

Robótica Móvil - Aerial Mobile Robots

Davide Jarik De Rosa - Erasmus student

DNI: CA91061DU

Email: davidejarik@correo.ugr.es

January 31, 2025

Contents

1	Introducción	2
2	Tipos de robots aéreos: multirrotores, ala fija, híbridos	2
2.1	Robots multirrotores	2
2.2	Robots de ala fija	3
2.3	Robots monorrotor	3
2.4	Robots híbridos	3
2.5	Otros tipos de robots y NTARs	4
3	Modelos dinámicos y cinemáticos	5
3.1	Modelo cinemático de un robot con ala fija	5
3.2	Modelo dinámico de un robot con ala fija	7
3.3	Modelo cinemático de un robot quadrotor	9
3.4	Modelo dinámico de un robot quadrotor	10
4	Sistemas de control: estabilización, seguimiento de trayectorias	11
4.1	Posibles sistemas de control	11
4.2	Simulación de la dinámica lateral de un robot con ala fija	11
5	Autonomía de vuelo	15
5.1	Classificación	16
5.2	Arquitecturas de sistemas	16
5.3	Componentes Hardware y Software	17
5.4	Técnicas de navegación	18
6	Ejemplos de aplicaciones	18
6.1	Entrega de mercancías	18
6.2	Vigilancia	20
6.3	Rescate	20
A	Cálculo de matrices para la simulación	23
B	Código Matlab y Simulink	25

1 Introducción

La robótica aérea, o drones aéreos, se está imponiendo en muchos sectores industriales. La robótica aérea tiene varias ventajas que la diferencian de otros tipos de robótica: es barata y fácil de manejar, puede llegar donde otros robots no pueden y, en algunos casos, no requiere programación ni conocimientos especializados. La robótica aérea representa el próximo gran salto adelante en la tecnología robótica, y sus beneficios potenciales no deben subestimarse [17].

Las primeras aplicaciones de los robots aéreos tuvieron lugar en el ámbito militar, donde se utilizaron para ejecutar misiones peligrosas con el fin de reducir los riesgos de los pilotos y mejorar la eficacia operativa. La tecnología robótica aérea ha evolucionado rápidamente, y su adopción generalizada se ha extendido al sector civil. La robótica aérea es ahora una opción popular en muchos sectores, como la agricultura, la construcción y las fuerzas de seguridad, y los robots aéreos se emplean en diversas tareas civiles, como la inspección de redes eléctricas, la vigilancia de incendios forestales, las operaciones de búsqueda y rescate y la topografía [12].

Los diferentes tipos de robots aéreos y de tareas implican que no tendremos características fijas para esta tipología de robots: el sistema de alimentación y de propulsión será de naturaleza diferente, por los sensores es lo mismo (cámara fish-eye [7], reflectante [18], LIDARs, etc...), así como por el sistema de control y el grado de autonomía. También la estructura del entorno depende fuertemente del tipo de robots y de la tarea: los UAVs tienden a aplicarse en entornos desconocidos, parcialmente observables, altamente estocásticos y dinámicos [23], mientras los robots multirrotores se aplican normalmente en entornos más observables y estáticos. Son muchas las experimentaciones sobre sistemas multi-agentes en la robótica aérea [9].

2 Tipos de robots aéreos: multirrotores, ala fija, híbridos

Existen muchísimas clasificaciones para los robots aéreos, la más clásica divide los robots en multirrotores, ala fija, monorrotor y híbridos [19].

2.1 Robots multirrotores

Los robots multirrotores son los drones más fáciles y baratos. También ofrecen un mayor control sobre la posición y el encuadre, por lo que son perfectos para la fotografía aérea y la vigilancia. Se llaman multirrotores porque tienen más de un motor, siendo los más comunes los tricópteros (3 rotores), los cuadricópteros (4 rotores), los hexacópteros (6 rotores) y los octocópteros (8 rotores), entre otros. Los cuadricópteros son, con diferencia, los drones multirrotores más populares.

Sus principales ventajas son:

- Un mejor control durante el vuelo;
- Una gran maniobrabilidad (pueden moverse arriba y abajo en la misma línea vertical, de atrás hacia delante, de lado a lado y girar en su propio eje);
- La capacidad de volar mucho más cerca de estructuras y edificios y llevar múltiples cargas por vuelo, aumentando su eficacia operativa y reduciendo el tiempo necesario para las operaciones.

Sus principales desventajas son:

- Resistencia y velocidad limitadas, son inadecuadas para la cartografía aérea a gran escala, la vigilancia de larga duración y la inspección a larga distancia;
- Muy ineficientes: requieren mucha energía sólo para luchar contra la gravedad y mantenerse estables en el aire;
- Teniendo en cuenta la tecnología actual de las baterías, los robots pequeños son limitados a unos 20-30 minutos (los multirrotores de carga pesada son capaces de transportar mucho peso, pero a cambio de tiempos de vuelo mucho más cortos);
- se limitan a los motores eléctricos debido a la necesidad de cambios de aceleración rápidos y de alta precisión para mantenerlos estabilizados.

2.2 Robots de ala fija

Un dron de ala fija tiene un ala rígida diseñada para parecer y funcionar como un avión. Por tanto, este tipo de dron sólo necesita energía para avanzar y no para mantenerse en el aire. Esto los hace eficientes desde el punto de vista energético. Sus usos abarcan la cartografía aérea, la vigilancia aérea, la agricultura y la inspección.

Sus principales ventajas son:

- Cubren distancias más largas, cartografían zonas mucho más extensas y permanecen mucho tiempo vigilando su punto de interés. El tiempo medio de vuelo es de un par de horas, pero con una mayor densidad energética del combustible muchos UAV de ala fija pueden permanecer en el aire 16 horas o más;
- Pueden volar a gran altitud, cargar más peso y son más clementes con los errores que otros tipos de drones.

Sus principales desventajas son:

- Pueden ser muy caros;
- Volar es mucho más difícil, en el caso de un UAV semiautomático con piloto se necesita una formación adecuada;
- Por lo general, hay que procesar miles de imágenes capturadas y realizar muchas operaciones posteriores (cálculo del volumen de las reservas, recuento de árboles, superposición de otros datos en los mapas, etc...).

2.3 Robots monorrotor

Los drones monorrotor son resistentes y duraderos. Su estructura y diseño son similares a los de los helicópteros reales. Un monorrotor solo tiene un rotor, que es como una gran ala giratoria, y otro pequeño rotor de cola para controlar la dirección y la estabilidad. Sus usos principales abarcan vigilancia aérea y el transporte de cargas pesadas.

Sus principales ventajas son:

- Mucha mayor eficiencia que un multirrotor;
- Permiten palas muy largas que proporciona una gran eficiencia;
- La mejor opción si necesitas una mezcla de vuelo estacionario con vuelo de larga duración o de avance rápido;
- Resistentes y duraderos.

Sus principales desventajas son:

- Complejos y costosos.
- Vibran mucho y no son tan estables o clementes en caso de mal aterrizaje;
- Requieren mucho mantenimiento debido a sus complejidad mecánica;
- Las largas y pesadas palas giratorias de un solo rotor pueden ser peligrosas.

2.4 Robots híbridos

Los drones híbridos combinan las ventajas de los diseños de ala fija y de los multirrotores. Este tipo de dron tiene rotores acoplados a las alas fijas, lo que le permite planear y despegar y aterrizar verticalmente. Esta nueva categoría de híbridos sólo cuenta con unos pocos en el mercado, pero puede ser mucho más popular en los próximos años. Un ejemplo de híbrido es el dron de reparto Amazon's Prime Air.

Sus principales ventajas son:

- El piloto automático puede hacer todo el trabajo duro de mantener estable el dron, dejando al piloto humano la tarea más fácil de guiarlo por el cielo;
- Ofrecen lo mejor de ambos mundos: diseños de ala fija y de rotor;
- perfectos tanto en vuelo estacionario como en vuelo frontal.

Sus principales desventajas son:

- Actualmente sólo hay en el mercado un pequeño número de híbridos;
- La tecnología utilizada en estos tipos de drones aún está en fase de desarrollo.

2.5 Otros tipos de robots y NTARs

Aparte los cuatro tipos de robots que he elencado antes, existen también otras tipologías de robots aéreos: Drones pequeños (se utilizan con fines recreativos, demasiado ligeros y carecen de la estabilidad necesaria para captar imágenes con precisión), Microdrones (tienen microcámaras, el ejército británico utiliza habitualmente este tipo de dron llamado Black Hornet), Drones tácticos (equipados con tecnología GPS y cámaras de infrarrojos), Grandes drones de combate (suelen utilizarse para disparar bombas guiadas por láser o misiles aire-superficie contra objetivos), Drones GPS (se conectan a satélites mediante una conexión GPS para trazar el resto de su vuelo, recopilando datos que pueden extraerse para tomar decisiones informadas), Drones fotográficos (equipados con cámaras de calidad profesional).

Los "Nuevos Tipos de Robots Aéreos" (NTARs) son un conjunto de robots aéreos innovadores que presentan características avanzadas como morfabilidad, biomímesis, locomoción multimodal (pueden cambiar entre distintos modos de movimiento para mejorar la eficacia de la ejecución de sus tareas) y manipuladores integrados (para realizar tareas operativas durante el vuelo) [22].

