempre se ubicará a la misma altura.

El presente artículo se ha organizado en los siguientes apartados: En el segundo capítulo se describe la estimación del modelo del cuatrirrotor, tanto de la no linealidad estática como de la linealidad dinámica. El tercer apartado hace referencia a la propuesta de diseño tanto del controlador como del planificador. Finalmente en los capítulos cuatro y cinco se presentan los resultados y conclusiones respectivamente.

II. MODELO DEL CUADRICOPTERO

La estimación del modelo dinámico de movimiento del AR.Drone 1.0, que relaciona las entradas de ángulos con las velocidad y posiciones, se basa en los datos proporcionados por el Comité Español de Automática CEA (<http://www.ceautomatica.es/>).

En la figura 2, se puede apreciar una fuerte relación entre el ángulo pitch con la velocidad en x, así como entre el ángulo roll y la velocidad en y.

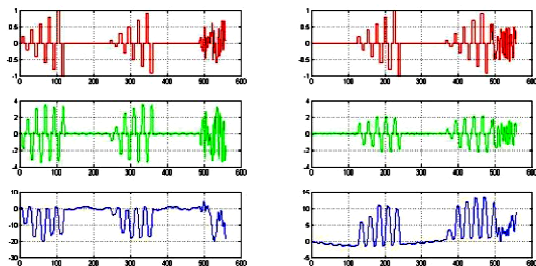


Figura 2. 1ra Derecha: Pitch. 2da Derecha: Velocidad X. 3ra Derecha: Posición X. 1ra Izquierda: Roll. 2da Izquierda: Velocidad Y. 3ra Izquierda: Posición Y.

Para enfrentar el problema de identificación del modelo se plantean varias hipótesis basadas en los datos:

- Los modelos para cada eje de movimiento se encuentran desacoplados y definen las siguientes relaciones: Ángulo pitch con velocidad y posición en X, Ángulo roll con velocidad y posición en Y.
- Las relaciones entre los ángulos y las velocidades siguen un Modelo No lineal Estático combinado con un Modelo Dinámico Lineal.
- La diferencia entre la velocidad estimada a partir de los datos de posición pasados por un integrador y los datos de velocidad se deben a fuentes de ruido externo.

A partir de estas premisas, el modelo se estima en 3 etapas:

- Estimación del modelo no lineal estático.
- Estimación del modelo dinámico lineal.
- Estimación de las fuentes de ruido.

A. Estimación del Modelo Estático

La parte no lineal del modelo se estima, de forma estática, como un polinomio que relaciona las entradas angulares de pitch y roll con los valores estacionario de la velocidad en el eje X y Y respectivamente.

Para ello es imprescindible definir los valores estacionarios aproximados de las velocidades para cada valor de ángulo como entrada.

En la tabla I se encuentran especificados dichos valores.

TABLE I. ÁNGULOS VS VALORES ESTACIONARIOS DE VELOCIDADES.

Pitch	V _x (m/s)	Roll	V _y (m/s)
-1.00	2.70	-1.00	-1.91
-0.90	2.80	-0.90	-2.14
-0.80	2.85	-0.80	-2.06
-0.70	3.29	-0.70	-2.10
-0.60	3.29	-0.60	-2.07
-0.50	3.03	-0.50	-1.87
-0.40	3.01	-0.40	-1.50
-0.30	2.47	-0.30	-1.58
-0.20	1.78	-0.20	-1.26
-0.10	0.82	-0.10	-0.59
0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	-0.82	0.10	0.59
0.20	-1.78	0.20	1.26
0.30	-2.47	0.30	1.58
0.40	-3.01	0.40	1.50
0.50	-3.03	0.50	1.87
0.60	-3.29	0.60	2.07
0.70	-3.29	0.70	2.10
0.80	-2.85	0.80	2.06
0.90	-2.80	0.90	2.14
1.00	-2.70	1.00	1.91

Parte de la propuesta de solución ante el modelo, es que la No linealidad existente entre los valores de ángulo y velocidad sea un polinomio. Utilizando el ajuste polinomial de la herramienta de software matemático Matlab, se obtiene, como aproximación de la no linealidad, un polinomio de grado 5:

$$P_j = a_j q^5 + b_j q^4 + c_j q^3 + d_j q^2 + e_j q + f_j \quad (1)$$

donde: $j = \{x, y\}$

$$\begin{aligned} a_x &= -5.7987 & a_y &= 2.4708 \\ b_x &= -1.9430e-014 & b_y &= 8.0192e-015 \\ c_x &= 12.1962 & c_y &= -5.6890 \\ d_x &= 5.5448e-015 & d_y &= -2.3478e-015 \\ e_x &= -9.1167 & e_y &= 5.2051 \\ f_x &= -1.4731e-016 & f_y &= 6.0261e-017 \end{aligned}$$

En la figura 3 se puede observar la gráfica del polinomio de grado 5 respecto a los valores reales utilizados para la estimación del mismo.

