

**PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS  
PARA QUADROTOR DE BAJO COSTO  
MEDIANTE SOFTWARE EDUCATIVO**

**TRAJECTORY PLANNING FOR LOW  
COST QUADROTOR THROUGH AN  
EDUCATIONAL SOFTWARE**

**PLANO DE TRAJETÓRIA PARA  
QUADRO DE BAIXO CUSTO ATRAVÉS  
DE SOFTWARE EDUCACIONAL**

**Edgar Andrés Gutiérrez-Cáceres**

Ingeniería Electrónica, Grupo de  
Investigación y Desarrollo de  
Ingeniería en Nuevas Tecnologías (GIDINT),  
Universidad Santo Tomás Seccional Tunja  
[edgar.gutierrez@usantoto.edu.co](mailto:edgar.gutierrez@usantoto.edu.co)

*Fecha de recepción:* 01 de agosto 2017  
*Fecha de aprobación:* 15 de Octubre 2017

## Resumen

Este artículo se da a conocer como documento de consulta para estudiantes de pregrado y posgrado en el área de ingeniería, que requieran realizar una implementación de control rápida y eficaz de un robot aéreo. Se tiene como objetivo dar a conocer el diseño e implementación de un planificador de trayectorias para un quadrotor de bajo costo utilizado como objeto de investigación. Para ello, se realiza una conceptualización del análisis matemático correspondiente a los multirrotores tipo quadrotor, la estrategia de control, el cálculo del planificador de trayectorias punto a punto con un perfil de velocidad trapezoidal construido en Software Educativo, y posteriormente, el análisis de los resultados obtenidos en la práctica mediante una validación experimental del mismo en la plataforma Ar. drone2 de la empresa Parrot vs a la simulación realizada. Dichos resultados permitirán determinar la efectividad del planificador de trayectorias según las coordenadas calculadas XYZ. No se interactuó con la orientación del robot aéreo, es decir, no hay control sobre la rotación con respecto al eje Z.

**Palabras clave:** Ar. drone, Coordenadas, Software Educativo, Quadrotor, Trayectoria, Velocidad.

## Abstract

This article is presented as a consultation paper for undergraduate and postgraduate students in the engineering airfield, which requires an implementation of fast and efficient control of an aerial robot. It aims at presenting the design and implementation of a trajectory planner for a low cost quadrotor used as a research object. In addition, you will find that a conceptualization of the necessary mathematical analysis is made corresponding to the quadrotor-type multirotors, the control strategy, the calculation of the point-to-point trajectory planner with a trapezoidal velocity profile built in educational software and later the analysis of the results obtained in practice through an experimental validation of the same in the platform Ar.drone2 of the company Parrot vs the simulation carried out. These results will allow determining the effectiveness of the trajectory planner according to the computed coordinates XYZ, for this investigation it was not interacted with the orientation of the aerial robot, that is, there is no control over the rotation with respect to the Z-axis.

**Keywords:** Ar.drone, coordinates, educational software, Quadrotor, trajectory, speed.

## Resumo

Este artigo é publicado como documento de consulta para estudantes de graduação e pós-graduação em a engenharia aérea, que requer uma implementação de controle rápido e efetivo de um robô aéreo. Tem como objetivo apresentar o projeto e a implementação de um planejador de trajetórias para um quadrotor de baixo custo usado como objeto de pesquisa. Além disso, você descobrirá que uma conceituação da análise matemática necessária é feita correspondente aos quadro-tipo multirrotores, a estratégia de controle, o cálculo do planejador de trajetória ponto-a-ponto com um perfil de velocidade trapezoidal construído em Software Educacional e mais tarde o analise dos resultados obtidos na prática ca através de uma validação experimental do mesmo

na plataforma Ar.drone2 da empresa Parrot versus a simulação realizada. Estes resultados permitirão determinar a eficácia do planejador de trajetórias de acordo com as coordenadas coordenadas XYZ, Para esta investigação, a orientação do robô aéreo não foi interagida, ou seja, não há controle sobre a rotação em relação ao eixo Z.

**Palavras-chave** - Ar.drone, Coordenadas, Software educacional, Quadrotor, Trajectory, Speed.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el término “Drone” es utilizado para asignar un nombre general a cualquier sistema de vuelo multirrotor que las personas vean circulando a su alrededor (Abdessameud & Janabi-sharifi, 2015; Brown et al., 2014; Freeman & Freeland, 2014; Gohardani, Chapattegui, & Elizetxea, 2014; Guenard & Ciarletta, 2012; Guerrero, Contreras, Hernández, & Neira, 2015; Önder, Eresen, & Imamog, 2012; Xiang & Tian, 2011). Esta asignación de nombre se realiza sin tener el conocimiento técnico, ignorando, por ejemplo, términos como quadrotor o hexacopter. Los campos de aplicación de los quadrotor son amplios, ya sea en el levantamiento de mapas topográficos (Alpen, Frick, & Horn, 2013; Gabrlík, Gabrlík, & Gabrlík, 2015), vigilancia, seguimiento, agricultura de precisión (Caccavale, Giglio, Muscio, & Pierri, 2014; Duan, Chapman, Guo, & Zheng, 2017; Garrido et al., 2015; Önder et al., 2012; Vázquez-Arellano, Griepentrog, Reiser, & Paraforos, 2016; Zhou, Pavek, Shelton, Holden, & Sankaran, 2016) o simplemente vistos como simple un juguete. Rápidamente los sistemas de vuelo como los quadrotor han generado una gran industria de desarrollo, investigación y comercio. Pero lamentablemente, plataformas de buen funcionamiento como los quadrotor de la empresa DJI en sus versiones Phantom, presentan una arquitectura de programación totalmente cerrada para la

experimentación (Matouk & Gherouat, 2016). Por otra parte, empresas como Astec, 3DRobotics son de arquitectura abierta permitiendo el desarrollo investigativo (Amato et al., 2015; Caccavale et al., 2014; King, Lai, Wang, Lan, & Chen, 2015), pero presentan un costo considerable para jóvenes investigadores que deseen iniciarse en este campo de trabajo.