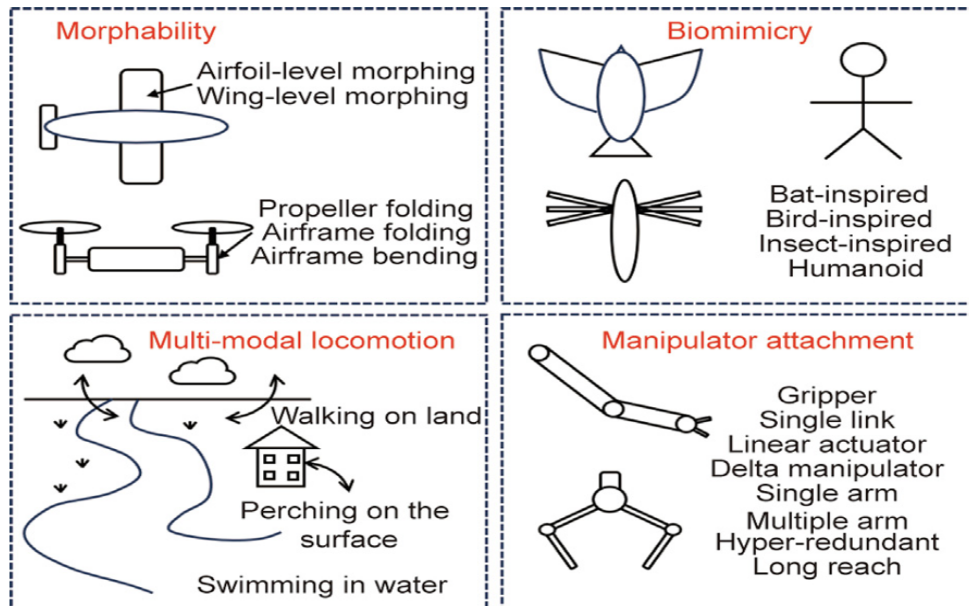


Figure 1: Definición de NTARs

Los NTARs tienen aplicaciones en ámbitos militares, civiles, de investigación científica, gestión de desastres y más. Los NTARs surgieron para superar las limitaciones de los robots aéreos tradicionales, caracterizados por configuraciones de vuelo limitadas, alta emisión de ruido, dimensiones voluminosas y dificultades para operar en entornos complejos. La inspiración para estos nuevos robots proviene de la naturaleza (vuelo animal), con soluciones que incluyen la capacidad de posarse, locomoción anfibia y manipuladores para tareas operativas.

3 Modelos dinámicos y cinemáticos

En esta sección haremos un análisis de los modelos cinemáticos y dinámicos de un pequeño UAV con ala fija y de un quadrotor con 6 grados de libertad.

3.1 Modelo cinemático de un robot con ala fija

Los robots o las aeronaves de ala fija son capaces de volar utilizando alas que generan sustentación debido a la velocidad de avance del vehículo y a la geometría de las alas. La sustentación, en concreto, es creada por la diferencia de presión entre la parte superior e inferior del ala. La distribución de la presión puede reducirse a dos fuerzas y un momento si tenemos un cuerpo rígido [3]. La fuerza de sustentación (1), la fuerza de arrastre (2) y el momento de giro (3).

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L \quad (1)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D \quad (2)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho v^2 S b C_m \quad (3)$$

Donde ρ es la densidad del aire (kg/m^3), v es la velocidad de vuelo (m/s), S es la superficie alar, c es la cuerda media aerodinámica (m), C_L es el coeficiente de sustentación, C_D es el coeficiente de arrastre y C_m es el coeficiente de momento. Los coeficientes son todos dependientes del ángulo de ataque y se pueden estimar teóricamente utilizando software 2D-CFD, experimentalmente en un túnel de viento o a partir de datos de vuelo.

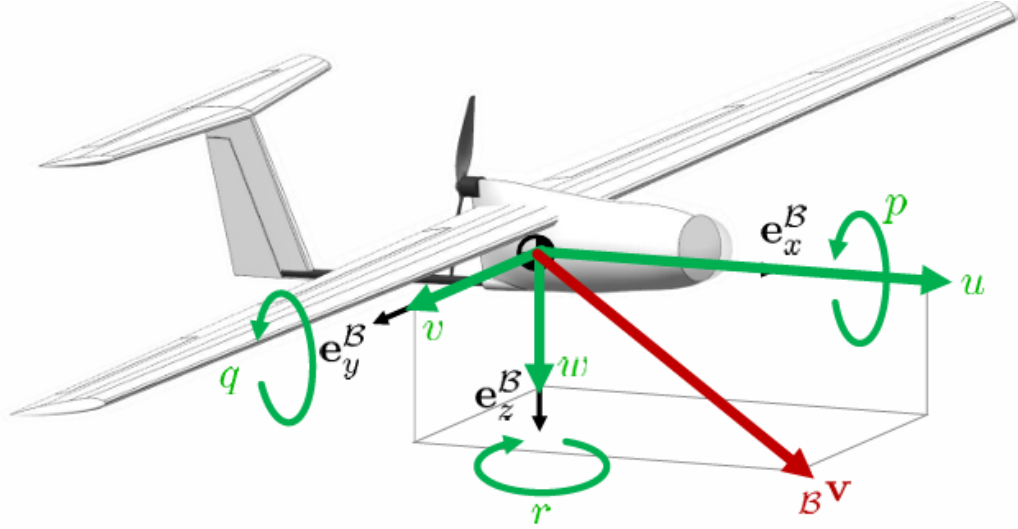


Figure 2: El sistema del cuerpo

Cómo hay hecho en [15], haremos las siguientes asunciones y simplificaciones en el tratamiento del modelo cinemático y dinámico:

- Origen del sistema de coordenadas del cuerpo fijado en el centro de gravedad;
- Estructura rígida y simétrica: matriz de inercia constante y diagonal;
- Masa constante;
- Motor sin dinámica y sin efectos giroscópicos;
- No tener en cuenta la fuerza de sustentación del fuselaje y la fuerza de deslizamiento lateral.

Fijamos los dos sistemas de referencia:

- El sistema inercial, con los ejes Norte, Este, Abajo (o NED), la suposición de Tierra Plana y el origen en las coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator);
- El sistema del cuerpo, con u por el morro, v por el ala derecha y w hacia abajo y el origen al centro de gravedad.

Con referencia a la Figura 2, tendremos la velocidad del cuerpo (4), la velocidad angular del cuerpo (5) y la velocidad del aire (6):

$$B^V = (u, v, w)^T \quad (4)$$

$$B^\omega = (p, q, r)^T \quad (5)$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (6)$$

Para transformar las coordenadas inerciales en coordenadas corporales para obtener la cinemática directa (e inversa) necesitaremos alabeo, cabeceo, guiñada y los ángulos de Tait-Brian (variantes de ángulos de Euler donde cero grados de elevación representa la actitud horizontal) [20]. Los ángulos de Tait-Brian se representan así

$$\Theta = (\phi, \theta, \psi)^T \quad (7)$$

y la matriz de rotación C_{IB} desde el sistema inercial I al sistema del cuerpo del robot B será obtenida con 3 rotaciones consecutivas de guiñada, cabeceo y alabeo sobre el eje z_I del sistema inercial y dos ejes intermedios, así como se ve en la Figura 3.

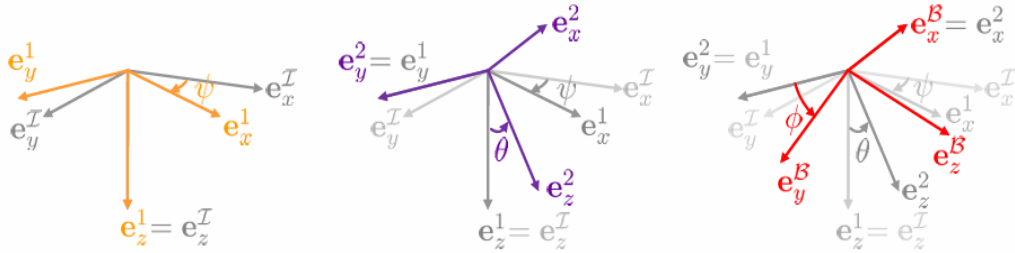


Figure 3: Las rotaciones consecutivas

Lo que obtenemos será

$$C_{IB} = C_{I1}C_{12}C_{2B} = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\phi - s_\psi c_\phi & c_\psi s_\theta c_\phi + s_\psi s_\phi \\ s_\psi c_\theta & s_\psi s_\theta s_\phi + c_\psi c_\phi & s_\psi s_\theta c_\phi - c_\psi s_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

y es muy importante saber que la variación temporal de los ángulos de (7) tendrá esta correlación con (5)

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_r \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \cos \theta \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (9)$$

Ahora, empezando con estas dos ecuaciones

$${}_I V_a = C_{IB} \cdot {}_B V_a \quad (10)$$

$${}_I V = {}_I V_a + {}_I W \quad (11)$$

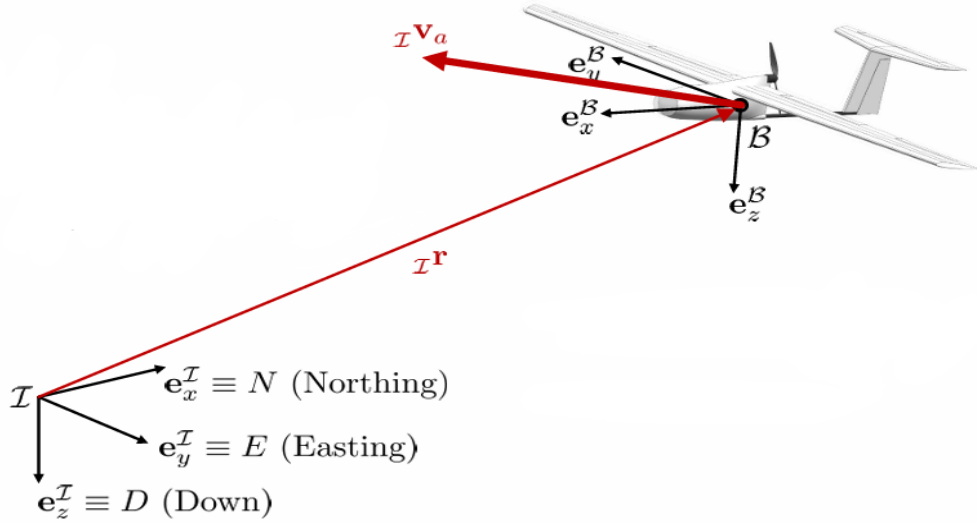


Figure 4: La transformación entre sistemas de referencia

donde ${}_B V_a$ es la velocidad del cuerpo en el sistema B y ${}_I V_a$ en el sistema I , ${}_I W$ es la velocidad del viento que imponemos constante y horizontal (con la hipótesis de viento constante eso sólo afectará a la dinámica de posición), ${}_I V$ es la velocidad inercial terrestre. Todo ilustrado en la Figura 4

