

Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Electrónica, Robótica y
Automática

Sistema multi-UAV para apoyo humano en
operaciones de inspección con múltiples vis-
tas

Autor: Damián Jesús Pérez Morales

Tutor: Jesús Capitán Fernández, Alfonso Ángel Alcántara Marín

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

Sistema multi-UAV para apoyo humano en operaciones de inspección con múltiples vistas

Autor:

Damián Jesús Pérez Morales

Tutor:

Jesús Capitán Fernández, Alfonso Ángel Alcántara Marín

Profesores Titulares

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Máster: Sistema multi-UAV para apoyo humano en operaciones de inspección con múltiples vistas

Autor: Damián Jesús Pérez Morales

Tutor: Jesús Capitán Fernández, Alfonso Ángel Alcántara Marín

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Resumen

Se presenta un generador de trayectorias para formaciones multi-UAV que monitorizan la misión de la inspección de una turbina eólica. El objetivo principal es ofrecer diferentes puntos de vista de la turbina de viento a un operario de tierra, ofreciendo mejores perspectivas de lo que se está supervisando. Para hacer esto posible, se emplea una formación que sigue un esquema líder-seguidor de forma descentralizada. Cada UAV calcula una trayectoria inicial a partir de los comandos del operario que mantienen las propiedades visuales. Seguidamente, estas trayectorias son optimizadas, minimizando aceleraciones para obtener caminos suaves y, de esta manera, evitar movimientos bruscos. Este método es evaluado con simulaciones.

Índice

<i>Resumen</i>	I
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
2 Metodología	3
2.1 Planteamiento del sistema	3
2.2 Formulación del problema	4
2.2.1 Modelo dinámico	4
2.2.2 Generación de trayectorias de referencia	5
2.2.3 Optimización de la trayectoria	6
3 Resultados	9
3.1 Entorno	9
3.2 Interfaz del operario	9
3.3 Simulación	10
4 Conclusiones y líneas futuras	15

1 Introducción

1.1 Motivación

En la actualidad, los UAVs (*Unmanned Aerial Vehicules*) han estado evolucionando hasta el punto de emplearse en una gran variedad de aplicaciones, tales como para rodajes de cine, detección de incendios, detección de roturas o tareas de inspección. Sobresalen respecto a las otras arquitecturas de robot por ser pequeños y ligeros, permitiendo que puedan emplearse en escenarios complicados que requieren un alto grado de maniobrabilidad. Además, se le pueden acoplar una gran cantidad de sensores y/o actuadores, lo cual permite que tenga aún más potencial.

En principio, grabar vídeos de manera profesional con un dron requiere de tener a un operario entrenado y estar pendiente de los movimientos del mismo, lo cual no suele ser eficiente. La idea de desarrollar una aplicación con drones que puedan completar este tipo de tareas de manera autónoma es interesante para reducir la carga de los operarios de tierra. Además, las tareas de reparaciones en áreas peligrosas (turbinas de viento, torres eléctricas) siguen siendo desempeñadas por humanos. Teniendo la posibilidad de acoplar a un UAV una cámara que le permita tener al operario de tierra puntos de vista que un humano jamás llegaría a alcanzar y sin poner en riesgo la vida de una persona sería una gran mejora para el sector de la inspección.

Por si fuera poco tener la visión de un UAV, la visión de varios UAV podría mejorar significativamente el rango de visión que tendría el operario acerca de la estructura que está inspeccionando, ofreciendo también tener una inspección más rápida de la misma y un incremento de la robustez ante fallos de los robots.

Este trabajo se centra en una aplicación de una formación multi UAV que ofrece información visual a un operario que está inspeccionando la estructura desde el suelo. Además, estas imágenes en un futuro se pueden integrar en una interfaz de Realidad Aumentada (RA) a modo de tener un medio de interacción e intercambio de información con el sistema autónomo, incrementando la eficiencia de la Interacción Humano-Robot (HRI).

Sin embargo, es necesario contemplar que los sistemas multi UAV presentan también algunos problemas, entre ellos, la evitación de colisiones, problemas en las estrategias de coordinación entre ellos en tiempo real (preferiblemente de forma descentralizada), no solapar el campo de visión de los UAV, entre otras.

Además, al tratarse de una tarea donde la información visual es primordial, es necesario realizar una generación de trayectorias de los UAV donde se evite dentro de lo posible los movimientos bruscos para tener las imágenes lo más estables posibles.

Este proyecto está motivado por los objetivos fijados en DURABLE¹, cuyo propósito es desarrollar principalmente tareas de inspección para fuentes de energías renovables.

¹ durableproject.eu

1.2 Objetivos

El objetivo global de este proyecto es el desarrollo de un sistema multi UAV en el que se apoye la inspección de una turbina eólica, ofreciendo diferentes puntos de vista de la estructura a un operario de tierra. El operario puede mandar comandos de alto nivel a la formación y, para este trabajo, los objetivos están definidos:

- Generar trayectorias de referencia en función de los comandos de alto nivel ordenados por un supervisor manteniendo las propiedades visuales.
- Generar trayectorias óptimas definiendo un problema de optimización que minimice las aceleraciones para conseguir trayectorias suaves.
- Ejecutar el sistema on-line y en tiempo real. Para este propósito, se emplea horizonte deslizante (receding horizon) y se ejecuta el sistema de manera descentralizada. Esto permite el recálculo de las trayectorias con una mayor tasa para tener en cuenta las posibles perturbaciones.
- Desarrollar la arquitectura del software del multi UAV en ROS.
- Realizar simulaciones SITL (*Software In The Loop*) para corroborar que el sistema está capacitado para generar las trayectorias de la formación de UAVs que está inspeccionando una turbina eólica.