En este trabajo se usó la plataforma Parrot Ar. drone2. Entre las ventajas del uso de esta plataforma se encuentra la gran cantidad de información teórica reconocida y validada a nivel mundial, (Drone & Quadrotor, 2016; Freeman & Freeland, 2014; GPSPRO, n.d.) en el área de control y aplicación de la plataforma con lenguajes de programación como Software Educativo, Python, ROS, entre otros. Otro factor interesante se remonta a su bajo costo, facilitando la adquisición a investigadores que no deseen realizar una gran inversión.

En la segunda sección se encontrará una descripción detallada de la plataforma Ar.drone2 que servirá como referencia, en cuanto a las prestaciones que ofrece y los métodos utilizados en la investigación como el análisis dinámico del quadrotor (Duan et al., 2017; Palunko & Fierro, 2011; Pounds, Mahony, & Corke, 2010; Rocchi, 2008) y el planificador de trayectoria punto a punto con perfil de velocidad trapezoidal para el quadrotor (Bouktir, Haddad, & Chettibi, 2008; Hehn & Andrea, 2011; Raffler, Wang, & Holzapfel, 2013; Saska, Kasl,

& P<sup>~</sup>, 2014; Zhang, Zhang, Xie, & Ma, 2014). En la tercera sección se observará los resultados de la implementación de la planificación de trayectoria. La cuarta sección mostrará la discusión de la validación de los resultados comparados con la simulación realizada y lo observado en la experimentación.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la investigación realizada se tuvo en cuenta tres bases fundamentales iniciando con la plataforma Ar. drone2 de parrot, el modelo dinámico del quadrotor y el cálculo del planificador de trayectorias.

### Ar. drone2 de Parrot:

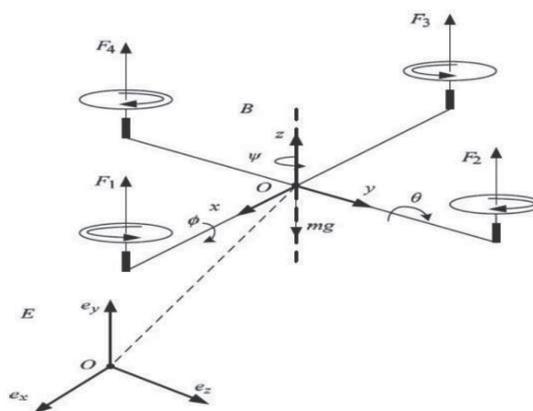


**Fig. 1.** Ar.drone2 de Parrot.

Fuente: (François, David, & Jemmapes, 2011)

El Ar.drone2 de la empresa Parrot Fig.1. se caracteriza por ser una plataforma de bajo costo cuyas características principales radican(-Drone & Quadrotor, 2016; GPSPRO, n.d.) por ejemplo en un procesador ARM Cortex A8 de 32 bits a 1 GHz, protocolo de comunicación Wi-Fi, una unidad IMU (Giróscopo, acelerómetro y magnetómetro triaxiales), una batería recargable de Li-po de 3 celdas a 1.000 mAh, motores de rotor interno sin escobillas a 14,5 W de consumo y un peso de 420 g con la carcasa de protección.

### Fundamentación del Análisis Dinámico



**Fig. 2.** Esquema análisis Dinámico UAV

Fuente: (Xiong & Zheng, 2014)

### Rotores

El quadrotor es un sistema no lineal de seis grados de libertad, multi-entrada-multi-salida (Behera, 2014; Duan et al., 2017; Pounds et al., 2010; Raffler et al., 2013). Se controla variando las fuerzas de empuje de cada motor y buscando equilibrio en el torque. Se caracteriza por hélices contrarrotativas para contrarrestar la resistencia aerodinámica. Presenta tres modos de funcionamiento Fig.2.

1. El movimiento vertical es controlado por el incremento o disminución de la fuerza de todos los motores.
2. El movimiento en Yaw es creado proporcionalmente variando las velocidades de las piezas contrarrotativas.
3. Los ángulos de Roll y Pitch pueden ser controlados por la aplicación de las fuerzas diferenciales de los rotores opuestos del quadrotor.

Para el  $i$ -ésimo motor con velocidad angular  $\omega_i$ , las fuerzas y el torque se pueden definir como:

$$F_i = b\omega_i^2 \quad (1)$$

$$\tau_i = d\omega_i^2 \quad (2)$$

Donde,  $b$  y  $d$  son los momentos de empuje y arrastre respectivamente. La totalidad de las fuerzas de empuje pueden ser definidas como:

$$f = \sum_{i=1}^4 F_i \quad (4)$$

### Modelado dinámico del quadrotor

#### 1) Variables de estado

En Fig.2.,  $(u, \phi, p)$  es la velocidad lineal alrededor del eje roll, el ángulo de rotación y la velocidad angular en el eje roll.

$(\omega, \psi, q)$  es la velocidad lineal alrededor del eje yaw, el ángulo de rotación y la velocidad angular en el eje yaw.  $(\omega, \theta, q)$  es la velocidad lineal alrededor del eje pitch, el ángulo de rotación y la velocidad angular en el eje pitch (Rossi & Savino, 2013; Xiong & Zheng, 2014; Z. Yu, Jing, & Lincheng, 2013).  $(x, y, z)$  es la posición del quadrotor alrededor de los ejes  $\hat{i}, \hat{j},$  y  $\hat{k}$ .