Teniendo en cuenta los siguientes ángulos:

- $\alpha = \arctan(\frac{w}{u})$ - ángulo de ataque;
- $\beta = \arctan(\frac{v}{V})$ - ángulo de deslizamiento lateral;
- γ - ángulo de trayectoria de vuelo, ángulo entre el horizonte y ${}_I V_a$;
- θ - ángulo de cabeceo, ángulo entre el horizonte y el eje x del cuerpo;
- ϕ - ángulo de alabeo, la rotación sobre el eje x del cuerpo;
- ξ - ángulo de rumbo, ángulo entre norte y ${}_I V_a$;
- ψ - ángulo de guiñada, ángulo entre norte y el eje x del cuerpo;
- χ - ángulo de derrota, ángulo entre norte y ${}_I V$;
- ϵ - ángulo entre la dirección del empuje F_T y el eje longitudinal del fuselaje del robot.

Con estos ángulos podemos escribir la ecuación final del modelo cinemático:

$${}_I V = {}_I V_a + {}_I W = {}_I \dot{r} = \begin{bmatrix} V \cos \gamma \cos \xi + \omega_N \\ V \cos \gamma \sin \xi + \omega_E \\ -V \sin \gamma + \omega_D \end{bmatrix} \quad (12)$$

donde ω_N , ω_E y ω_D son las componentes de la velocidad angular del robot con respecto al sistema de referencia inercial.

3.2 Modelo dinámico de un robot con ala fija

En el modelo dinámico lo que haremos será una suma de las fuerzas y de los momentos actuando en el centro de gravedad del robot. En la Figura 5 todas las fuerzas y los momentos son ilustrados, por la definición de la fuerza de empuje F_T , el momento de alabeo L_m , el momento de cabeceo M_m y el momento de guiñada N_m mirar a [15].

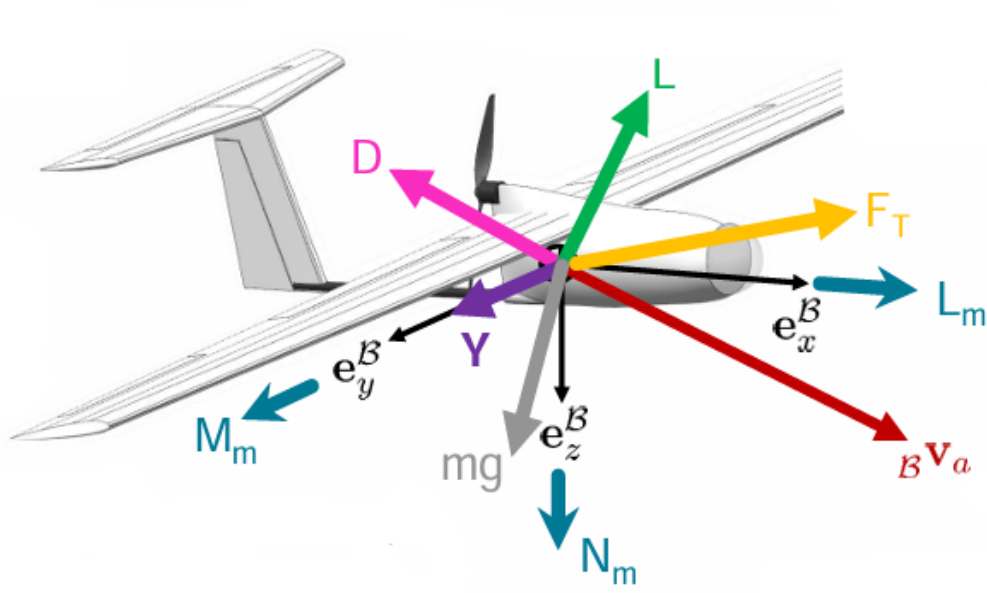


Figure 5: La suma de las fuerzas y de los momentos

Entonces en el sistema B , con las fuerzas tendremos

$$\mathbf{F}_{\text{tot}} = \begin{bmatrix} -D \cos \alpha + L \sin \alpha \\ Y \\ -D \sin \alpha - L \cos \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_T \cos \epsilon \\ 0 \\ F_T \sin \epsilon \end{bmatrix} + m C_{BI} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{F}_{\text{tot}} = \begin{bmatrix} F_T \cos \epsilon - D \cos \alpha + L \sin \alpha - mg \sin \theta \\ Y + mg \sin \phi \cos \theta \\ F_T \sin \epsilon - D \sin \alpha - L \cos \alpha + mg \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (14)$$

y con los momentos

$$\mathbf{M}_{\text{tot}} = \begin{bmatrix} L_m \\ M_m \\ N_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{mT} \\ M_{mT} \\ N_{mT} \end{bmatrix} \quad (15)$$

donde L_{mT}, M_{mT}, N_{mT} son los momentos adicionales debidos a la propulsión. Si tuviéramos que aplicar la segunda ley de Newton tendríamos para las fuerzas

$$\mathbf{F}_{\text{tot}} = \frac{d}{dt}(m_B \mathbf{v}) = m \left[\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \right] = m \begin{bmatrix} \dot{u} + qw - rv \\ \dot{v} + ru - pw \\ \dot{w} + pv - qu \end{bmatrix} \quad (16)$$

y para los momentos

$$\mathbf{M}_{\text{tot}} = \frac{d}{dt}(\mathbf{I}_B \boldsymbol{\omega}) = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & I_{xz} \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ I_{xz} & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & I_{xz} \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ I_{xz} & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & I_{xz} \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ I_{xz} & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx}\dot{p} + I_{xz}\dot{r} + qr(I_{zz} - I_{yy}) + qpI_{xz} \\ I_{yy}\dot{q} + pr(I_{xx} - I_{zz}) + (r^2 - p^2)I_{xz} \\ I_{xz}\dot{p} + I_{zz}\dot{r} + pq(I_{yy} - I_{xx}) - qrI_{xz} \end{bmatrix} \quad (18)$$

En conclusión, las ecuaciones de desplazamiento del modelo dinámico serán en el sistema B

$$\dot{u} = rv - qw + \frac{1}{m} (F_T \cos \epsilon - D \cos \alpha + L \sin \alpha) - g \sin \theta \quad (19)$$

$$\dot{v} = pw - ru + \frac{1}{m} Y + g \sin \phi \cos \theta \quad (20)$$

$$\dot{w} = qu - pv + \frac{1}{m} (F_T \sin \epsilon - D \sin \alpha - L \cos \alpha) + g \cos \phi \cos \theta \quad (21)$$

y en el sistema I

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{IB} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} + \mathbf{I} \mathbf{w} \quad (22)$$

Las ecuaciones de rotación del modelo dinámico, con $I_{xz} = 0$, para las derivadas de las velocidades angulares en el sistema B , son

$$\dot{p} = \frac{1}{I_{xx}} [L_m + L_{mT} - qr(I_{zz} - I_{yy})] \quad (23)$$

$$\dot{q} = \frac{1}{I_{yy}} [M_m + M_{mT} - pr(I_{xx} - I_{zz})] \quad (24)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{I_{zz}} [N_m + N_{mT} - pq(I_{yy} - I_{xx})] \quad (25)$$

y para las derivadas de los ángulos de Tait-Brian:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_r^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p + q \tan \theta \sin \phi + r \tan \theta \cos \phi \\ q \cos \phi - r \sin \phi \\ \frac{q \sin \phi}{\cos \theta} + \frac{r \cos \phi}{\cos \theta} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

3.3 Modelo cinemático de un robot quadrotor

En este sistema, se fija un brazo robótico de dos grados de libertad al centro inferior de un cuadricóptero. El end-effector de este robot puede seguir una trayectoria deseada de seis DOF. En la Figura 14 tenemos su sistema geométrico siguiendo la convención de Denavit-Hartenberg.

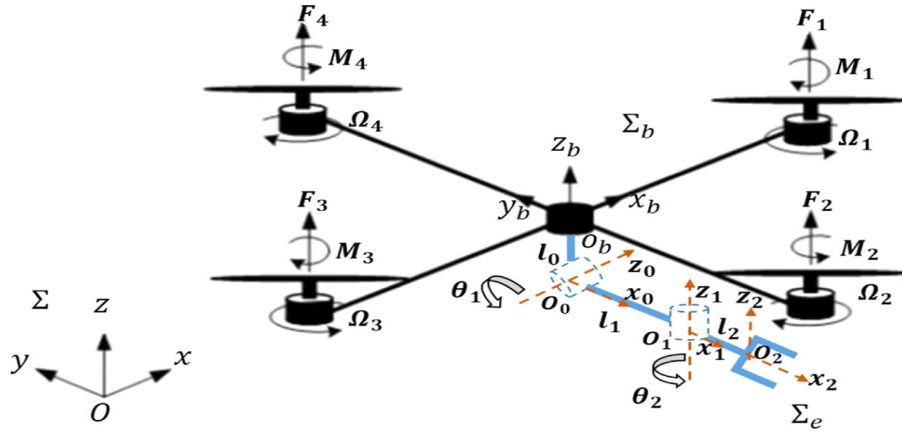


Figure 6: El sistema del quadrotor

Para una descripción detallada, consulte [11], lo que es importante para nosotros es que en el brazo hay dos articulaciones de revolución cuyos ejes son perpendiculares: el primer eje de articulación de revolución, z_0 , es paralelo al eje x del cuerpo del quadrotor, el segundo eje de articulación, z_1 , es

paralelo al eje y del cuerpo del cuadrotor. Así, el efector final puede realizar rotaciones de cabeceo y balanceo sin el movimiento horizontal del vehículo aéreo.