2 Metodología

2.1 Planteamiento del sistema

Este trabajo apunta a desarrollar un sistema multi UAV para realizar tareas de inspección de una turbina eólica, pudiendo ser interactuado por comandos de alto nivel por un operario de tierra. Las nociones básicas de la aplicación son las siguientes.

- Siguiente punto para inspeccionar (Next waypoint to inspect). Los UAVs deben dirigirse hacia dicho punto para inspeccionar (waypoint), que ha sido comandado por el operario de tierra y las cámaras a bordo de cada UAV deben apuntar al punto a inspeccionar (inspected point, mirar la Figura 2.1). El operario puede añadir nuevos puntos de forma on-line para obtener imágenes desde diferentes partes de la infraestructura y estos puntos son almacenados en una lista de waypoints que deben ser seguidos en el mismo orden que el operario comandó. Cuando el UAV líder alcanza un waypoint, este se elimina de la lista.
- Ángulo de formación, θ_r (Formation angle). Este ángulo está representado en Fig 2.1. Es el ángulo que forman el UAV líder y el UAV seguidor.
- Distancia de inspección, r (Inspection distance). Es la distancia a la que se desea inspeccionar la estructura. Todos los UAV deben mantener dicha distancia.

La configuración que la formación de UAVs debe depender esencialmente de los parámetros mencionados anteriormente y estos son configurables por el operario. Este método genera trayectorias para sistemas multi-UAV que mantienen las propiedades visuales. Como resultado, las trayectorias encajan en un cilindro de radio igual a r y centro en el punto a inspeccionar.

En la Figura 2.2 se muestra la arquitectura del sistema. El UAV líder lleva consigo la cámara principal, mientras que los seguidores llevan cámaras auxiliares para ofrecer imágenes auxiliares. En la Sección 2.2.2 se muestra cómo se hace la generación de las trayectorias de referencia a partir de los parámetros de la formación y de los puntos a los que se desee alcanzar para observar la estructura desde dicho punto. En la Sección 2.2.3 se muestra el problema de optimización planteado para obtener trayectorias suaves a partir de las trayectorias de referencia. El esquema de lo que hace cada UAV se muestra en los Algoritmos 1 y 2.

Todos los elementos que se muestran en la Figura 2.2 (salvo la componente del operario) y se ejecutan en cada UAV con un horizonte deslizante. Esto permite que el planificador on-line reaccione de manera adecuada a los cambios que mande el operario, además de evitar malos funcionamientos.

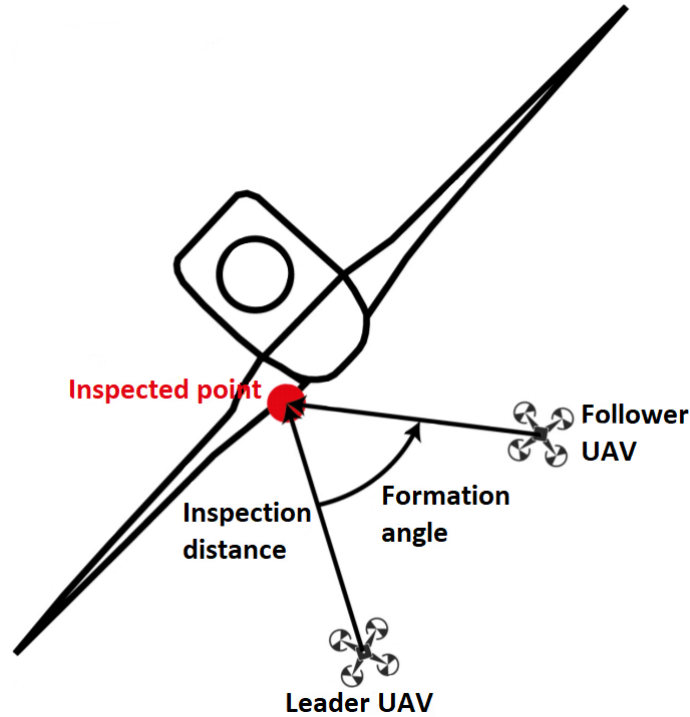


Figura 2.1 Esquema líder-seguidor en 2D.

Algorithm 1 UAV líder

```

1: procedure LEADER(waypoints, punto a inspeccionar, distancia de inspección)
2:   Inicialización del sistema
3:   while Existan waypoints && Misión empezada do                                ▶ Por cada ciclo
4:     Trayectoria de referencia  $\leftarrow$  Punto a alcanzar, punto a inspeccionar, distancia de inspección
5:     Trayectoria óptima  $\leftarrow$  Trayectoria de referencia
6:     Salida: Trayectoria del líder

```

Algorithm 2 UAV seguidor

```

1: procedure SEGUIDOR(Trayectoria de referencia del líder, ángulo de formación)
2:   Inicialización del sistema
3:   while Exista trayectoria de referencia del líder do                                ▶ Por cada ciclo
4:     Entrada: Trayectoria de referencia del líder, ángulo de formación
5:     Trayectoria de referencia del seguidor  $\leftarrow$  Rotar  $\pm$  ángulo de formación la trayectoria de referencia del líder
6:     Trayectoria óptima  $\leftarrow$  Trayectoria de referencia del seguidor
7:     Salida: Trayectoria del seguidor

