

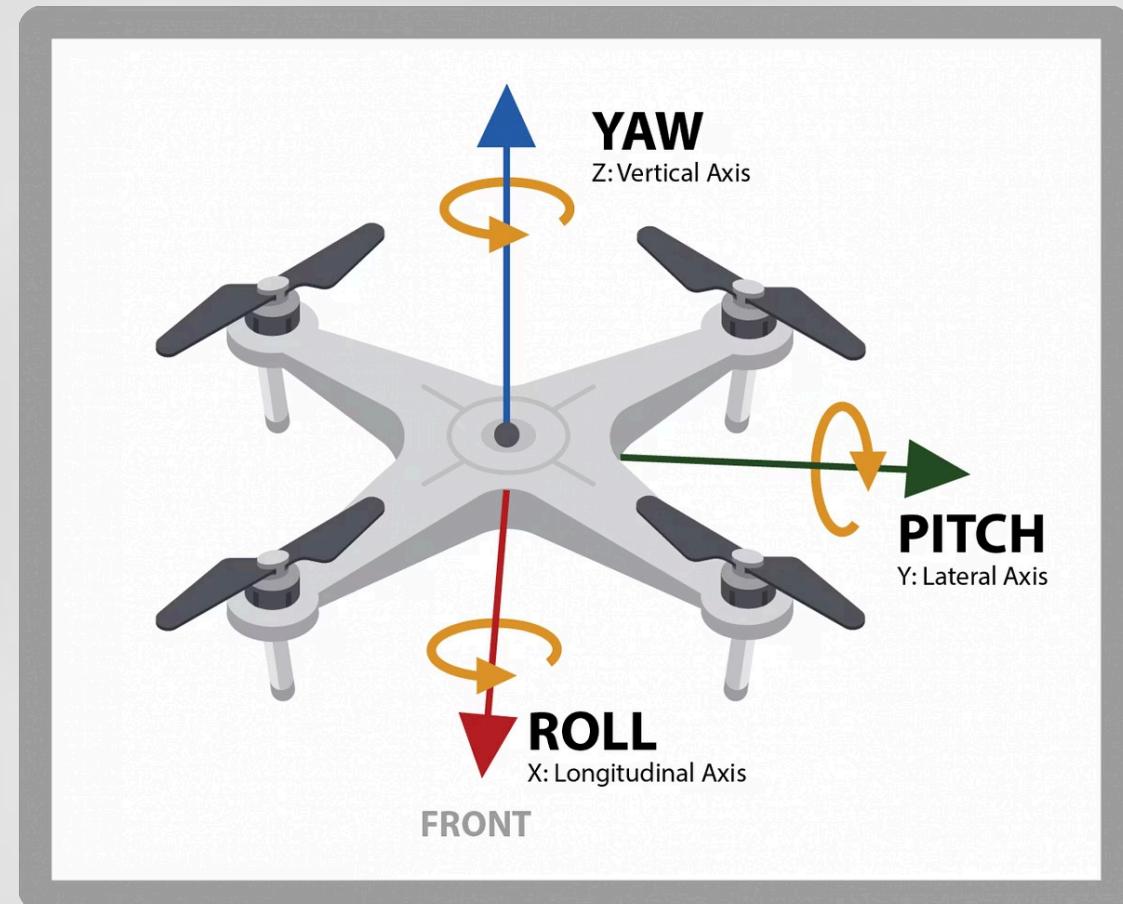
Control Automático y Navegación de un VANT

A01798275 Bruno Manuel Zamora Garcia

A01737223 Juan Paulo Salgado Arvizu

A01737250 Alfredo Díaz Lopez

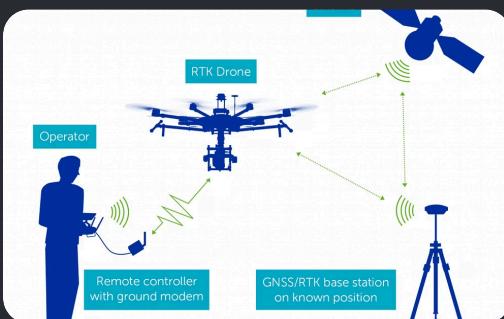
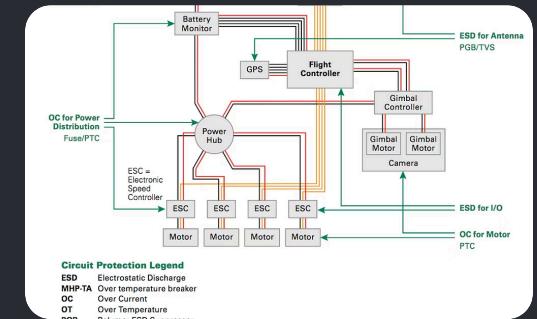
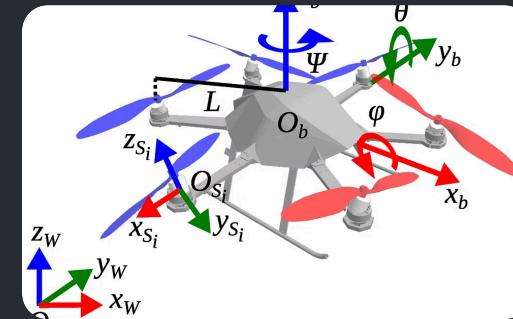
A01735818 Carlos Adran Delgado Vazquez