El sistema de referencia del cuerpo es Σ_b y el sistema de referencia inercial es Σ . Entonces la posición del sistema Σ_b respecto al sistema Σ será (27) y su orientación será representada da la matriz de rotación (28).

$$p_b = [x \quad y \quad z]^T \quad (27)$$

$$R_b = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & S_\phi S_\theta C_\psi - S_\psi C_\phi & S_\psi S_\phi + C_\psi S_\theta C_\phi \\ S_\psi C_\theta & C_\psi C_\phi + S_\psi S_\theta S_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi \\ -S_\theta & C_\theta S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \quad (28)$$

Donde $\Phi_b = [\psi \quad \theta \quad \phi]^T$ son los ángulos de guiñada, cabeceo y balanceo. El sistema de referencia del end-efector es Σ_e y su posición respecto de Σ se expresa con (29)

$$p_e = p_b + R_b p_{eb}^b \quad (29)$$

donde p_{eb}^b es la posición de Σ_e con respecto a Σ_b . La orientación de Σ_e respecto a Σ se expresa con (30), donde R_e^b es la matriz de rotación que describe la orientación del efector final con respecto al sistema de referencia Σ_b .

$$R_e = R_b R_e^b. \quad (30)$$

La matriz de transformación homogénea final entonces será

$$T_e = \begin{bmatrix} R_e & p_e \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

3.4 Modelo dinámico de un robot quadrotor

Por el modelo dinámico sabemos que las fuerzas de empuje y los momentos de arrastre generados para cada hélica j serán

$$F_j = K_{fj} \Omega_j^2, \quad (32)$$

$$M_j = K_{mj} \Omega_j^2, \quad (33)$$

donde K_{fj} y K_{mj} son los coeficientes de empuje y resistencia aerodinámica. El modelo dinámico será

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau, \quad \tau = Bu, \quad (34)$$

donde

$$q = [x \quad y \quad z \quad \psi \quad \theta \quad \phi \quad \theta_1 \quad \theta_2]^T \quad (35)$$

es un vector (8×1) . Las matrices M , C y G representan, respectivamente, la matriz de inercia, la matriz de términos de Coriolis y la matriz de términos gravitacionales. Las fuerzas y los torques de entrada serán

$$u = [F_1, F_2, F_3, F_4, T_{m1}, T_{m2}]^T. \quad (36)$$

La matriz de entrada es $B = HN$ con

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \gamma_1 & -\gamma_2 & \gamma_3 & -\gamma_4 & 0 & 0 \\ -d & 0 & d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -d & 0 & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

y

$$H = \begin{bmatrix} R_b & O_3 & O_2 \\ O_3 & T_b^T R_b & O_2 \\ O_{2 \times 3} & O_{2 \times 3} & I_2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

donde $\gamma_j = K_{mj}/K_{fj}$ y d es la distancia desde el centro de masa del cuadricóptero hasta el eje de rotación del rotor; T_b está definida como

$$T_b(\Phi_b) = \begin{bmatrix} 0 & -S_\psi & C_\psi C_\theta \\ 0 & C_\psi & S_\psi C_\theta \\ 1 & 0 & -S_\theta \end{bmatrix} \quad (39)$$

4 Sistemas de control: estabilización, seguimiento de trayectorias

Lo que haremos en esta sección es describir de manera más sintética posibles estrategias de control para la estabilización y el seguimiento de trayectorias de los dos robots en la sección delantera, después haremos una simulación con la dinámica lateral de un sencillo robot con ala fija.

4.1 Posibles sistemas de control

En el robot con ala fija y en el robot quadrotor que hemos visto, el problema del control es que estamos hablando de sistemas subactuados: tienen solo cuatro actuadores pero deben moverse en un espacio de seis grados de libertad. Son sistemas MIMO intrínsecamente no lineales! Los sistemas de control propuestos son:

- **Robot con ala fija:** Es un sistema intrínsecamente no lineal (especialmente en el eje longitudinal), con baja autoridad de control, saturación de los actuadores y subactuado. Las entradas serán $u = [\delta_e \quad \delta_a \quad \delta_r \quad \delta_t]^T$ que son respectivamente la deflexión del elevador (controla el movimiento en el eje de cabeceo), la deflexión de los alerones (controla el movimiento en el eje de alabeo), la deflexión del timón de dirección (controla el movimiento en el eje de guiñada) y el acelerador (controla la potencia del motor). Tenemos muchas estrategias de control: lazos PID en cascada, control óptimo, control robusto, H-infinito, H-2, control adaptativo, MPC. Tendremos un control a cascada, donde la parte de bajo nivel va a estabilizar la actitud (y a veces la velocidad) y la parte de alto nivel va a seguir las trayectorias.
- **Robot quadrotor:** El control es un PID no lineal con compensación de gravedad. Se puede estructurar en un control en cascada con compensación de gravedad, donde el bucle interior controla la actitud del vehículo y las referencias de balanceo y cabeceo proceden del controlador del bucle exterior. La compensación de gravedad ayuda a reducir errores en la estimación de la posición y permite un desempeño más estable en vuelo y un control del manipulador (el brazo robótico se controla de manera independiente mediante un control PID clásico, dado que sus movimientos son más lentos y menos dinámicos que los del dron).

4.2 Simulación de la dinámica lateral de un robot con ala fija

En esta sección vamos a simular una estabilización, una respuesta a un cambio de referencia y el seguimiento de una trayectoria sencilla en la dinámica lateral de un robot con ala fija. Antes de hacer esto, vamos a caracterizar la dinámica longitudinal y lateral de un vehículo aéreo genérico:

- La dinámica longitudinal de una aeronave riguarda los movimientos alrededor del eje lateral. La estabilidad longitudinal de una aeronave, también llamada estabilidad de cabeceo, se refiere a la estabilidad de la aeronave en su plano de simetría alrededor del eje lateral [21]. Los componentes directamente implicados son $u, w, q, \theta, \delta_e$.

- La dinámica lateral de una aeronave riguarda los movimientos alrededor de los ejes longitudinal y vertical. En la dinámica lateral he incluido la dinámica lateral y direccional. La estabilidad lateral se refiere al eje lateral o de balanceo. La estabilidad direccional se refiere al eje de guiñada o direccional [13]. Los componentes directamente implicados son $v, p, r, \phi, \psi, \delta_a, \delta_r$.

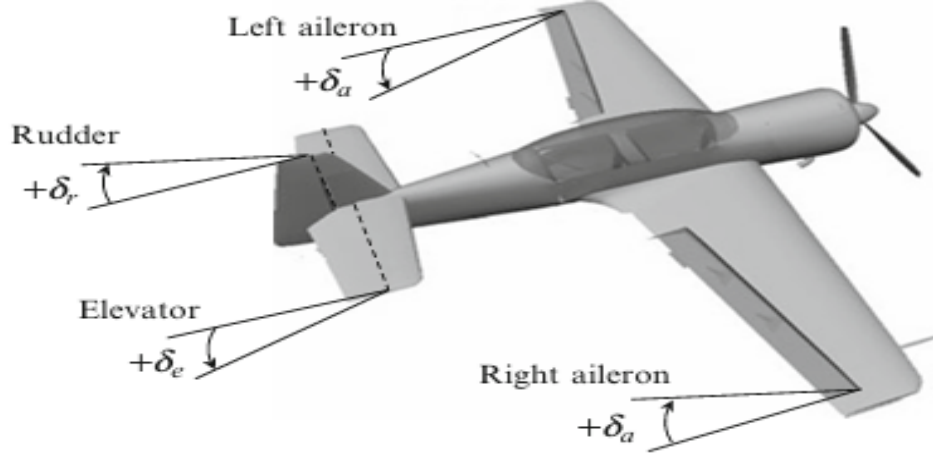


Figure 7: Los actuadores

En Figura 7 podemos mirar la posición de los actuadores, para las otras variables se hace referencia a Figura 2. Para obtener un sistema de control lineal en la forma

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad y = Cx \quad (40)$$

tenemos que linealizar las ecuaciones de movimiento y separar la dinámica longitudinal y lateral. Usamos el procedimiento hecho en [1] y ponemos valores plausibles segundo [4] (los cálculos y resultados figuran en el Apéndice A). Lo que obtenemos será

- $x_1 = v$ Velocidad [m]
- $x_2 = p$ Tasa de giro en alabeo [rad/s]
- $x_3 = r$ Tasa de giro en guiñada [rad/s]
- $x_4 = \phi$ Ángulo de alabeo [rad]
- $x_5 = \Psi$ Ángulo de guiñada [rad]
- $u_1 = \delta_a^{cmd}$ Ángulo de referencia de los alerones [rad]
- $u_2 = \delta_r^{cmd}$ Ángulo de referencia del timón de dirección [rad]
- $y_1 = \phi$ Ángulo de alabeo [rad]
- $y_2 = \Psi$ Ángulo de guiñada [rad]