```

2.2 Formulación del problema**2.2.1 Modelo dinámico**

Debido a que se dispone de un seguidor de trayectorias, se formula el modelo dinámico del UAV empleando únicamente su modelo cinemático (posición, velocidad y aceleración). Para el modelado de la orientación de la cámara, se asume que existe un mecanismo para el gimbal en el que se

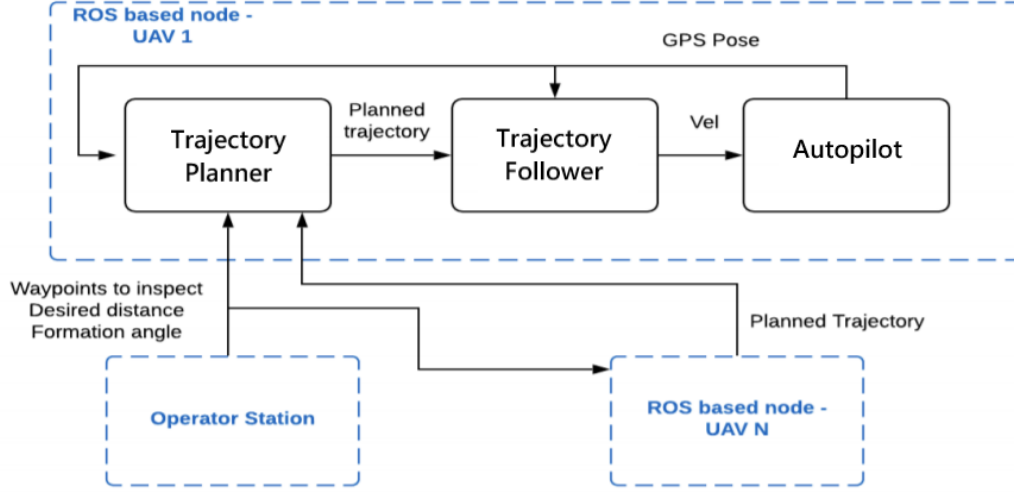


Figura 2.2 Esquema de software del sistema.

desprecia las variaciones en roll de la cámara y que solo se controla el cabeceo y la guiñada (pitch y yaw).

La parte posicional del UAV del modelo dinámico se define como un doble integrador:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{p}} &= \mathbf{v}, \\ \dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{a},\end{aligned}\tag{2.1}$$

donde $\mathbf{p} = [p_x \ p_y \ p_z]^T \in \mathbb{R}^3$ es la posición del UAV, $\mathbf{v} = [v_x \ v_y \ v_z]^T \in \mathbb{R}^3$ la velocidad lineal y $\mathbf{a} = [a_x \ a_y \ a_z]^T \in \mathbb{R}^3$ la aceleración lineal. La posición de la cámara se asume que es la misma que la del UAV. La orientación de la cámara se define de la misma manera:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{o}} &= \boldsymbol{\omega}, \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} &= \boldsymbol{\theta},\end{aligned}\tag{2.2}$$

donde $\mathbf{o} = [\varphi \ \xi]^T$ representa la orientación del gimbal respecto al sistema de referencias global por sus ángulos de pitch y yaw, $\boldsymbol{\omega} \in \mathbb{R}^2$ son las correspondientes velocidades angulares, y $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^2$ las aceleraciones angulares. Para la descripción del método, se define un estado posicional del UAV $\mathbf{x}_p = [\mathbf{p}^T \ \mathbf{v}^T]^T \in \mathbb{R}^6$, un vector de entradas de control posicional $\mathbf{u}_p = \mathbf{a}$, un estado de orientación $\mathbf{x}_o = [\mathbf{o}^T \ \boldsymbol{\omega}^T]^T \in \mathbb{R}^4$, y un vector de entradas de control $\mathbf{u}_o = \boldsymbol{\theta}$.

2.2.2 Generación de trayectorias de referencia

La referencia del líder se genera a partir del punto a inspeccionar (waypoint), el punto a inspeccionar y la distancia a inspeccionar. Como resultado, se ofrece una trayectoria que encaja con un cilindro de radio igual a la distancia de inspección pasando por los waypoints comandados por el operario y manteniendo las restricciones visuales de los UAV para las imágenes. Para este propósito, es necesario realizar la parametrización en coordenadas polares y se aplica interpolación. Dado un waypoint $\mathbf{w}_0 = [r_0 \ \theta_0 \ z_0]$ y $\mathbf{w}_1 = [r_1 \ \theta_1 \ z_1]$ y un parámetro $t \in [0, 1]$. \mathbf{w}_0 representa la posición actual y \mathbf{w}_1 el siguiente punto a alcanzar, ambas en coordenadas cilíndricas.