### Análisis Geométrico de posición

Se conocen dos marcos de referencia principales de coordenadas (Kapitonov, 2014; Wang, Wang, Iurii, Krasnov, & Krasnov, 2015). El marco de referencia inicial predefinido en tierra en la posición de coordenadas (0,0,0). El sistema de coordenadas sobre el quadrotor ubicado normalmente en el centro de gravedad. Finalmente, se declara la matriz de rotación:

$$\begin{aligned} R_v^b(\phi, \theta, \psi) &= R_p^b(\phi)R_y^p(\theta)R_z^y(\psi) \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 1 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c\theta c\psi & c\theta s\psi & -s\theta \\ s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi c\theta \\ c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi c\theta \end{pmatrix} \quad (5) \end{aligned}$$

### Cinemática

#### a) Modelo diferencial traslacional

Las variables de estado  $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$  son parámetros de coordenada inercial mientras que las velocidades  $(u, v, w)$  son parámetros

de coordenadas del robot (Li, Li, Wu, Tang, & Huo, 2013; "Modeling, Estimation, and Control of Quadrotor," 2012; Olivares, Cordova, Sepúlveda, & Derpich, 2015; Palunko & Fierro, 2011). Pueden ser relacionados a través de la matriz de transformación como:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} &= R_v^b \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = (R_v^b)^T \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c\theta c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ c\theta s\psi & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad (6) \end{aligned}$$

### b) Cinemática Rotacional

Siendo los ángulos yaw, pitch y roll son medidas relativas del sistema de coordenadas, la transformación para cada una es diferente (Luo, Guan, Wei, Pan, & Yu, 2015; Pretorius & Boje, 2014; Riccardi et al., 2013). Las velocidades angulares  $(p, q, r)$  se pueden obtener de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + R_p^b(\phi) \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{pmatrix} + R_p^b(\phi) R_y^p(\theta) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\theta & \sin\phi\cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (7)$$

### Dinámica

#### a) Dinámica traslacional

Este análisis parte de la segunda ley de Newton el movimiento traslacional del quadrotor podemos expresarla como:

$$f = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \left( \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \omega_b \times \mathbf{v} \right) \quad (8)$$

Donde,  $\mathbf{v}=(u, v, w)^T$  y  $\omega_b=(p, q, r)^T$ . Se utiliza la ecuación coriolis para evaluar el tiempo derivado de las velocidades en las coordenadas del robot (Lippiello & Ruggiero, 2012; Mu, Parra-vega, & Anand, 2015; Rudolph, 2013; Xiong & Zheng, 2014). Evaluando se obtiene:

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} rv - qw \\ pw - ru \\ qu - pv \end{pmatrix} + \frac{1}{m} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} \quad (9)$$

Asumiendo la ausencia de cualquier perturbación externa, se tiene:

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = R_v^b \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -f \end{pmatrix} \quad (10)$$

Donde  $f$  es la fuerza de empuje ascendente total y  $mg$  es el peso del quadrotor.

### b) Dinámica rotacional

Aplicando la ley de Newton para el movimiento rotacional, tenemos:

$$\tau = \frac{d\mathbf{L}}{dt} = \left( \frac{d\mathbf{L}}{dt} + \omega_b \times \mathbf{L} \right) \quad (11)$$

Donde,  $\mathbf{L}=J\omega_b$  es el momento angular y es el torque aplicado. Se aplica la ecuación de coriolis para evaluar la derivada con respecto al tiempo del momento angular en las coordenadas del robot (Antonelli, Baizid, Caccavale, Giglio, & Pierri, 2014; Ayanian, Rus, & Kumar, 2012; Kapitonov, 2014; Khamseh, Pimenta, & Tôrres, 2014; Vignoni, Garelli, & Garc, 2012; Wang et al., 2015). Suponiendo que sea un cuerpo simétrico,  $J$  implica una matriz diagonal. Obteniéndose:

$$\begin{pmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} qr \frac{J_y - J_z}{J_x} \\ pr \frac{J_z - J_x}{J_y} \\ pq \frac{J_x - J_y}{J_z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{pmatrix} \quad (12)$$

Donde,  $\tau=(\tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi)$  y  $J_x, J_y, J_z$  son las entradas diagonales de la matriz inercial  $J$ . De (5) – (12) sirven para describir el modelo de 6 DOF del quadrotor, generándose:

$$\ddot{\phi} = \dot{\theta}\dot{\psi} \left( \frac{J_y - J_z}{J_x} \right) + \frac{U_2}{J_x} \quad (13)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi} \left( \frac{J_z - J_x}{J_y} \right) + \frac{U_3}{J_y} \quad (14)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\phi}\dot{\theta} \left( \frac{J_x - J_y}{J_z} \right) + \frac{U_4}{J_z} \quad (15)$$

$$\ddot{z} = \frac{U_1}{m} \cos\phi\cos\theta - g \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{U_1}{m} (\cos\phi \sin\theta \cos\psi \\ &+ \sin\phi \sin\psi) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= \frac{U_1}{m} (\cos\phi \sin\theta \sin\psi \\ &- \sin\phi \cos\psi) \end{aligned} \quad (18)$$

Se deberá considerar que las entradas de Control y se describen como:

$$U_1 = b(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \quad (19)$$

$$U_2 = b(\omega_4^2 - \omega_2^2) \quad (20)$$

$$U_3 = b(\omega_3^2 - \omega_1^2) \quad (21)$$

$$U_4 = b(\omega_4^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 - \omega_1^2) \quad (22)$$

### Planificación de Trayectorias punto a punto con perfil velocidad trapezoidal

En la actualidad se encuentran varios interpoladores (clasificados por el grado del polinomio 1, 3 o 5), una de las ventajas del planificador punto a punto con perfil de velocidad trapezoidal se encuentra en el control de velocidad entre dos puntos  $q_i$  y  $q_f$  (Bouktir et al., 2008; Jiang, Bishop, Anderson, & Drake, 2014; Kapitonov, 2014; Raffler et al., 2013; Rossi & Savino, 2013; Sumano, Castro, & Salazar, 2013; H. Yu, Sharma, Beard, & Taylor, 2013). Dividido en tres segmentos de trabajo Fig.3.