Claro que hemos hecho simplificaciones: el ángulo θ no se verá afectado por otras variables y estará cerca de cero, los actuadores tendrán una dinámica instantánea y la propulsión será constante. Tenemos que estabilizar el robot empezando con condiciones iniciales donde $\phi \neq 0$ y $\psi \neq 0$, en particular

$$x_0 = \begin{bmatrix} 5 \\ 0.0017 \\ 0.0017 \\ 0.0873 \\ 0.0873 \end{bmatrix} \quad (41)$$

Con referencia a [14], tenemos que ampliar el sistema para obtener error cero, verificamos que no tenemos elementos derivativos y

$$\dot{\eta} = y^0 - y = y^0 - Cx - Du \quad (42)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A & \mathcal{O}_{n \times p} \\ -C & \mathcal{O}_{p \times p} \end{bmatrix}}_{\tilde{A}} \tilde{x} + \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ -D \end{bmatrix}}_{\tilde{B}} u + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathcal{O}_{n \times p} \\ I_{p \times p} \end{bmatrix}}_{\tilde{M}} y^0 \quad (43)$$

$$\dot{\tilde{x}} = \tilde{A}\tilde{x} + \tilde{B}u + \tilde{M}y^0 \quad (44)$$

Ahora que tenemos el sistema ampliado podríamos imponer los polos por el nuevo sistema así que sea más rápido

$$K_{\text{en}} = [K_{\text{en},x} \quad K_{\text{en},\eta}] \quad (45)$$

$$u = -K_{\text{en}}\tilde{x} = -K_{\text{en},x}\hat{x} - K_{\text{en},\eta}\eta \quad (46)$$

Usamos pero un control más avanzado: el LQG. Diseñamos antes un controlador LQ que garantice polos en lazo cerrado más rápidos que 0.05rad/s y después un filtro de Kalman.

Si

- $R = I_{m \times m}$
- $Q = I_{(n+p) \times (n+p)}$
- $C_q^T C_q = Q$.
- $\tilde{Q} = I_{n \times n}$
- $\tilde{R} = I_{p \times p}$
- $B_q B_q^T = \tilde{Q}$

Las condiciones necesarias serán

- $(\tilde{A} + 0.05I, \tilde{B})$ sea alcanzable (LQ)
- $(\tilde{A} + 0.05I, C_q)$ sea observable (LQ)
- (A, C) sea observable (KF)
- (A, \tilde{B}_q) sea alcanzable (KF)

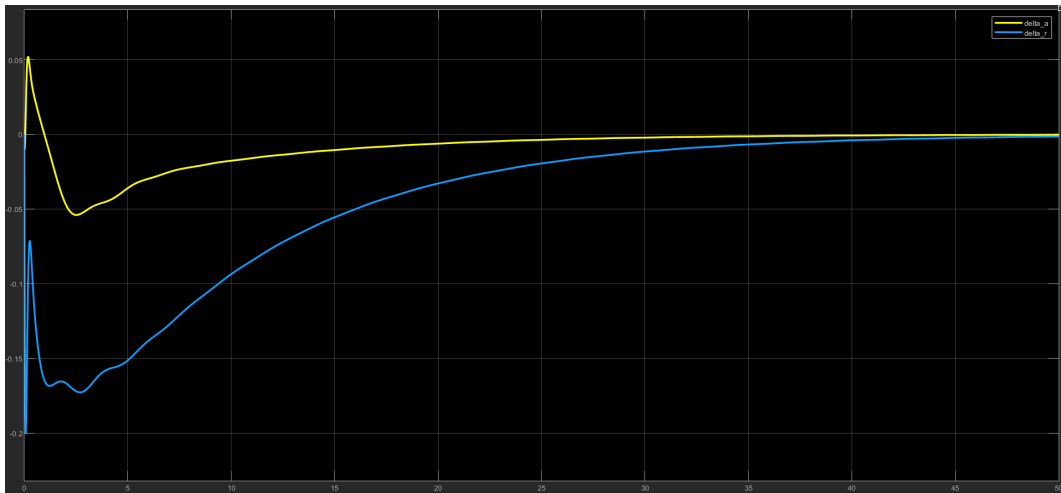


Figure 8: Las entradas de la primera simulación

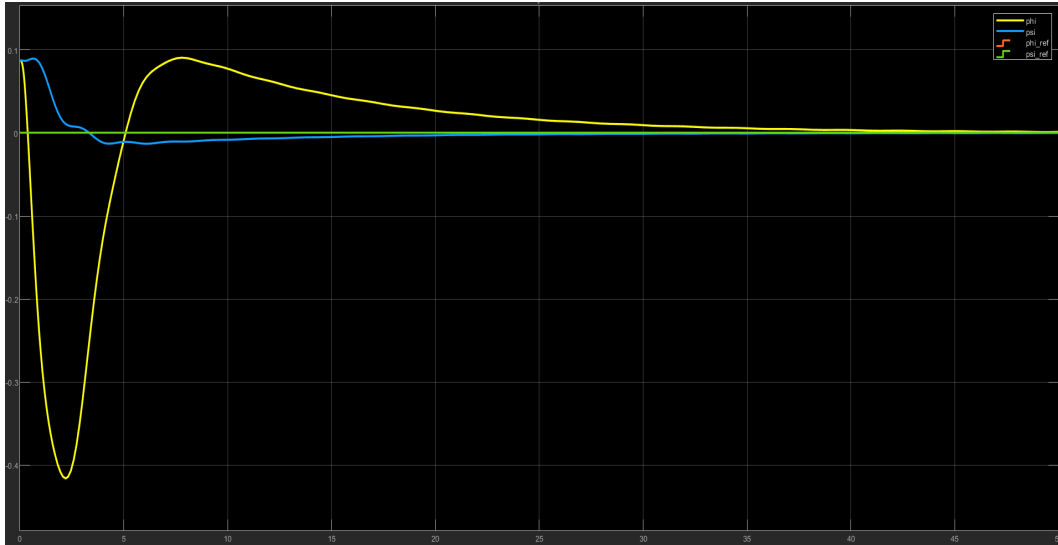


Figure 9: Las salidas de la primera simulación

Entonces podemos usar el LQG control. En Figura 8 y 9 tenemos los resultados de esta primera simulación.

Es claro que la estabilización es buena y se puede ver también que el efecto del primero estado ϕ , el ángulo de alabeo, sea más eficaz en la estabilización y el sistema de control tenderá a usarlo más.

Ahora intentamos hacer una segunda tarea, donde ponemos como referencias externas las siguientes, el resultado es en Figura 10.

- $\phi^\circ = 1.04 \text{ step}(t - 100)$,
- $\psi^\circ = -0.52 \text{ step}(t - 150)$,

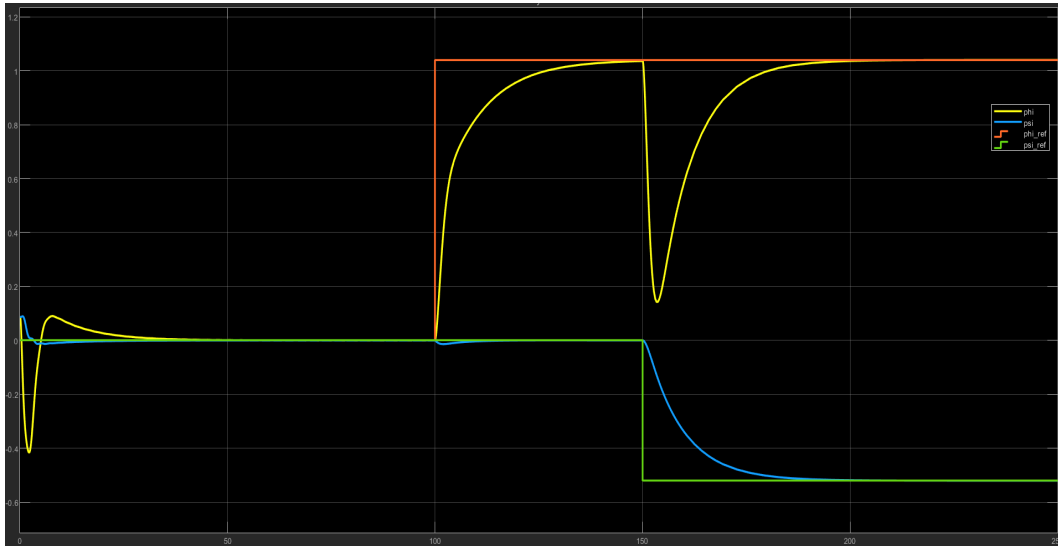


Figure 10: Las salidas de la segunda simulación

Entonces también en el seguimiento de referencia el sistema funciona muy bien. Notamos que, cuándo el cambio de referencia se hace en el ángulo de rumbo, la respuesta más fuerte la tendremos siempre en el ángulo de alabeo.



Figure 11: Las salidas de la tercera simulación

La última simulación que haremos será sobre un sencillo seguimiento de trayectoria en bucle abierto. En la hipótesis que podemos tener una velocidad constante independiente de los estados y entradas, intentamos hacer una trayectoria circular. Si el radio de la circunferencia es $R = 5e4$ m y tendremos una velocidad de $V = 250$ m/s, ponemos $\zeta_0 = V/R$ y $T = \frac{\pi/2}{\zeta_0}$. Al final necesitamos que poner $\psi = \zeta_0 t$ en $0 < t < T$. Lo que pasaría si hiciéramos la simulación con el sistema de control que hemos hecho antes sería un desastre: en nuestro sistema de control la prioridad la tiene el ángulo de alabeo, pero tenemos que imponer que $\phi = 0$ en $0 < t < T$, así que la trayectoria sea planar. Lo que haremos será modificar los parámetros de las matrices Q y R en el sistema de control así que la prioridad la tendrá la referencia del ángulo de alabeo y la entrada ángulo de referencia del timón de dirección. El resultado es en Figura 11.