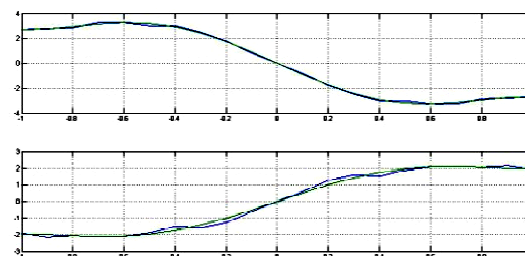


Figura 3. Polinomio (verde) y datos reales (azul).

Es importante tener presente que el polinomio estimado representa la relación entre los ángulos y el valor estacionario de velocidad. Es decir que al pasar los ángulo por el polinomio, se obtiene a la salida los valores estacionarios de velocidad. Este conjunto de datos se lo denominará velocidad estacionaria.

B. Estimación del Modelo Dinámico

Una vez estimada la no linealidad se puede identificar el modelo dinámico lineal que relacione la salida del polinomio con los datos de velocidad. En la figura 4 se muestran las gráficas superpuestas de velocidad estacionaria y velocidad real.

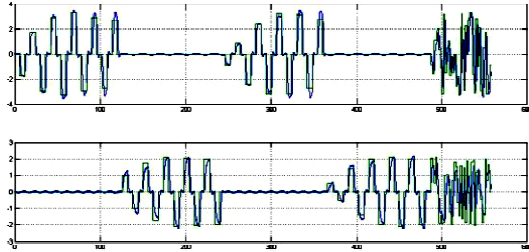


Figura 4. Velocidad estacionaria (azul) y velocidad real (verde).

Para ello, se utiliza como herramienta el modelo de identificación de sistemas de Matlab (System Identification Toolbox™), tomando en consideración los siguiente criterios:

- La variable de entrada corresponde a la velocidad estacionaria.
- La variable de salida corresponde a la velocidad real.
- El sistema se lo modela como un proceso lineal.
- La función de transferencia es de segundo orden, con 2 polos reales.

Con estos criterios se obtienen, con precisiones superiores al 90% tanto para V_x como V_y , las siguientes funciones de transferencia:

$$H_x(s) = \frac{4.9286}{s^2 + 4.968s + 5.0553} \quad (2)$$

$$H_y(s) = \frac{3.2228}{s^2 + 3.6765s + 3.3766} \quad (3)$$

C. Estimación de Fuentes de Ruido

Para obtener la posición se añadió un integrador luego de las funciones de transferencia de cada velocidad, sin embargo, los datos que se obtuvieron distan considerablemente de los datos de posición.

Esto se debe a la presencia de perturbaciones y acoplamiento entre ejes. Para su identificación utilizamos los datos facilitados por el CEA.

Tal como se plantea en el tercer criterio para la estimación del modelo, la función diferencia (función azul de la gráfica superior en las figuras 5 y 6) entre la velocidad estimada a partir de los datos de velocidad pasados por un integrador y los datos de posición, se debe a fuentes de ruido externo.

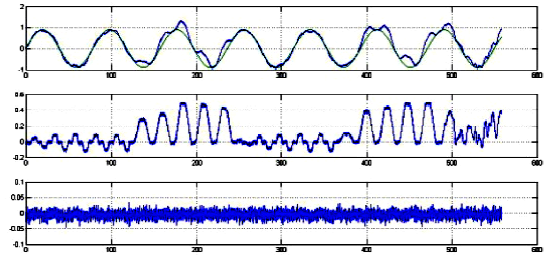


Figura 5. Fuentes de ruido en eje X. Gráfica superior: Función diferencia. Gráfica central: Ruido por velocidad y posición. Gráfica inferior: Ruido blanco

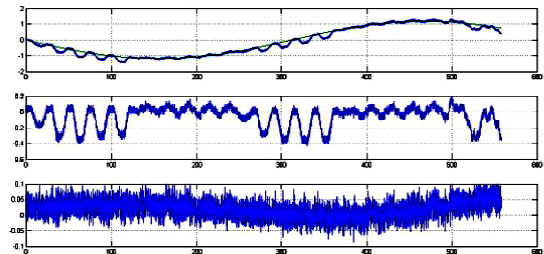


Figura 6. Fuentes de ruido en eje Y. Gráfica superior: Función diferencia. Gráfica central: Ruido por velocidad y posición. Gráfica inferior: Ruido blanco