$$\begin{aligned}r &= r_0 + (r_1 - r_0) * t \\ \theta &= \theta_0 + (\theta_{total}) * t \\ z &= z_0 + (z_1 - z_0) * t\end{aligned}\tag{2.3}$$

$$\theta_{total} = \begin{cases} \theta_2 - \theta_1 - 2\pi, & \text{if } \theta_2 - \theta_1 > \pi \\ \theta_2 - \theta_1, & \text{if } \theta_2 - \theta_1 < \pi \text{ y } \theta_2 - \theta_1 < 0 \\ \theta_2 - \theta_1 + 2\pi, & \text{if } \theta_2 - \theta_1 < -\pi \\ \theta_2 - \theta_1, & \text{if } \theta_2 - \theta_1 < \pi \text{ y } \theta_2 - \theta_1 > 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Se sabe que si $t=1$, la longitud de la curva L es:

$$L = \sqrt{(R^2(\theta_{total})^2 + (z_1 - z_0)^2)} \quad (2.5)$$

Para interpolar N puntos separados por t_{step} segundos a una velocidad de crucero V_c , aplicando regla de tres, para cada punto k se tiene la correspondiente t_k :

$$t_k = \frac{V_c * t_{step} * k}{\sqrt{(R\theta_{total})^2 + (z_1 - z_0)^2}} \quad (2.6)$$

En el caso de los seguidores, la trayectoria de referencia se calcula con una rotación alrededor del eje Z de $relative_angle$ rad a partir de la trayectoria de referencia del líder:

$$\mathbf{P}_{RF} = (\mathbf{P}_{RL} - \mathbf{p}_i) * R_Z(relative_angle) \quad (2.7)$$

Donde \mathbf{P}_{RF} es una lista de puntos donde se almacena la trayectoria de referencia del follower, \mathbf{P}_{RL} es una lista de puntos donde se almacena la trayectoria de referencia del líder, \mathbf{p}_i el punto a inspeccionar y R_Z es:

$$R_Z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

2.2.3 Optimización de la trayectoria

El objetivo principal es generar trayectorias óptimas para conseguir trayectorias suaves. Para ello, se formula un problema de optimización minimizando las desviaciones respecto a la trayectoria de referencia y las aceleraciones para evitar movimientos bruscos. Además, se añade el modelo cinemático del UAV y las limitaciones dinámicas como restricciones del problema de optimización. Por simplicidad, se denota $\mathbf{x} := \mathbf{x}_p$ y $\mathbf{u} := \mathbf{u}_p$:

$$\underset{\substack{\mathbf{x}_0, \dots, \mathbf{x}_N \\ \mathbf{u}_0, \dots, \mathbf{u}_N}}{\text{minimize}} \sum_{k=1}^N (||\mathbf{x}_{d,k} - \mathbf{x}_k||^2 + \beta ||\mathbf{u}_{k-1}||^2), \quad (2.9)$$

$$\text{subject to } \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}' \quad (2.9.a)$$

$$\mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (2.9.b)$$

$$\mathbf{u}_{min} \leq \mathbf{u}_k \leq \mathbf{u}_{max} \quad (2.9.c)$$

$$\mathbf{v}_{min} \leq \mathbf{v}_{Q,k} \leq \mathbf{v}_{max} \quad (2.9.d)$$

donde las variables de optimización $\mathbf{x}_k = [\mathbf{p}_k \ \mathbf{v}_k]$ y $\mathbf{u}_k = \mathbf{a}_k$ son los estados discretos (posición y velocidad) y las entradas de control (aceleración) del sistema en cada t_k . $\mathbf{x}_{d,k}$ es una lista de los puntos de referencia deseados a alcanzar para cada UAV que viene de la Sección 2.2.2 y su tamaño depende de la longitud del horizonte deslizante.

En el caso de que haya una zona de no vuelo predefinida (por ejemplo, alrededor de una turbina eólica), una nueva restricción puede ser añadida al problema de optimización. Sin embargo, esta

restricción es no convexa, lo que complica bastante el problema de optimización. Afortunadamente, se dispone de un módulo externo que genera las trayectorias de referencia (véase en la Sección 2.2.2) y esta restricción puede ser considerada implícitamente en la generación de la trayectoria de referencia. De esta manera, el optimizador no tiene por qué considerar una restricción no convexa, haciendo el problema más rápido y robusto para encontrar soluciones.

En 2.9.a, \mathbf{x}' es el valor del estado observado del UAV actual, que es considerado el estado inicial para la formulación \mathbf{x}_0 . Las dinámicas del sistema están expresadas en 2.9.b, mientras que en 2.9.c y en 2.9.d se expresan las limitaciones de velocidad y aceleración del UAV respectivamente.

En esta aplicación, las cámaras necesitan estar siempre apuntando al objetivo a filmar. Por ello, la orientación se obtiene:

$$\mathbf{o}_d = [\varphi_d \ \xi_d]^T = \left[\arctan(q_y, q_x) \ \sin\left(\frac{q_z}{\|\mathbf{q}\|}\right) \right]^T. \quad (2.10)$$

donde $\mathbf{q} = [q_x \ q_y \ q_z] = \mathbf{p} - \mathbf{p}_i$, son las posiciones relativas entre la posición de la cámara (asumiendo que es la misma que la del UAV) y la del punto a inspeccionar. Con esta información, la orientación deseada de yaw (φ_d) y de pitch (ξ_d) se puede inferir.