Índice



**Introducción a los VANTs
Multirrotor**



**Técnicas de Navegación
y Posicionamiento**



**Planificación de
Trayectorias y Evasión de
Obstáculos**

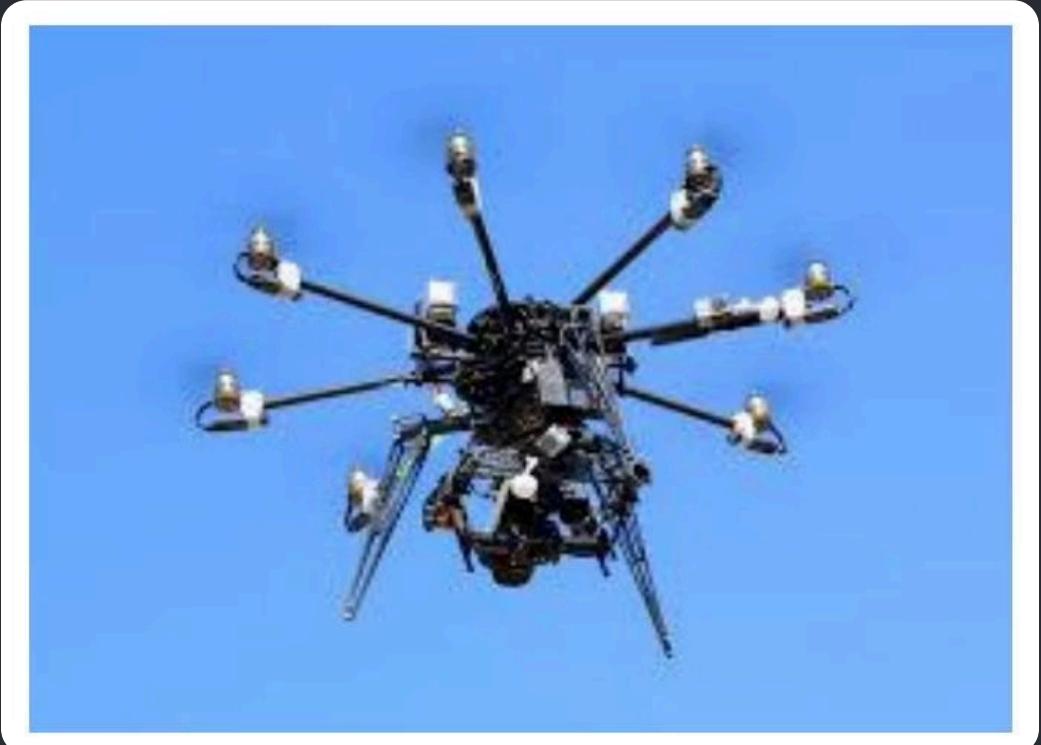


**Conclusiones y Futuro de
los VANTs**

1. Introducción a los VANTs Multirrotor

Un dron, o VANT, es una aeronave que no requiere piloto humano a bordo. Los drones multirrotor utilizan motores eléctricos y baterías de litio, evitando gases contaminantes. Cuantos más rotores tenga un multicóptero, más estable y controlable será su vuelo.

Se clasifican por el número de rotores: cuadricópteros (4), hexacópteros (6), octocópteros (8), etc. Su uso ha crecido exponencialmente en vigilancia, agricultura, topografía, logística y entretenimiento, destacando por su maniobrabilidad y vuelo vertical.



1.1 Línea del Tiempo de los VANT Multirrotor



2. Clasificación de Drones Multirrotor

Los VANTs multirrotor son los más usados en aplicaciones civiles por su "despegue/aterrizaje vertical" (VTOL) y vuelo estacionario preciso. A nivel profesional, integran sensores de alta precisión, GPS RTK y software de navegación inteligente.



Tricóptero

3 brazos, 3 motores. Usa servomotor trasero para estabilidad.



Cuadricóptero

4 brazos, 4 motores. El más común en el mercado.



Hexacóptero

6 brazos, 6 motores. Alta estabilidad, puede volar con un motor fallido.



Octocóptero

8 brazos, 8 motores. Mayor potencia



Coaxial

4 brazos, 8 motores. Motores dobles por brazo. Resistente a cargas altas.

3. Ecuaciones de Movimiento y Dinámica

Los drones multirrotor operan con 6 grados de libertad: 3 lineales (X, Y, Z) y 3 rotacionales (Roll, Pitch, Yaw). Estas ecuaciones son fundamentales para entender y controlar su comportamiento en el aire.

Rotación (Roll, Pitch, Yaw)

Las matrices de rotación $R(x, \phi)$, $R(y, \theta)$, $R(z, \psi)$ describen la orientación del dron en el espacio, permitiendo calcular su posición y actitud.

Traslación

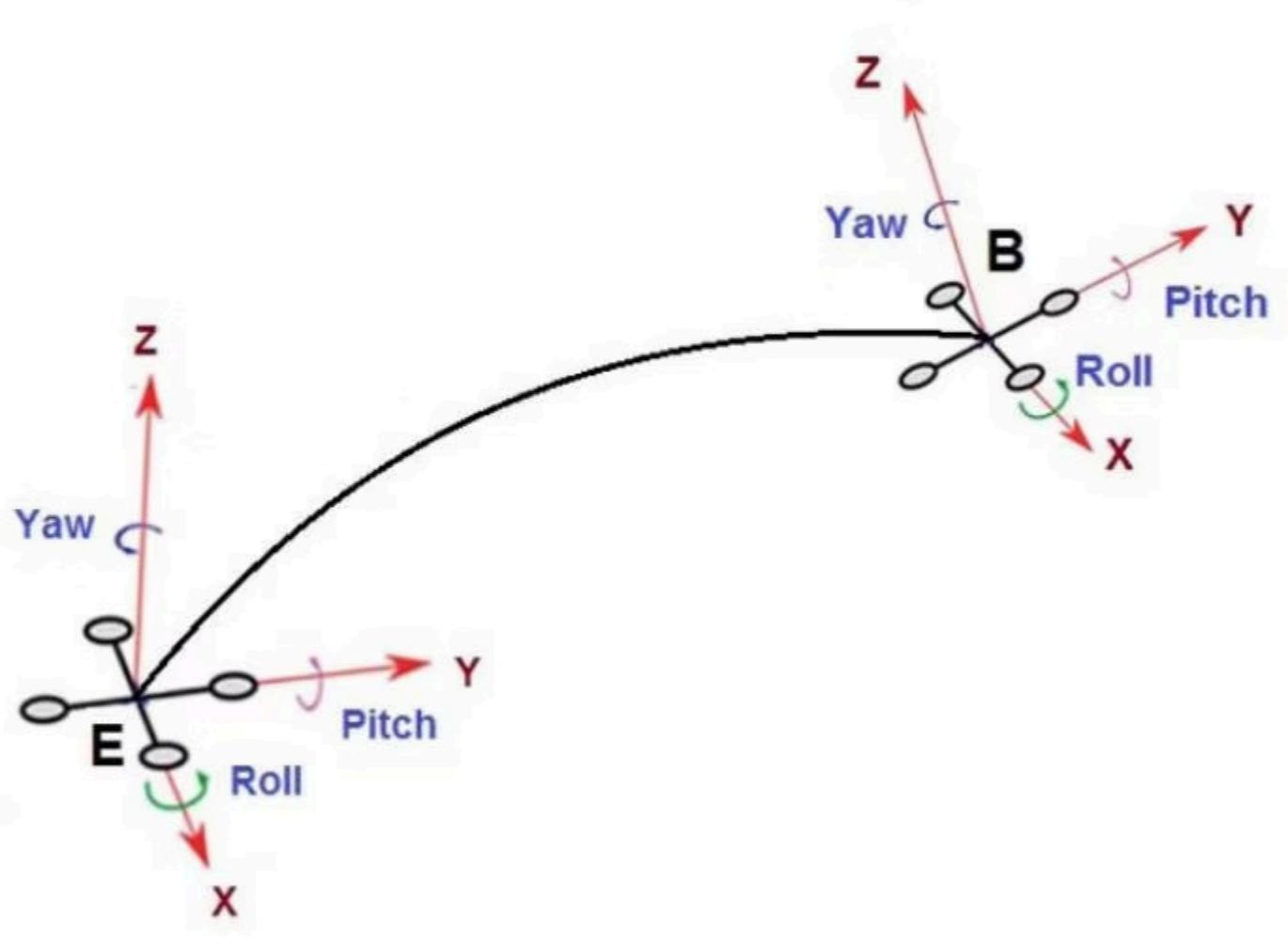
La dinámica translacional ($m * r'' = F_{\text{thrust}} + F_{\text{gravity}}$) describe cómo la fuerza de empuje y la gravedad afectan la aceleración del dron en los ejes X, Y y Z. Aquí:

- **m:** masa del dron
- **r'':** aceleración translacional
- **F_thrust:** fuerza de empuje generada por los motores
- **F_gravity:** fuerza de la gravedad

Rotacional

La dinámica rotacional ($I * w' + w x (I * w) = \tau$) explica cómo los momentos de inercia y los torques influyen en la aceleración angular del dron. En esta ecuación:

- **I:** tensor de inercia
- **w' :** aceleración angular
- **w:** velocidad angular
- **tau:** torque



3.1 Matrices de Rotación

Las matrices de rotación son esenciales para modelar la orientación de un dron en el espacio tridimensional. Cada matriz representa una rotación alrededor de un eje específico (X, Y, Z), y su combinación permite describir la orientación completa del VANT.



Roll (ϕ)

Rotación alrededor del eje X. Controla la inclinación lateral del dron.

Pitch (θ)

Rotación alrededor del eje Y. Controla la inclinación frontal/trasera.

Yaw (ψ)

Rotación alrededor del eje Z. Controla la dirección de la nariz del dron.

Las matrices de rotación individuales para Roll (ϕ), Pitch (θ) y Yaw (ψ) son las siguientes:

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

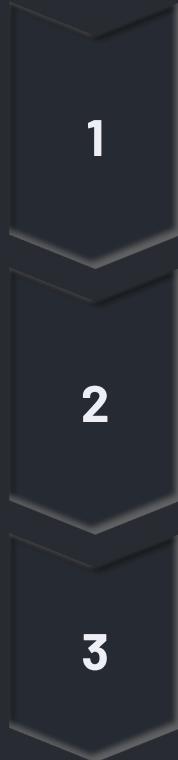
$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz de rotación combinada para el dron, aplicando las rotaciones en el orden Yaw-Pitch-Roll (Z-Y-X), es:

$$R(\phi, \theta, \psi) = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \theta \cos \psi & \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.2 Dinámica Traslacional

La dinámica de un VANT se rige por cómo las fuerzas y torques afectan su movimiento lineal y angular. Comprender estas ecuaciones es crucial para diseñar sistemas de control efectivos que garanticen la estabilidad y el movimiento deseado del dron.



Aceleración en X

1

$$\ddot{x} = \frac{(\cos \varphi \sin \theta \cos \varphi + \sin \varphi \sin \theta)U_1}{m}$$

Aceleración en Y

2

$$\ddot{y} = \frac{(\sin \psi \sin \theta \cos \varphi + \cos \psi \sin \varphi)U_1}{m}$$

Aceleración en Z

3

$$\ddot{z} = [(\cos \theta \cos \varphi - mg)]U_1/m$$

Estas ecuaciones describen cómo la fuerza de empuje (U_1) y la masa (m) del dron, junto con los ángulos de Roll (ϕ), Pitch (θ) y Yaw (ψ), determinan su aceleración en cada dirección. La dinámica rotacional, por otro lado, considera los momentos de inercia (I) y los torques (T) para calcular la aceleración angular.

3.3 Dinámica Rotacional

La dinámica rotacional describe cómo los drones giran. Relaciona torques, inercia y velocidad angular.

$$I \cdot \dot{\omega} + \omega \times (I \cdot \omega) = \tau$$

Momento de Inercia (I)

Matriz 3x3 que representa la resistencia del dron a cambios de rotación. Cada componente de la matriz (I_{xx} , I_{yy} , I_{zz}) describe la distribución de la masa alrededor de un eje principal.

Velocidad Angular (ω)

Vector (p , q , r) que indica la rotación del dron en los ejes X (Roll), Y (Pitch), y Z (Yaw). Su magnitud y dirección son cruciales para el control de la orientación.

Torque (τ)

Fuerzas de giro (τ_ϕ , τ_θ , τ_ψ) que los motores aplican al dron alrededor de los ejes de Roll, Pitch y Yaw, respectivamente. Estos torques son generados por las diferencias en la velocidad de los propulsores.



4. Control Automático y Estabilización de Vuelo

El vuelo de un dron multirrotor es inherentemente inestable, requiriendo estabilización automática constante. Esto se logra mediante una combinación de sensores y controladores avanzados que ajustan continuamente el movimiento del dron.



Sensores

IMU, barómetro, GPS y magnetómetro proporcionan datos cruciales sobre la posición y orientación del dron.