En el primer tramo parte central está caracterizado por un interpolador lineal que expresa que la velocidad se mantiene constante por lo cual la aceleración del sistema

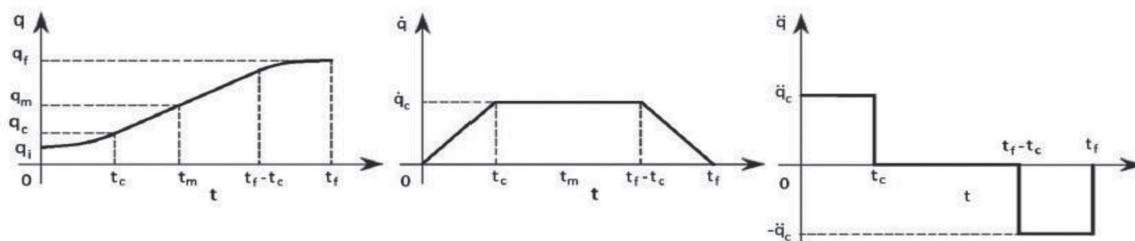


Fig. 3. Perfil de velocidad trapezoidal. Izq. Posición, Centr. Velocidad, Der. Aceleración

Fuente: (Rossi & Savino, 2013)

es cero. Para los extremos se usa un polinomio de segundo grado, respetando que en el tramo inicial la velocidad para dicho polinomio es cero y que para la tercera

sección la velocidad inicial corresponde a la máxima permitida en el sistema. Para estos casos la función de planificación de trayectoria se define como:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 + s \frac{a}{2} t^2, & t \leq \tau \\ q_0 - s \frac{V^2}{2a} + sVt, & \tau < t \leq T - \tau \\ q_1 + s \left( \frac{a}{2} T^2 + aTt - \frac{a}{2} t^2 \right), & T - \tau < t < T \end{cases} \quad (23)$$

Siendo:

$$\tau = \frac{V}{a} \quad (24)$$

$$T = s \frac{q_1 - q_0}{V} + \frac{V}{a} \quad (25)$$

Donde “V” representa la velocidad máxima permitida, “a” la aceleración máxima permitida y s el signo de  $(q_1 - q_0)$ .

planificador de trayectoria al sistema de control de posición del quadrotor.

### III. DESARROLLO DEL TRABAJO

De la sección anterior, y verificada por diversos autores, se plantea el diseño de una ruta para el Ar.drone2 en simulación con Software Educativo, posteriormente se incorpora el

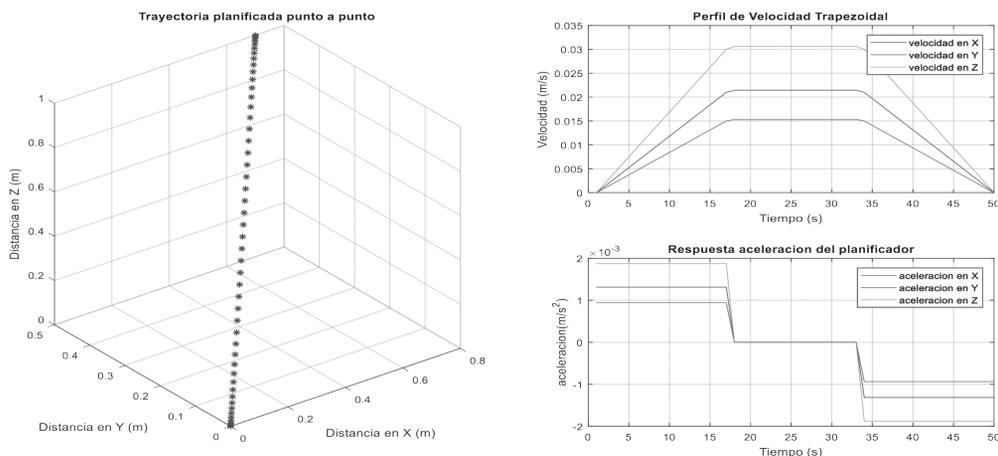
### B. Diseño y simulación del planificador de trayectorias.

Aplicando (23) se realizó la simulación para el diseño del planificador para este caso se realizaron tienen en cuenta los siguientes parámetros. Tabla.1.:

**Tabla 1.** Parámetros de diseño del planificador

Parametro	Valor	Parametro	Valor	Parametro	Valor	Parametro	Valor	Parametro	Valor
X inicial	0 m	X final	0.7 m	Vx inicial	0 m/s	Vx final	0 m/s	Vx máx	0.02143 m/s
Y inicial	0 m	Y final	0.5 m	Vy inicial	0 m/s	Vy final	0 m/s	Vy máx	0.01531 m/s
Z inicial	0 m	Z final	1 m	Vz inicial	0 m/s	Vz final	0 m/s	Vz máx	0.03061 m/s

Fuente: Autor



**Fig. 4.** Resultados del diseño del planificador. Grafica posiciones calculadas del planificador, perfil de velocidad, aceleración del planificador.

Fuente: Autor

### Respuesta en simulación del planificador de trayectoria

Para someter a prueba el planificador diseñado se hace uso del Toolbox AR Drone Simulink Development-kit V.1.1. (Sanabria,

2014). Fig.5. Se hace necesaria la declaración de controladores de la velocidad inercial del sistema debido a la configuración del toolbox que trabaja en función de unidades inerciales denotadas por el autor como  $X_e$ ,  $Y_e$  y  $\theta_e$ .