El control de orientación es también definido como una problema de optimización cuadrática con restricciones con horizonte deslizante para conseguir cambios de orientación suaves:

$$\underset{\mathbf{u}_0, \dots, \mathbf{u}_{N-1}}{\text{minimize}} \sum_{k=1}^N (\|\mathbf{o}_{d,k} - \mathbf{o}_k\|^2 + \gamma \|\mathbf{u}_{k-1}\|^2), \quad (2.11)$$

$$\text{subject to } \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}', \quad (2.11.a)$$

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}_o(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \quad \forall k \in \{0, \dots, N-1\}, \quad (2.11.b)$$

$$\omega_{min} \leq \omega_k \leq \omega_{max} \quad \forall k \in \{1, \dots, N\}, \quad (2.11.c)$$

$$\xi_{min} \leq \xi_k \leq \xi_{max} \quad \forall k \in \{1, \dots, N\}, \quad (2.11.d)$$

$$\mathbf{u}_{min} \leq \mathbf{u}_k \leq \mathbf{u}_{max} \quad \forall k \in \{0, \dots, N-1\}, \quad (2.11.e)$$

donde $\mathbf{f}_o(\cdot)$ representa la orientación del modelo dinámico definido en la Sección 2.2.1; ω_{min} , ω_{max} son las limitaciones de las velocidades angulares; \mathbf{u}_{min} , \mathbf{u}_{max} son las limitaciones de las entradas de control; y ξ_{min} , ξ_{max} representan las limitaciones de hardware del gimbal para ajustar los ángulos de pitch. Los ángulos de yaw y de pitch de la cámara pueden ser controlados de forma independiente. De esta manera, el problema (2.11) se ha desacoplado en dos problemas más simples.

El módulo Trajectory Follower tiene una tasa de 100 Hz, la cual es responsable de mandar los comandos de velocidad al autopiloto (mirar la Figura 2.2) y el módulo de Trajectory Planning se ejecuta a 1 Hz, teniendo un camino planificado durante 4 segundos gracias al horizonte deslizante implementado (40 steps de horizonte deslizante, N , siendo cada step de 0.1 segundos). La implementación del horizonte deslizante permite al UAV tener un camino que seguir durante los próximos 4 segundos y permite tener movimientos más suaves, ya que el camino a seguir se vuelve a recalcular cada segundo.

Para conseguir las trayectorias óptimas, se emplea el mismo problema para el líder que para el seguidor.

3 Resultados

3.1 Entorno

Para realizar las simulaciones se emplea el simulador Gazebo, cuyo mundo es la cancha de baloncesto en "La Plaza del Agua", (ETSI, Sevilla). Se empleará este mundo para las simulaciones debido a que los experimentos en la vida real se van a realizar en ese lugar en un futuro.

La interfaz de RViz proporciona información acerca de cómo está yendo la misión. Arroja información acerca de las trayectorias de referencia y reales de cada UAVs, las orientaciones de los UAVs, los puntos a inspeccionar, entre otras cosas. La apariencia del entorno de RViz se muestra en la Figura 3.2.

3.2 Interfaz del operario

La interfaz del operario tiene la posibilidad de ejecutar un archivo de autoconfiguración donde se establecen ciertos parámetros por defecto, aunque se pueden modificar posteriormente a través de la consola que se le proporciona a través de comandos de alto nivel. El aspecto de la interfaz de la



Figura 3.1 Escenario de simulación en Gazebo.

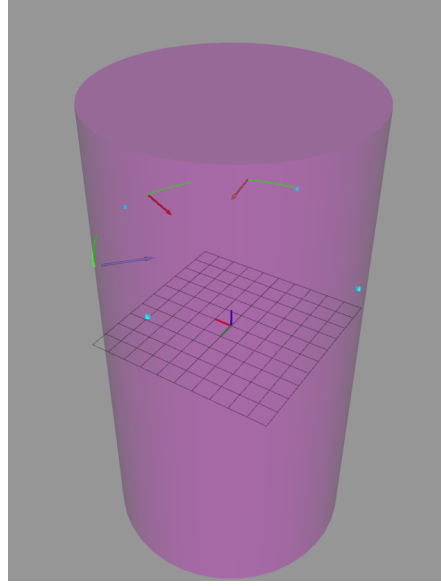


Figura 3.2 RViz en simulación.

que dispone el operario se representa en la Figura 3.3, a través de la cual puede interaccionar con la formación de UAVs.

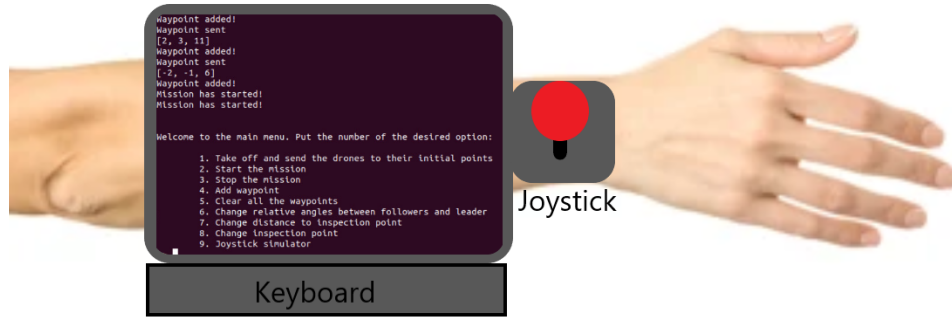


Figura 3.3 Operator's interface, selection of the menu.

3.3 Simulación

En estos experimentos simulados, se inspecciona una hipotética turbina eólica en el escenario planteado en la Figura 3.1. El operario de tierra cambiará θ_r y r con un simulador de joystick para obtener diferentes puntos de vista, acercándose y alejándose de la estructura.

El operario de tierra tiene el control de la formación y tiene unos parámetros de simulación preestablecidos, que se muestran en la Tabla 3.1 y los waypoints comandados se muestran en la Tabla 3.2. Es importante mencionar que dichos waypoints se adaptan automáticamente al cilindro.