Controladores

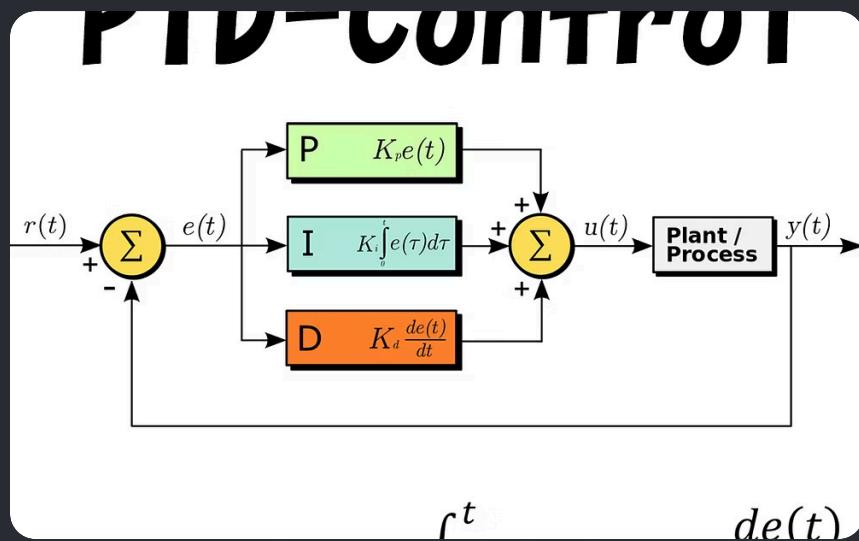
Sistemas como PID, LQR o MPC procesan los datos de los sensores para calcular las correcciones necesarias.



Ajuste de Motores

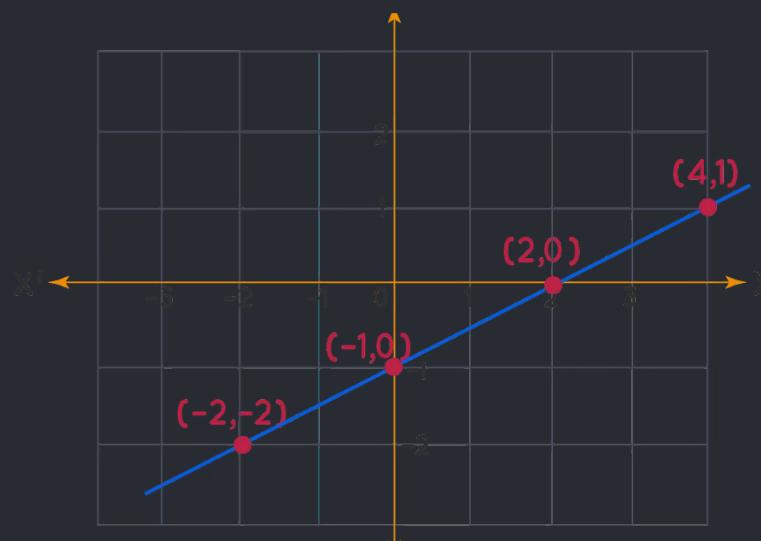
Los ESCs y motores sin escobillas ejecutan las órdenes calculadas, ajustando la velocidad para mantener el equilibrio y el movimiento deseado.

4.1 Algoritmos de Control en VANT



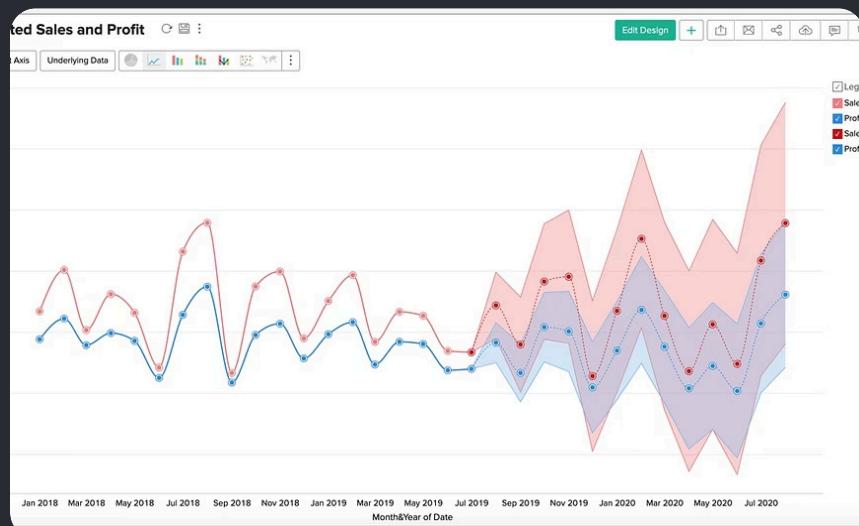
PID (Proporcional-Integral-Derivativo)

Controla errores con proporción, integral y derivada. Es simple y rápido de implementar.



LQR (Regulador Cuadrático Lineal)

Optimiza el rendimiento para sistemas lineales. Requiere un modelo preciso del dron.



MPC (Control Predictivo Basado en Modelo)

Predice el futuro del sistema y maneja restricciones. Tiene un alto costo computacional.

Estos algoritmos son esenciales para la estabilidad. Cada uno ofrece ventajas únicas según la aplicación.

Algoritmo	Simplicidad	Robustez	Coste Computacional
PID	Alto	Medio	Bajo
LQR	Medio	Alto	Medio
MPC	Bajo	Alto	Alto

4.2 Bucle de Estabilización en Tiempo Real

El bucle de estabilización en tiempo real es el corazón del control de vuelo de un VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado). Funciona como un ciclo continuo de detección, procesamiento y actuación para mantener el dron en la posición y orientación deseadas, compensando cualquier perturbación externa o interna.



Este bucle iterativo asegura que el VANT pueda mantener su estabilidad y trayectoria, incluso frente a perturbaciones como el viento o cambios en la carga. Es la base para cualquier maniobra de vuelo compleja o navegación autónoma.

5. Técnicas de Navegación y Posicionamiento

La navegación es fundamental para que un dron conozca su ubicación, velocidad y rumbo. Diversas tecnologías se combinan para lograr una precisión y confiabilidad óptimas en diferentes entornos.