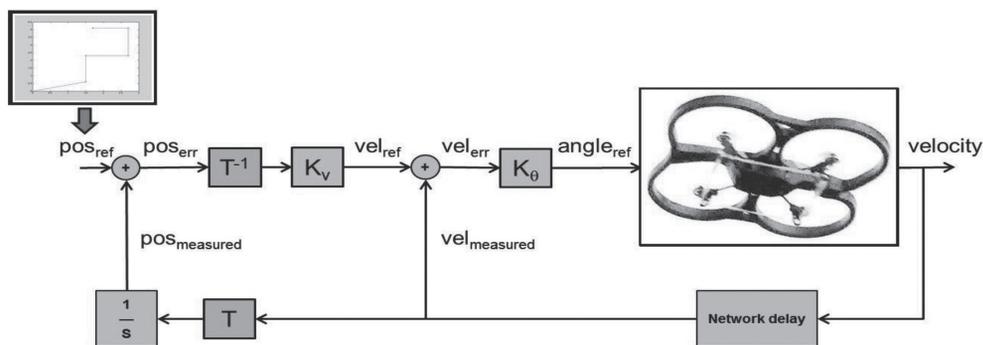


Fig. 5. Arquitectura de control utilizada propuesta por el Ar Drone Simulink Development-kit V.1.1. Fuente: (Sanabria, 2014)

## IV. RESULTADOS

En cuanto a la implementación bajo el modo de conexión Wifi con la plataforma Ar.drone2 del

Toolbox AR Drone Simulink Development-kit V.1.1. (Sanabria, 2014) se obtuvieron las mediciones asociadas a posiciones, velocidades, ángulo y velocidad angular del sistema.

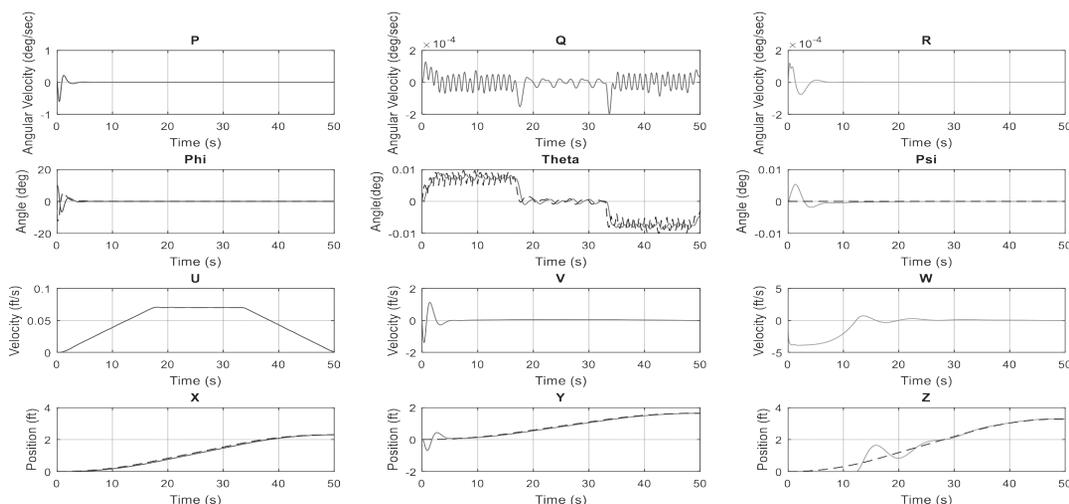


Fig. 6. Resultados posición (ft) velocidad (ft/s) angle (deg) y velocidad angular plataforma Fuente: Autor

En Fig.6. Encontrará que se aplicó el perfil de velocidad trapezoidal al desplazamiento para las coordenadas del eje X, para el eje Y, Z no se aplicó el perfil de velocidad trapezoidal para contrastar el efecto de la no aplicación de dicho

perfil. A continuación, en Fig.7. Observará el torque junto a las RPM presentadas en cada uno de los motores del Quadrotor Ar.drone2 de prueba. En la sección posterior encontrará la discusión de los resultados de la investigación.

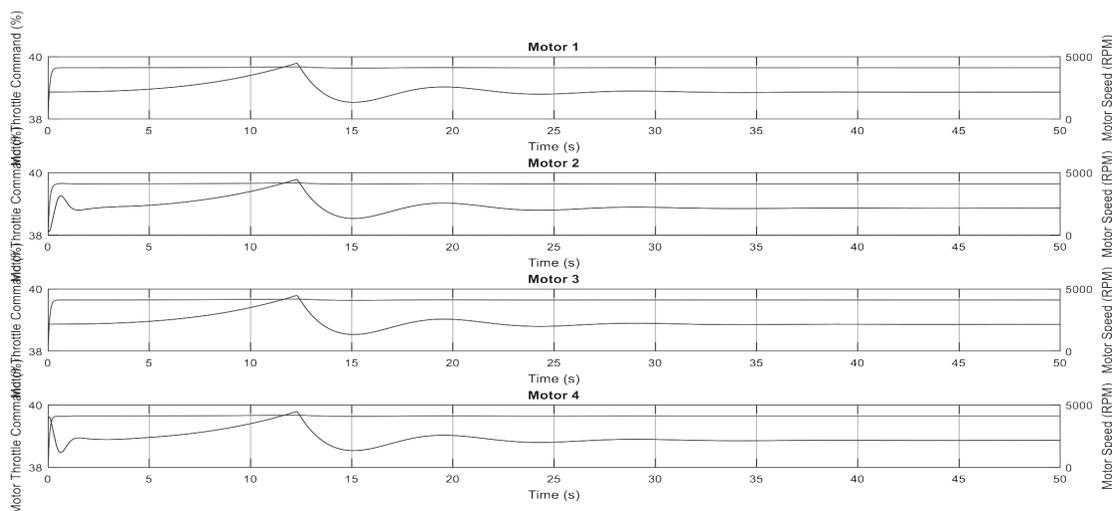


Fig. 7. Cálculo del torque y RPM de los motores que componen el Ar.drone2

Fuente: Autor

## V. DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta que en Fig.6., utilizó la unidad de pies (*ft*) como unidad fundamental

para identificar el desplazamiento en aeronaves, se recuerda las distancias utilizadas para el planificador diseñado con su valor en pies. Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de diseño del planificador en pies