En la Figura 3.4 se representa la evolución de las trayectorias por cada UAV. Se puede observar que hay un cambio en la distancia de inspección observando los instantes de tiempo $t = 30s$ y $t = 40s$.

En la Figura 3.5, se representa la evolución de la distancia de inspección para cada UAV. Se puede observar que hay un cambio de referencia en $t = 32s$ de 6.5m a 7.35m y empieza a seguir a

Tabla 3.1 Parámetros de la simulación.

Parameter	Value	Unit
Horizon length	40	steps
Step size	0.1	seconds
Planning rate	1	seconds
Cruising speed	0.7	m/s
Max acceleration	1	m/s ²
Inspection distance	6.5	m
Relative angle	1	radian
Inspection point	[0, 0, 3.5]	m

Tabla 3.2 Waypoints deseados en la simulación.

Waypoint	Position [x, y, z] (m)
Waypoint 1	[0, 2, 5]
Waypoint 2	[2, 0, 5]
Waypoint 3	[0, -2, 5]
Waypoint 4	[-2, 0, 5]
Waypoint 1	[0, 2, 5]
Waypoint 2	[2, 0, 5]
Waypoint 3	[0, -2, 5]
Waypoint 4	[-2, 0, 5]

la referencia en $t = 36s$. Más tarde, en $t = 110s$, hay otro cambio de referencia de 7.35m a 6.7m y empieza a seguir la trayectoria en $t = 115s$. El comportamiento de "overshooting" viene dado por estar generando trayectorias de referencia que son algo más largas de lo que deberían, sobrepasando ligeramente el waypoint. Sin embargo, tampoco excede de manera notoria.

En la Figura 3.6 se muestra la evolución de los ángulos de formación. Fijándose en el problema de seguimiento del ángulo de formación, se puede observar que se siguen correctamente los cambios de referencia, pero hay un offset inevitable de algunos grados ($\sim 5-8^\circ$). Esto se debe a una mala sincronización de las trayectorias del líder y del seguidor, apareciendo un delay al mandar la trayectoria del líder a los seguidores ejecutándose las de estos últimos algo más tarde de lo que deberían. Para solucionarlo, es necesario descartar los puntos de la trayectoria del líder cuyo Timestamp sea más antiguo que el instante de ejecución de la misión. Este cambio está pendiente de implementarse.

La aceleración lineal de los UAVs se muestran en la Figura 3.7. Como es de esperar, estas aceleraciones no pueden ser 0, ya que los UAV están describiendo una circunferencia, lo que significa que debe tener algo de aceleración para que no sigan una línea recta. Cuando hay un cambio en el ángulo de la formación, las aceleraciones de los UAV seguidores pueden tener algunos picos para acercarse o alejarse del UAV líder. Incluso sin tener variaciones en los ángulos de la formación o en la distancia de inspección, las aceleraciones de los seguidores puede ser algo más irregular que las del líder, debido a que las trayectorias de los seguidores dependen directamente de la trayectoria del líder y deben adaptarse para mantener siempre el ángulo de formación con el líder. Sin embargo, gracias al solver, estos picos son minimizados gracias al problema de optimización que minimiza las aceleraciones, haciendo que estos picos sean poco notorios.

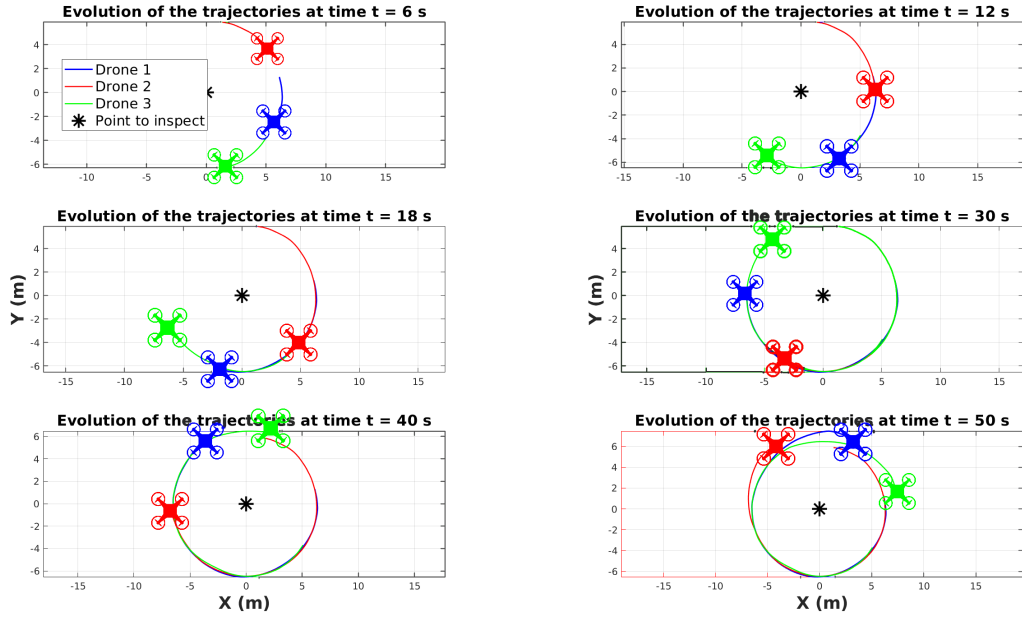


Figura 3.4 Simulación. Mosaico de las trayectorias descritas por los UAVs. Notar que el Drone 1 (líder) se encuentra entre dos UAV, que son los seguidores (Drone 2, Drone 3) y están describiendo un camino siempre en dirección horaria alrededor de la turbina eólica (estrella negra).