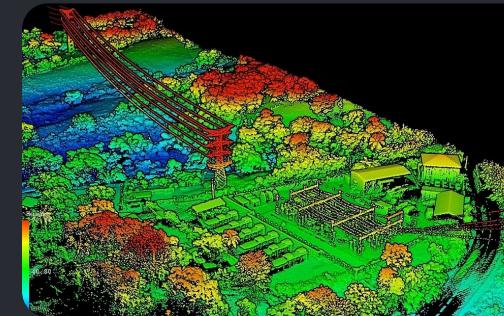
GPS

Uso general con una precisión de aproximadamente 2 metros para posicionamiento exterior.



RTK-GPS

Precisión centimétrica, ideal para agricultura y topografía de alta precisión.



SLAM y Odometría Visual

Navegación en interiores sin GPS, usando cámaras o LiDAR para analizar el movimiento relativo.



Fusión Sensorial

Combina datos de IMU, GPS, barómetro, etc., para mayor precisión y confiabilidad.

5.1 GPS vs RTK para Navegación Exterior



Drone Antenna

Multi-arm spiral technology
Ensure right-hand circular polarization and phase center performance
Reduce the influence of measurement errors

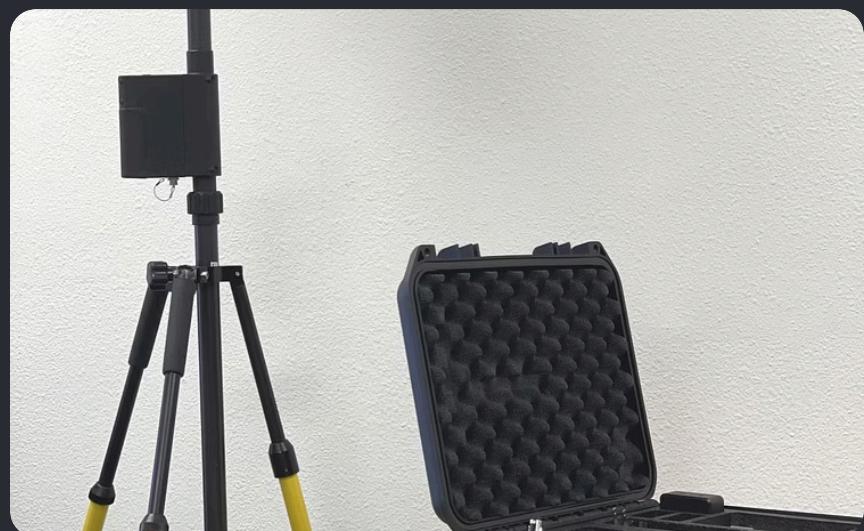
Antenna unit adopts air medium
High gain and small gain roll-off

GPS Estándar

Precisión de ~2 metros.

Hardware común, bajo costo.

Ideal para uso general.

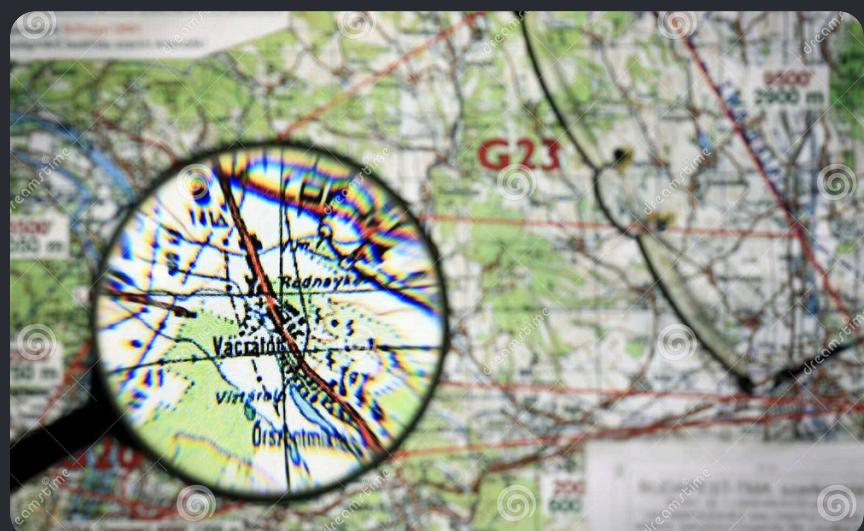


RTK (Real-Time Kinematic)

Precisión centimétrica (< 2 cm).

Requiere estación base GNSS.

Mayor inversión en hardware.



Aplicaciones Clave

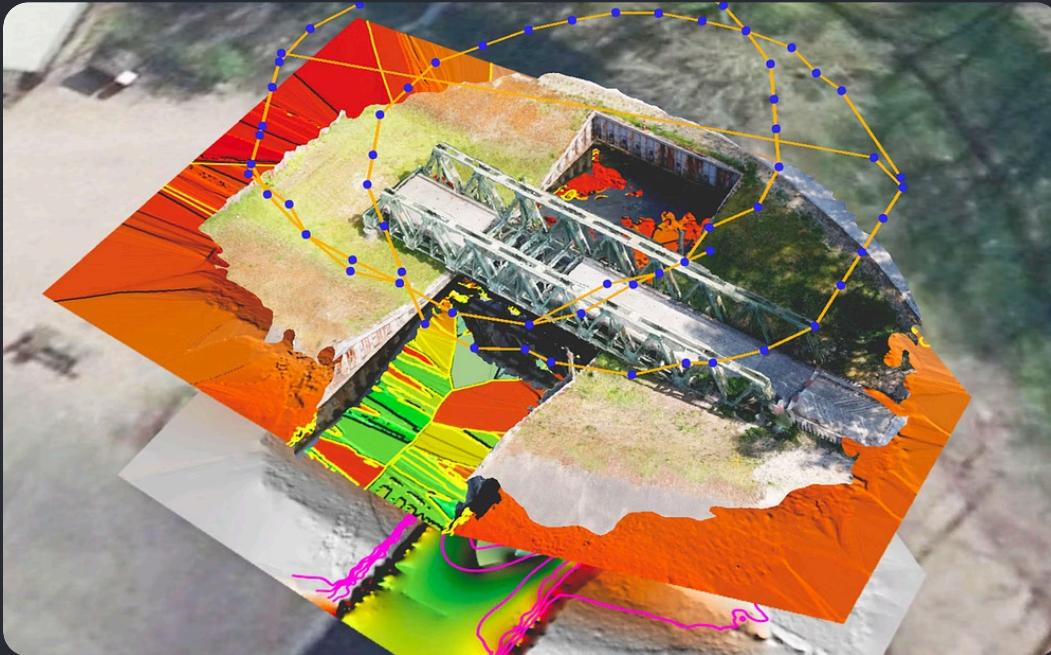
RTK es crucial para topografía.