5 Autonomía de vuelo

La autonomía de los robots aéreos aborda quizá el tema más difícil e importante del rendimiento de las aeronaves no tripuladas. Una transición de UAV con operadores a autónomos puede ser resumida así:

- Con una mayor autonomía y capacidades de planificación, los UAV podrán responder más rápido para satisfacer las necesidades operativas, en lugar de requerir equipos de analistas;
- Con más datos de los sensores procesados a bordo, se requerirán menos analistas para apoyar a cada UAV. En su lugar, el sistema señalaría las áreas de interés para los analistas, permitiéndoles centrarse en los aspectos más importantes de su trabajo y reduciendo los requisitos de comunicación;
- Con una mayor autonomía, los UAV serían menos susceptibles a errores del operador y fallos en los enlaces de comunicación, por lo que serían más seguros de operar

Para obtener este, necesitamos de una evolución del software y hardware de los UAV:

- La autonomía a nivel de misión a bordo deberá admitir una planificación de alto nivel basada en el comportamiento, en lugar de un simple control de waypoints de bajo nivel o teleoperado;
- Los UAV autónomos deberán realizar un mayor procesamiento de los datos de los sensores a bordo de la aeronave y tener la capacidad de notificar a los operadores y otros procesos según sea necesario;
- La arquitectura del sistema debe ser extensible y débilmente acoplada, de modo que los componentes adicionales, las mejoras y los comportamientos puedan integrarse fácilmente.

Además, la transición a la autonomía es más compleja en los robots aéreos que en otros campos de aplicación como los vehículos terrestres (UGVs) y los vehículos submarinos autónomos (AUVs) por limitaciones de las tecnologías disponibles (limitaciones en las capacidades de detección, la capacidad de carga permitida, el tiempo de vuelo, el consumo de energía, la comunicación, la actuación y el esfuerzo de control) [5].

5.1 Classificación

El los robots aéreos se pueden alcanzar diferentes niveles de autonomía. Estos niveles serán:

- **Totalmente autónomo:** Un UAV puede llevar a cabo una tarea/misión delegada sin interacción humana, todas las decisiones son basadas en las observaciones de los sensores;
- **Semiautónomo** Se necesita un operador humano para la planificación de misiones de alto nivel y para la interacción durante el movimiento cuando se requieren decisiones que el UAV no puede tomar;
- **Teleoperado:** El operador remoto confía en las observaciones de los sensores a bordo para mover el vehículo;
- **Controlado remotamente:** Se necesita un piloto remoto para controlar manualmente el UAV sin retroalimentación de sensores.

5.2 Arquitecturas de sistemas

Aquí presentamos dos diferentes tipos de arquitecturas de los UAV autónomos: el paradigma frontseat-backseat y la Behaviour-Based Architecture.

En el paradigma frontseat-backseat, el conductor frontseat se considera el Flight Control System, que incluye el piloto automático, la aviónica y el hardware de control relacionado con el control directo del vuelo. El conductor backseat está representado por el Mission Computer, que es más deliberativo y se ocupa de la planificación a largo plazo. La idea central de este paradigma es desacoplar el control de bajo nivel de las operaciones autónomas de alto nivel.

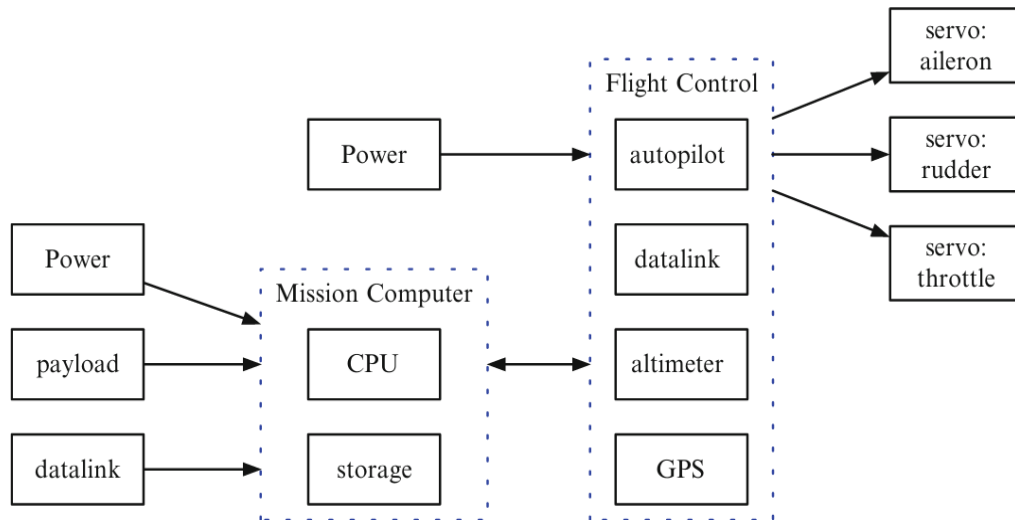


Figure 12: El paradigma frontseat-backseat

La Behaviour-Based Architecture consiste en un sistema de control que incluye tres niveles:

- **Mission executive:** Realiza la planificación de alto nivel y genera trayectorias que pueden ser ejecutadas por el UAV;
- **Behaviors and state machine** Reflejan el estado actual de la operación autónoma del UAV, pueden solicitar la generación de nuevos planes e implementar la lógica de comportamiento;
- **Reactive controller and autopilot:** proporciona señales de control de bajo nivel para el UAV y permite una respuesta rápida para garantizar la seguridad del vehículo;

Layer	Description	Frequency	Outputs
Mission executive	Deliberative, high-level global planner	Low frequency	Candidate paths
Behaviors and state machine	Processes sensors and executes behaviors	Medium frequency	Waypoints, speed, altitude
Reactive controller and autopilot	Generates control signal	High frequency (fast loop)	Low-level control signals

Figure 13: La Behaviour-Based Architecture

5.3 Componentes Hardware y Software

A nivel de hardware, un UAV en su forma más simple consta de un armazón, un sistema de propulsión y un sistema de control de vuelo (FCS).

- Un sistema de propulsión consta de una fuente de energía (baterías, celdas de combustible, microdiésel y/o microturbinas de gas), controladores de motores o controladores electrónicos de velocidad (ESCs), motores, hélices y/o superficies de control (aleros, flaps, elevadores y timones);
- El sistema de control de vuelo es simplemente un sistema embedded que consta del piloto automático, la aviónica y otros componentes de hardware directamente relacionados con el control de vuelo. Los sensores principales críticos para el control de vuelo incluyen IMUs, barómetros, altímetros y GNSS (soluciones más avanzadas incluyen filtrado de Kalman);
- La unidad de cómputo (un microcontrolador), que se usa normalmente para implementar la lógica del piloto automático para un control de vuelo fiable y tolerante a fallos (para tareas/misiones más complejas, se requiere una computadora de a bordo con mayor capacidad de procesamiento);
- Para la percepción avanzada y la planificación, cámaras (monocular, RGBD, térmicas, hiperspectrales, etc.), sensores de rango (LiDAR, RADAR, ultrasónicos) y otros sensores específicos para tareas.

La arquitectura de software implementada en el Mission Computer generalmente consta de varios procesos/módulos que se ejecutan en paralelo, y se utiliza un middleware de mensajería para intercambiar mensajes entre los procesos en la computadora de misión o con otras computadoras en la misma red (por ejemplo, en sistemas multi-UAV).

5.4 Técnicas de navegación

Las técnicas de navegación existentes para robots móviles autónomos en general pueden clasificarse en deliberativas (planificación global), basadas en sensores (planificación local) o híbridas:

- Los métodos deliberativos requieren un conocimiento completo del entorno representado como un mapa, los algoritmos clásicos de path planning son search-based methods (Dijkstra, A*, D*), potential field methods, geometric methods (Cell Decomposition, Generalized Voronoi Diagrams), Sampling-based methods (PRM, RRT, RRT*), Optimization-based methods (PSO, Genetic Algorithms);
- Los métodos basados en sensores dependen directamente de las mediciones actuales de los sensores o de un historial corto de las observaciones de los sensores, ofrecen soluciones con un gran rendimiento computacional, lo que los hace favorables para problemas de navegación en entornos desconocidos y dinámicos;
- Los métodos híbridos combinan métodos deliberativos y basados en sensores para generar un comportamiento de navegación más avanzado.

Los métodos de navegación pueden clasificarse alternativamente en mapas o sin mapas:

- Las estrategias basadas en mapas requieren una representación local (o global) del entorno, que puede estar disponible antes de que comience la navegación o construirse durante la navegación a partir de mediciones de sensores (estos métodos son exigentes en términos de recursos computacionales, tiempo de planificación y requisitos de memoria);
- Por el contrario, las estrategias sin mapas (métodos reactivos) dependen directamente de las mediciones de los sensores para tomar decisiones de movimiento sin necesidad de mantener mapas globales y una localización precisa.

Sabemos que el path planning es el proceso de encontrar un camino geométrico libre de colisiones entre las posiciones de inicio y final sin una ley de tiempo; el trajectory planning se asocia una ley de tiempo con la ruta geométrica planificada libre de colisiones, representada como una trayectoria, que incluye información sobre derivadas superiores. Vamos a listar algunas estrategias aplicadas en los últimos años:

- Por el Path Planning - RRR y Path Smoothing Algorithm, Model Predictive Control, Real-Time Path Planning Algorithm con árboles aleatorios (CC-RRT), Deep Learning-Based Computer Vision, Generative AI;
- Por el trajectory Planning - Bernstein and B-splines, Voxel Maps and A*, Receding Horizon Planning Paradigm, Unconstrained Quadratic Programming (QP), Nonlinear Model Predictive Control (NMPC), Proximal Averaged Newton for Optimal Control (PANOC).