Esta función diferencia tiene una forma de onda que puede ser estimada como un modelo sinusoidal sin desfase:

$$\text{Ruido}_1(t) = A \sin(\omega t) \quad (4)$$

donde A se estima a partir de la media de la amplitud de la función diferencia, y ω es la frecuencia angular de la sinusoidal, con lo que se obtiene la primera fuente de ruido tanto para X como Y .

$$\text{RuidoX}_1(t) = 0.9 \sin(0.0800 t) \quad (5)$$

$$\text{RuidoY}_1(t) = -1.205 \sin(0.0101 t) \quad (6)$$

Existen 3 fuentes adicionales de ruido:

- Ruido correspondiente a una fracción de la velocidad en el mismo eje: Se estima a partir de las amplitudes de velocidad y se obtiene:

$$\text{RuidoX}_2(V_x) = -\frac{1}{35} V_x \quad (7)$$

$$\text{Ruido}Y_2(V_Y) = -\frac{1}{40}V_Y \quad (8)$$

- Ruido correspondiente a una fracción de la posición en el otro eje: Se estima a partir de los valores de posición y se obtienen:

$$\text{Ruido}X_2(X) = \frac{1}{25}X \quad (9)$$

$$\text{Ruido}Y_2(Y) = \frac{1}{50}Y \quad (10)$$

- Ruido blanco de varianza 0.0005 (gráfica inferior figura 5 y 6).

III. DISEÑO DEL CONTROLADOR

En el capítulo 2 se ha conseguido un modelo desacoplado de buenas prestaciones según el criterio del simulador facilitado por el CEA (Estos resultados se expondrán en el capítulo 4). El diseño del controlador se reduce a realizar tres compensaciones:

- Polinomio inverso.
- Compensación de ruido sinusoide.
- Controlador del modelo lineal.

A. Estimación del Polinomio Inverso y Compensación del Ruido Sinusoidal.

En la sección 2.1 se había estimado la no linealidad del modelo como un polinomio de grado 5. Para compensar esta no linealidad es necesario calcular el polinomio inverso, polinomio en cuya estimación nuevamente se hace uso del ajuste polinomial de la herramienta Matlab, utilizando como datos de entrada en este caso los valores estimados de velocidad estacionaria y como datos de salida la referencia Pitch.

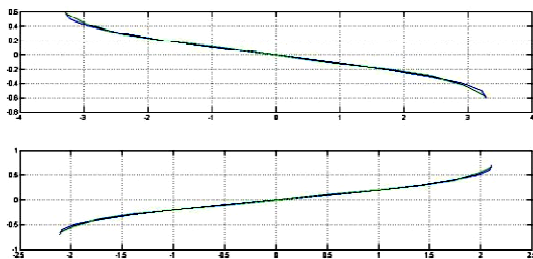


Figura 7. Polinomio Inverso (verde) y datos reales (azul).

Este polinomio es no invertible ya que para un mismo valor de Pitch tiene distintos valores de velocidad estacionaria, por lo cual truncaremos los valores entre -0.6 y 0.6 para pitch y -0.7 y 0.7 para roll de forma que se puede trabajar en la zona

biyectiva (ver figura 7). Estos valores corresponden al máximo y mínimo valor de velocidad estacionaria alcanzable para en X e Y respectivamente.

TABLE II. VALORES ESTACIONARIOS DE VELOCIDADES VS ÁNGULOS.

Vx (m/s)	Pitch	Vy (m/s)	Roll
		-2.108	-0.70
3.287	-0.60	-2.086	-0.60
3.215	-0.50	-1.969	-0.50
2.926	-0.40	-1.743	-0.40
2.42	-0.30	-1.414	-0.30
1.728	-0.20	-0.9963	-0.20
0.8995	-0.10	-0.5148	-0.10
0.00	0.00	0.00	0.00
-0.8995	0.10	0.5148	0.10
-1.728	0.20	0.9963	0.20
-2.42	0.30	1.414	0.30
-2.926	0.40	1.743	0.40
-3.215	0.50	1.969	0.50
-3.287	0.60	2.086	0.60
		2.108	0.70