Perfecto en agricultura de precisión.

Mapeo detallado y construcción.

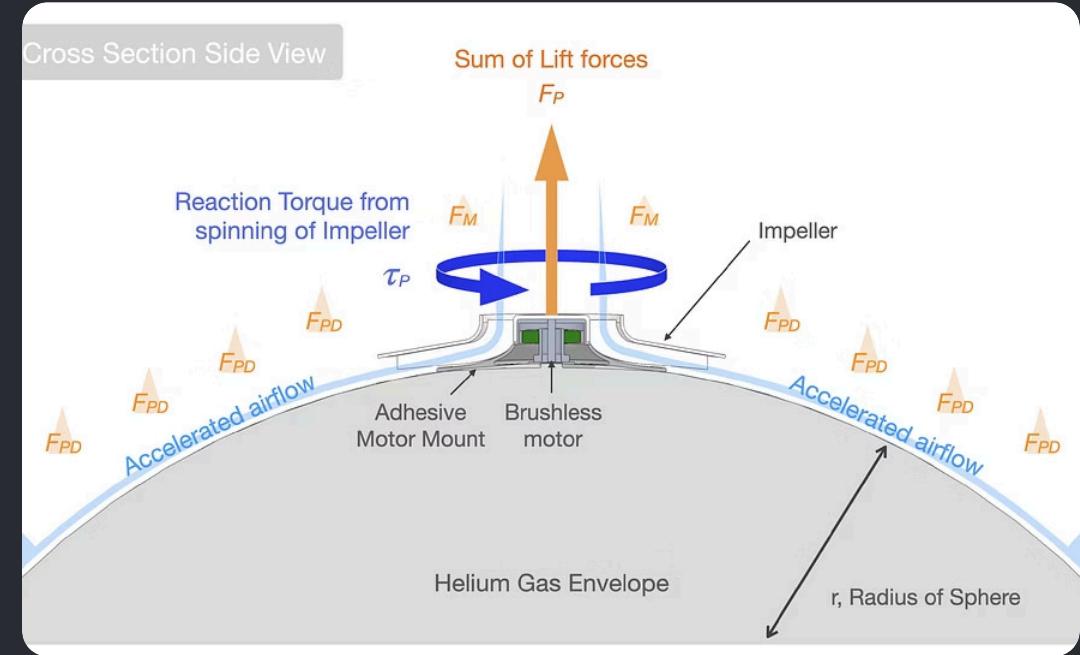
5.2 Navegación Interior: SLAM y Odometría Visual

Los VANTs operan sin GPS en interiores. Estas técnicas construyen mapas y localizan el dron.



SLAM (Localización y Mapeo Simultáneo)

Genera un mapa del entorno y localiza el dron. Ejemplos:
ORB-SLAM, RTAB-Map.



Odometría Visual (VO)

Mide el movimiento relativo entre imágenes. Calcula el desplazamiento frame a frame.

6. Planificación de Trayectorias y Evasión de Obstáculos

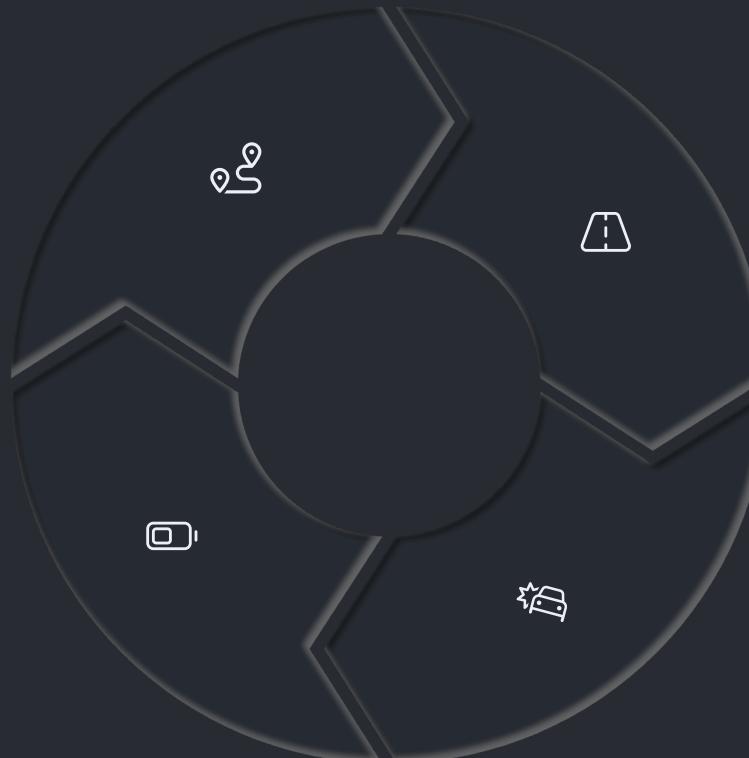
La planificación de trayectorias es crucial para que un dron se mueva eficientemente del punto A al B, evitando colisiones y optimizando su ruta. Esto implica el uso de algoritmos avanzados y sensores en tiempo real.

Generación de Rutas

Algoritmos como A* o RRT* crean rutas óptimas, considerando la distancia y los obstáculos.

Factores Clave

Considera evitar zonas de no vuelo, ahorrar energía y adaptarse a obstáculos móviles para una operación segura.



Seguimiento de Rutas

Técnicas como Pure Pursuit y MPC aseguran que el dron siga la trayectoria de forma suave y precisa.