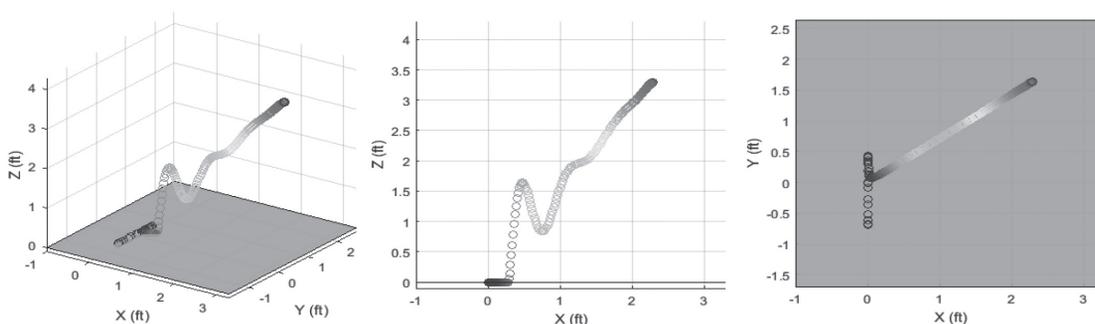
Parametro	Valor	Parametro	Valor	Parametro	Valor	Parametro	Valor
X final	0.7 m	X final	2.29659 ft	Vx máx	0.02143 m/ s	Vx máx	0.07030 ft/ s
Y final	0.5 m	Y final	1.64042 ft	Vy máx	0.01531 m/ s	Vy máx	0.05022 ft/ s
Z final	1 m	Z final	3.28084 ft	Vz máx	0.03061 m/s	Vz máx	0.10042 ft/s

Fuente: Autor

Como se indicó anteriormente se aplicó el planificador de trayectorias de perfil trapezoidal al desplazamiento con referencia al eje X. Dentro de Fig.6 se observa que el planificador efectivamente alcanza su referencia de 3.28084 ft, pero se ve aún más interesante la respuesta del cumplimiento del perfil de velocidad trapezoidal acatando la velocidad máxima para dicho perfil de 0.07030 ft/s. Otro efecto importante es el comportamiento de los ángulos pitch(p), roll (q) y yaw(r) un control del ángulo pitch llevándolo a una posición de 0°. También

podrá apreciar que la velocidad angular sobre el eje X también busca estabilizarse en 0, ya que no se produce una variación sobre el ángulo, caso contrario si pasa en el eje Y.

Ahora bien, analizando los motores se observa que se alcanza los 4800 RPM en los motores y el torque como esfuerzo del sistema presenta un comportamiento uniforme entre los cuatro motores. De igual forma con los datos obtenidos en la implementación se logra graficar desde Software Educativo el comportamiento de la ruta de vuelo. Fig.8.



**Fig. 8.** Ruta de vuelo realizada, ruta en el plano XZ, Ruta de vuelo XY  
Fuente: Autor

En Fig.8. Finalmente se comprueba la ruta de vuelo del planificador de trayectorias sobre el Ar.drone2 en XYZ, el cual, a primera vista pareciera no aportar mayor información más la de alcanzar el punto final (x, y, z) deseado. La imagen central en Fig.8., demuestra que alcanza la altura deseada junto con la coordenada en X, pero no obstante la tercera y última imagen de Fig.8., demuestra el real alcance del planificador de trayectorias como efecto final del planificador con perfil trapezoidal para un tiempo de ejecución de 50s.

## VI. CONCLUSIONES

Se hace evidente los efectos del uso del planificador de trayectorias de perfil trapezoidal para sistemas robóticos aéreos. Los resultados de las pruebas de operación del Ar.drone2 permitieron el control de las posiciones, velocidades y aceleraciones del sistema, recordando la aplicabilidad de la segunda ley de Newton para el análisis dinámico y cinemático de la plataforma. La estructura de este trabajo de investigación fortalece el modelo de

enseñanza a partir de la triada diseño-simulación-implementación base para cualquier ingeniería. Se observó en la parte inicial de la ruta la compensación que hace el Ar.drone en el arranque del sistema para tratar de compensar el movimiento en el eje X.

En cuanto al desarrollo del trabajo, se encuentra el aporte de la planificación de trayectorias punto a punto como opción para la creación de rutas preestablecidas, las cuales son fundamentales para aplicaciones como vigilancia, e incluso, la fotografía aérea para las aplicaciones como levantamientos de mosaicos, mapas topográficos donde el conocer la altura y las coordenadas del robot aéreo junto con la velocidad de desplazamiento y aceleraciones cobran gran importancia para la calidad de las fotos adquiridas.

Otro factor importante relata la posibilidad de analizar el torque necesario y aplicado por los motores en cada segmento del trayecto. Lo cual es posible determinar a partir de los datos del planificador y las características dinámicas de la plataforma aérea. La no implementación del planificador como apoyo a la estrategia de control causará efectos indeseados en cuanto a la manipulación de la plataforma ya que se convierte en pieza importante para el desplazamiento.

Dentro de la implementación del sistema real se debe recalcar la importancia de la coordinación del protocolo UDP otorgado por Software Educativo, así como la necesidad de ver las coordenadas generadas expresadas en el marco de referencia inercial del robot.