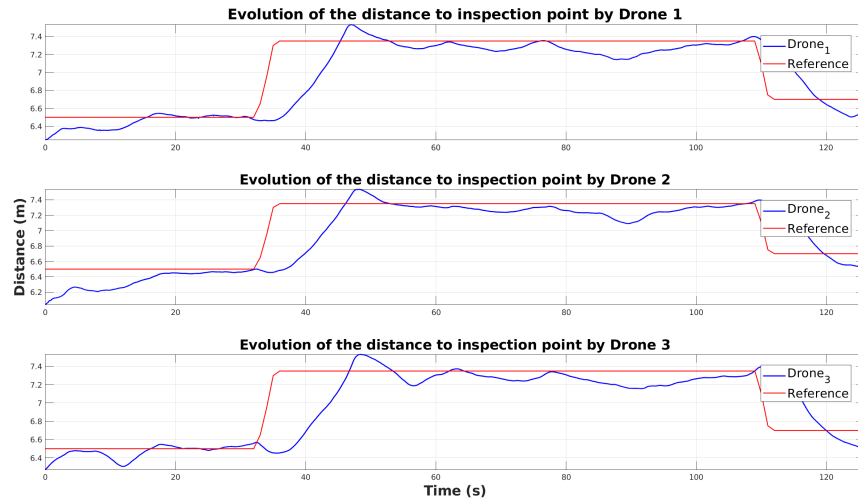


Figura 3.5 Simulación. Seguimiento del cambio de referencia de la distancia de inspección.

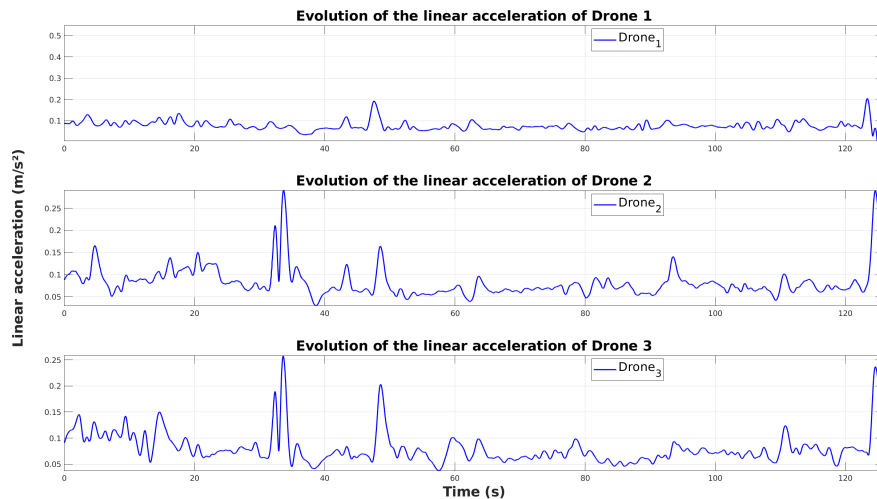


Figura 3.7 Simulación. Aceleración lineal de los UAVs con trayectoria optimizada.

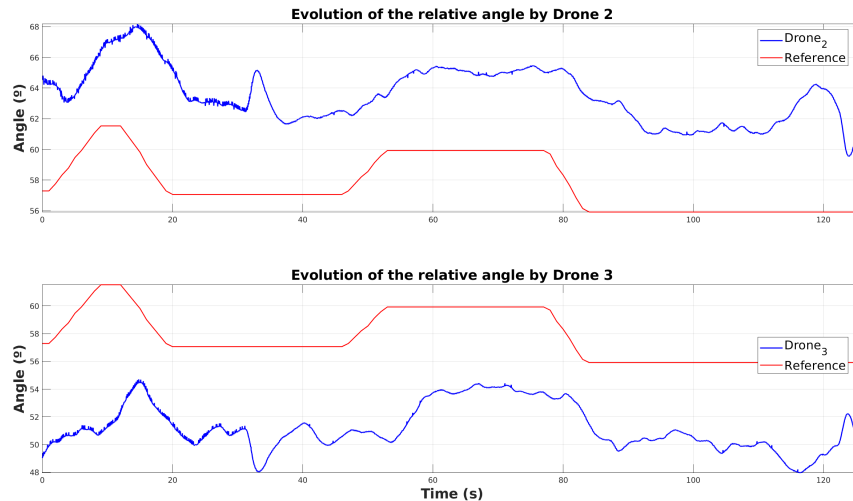


Figura 3.6 Simulación. Seguimiento del ángulo relativo de los UAVs.

Para ver la diferencia entre tener un camino óptimo de un camino no óptimo, en la Figura 3.8 se muestran las aceleraciones lineales de los UAV de otro experimento donde las trayectorias no han sido optimizadas y tienen cambios de referencia similares al experimento que se está exponiendo. En estos resultados, se puede apreciar que la aceleración lineal para el UAV líder no varía mucho respecto al experimento con MPC. Sin embargo, para los UAV seguidores sí que se puede apreciar bastante, teniendo picos bastante significativos cuando hay un cambio de referencia tanto en la distancia de inspección como en el ángulo relativo, incluso cuando no lo hay porque la trayectoria de los seguidores dependen de la trayectoria del líder y esto hace que esté constantemente acelerando o frenando. Si se hace el contraste con la Figura 3.7 que tiene el camino óptimo, se puede apreciar la mejora que hay al tener un MPC.