6 Ejemplos de aplicaciones

En esta última sección vemos 3 ejemplos de aplicaciones de robots aéreos.

6.1 Entrega de mercancías

Un delivery drone es un vehículo aéreo no tripulado (UAV) diseñado para transportar artículos como paquetes, medicamentos, alimentos, correo postal y otras mercancías ligeras. Grandes empresas como Amazon, DHL y FedEx han empezado a utilizar servicios de reparto con drones [8]. En Estados Unidos, el sector de la paquetería tiene un valor sustancial de 200.000 millones de dólares anuales, y hay grandes expectativas de un rápido crecimiento de las entregas con drones [2]. Se prevé que hasta un 7% de los ciudadanos de la UE podrían beneficiarse de los servicios de entrega con drones, los estudios evalúan la intención de los consumidores millennials europeos de utilizar drones para la entrega de paquetes.

Aquí listamos las principales características de los delivery drones:

- **Eficaz de transporte** - Especialmente en el transporte eficiente de mercancías a lugares remotos y de difícil acceso.
- **Sostenibilidad ambiental** - Al funcionar general con baterías (pueden usar también pilas de combustible, baterías, células solares y supercondensadores), los drones favorecen la sostenibilidad ambiental al eliminar la emisión de gases nocivos. Las emisiones potenciales de partículas por unidad de distancia cuando se realizan entregas con drones son significativamente inferiores a las de las entregas en motocicleta. Además, la reducción del impacto debido al reparto con drones es 13 veces mayor en las zonas rurales que en las urbanas. No obstante, los resultados indican diferencias significativas en los niveles de emisiones que se ven afectadas por factores como el consumo de energía, la distancia recorrida, el número de entregas a realizar y el nivel de automatización de los drones.
- **Entregas urgentes** - La capacidad para evitar la congestión del tráfico los hace inestimables para entregas en las que el tiempo es un factor crítico. Una de las aplicaciones más críticas de los drones es la entrega de suministros médicos esenciales, como sangre y órganos. Esto es especialmente importante en situaciones en las que los medios de transporte tradicionales, como las ambulancias, pueden verse obstaculizados por la congestión del tráfico, y cada minuto perdido puede tener graves consecuencias. Además, los drones pueden resultar muy valiosos durante las pandemias, como la COVID-19, por ejemplo, ya que pueden realizar autodiagnósticos y proporcionar alimentos a las personas infectadas durante un bloqueo mundial.
- **Batería de uso limitado** - La batería de a bordo limita considerablemente el tiempo de vuelo y la autonomía de los drones, por lo que es fundamental ampliar su autonomía y duración.
- **Consumo de energía** - La optimización del consumo de energía y aplicación de estrategias avanzadas de planificación de rutas teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas del momento es importante. Diversos factores, como las condiciones meteorológicas y el viento, pueden influir significativamente en su consumo de energía. Además, el peso de los paquetes transportados incide negativamente en la eficiencia energética.
- **Comunicaciones** - El establecimiento de una infraestructura de comunicación fiable y robusta es crucial para garantizar la conectividad y el control sin fisuras entre las estaciones terrestres y los drones durante todo el proceso de entrega. Esto es especialmente importante en caso de imprevistos. Los drones se enfrentan a retos de comunicación durante la entrega de paquetes, sobre todo en entornos urbanos, donde es esencial disponer de estrategias fiables y sólidas para una comunicación eficaz. Esto resulta aún más crucial en presencia de acontecimientos inesperados o atascos de tráfico, que requieren la capacidad de redirigir los drones por rutas alternativas. Las comunicaciones son cruciales en entornos congestionados para evitar colisiones entre drones y facilitar entregas eficientes.
- **Problemas de privacidad** - Los resultados de una encuesta sugieren que los consumidores tienen muy en cuenta la privacidad a la hora de realizar entregas con drones. Para abordar estas preocupaciones, será necesario incorporar parámetros de privacidad durante las fases de diseño y despliegue del servicio de la infraestructura de drones. También existe el riesgo de ataques a la información confidencial durante las transacciones monetarias. Se da una solución para asegurar la entrega con drones utilizando la tecnología IoT para evitar ataques maliciosos de hackers y mantener la privacidad.
- **Problemas de seguridad** - Se plantean problemas de seguridad, ya que los drones pueden estrellarse y causar lesiones a las personas que se encuentran en tierra. Existen sistemas como el RFRS, que garantiza la tolerancia a fallos en caso de avería del motor.

Además, en los últimos años algo nuevo como la colaboración con otros vehículos se está desarrollando. De hecho, mediante relaciones simbióticas con camiones privados o transportes públicos como trenes o autobuses, los drones pueden aprovechar las redes de transporte terrestre existentes para optimizar el proceso de entrega. Este no sólo ayuda a aumentar el número de entregas y reducir el tiempo total de entrega, sino también a abordar posibles problemas relacionados con la duración de la batería o la capacidad de carga útil.

6.2 Vigilancia

La vigilancia con drones es el uso de UAV para capturar imágenes fijas y vídeo a distancia o a gran altura con el fin de recopilar información sobre objetivos específicos, que pueden ser personas, grupos o el entorno. Hoy en día, las fuerzas del orden de muchas naciones utilizan en gran número drones de seguridad equipados con cámaras de vídeo en directo, cámaras de infrarrojos, sensores térmicos y LIDAR [10].

Los drones autónomos han cambiado la vigilancia y la seguridad. Los UAV con tecnología avanzada pueden vigilar y proteger ciudades y zonas distantes. Los drones vigilantes se han introducido en los últimos años en EE.UU. gracias a sus sistemas mejorados de navegación y control, su avanzada tecnología de sensores, su mejor comunicación y transmisión de datos, su mayor duración de la batería y su mejor gestión de la energía [16].

- **Ventajas** - Aumento significativo de las capacidades de vigilancia, mejoraría de la rentabilidad y de la eficacia operativa, mayor alcance operativo, resolución de imagen mejorada, y la capacidad de entrar y explorar zonas inaccesibles o peligrosas, capacidad para adaptarse rápidamente a circunstancias dinámicas;
- **Desventajas** - La capacidad limitada de las baterías, las dificultades para transmitir datos, los problemas de privacidad y los obstáculos en el plantear normativas;
- **Aplicaciones** - Vigilancia de acontecimientos públicos, seguridad fronteriza, protección de infraestructuras críticas y operaciones de búsqueda y rescate, actividades delictivas, catástrofes naturales;
- **Necesidades** - Crear una legislación más estricta, adoptar medidas de protección de la privacy y promover el avance tecnológico continuo.

6.3 Rescate

Las catástrofes naturales están aumentando de forma espectacular. Desde 1970 se ha cuadruplicado el número de catástrofes en todo el mundo. Ahí es donde entran en juego los robots de rescate [6]. Los robots de intervención en catástrofes - que vuelan, nadan, se arrastran entre los escombros, apagan incendios o ayudan de cualquier otro modo a los socorristas a hacer frente a los problemas - han avanzado enormemente en las últimas décadas. Algunos de los robots que pueden utilizarse en operaciones de rescate son:

- **Robots de rescate acuático** - Muchos rescates acuáticos se producen en condiciones peligrosas, pero algunos son demasiado difíciles para que los humanos los realicen sin arriesgarse a sufrir lesiones graves o perder la vida. Estas empresas de robótica están empujando a los robots de rescate marítimo hacia aguas inexploradas;
- **Robots de búsqueda y rescate** - Los robots de búsqueda y rescate entregan suministros, localizan objetivos difíciles de encontrar y navegan por terrenos extremos para ayudar a quienes lo necesitan;
- **Robots para terremotos e incendios** - Se han desarrollado con la forma de enredaderas y serpientes como ayudantes para buscar entre las secuelas de los terremotos, que de otro modo serían innavegables, los robots de extinción de incendios están aún más extendidos;
- **Robots aéreos de rescate** - Escáneres láser y/o radar para la navegación, cámaras de vídeo para grabar y transmitir detalles a los equipos remotos e imágenes térmicas para ayudar a detectar supervivientes.