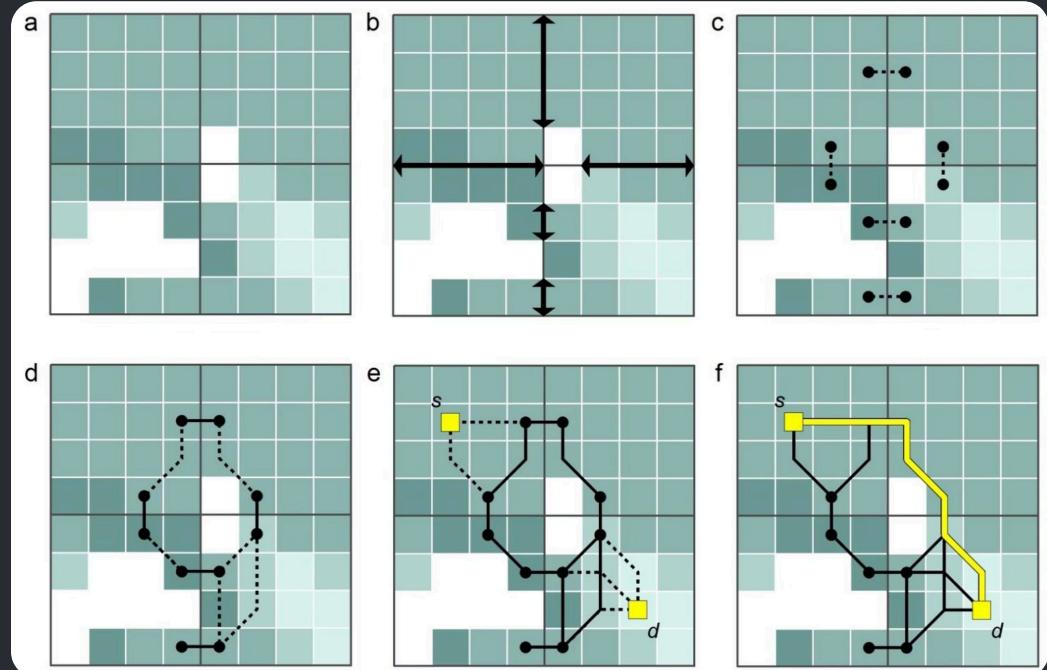
Evasión Reactiva

VFH o DWA permiten al dron evitar obstáculos en tiempo real usando datos de sensores.

6.1 Generación de Rutas Óptimas (A*, RRT*)

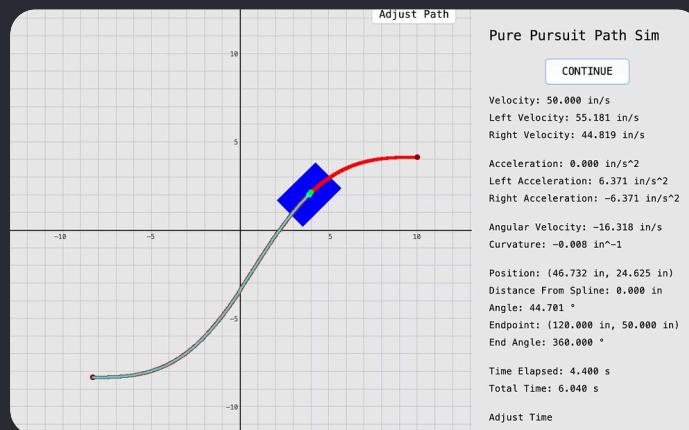
A* busca la ruta óptima en grids con heurísticas. Es preciso en mapas discretos, pero su costo aumenta en espacios continuos grandes.

RRT* explora aleatoriamente, mejorando la solución progresivamente. Es eficiente en entornos complejos, aunque no garantiza la ruta más corta de inmediato.



6.2 Seguimiento de Ruta: Pure Pursuit y MPC

El seguimiento de ruta es esencial para que los VANTs mantengan su curso. Algoritmos avanzados aseguran que el dron siga la trayectoria con alta precisión.



Pure Pursuit

Este método selecciona un punto futuro sobre la trayectoria deseada, luego ajusta la velocidad angular del dron para alcanzarlo.

Control Predictivo por Modelo

MPC optimiza una secuencia de controles futuros, respetando restricciones de velocidad y aceleración del dron.

Vuelo Eficiente y Seguro

Ambas técnicas son cruciales para lograr un seguimiento suave, preciso y adaptable, mejorando la seguridad operativa.

6.3 Evasión Reactiva de Obstáculos (VFH, DWA)



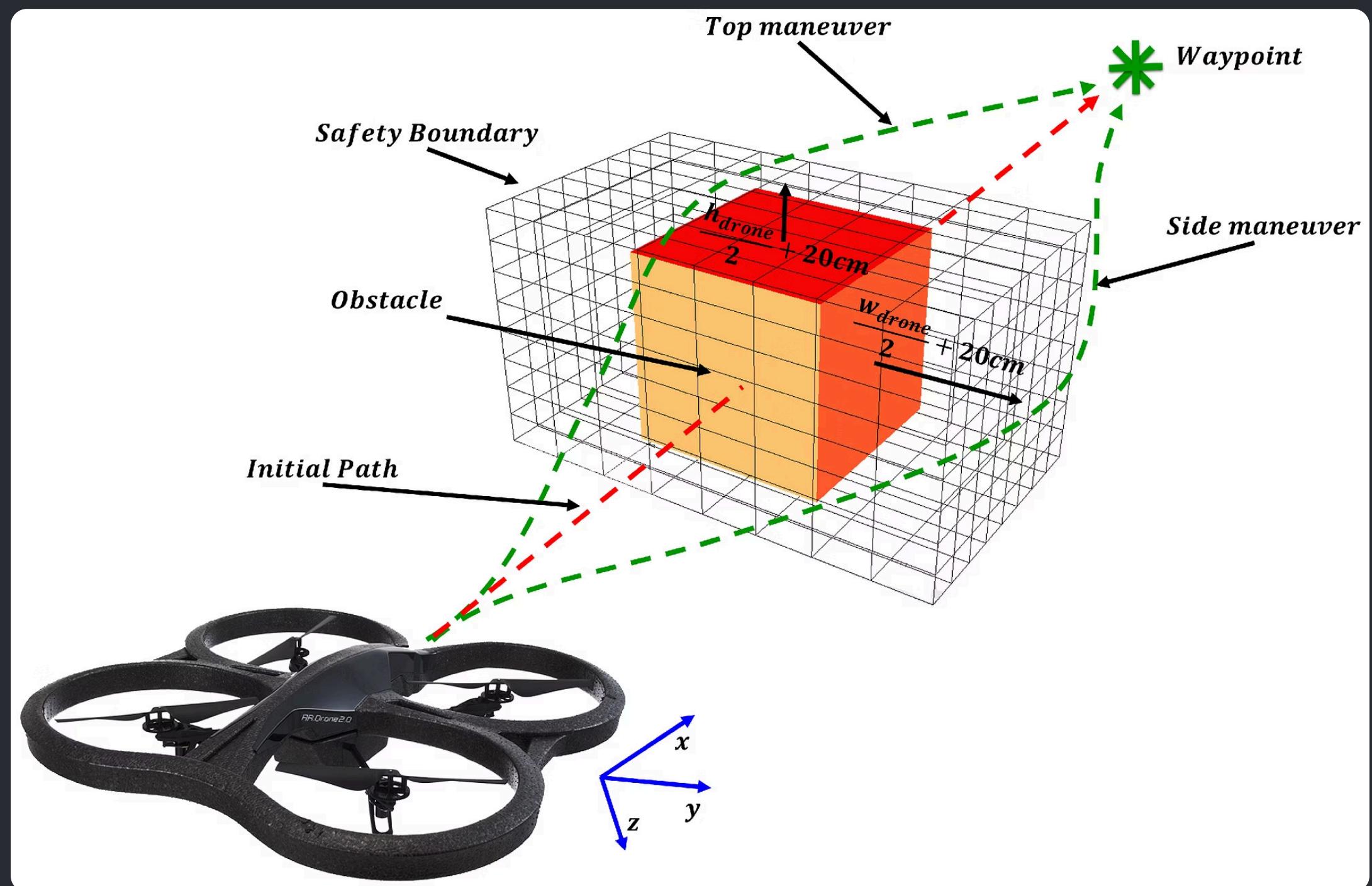
VFH (Vector Field Histogram)