## VII. REFERENCIAS

Abdessameud, A., & Janabi-sharifi, F. (2015). Automatica Image-based tracking control of VTOL unmanned aerial vehicles

☆. *Automatica*, 53, 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.12.032>

Alpen, M., Frick, K., & Horn, J. (2013). *An Autonomous Indoor UAV with a Real-Time On-Board Orthogonal SLAM*. *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 46). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20130626-3-AU-2035.00016>

Amato, E. D., Francesco, G. Di, Notaro, I., Tagliione, G., Mattei, M., Francesco, G. Di, ... Notaro, I. (2015). ScienceDirect Nonlinear Dynamic Inversion and Neural Networks for a Tilt Tri-Rotor UAV Nonlinear Dynamic Inversion and Neural Networks for a Tilt Tri-Rotor UAV Nonlinear Dynamic Dynamic Inversion and Neural Networks for a a Tilt Tilt Nonlinear Inve. *IFAC-PapersOnLine*, 48(9), 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.077>

Antonelli, G., Baizid, K., Caccavale, F., Giglio, G., & Pierri, F. (2014). *CAVIS : a Control software Architecture for cooperative multi-unmanned aerial Vehicle-manipulator Systems*. *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 47). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02366>

Ayanian, N., Rus, D., & Kumar, V. (2012). *Decentralized Multirobot Control in Partially Known Environments with Dynamic Task Reassignment*. *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 45). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20120914-2-US-4030.00029>

Behera, L. (2014). International Federation of Automatic Control 3<sup>rd</sup> International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems ACODS 2014, (March), 13–15. <https://doi.org/10.3182/20140313-3-IN-3024.90001>

Bouktir, Y., Haddad, M., & Chettibi, T. (2008). Trajectory planning for a quadrotor helicopter, 1258–1263.

Brown, T. B., Cheng, R., Sirault, X. R. R., Rungrat, T., Murray, K. D., Trtlek, M., ... Borevitz, J. O. (2014). TraitCapture: Genomic and environment modelling of plant phenomic data.

- Current Opinion in Plant Biology*, 18(1), 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2014.02.002>
- Caccavale, F., Giglio, G., Muscio, G., & Pierri, F. (2014). *Adaptive control for UAVs equipped with a robotic arm. IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 47). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00790>
- Drone, A. R., & Quadrotror, D. (2016). ScienceDirect with with. *IFAC-PapersOnLine*, 49(6), 236–241. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.183>
- Duan, T., Chapman, S. C., Guo, Y., & Zheng, B. (2017). Field Crops Research Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. *Field Crops Research*, 210(June), 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.025>
- François, P. B., David, C., & Jemmapes, D. (2011). *The Navigation and Control technology inside the AR . Drone micro UAV. IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 44). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02327>
- Freeman, P. K., & Freeland, R. S. (2014). Politics & technology : U . S . polices restricting unmanned aerial systems in agriculture, 49, 302–311. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.09.008>
- Gabrlík, P., Gabrlík, P., & Gabrlík, P. (2015). ScienceDirect The Use of Direct Georeferencing in Aerial The Use in The Photogrammetry Use of of Direct Direct Georeferencing Georeferencing in Aerial Aerial with Micro UAV Photogrammetry with UAV Photogrammetry with. *IFAC-PapersOnLine*, 48(4), 380–385. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.07.064>
- Garrido, M., Paraforos, D. S., Reiser, D., Arellano, M. V., Griepentrog, H. W., & Valero, C. (2015). 3D maize plant reconstruction based on georeferenced overlapping lidar point clouds. *Remote Sensing*, 7(12), 17077–17096. <https://doi.org/10.3390/rs71215870>
- Gohardani, O., Chapartegui, M., & Elizetxea, C. (2014). Progress in Aerospace Sciences Potential and prospective implementation of carbon nanotubes on next generation aircraft and space vehicles : A review of current and expected applications in aerospace sciences. *Progress in Aerospace Sciences*, 70, 42–68. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.05.002>
- GPSPRO. (n.d.). SIA &quot;Infinitas&quot; - Parrot Droni - Parrot AR.Drone 2.0 orange + Gloves and 16GB USB Stick Parrot Droni. Retrieved October 11, 2017, from [http://www.gpspro.lv/products/lv/326/4662/sort/1/filter/0\\_0\\_0\\_0/Parrot-AR.Drone-2.0-orange--Gloves-and-16GB-USB-Stick-Parrot-Droni.html](http://www.gpspro.lv/products/lv/326/4662/sort/1/filter/0_0_0_0/Parrot-AR.Drone-2.0-orange--Gloves-and-16GB-USB-Stick-Parrot-Droni.html)
- Guenard, A., & Ciarletta, L. (2012). The AE-TOURNOS project : Using a flock of UAVs as a Cyber Physical System and platform for application-driven research, 10(EmSens), 939–945. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2012.06.127>
- Guerrero, J. S., Contreras, A. F., Hernández, J. I., & Neira, L. A. (2015). Instrumentation of an Array of Ultrasonic Sensors and Data Processing for Unmanned Aerial Vehicle ( UAV ) for Teaching the Application of the Kalman Filter. *Procedia - Procedia Computer Science*, 75(Vare), 375–380. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.260>
- Hehn, M., & Andrea, R. D. (2011). *Quadrocopter Trajectory Generation and Control. IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 44). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03178>
- Jiang, B., Bishop, A. N., Anderson, B. D. O., & Drake, S. P. (2014). *Path Planning for Minimizing Detection. IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 47). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00634>
- Kapitonov, A. A. (2014). *Geometric path following control of a rigid body based on the stabilization of sets* □. *IFAC Proceedings*