El ajuste se consigue con un polinomio de grado 5:

$$P_{i_j} = a_{i_j}q^5 + b_{i_j}q^4 + c_{i_j}q^3 + d_{i_j}q^2 + e_{i_j}q + f_{i_j} \quad (11)$$

donde: $j = \{x, y\}$

$$\begin{aligned} a_{i_x} &= -0.0013 & a_{i_y} &= 0.0141 \\ b_{i_x} &= -2.0509e-018 & b_{i_y} &= -1.5709e-017 \\ c_{i_x} &= 0.0097 & c_{i_y} &= -0.0454 \\ d_{i_x} &= 1.9642e-017 & d_{i_y} &= 8.8629e-017 \\ e_{i_x} &= -0.1314 & e_{i_y} &= 0.2339 \\ f_{i_x} &= -4.5694e-018 & f_{i_y} &= -4.7342e-017 \end{aligned}$$

B. Controlador del Modelo Lineal

Una vez compensado el polinomio inverso y el ruido sinusoidal, el diseño del controlador parte del modelo en lazo cerrado que minimiza el error entre la salida actual y la consigna. Dado que se cuenta con la medida de velocidad y de posición, se plantea una compensación en paralelo de velocidad y posición, ubicando a los polos en el semiplano izquierdo sin que el sistema se vuelva inestable (figura 8 y 9).

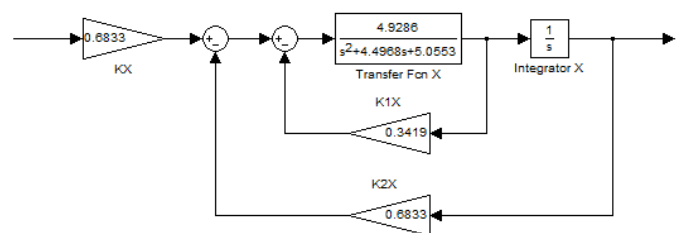


Figura 8. Controlador X

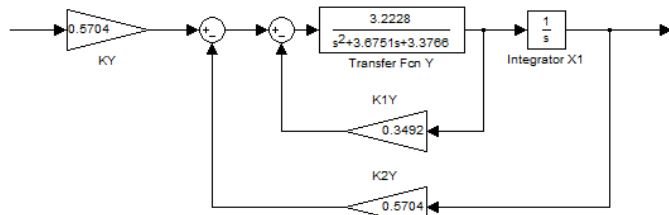


Figura 9. Controlador Y

Para la estimación del valor de K1 K2 y K, analizamos la estabilidad del sistema realimentado.

Por facilidad expresamos los 2 sistemas de segundo orden como:

$$H(s) = \frac{A}{s^2 + Bs + C} \quad (12)$$

Realimentando con las compensación en paralelo de K1 y K2 para velocidad y posición respectivamente, y multiplicando por la ganancia K se obtiene:

$$\frac{AK}{s^3 + Bs^2 + (C + K1A)s + K2A} \quad (13)$$

El sistema realimentado es de la forma:

$$\frac{AK}{(s + s1)(s + s2)(s + s3)} \quad (14)$$

$$\frac{AK}{s^3 + (s1 + s2 + s3)s^2 + (s1s2 + s1s3 + s2s3)s + s1s2s3} \quad (15)$$

Igualando se obtiene el sistema de ecuaciones:

$$s3 = B - s1 - s2 \quad (16)$$

$$K1 = (s1s2 + s2s3 + s1s3 - C) / A \quad (17)$$

$$K2 = s1s2s3 / A \quad (18)$$

Definimos $s1 = s2 = s3$, con el objetivo de ubicar las raíces en el semiplano izquierdo lo más distantes de cero. Por tanto $s1 = s2 = s3 = B/3$. Asimismo la ganancia $K = K2$ para minimizar el error entre la posición actual y la posición consigna.

Las ganancias obtenidas en X y Y son:

$$K1x = 0.3419; K2x = 0.6833; Kx = 0.6833;$$

$$K1y = 0.3492; K2y = 0.5704; Ky = 0.5704;$$

IV. RESULTADOS

Para la simulación y resultados se utiliza las herramientas facilitadas por el CEA, así como el criterio de evaluación de los organizadores.

A. Rendimiento del Modelo

En la tabla III se encuentran especificados los resultados del modelo estimado. Las siglas AD hacen referencia a Altamente-Deseable, mientras que D significa Deseable.

TABLE III. RENDIMIENTO DEL MODELO.

Variable	GPP: 0.90108		
	Valor (m)	Calificación	Porcentaje
Dist. X Media	0.06272	AD	31.3598%
Dist. Y Media	0.016007	AD	8.0035%
Dist. X Máx.	0.99527	D	38.0977%
Dist. Y Máx.	0.21274	AD	42.5478%

B. Rendimiento del Controlador

En la tabla IV se encuentra especificado el rendimiento del controlador respecto a la distancia a la trayectoria recta y el tiempo.