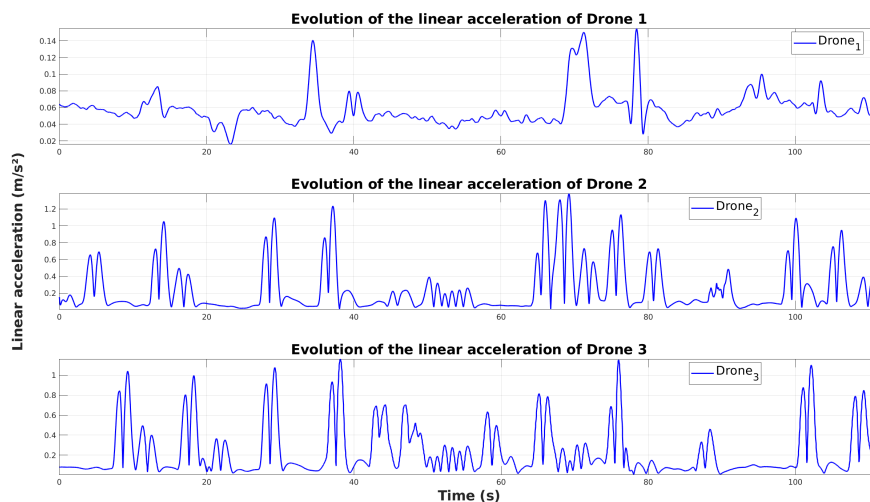


Figura 3.8 Simulación. Aceleración lineal de los UAV sin MPC.

Se añaden además unas tablas donde se recopilan los valores medios de las aceleraciones medias lineales, de pitch y de yaw para cuando se intenta seguir una trayectoria optimizada (mirar Tabla 3.3) y para una trayectoria no optimizada (mirar Tabla 3.4). Puede observarse una mejora significativa

para el caso de los seguidores tanto por la aceleración lineal como por el ángulo de pitch (también mejora un poco el yaw) cuando se emplea la trayectoria óptima. A pesar de no estar minimizando las aceleraciones de pitch y de yaw, se puede observar que, con el problema de optimización planteado, estas se aminoran significativamente de manera indirecta, teniendo así un comportamiento más estable por parte de los seguidores.

Tabla 3.3 Medium values of the accelerations using the optimization problem.

Acceleration	UAV 1	UAV 2	UAV 3	Units
Linear	0.103	0.122	0.101	m/s^2
Pitch	0.013	0.015	0.013	rad/s^2
Yaw	0.007	0.007	0.006	rad/s^2

Tabla 3.4 Medium values of the accelerations without using the optimization problem.

Acceleration	UAV 1	UAV 2	UAV 3	Units
Linear	0.071	0.280	0.275	m/s^2
Pitch	0.007	0.095	0.106	rad/s^2
Yaw	0.006	0.011	0.010	rad/s^2

Un vídeo de demostración en el entorno de simulación se ha subido a la plataforma de YouTube¹ a modo de hacer promoción del proyecto. Es necesario aclarar que el mundo en el que se ha realizado el vídeo es un escenario más realista para este tipo de aplicaciones, pero no es el mismo que el empleado para realizar las simulaciones anteriores.

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=pXQHwkDVizw>

4 Conclusiones y líneas futuras

En este trabajo se ha presentado un método para planificación de trayectorias en equipos multi-UAV para apoyo humano en tareas de inspección. Se ha propuesto una metodología novedosa para la planificación de las trayectorias del equipo multi-UAV, manteniendo una formación dependiendo de las órdenes del operario y teniendo en cuenta las propiedades visuales para, así, obtener imágenes desde diferentes puntos de vista. Se ha demostrado que este método minimiza aceleraciones, obteniendo movimientos de las cámaras suaves. Además, se han desarrollado simulaciones SITL, mostrando que se pueden planificar trayectorias de manera on-line y distribuida.

Respecto a las líneas futuras del trabajo, se está trabajando actualmente en los experimentos en la vida real para corroborar el correcto funcionamiento del sistema planteado. Además, se plantea direccionar la sincronización de las trayectorias recibidas por los seguidores para aproximar mejor los ángulos de formación de referencia añadiendo un adelanto o un retraso de la trayectoria del líder. También se plantea implementar la evitación de obstáculos para poder esquivar las palas de las turbinas entre otras cosas cuando el operario quiere obtener una visión más cercana de la estructura.

Se piensa que este método puede ser integrado con una interfaz de Realidad Aumentada para ofrecer al operario información adicional acerca de la misión. De esta manera, se plantea conectar nuestro sistema con unos cascos de Realidad Aumentada usando la interfaz que ofrecen en la *Ecole Supérieure des Technologies Industrielles Avancées* (ESTIA) en Bidart (Francia). Tienen desarrollado un escenario de realidad virtual donde el operario puede visualizar diferentes aspectos de la misión, como lo son las posiciones de los UAV, las imágenes de las cámaras, las posiciones inspeccionadas, etc.

Finalmente, este proyecto puede ser extrapolado a otro tipo de tareas de inspección, no solo a estructuras cilíndricas, haciendo ligeros cambios en el código. Esta última propuesta está pendiente de aprobación.