- Volumes (Vol. 47). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02502>
- Khamseh, H. B., Pimenta, L. C. A., & Tôrres, L. A. B. (2014). *Decentralized Coordination of Constrained Fixed-wing Unmanned Aerial Vehicles : Circular Orbits*. *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 47). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01643>
- King, S., Lai, S., Wang, F., Lan, M., & Chen, B. M. (2015). Mechatronics Systems design and implementation with jerk-optimized trajectory generation for UAV calligraphy. *Mechatronics*, 30, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.06.006>
- Li, Q., Li, D., Wu, Q., Tang, L., & Huo, Y. (2013). Computers in Industry Autonomous navigation and environment modeling for MAVs in 3-D enclosed industrial environments. *Computers in Industry*, 64(9), 1161–1177. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.06.010>
- Lippiello, V., & Ruggiero, F. (2012). *Cartesian Impedance Control of a UAV with a Robotic Arm*. *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 45). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20120905-3-HR-2030.00158>
- Luo, Y., Guan, T., Wei, B., Pan, H., & Yu, J. (2015). Neurocomputing Fast terrain mapping from low altitude digital imagery. *Neurocomputing*, 156, 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.12.079>
- Matouk, D., & Gherouat, O. (2016). Quadrotor Position and Attitude Control via Backstepping Approach, 73–79.
- Modeling, Estimation, and Control of Quadrotor. (2012), (August).
- Mu, A., Parra-vega, V., & Anand, S. (2015). ScienceDirect Control Control Control Control Control. *IFAC-PapersOnLine*, 48(19), 118–123. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.020>
- Olivares, V., Cordova, F., Sepúlveda, J. M., & Derpich, I. (2015). Information Technology and Quantitative Management ( ITQM 2015 ) MODELING INTERNAL LOGISTICS BY USING DRONES ON THE STAGE OF ASSEMBLY OF PRODUCTS. *Procedia - Procedia Computer Science*, 55(Itqm), 1240–1249. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.132>
- Önder, M., Eresen, A., & Imamog, N. (2012). Expert Systems with Applications Autonomous quadrotor flight with vision-based obstacle avoidance in virtual environment, 39, 894–905. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.087>
- Palunko, I., & Fierro, R. (2011). *Adaptive Control of a Quadrotor with Dynamic Changes in the Center of Gravity*. *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 44). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02564>
- Pounds, P., Mahony, R., & Corke, P. (2010). Control Engineering Practice Modelling and control of a large quadrotor robot. *Control Engineering Practice*, 18(7), 691–699. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.02.008>
- Pretorius, A., & Boje, E. (2014). *Design and Modelling of a Quadrotor Helicopter with Variable Pitch Rotors for Aggressive Manoeuvres*. *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 47). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01586>
- Raffler, T., Wang, J., & Holzapfel, F. (2013). *Path Generation and Control for Unmanned Multirotor Vehicles Using Nonlinear Dynamic Inversion and Pseudo Control Hedging*. *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 46). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20130902-5-DE-2040.00132>
- Riccardi, F., Farooq, M., Formentin, S., Lovera, M., Elettronica, D., Bioingegneria, I., ... Leonardo, P. (2013). *Control of variable-pitch quadrotors*. *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 46). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20130902-5-DE-2040.00143>

- Rocchi, A. B. C. A. P. C. (2008). *Hierarchical and Hybrid Model Predictive Control of Quadcopter Air Vehicles*. *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 42). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20090916-3-ES-3003.00004>
- Rossi, C., & Savino, S. (2013). Robot trajectory planning by assigning positions and tangential velocities. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(1), 139–156. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.04.003>
- Rudolph, M. K. J. (2013). *Quadrotor tracking control based on a moving frame*. *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 46). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20130904-3-FR-2041.00142>
- Saska, M., Kasl, Z., & Pě, L. (2014). Motion planning and control of formations of micro aerial vehicles, 1228–1233. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02295>
- Sumano, E., Castro, R., & Salazar, R. L. S. (2013). *Synchronized Flight Formation of Quadrotors*. *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 46). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20131120-3-FR-4045.00042>
- Vázquez-Arellano, M., Griepentrog, H. W., Reiser, D., & Paraforos, D. S. (2016). 3-D imaging systems for agricultural applications—a review. *Sensors (Switzerland)*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/s16050618>
- Vignoni, A., Garelli, F., & Garc, S. (2012). UAV reference conditioning for formation control via set invariance and sliding modes, 10–15. <https://doi.org/10.3182/20120914-2-US-4030.00060>
- Wang, J., Wang, J., Iurii, A., Krasnov, J., & Krasnov, A. J. (2015). ScienceDirect Geometric Geometric Geometric path path following following moving frame moving moving frame frame control control in in in a a. *IFAC-PapersOnLine*, 48(11), 150–155. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.175>
- Xiang, H., & Tian, L. (2011). Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle ( UAV ). *Biosystems Engineering*, 108(2), 174–190. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.11.010>
- Xiong, J. J., & Zheng, E. H. (2014). Position and attitude tracking control for a quadrotor UAV. *ISA Transactions*, 53(3), 725–731. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.01.004>
- Yu, H., Sharma, R., Beard, R. W., & Taylor, C. N. (2013). Observability-based local path planning and obstacle avoidance using bearing-only measurements. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12), 1392–1405. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.07.013>
- Yu, Z., Jing, C., & Lincheng, S. (2013). Real-time trajectory planning forUCAV air-to-surface attack using inverse dynamics optimization method and receding horizon control. *Chinese Journal of Aeronautics*, 26(4), 1038–1056. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2013.04.040>
- Zhang, Z., Zhang, S., Xie, P., & Ma, O. (2014). Bioinspired 4D Trajectory Generation for a UAS Rapid Point-to-Point Movement, 11, 72–81. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(14\)60021-4](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(14)60021-4)
- Zhou, J., Pavek, M. J., Shelton, S. C., Holden, Z. J., & Sankaran, S. (2016). Aerial multispectral imaging for crop hail damage assessment in potato. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, 406–412. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.06.019>