TABLE IV. RENDIMIENTO DEL CONTROLADOR.

Variable	GPP: 28.272		
	Valor	Calificación	Porcentaje
Dist. Media	0.07347 m	D	46.9403%
Dist. Máxima	0.20151 m	T	51.5123%
T de Recorrido	45.96 seg	D	84.4636%

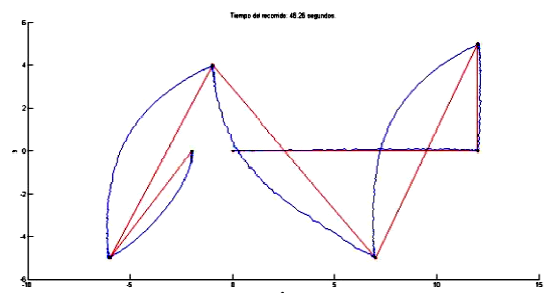


Figura 10. Ruta sin interpolador

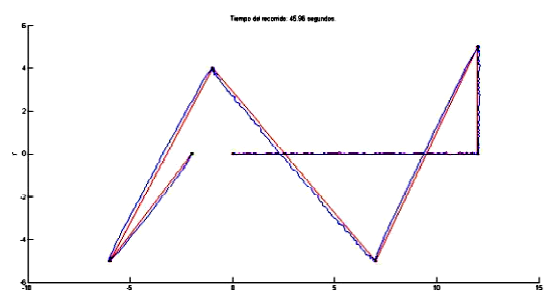


Figura 11. Ruta con interpolador

Con el objetivo de evitar alejarse de la trayectoria recta, se utilizó un interpolador que genere puntos intermedios como consignas locales por las cuales debe pasar el vehículo (ver figura 10 y 11). Cabe mencionar que es importante buscar un balance entre tiempo y precisión.

V. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Luego de estimar el modelo no lineal que relaciona los ángulos de entrada pitch y roll con las velocidades y posiciones en el plano XY, y de realizar el correspondiente diseño de control de seguimiento de trayectoria en dicho plano, se concluye que:

- El modelo que mejor relaciona ángulos del cuatrirrotor con su avance a lo largo de los ejes del plano está desacoplado, de forma tal que cada eje depende únicamente de un ángulo.
- La relación entre cada ángulo y su correspondiente eje puede representarse como una combinación de una no linealidad estática y una linealidad dinámica.
- La no linealidad se ajusta a un polinomio de grado 5 con alta fiabilidad.
- La linealidad corresponde a un sistema de segundo orden de polos reales para la velocidad y un integrador adicional para la posición.
- Existen 4 fuentes de ruido entre la posición estimada a partir de la velocidad integrada y la posición medida: Una senoide dependiente del tiempo, una fuente dependiente de la velocidad en el mismo eje, una de la posición en el otro eje y el ruido aleatorio.
- El sistema puede controlarse mediante un polinomio inverso de grado 5 que elimine la no linealidad, la compensación de la fuente de ruido y un controlador de compensación en paralelo.

- El modelo y controlador descritos a lo largo del presente artículo permitió obtener el primer lugar en la Fase 1 y segundo lugar en la Fase 2, categoría de máster y doctorado, del Concurso de Ingeniería de control 2013 organizado por el CEA.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España, a través del proyecto PATRICIA (TIN 2012-38416-C03-01).

El Investigador en Formación Wilbert G. Aguilar agradece la financiación a través de una beca del Programa "Convocatoria Abierta 2011" concedida por la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación SENESCYT de la República del Ecuador.

Un agradecimiento especial al Comité Español de Automática CEA por la organización del Concurso de Ingeniería de Control 2013, así como por facilitar los datos originales del modelo del AR.Drone 1.0, además de datos adicionales solicitados.

REFERENCIAS

- [1] Blasco, X., García-Nieto, S., Reynoso-Meza, G. (2012) "Control autónomo del seguimiento de trayectorias de un vehículo cuatrirrotor". Comité Español de Automática.
- [2] Bristeau P. J., Callou F., Vissiere D., Petit N. (2011) "The navigation and control technology inside the AR.Drone micro UAV". 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, pp. 1477-1484.
- [3] Concurso en Ingeniería de Control. (2013). "Control Autónomo del Seguimiento de Trayectorias de un Vehículo Cuatrirrotor". Documentación Técnica Fase1. Grupo Temático de Ingeniería de Control de CEA.
- [4] "Parrot AR Drone". (2011). <http://ardrone.parrot.com>.