References

- [1] AeroAcademy. Aircraft dynamics . linearization . linearized equations of motion, 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=WiinyiThWZ8> [Online; accessed 29-January-2025].
- [2] Francesco Betti Sorbelli. Uav-based delivery systems: A systematic review, current trends, and research challenges. *ACM Journal on Autonomous Transportation Systems*, 02 2024.
- [3] Stefano Bruni. *Notes for the course Dynamics of Mechanical Systems*, chapter Chapter 15: Aeroelastic stability of a 2-DOF mechanical system. Politecnico di Milano, 2007.
- [4] Global defense news. Gripen jas 39. <https://armyrecognition.com/military-products/air/fighter/gripen-jas-39#:~:text=The%20JAS%2039%20The%20Gripen,off%20weight%20is%2014%2C000kg.>, Accessed on date 29/01/2025.
- [5] Taha Elmokadem and Andrey V. Savkin. Towards fully autonomous uavs: A survey. *Sensors*, 21(18), 2021.
- [6] Stephen Gossett. 12 examples of rescue robots to know. <https://builtin.com/robotics/rescue-robots>, Accessed on date 30/01/2025.
- [7] Alex Gurtner, Duncan G. Greer, Richard Glasscock, Luis Mejias, Rodney A. Walker, and Wageeh W. Boles. Investigation of fish-eye lenses for small-uav aerial photography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3):709 – 721, 2009.
- [8] Mokter Hossain. Autonomous drones: A game changer in lightweight delivery services. <https://cmr.berkeley.edu/2022/03/autonomous-drones-a-game-changer-in-lightweight-delivery-services/#>, Accessed on date 30/01/2025.
- [9] Samuel J C Knox, Verdon J Crann, Peyman Amiri, and William J Crowther. A practical framework for multi agent experiments in aerial robotics. In *2022 7th International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research (ICMERR)*, pages 108–113, 2022.
- [10] Jouav. Security surveillance. <https://www.jouav.com/industry/security-surveillance#:~:text=Drone%20surveillance%20is%20the%20use,%2C%20groups%2C%20or%20the%20environment.>, Accessed on date 30/01/2025.
- [11] Ahmed Khalifa and Mohamed Fanni. Experimental implementation of a new non-redundant 6-dof quadrotor manipulation system. *ISA Transactions*, 104:345–355, 2020.
- [12] Muhammad Asif Khan, Hamid Menouar, Aisha Eldeeb, Adnan Abu-Dayya, and Flora D. Salim. On the detection of unauthorized drones—techniques and future perspectives: A review. *IEEE Sensors Journal*, 22(12):11439–11455, 2022.
- [13] J. Gordon Leishman. *Introduction to Aerospace Flight Vehicles*. Creative Commons, 2022.
- [14] L. Magni and R. Scattolini. *Advanced and Multivariable Control*. Pitagora, 2014.
- [15] Roland Siegwart Marco Hutter and Thomas Stastny. *Notes for the course Autonomous Systems Lab*, chapter Fixed-wing UAVs: Dynamic Modeling and Control. ETHzurich, 2017.
- [16] Rahimoddin Mohammed and Prasanna Pasam. Autonomous drones for advanced surveillance and security applications in the usa. 1:32–53, 05 2020.
- [17] Miguel Norberto. Aerial robotics 101: Introduction. *Medium*, 27/05/2022. <https://medium.com/r3plica/aerial-robotics-101-introduction-f6eeb88c760f>.
- [18] Altuğ E. Tarhan, M. Based attitude estimation and stabilization of a quadrotor uav using vanishing points in catadioptric images. *J Intell Robot Syst*, 62:587–607, 2011.
- [19] Drone Types: Multi-Rotor vs Fixed-Wing vs Single Rotor vs Hybrid VTOL. <https://www.auav.com.au/articles/drone-types/>, Accessed on date 28/01/2025.

- [20] Wikipedia contributors. Euler angles — Wikipedia, the free encyclopedia, 2024. [Online; accessed 28-January-2025].
- [21] Wikipedia contributors. Longitudinal stability — Wikipedia, the free encyclopedia, 2024. [Online; accessed 29-January-2025].
- [22] Hui Zhang-Wei He Hean Hua Yaonan Wang Xidong Zhou, Hang Zhong. Current status, challenges, and prospects for new types of aerial robots. *Engineering*, 2024.
- [23] Heng Xu and Dayong Zhu. Multiple unmanned aerial vehicle collaborative target search by drl: A dqn-based multi-agent partially observable method. *Drones*, 9(1), 2025.

A Cálculo de matrices para la simulación

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} W/g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{xxb} & -I_{xxb} & 0 & 0 \\ 0 & -I_{xxb} & I_{xxb} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\Delta v} \\ \dot{\Delta p} \\ \dot{\Delta r} \\ \dot{\Delta \phi} \\ \dot{\Delta \psi} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} F_{yb,\delta_a} & F_{yb,\delta_r} \\ M_{xb,\delta_a} & M_{xb,\delta_r} \\ M_{zb,\delta_a} & M_{zb,\delta_r} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_a \\ \Delta \delta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{yb,v} & F_{yb,p} & F_{yb,r} - V_0 W/g & W \cos \theta_0 & 0 \\ M_{xb,v} & M_{xb,p} & M_{xb,r} & 0 & 0 \\ M_{zb,v} & M_{zb,p} & M_{zb,r} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \tan \theta_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin \theta_0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta p \\ \Delta r \\ \Delta \phi \\ \Delta \psi \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta v} \\ \dot{\Delta p} \\ \dot{\Delta r} \\ \dot{\Delta \phi} \\ \dot{\Delta \psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_{yb,v}}{W/g} & \frac{F_{yb,p}}{W/g} & \frac{F_{yb,r} - V_0 W/g}{W/g} & \cos \theta_0 & 0 \\ \frac{M_{xb,v}}{I_{xxb}} & \frac{M_{xb,p}}{I_{xxb}} & \frac{M_{xb,r}}{I_{xxb}} & 0 & 0 \\ \frac{M_{zb,v}}{I_{zzb}} & \frac{M_{zb,p}}{I_{zzb}} & \frac{M_{zb,r}}{I_{zzb}} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \tan \theta_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\cos \theta_0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta p \\ \Delta r \\ \Delta \phi \\ \Delta \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{F_{yb,\delta_a}}{W/g} & \frac{F_{yb,\delta_r}}{W/g} \\ \frac{M_{xb,\delta_a}}{I_{xxb}} & \frac{M_{xb,\delta_r}}{I_{xxb}} \\ \frac{M_{zb,\delta_a}}{I_{zzb}} & \frac{M_{zb,\delta_r}}{I_{zzb}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_a \\ \Delta \delta_r \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta p \\ \Delta r \\ \Delta \phi \\ \Delta \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_a \\ \Delta \delta_r \end{bmatrix}$$

- $\theta_0 \approx 0$
- $V_0 W/g \approx 201$
- $F_{yb,v} \approx -0.292(W/g)$
- $F_{yb,p} \approx 8.13(W/g)$
- $M_{xb,v} \approx -0.152(I_{xxb})$
- $M_{xb,p} \approx -2.54(I_{xxb})$
- $M_{zb,r} \approx -0.481(I_{zzb})$
- $F_{yb,\delta_r} \approx -2.15(W/g)$
- $M_{xb,\delta_a} \approx -31.7(I_{xxb})$
- $M_{xb,\delta_r} \approx 0.0274(I_{xxb})$
- $M_{zb,\delta_r} \approx 1.48(I_{zzb})$

$$A = \begin{bmatrix} -0.2920 & 8.1300 & -201 & 9.7700 & 0 \\ -0.1520 & -2.5400 & 0.5610 & -4.0000 & 0 \\ 0.0364 & -0.0678 & -0.4810 & 0.0012 & 0 \\ 0 & 1 & 0.0401 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -2.1500 \\ -31.7000 & 0.0274 \\ 0 & 1.4800 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x_0 = \begin{bmatrix} 5 \\ 0.0017 \\ 0.0017 \\ 0.0873 \\ 0.0873 \end{bmatrix}$$

B Código Matlab y Simulink

```

1 load('data.mat');
2 sys_ol = ss(A, B, C, D);
3
4 % system enlargement
5 tzero(sys_ol) % verify no der action
6
7 A_tilde = [ A,      zeros(n, p);
8            -C,      zeros(p, p)];
9 B_tilde = [ B;
10            -D ];
11 M_tilde = [ zeros(n, p);
12            eye(p) ];
13
14 % LQ controller checks
15 rank(ctrb(A_tilde + 0.05*eye(n+p), B_tilde)) == n+p
16 Q = eye(n+p);
17 Q(4,4) = 1e7;
18 R = eye(m);
19 R(2,2) = 5e-5;
20 rank(observ(A_tilde + 0.05*eye(n+p), sqrt(Q))) == n+p
21 % creation
22 Klq = lqr(A_tilde + 0.05*eye(n+p), B_tilde, Q, R)
23 Klq_x = Klq(:, 1:n);
24 Klq_eta = Klq(:, n+1:end);
25
26 % Kalman Filter checks
27 rank(observ(A, C)) == n
28 Q_tilde = eye(n);
29 R_tilde = eye(p);
30 rank(ctrb(A, sqrt(Q_tilde))) == n
31 % creation
32 Lkf = lqr(A.', C.', Q_tilde, R_tilde).';
33 A_kf = A - Lkf*C;
34 B_kf = [ B - Lkf*D, Lkf];
35 C_kf = eye(n);
36 D_kf = zeros(n, m+p);
37
38 % trajectory planning
39 Raggio = 5e4;
40 V = 250;
41 theta_dot = V/Raggio;
42 T = pi/2/theta_dot;
43 % phi = theta_dot*t for 0 < t < T

```

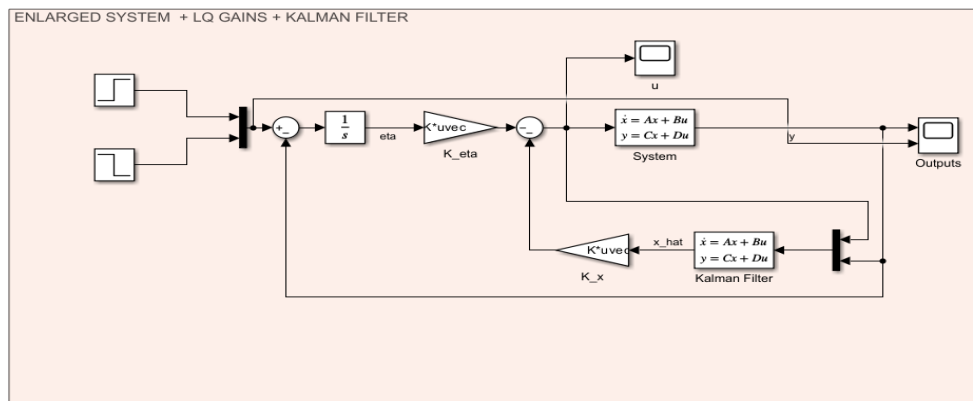


Figure 14: El sistema en Simulink