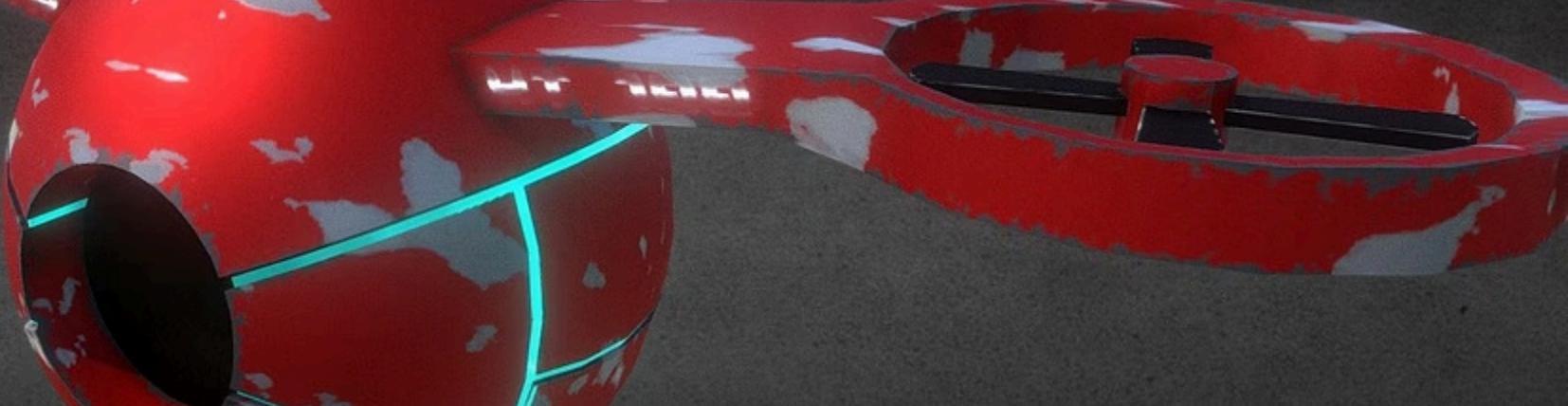
Construye un histograma polar. Este usa datos de sensores para detectar obstáculos. Luego, elige la dirección más libre, evitando colisiones activamente.



DWA (Dynamic Window Approach)

Evalúa velocidades dinámicas. Simula múltiples trayectorias posibles para el dron. Selecciona la mejor ruta, optimizando seguridad y velocidad.





Futuro de los VANTs

Los VANTs multirrotor, en constante evolución tecnológica, se perfilan como elementos clave para el desarrollo futuro. Su adaptabilidad y creciente autonomía, impulsadas por avances en control automático, navegación, y planificación de trayectorias, prometen transformar múltiples sectores, impactando positivamente en la sociedad y la economía global.

Transformación Tecnológica

La continua integración de sensores inteligentes de alta resolución (LIDAR, cámaras hiperespectrales), sistemas RTK avanzados para posicionamiento centimétrico, y plataformas de IA permitirá vuelos aún más precisos, capacidades autónomas expandidas para la toma de decisiones en tiempo real y la gestión de flotas de drones, incluyendo la colaboración entre VANTs.

Impacto Socioeconómico

Veremos una expansión significativa en su uso para entregas autónomas de última milla en áreas urbanas y rurales, monitoreo ambiental detallado de la calidad del aire y agua, asistencia en desastres con drones de búsqueda y rescate, y nuevas formas de entretenimiento como espectáculos de luces con drones y educación a través de simulaciones de vuelo.

Superando Límites

La investigación se enfocará en aumentar drásticamente la autonomía de batería mediante nuevas químicas y métodos de carga inalámbrica, mejorar la seguridad operativa en espacios urbanos congestionados con sistemas avanzados de detección y evasión de colisiones (basados en DWA y VFH), y desarrollar interacciones humano-dron más intuitivas y colaborativas para misiones complejas y escenarios de respuesta a emergencias.

Conclusiones y Futuro de los VANTs

A lo largo de esta presentación, abarcamos los pilares que sostienen el progreso de los VANTs multirrotor. Desde su control y estabilización fundamentales hasta las avanzadas técnicas de navegación y planificación de trayectorias, estos sistemas continúan evolucionando, prometiendo transformar múltiples sectores y redefinir nuestras interacciones con el entorno aéreo.