



MEMORIA DEL PROYECTO DE TESIS E INFORME DEL DIRECTOR

Apellidos y nombre del solicitante de la ayuda: Calvo Matos, Álvaro

Apellidos y nombre del/a Director/a: Capitán Fernández, Jesús
DN.I., N.I.E. o Pasaporte: 48821871R
Cargo: Profesor Contratado Doctor
Departamento: Ingeniería de Sistemas y Automática
Organismo: Universidad de Sevilla

Título completo de la tesis: **PLANIFICACION COGNITIVA PARA TAREAS DE INSPECCION COOPERATIVAS ENTRE HUMANOS Y EQUIPOS CON MULTIPLES UAVS**

Memoria del Proyecto de Tesis doctoral al que hace referencia la convocatoria. Máximo 3.000 palabras, incluido informe del director:

INTRODUCCIÓN

Últimamente se está extendiendo el uso de equipos cooperativos de UAVs (del inglés *Unmanned Aerial Vehicles*) para distintos tipos de aplicaciones. Gracias a su maniobrabilidad, mayor cobertura y capacidad para acceder a sitios más complejos, se han usado sistemas multi-UAV para tareas de reparto de paquetería, misiones de emergencia e inspección de infraestructuras, entre otros.

Sin embargo, para que estas aplicaciones sean una realidad en entornos dinámicos y no controlados, existen dos barreras relevantes: 1) que los UAVs tengan capacidades autónomas para poder operar de manera prolongada en el tiempo, siendo robustos ante posibles fallos; y 2) que tengan capacidades cognitivas para poder interaccionar en entornos dinámicos con humanos.

En el proyecto AERIAL-CORE¹ (H2020-ICT-2019-871479), en el cual participan los miembros del grupo investigador que avala la tesis, se pretenden desarrollar distintas tecnologías para el uso de equipos multi-UAV en tareas de inspección y mantenimiento en instalaciones eléctricas de alta tensión. Estas tareas son realizadas hoy día por operarios humanos y son bastante costosas, lentas y peligrosas. En particular, una de las tecnologías que se plantea es el uso de *aerial co-workers*, es decir pequeños equipos de UAVs cooperativos para dar soporte de manera segura a los operarios de mantenimiento, mientras trabajan en altura en líneas eléctricas. Estos sistemas tendrían que interaccionar con los humanos (ver Figura 1) para inspeccionar ciertas partes que se les indiquen, monitorizar la seguridad de los trabajadores durante la operación y entregar herramientas u otro equipamiento poco pesado; con el objetivo de hacer el trabajo más eficiente y seguro. Además, para tener un mayor impacto, el sistema necesitaría operar en periodos prolongados en el tiempo, siendo capaz de solventar ciertos fallos o las recargas de manera autónoma.

¹ <https://aerial-core.eu/>



Figura 1. Equipo multi-UAV dando soporte a un operario.

OBJETIVOS

En esta tesis se pretende **desarrollar una serie de técnicas cognitivas de planificación para coordinar equipos multi-UAV autónomos que asistan a operarios humanos en tareas de inspección y mantenimiento en líneas eléctricas de alta tensión**. Los UAVs debieran de ser capaces de dar soporte en las tareas de inspección con cámaras a bordo, de supervisar la seguridad de las operaciones y de transportar pequeñas herramientas de manera segura. Se establecen los siguientes objetivos:

- **Incrementar la autonomía.** Se desarrollará una arquitectura software que permita extender la autonomía en el tiempo del sistema, planificando recargas periódicas para los UAVs en estaciones en tierra, y activando planes de contingencia para reaccionar en tiempo real ante posibles fallos de algún UAV, como pérdida repentina de batería.
- **Incrementar las capacidades cognitivas para interactuar con humanos.** Esto quiere decir desarrollar algoritmos de planificación que permitan tomar decisiones considerando las acciones de los operarios, infiriendo sus intenciones; y de manera segura, razonando cuándo es posible acercarse al operario y cuándo no.
- **Crear interfaces novedosas para la interacción hombre-máquina.** Se estudiará el uso de técnicas de realidad aumentada y virtual para transferir información recopilada por el sistema multi-UAV a los operarios en tiempo real, y recibir sus comandos.
- **Validar las técnicas desarrolladas en un entorno real.** Se realizarán experimentos con UAVs en instalaciones eléctricas de alta potencia reales.

ANTECEDENTES Y NOVEDAD RESPECTO AL ESTADO DEL ARTE

El problema de planificación de misiones con múltiples UAVs que tengan restricciones de batería puede plantearse como un problema de optimización, cuya solución indique la manera más eficiente de asignar las diferentes tareas y planear las recargas. Para reaccionar ante posibles fallos, una de las opciones más extendidas es plantear métodos dinámicos que puedan replanificar en tiempo real según se produzcan ciertos eventos. Aunque hay muchas variantes, la mayoría de formulaciones para misiones donde múltiples vehículos visitan múltiples lugares para inspeccionar o realizar entregas, dan lugar a problemas de optimización NP-duros y, por tanto, la aproximación más extendida es resolverlos mediante algoritmos heurísticos.



Se puede formular un problema de enrutamiento de vehículos VRP (del inglés *Vehicle Routing Problem*), o cualquiera de sus variantes. Un VRP trataría de decidir cómo distribuir de manera eficiente una flota de UAVs con capacidades limitadas, para visitar una serie de puntos donde hay que realizar ciertas tareas. Existen formulaciones dinámicas [1] donde ciertas variables se actualizan continuamente y hay que replanificar durante la misión en tiempo real. Por ejemplo, Dorling et al. [2] proponen un resolutor heurístico para un VRP dinámico donde múltiples UAVs tienen que realizar entregas en distintos puntos y pueden viajar a una estación para recargar sus baterías. Otra aproximación heurística para un problema similar con múltiples UAVs de capacidad limitada es la propuesta en [3]. En [4], se formula el problema añadiendo la complejidad de tener estaciones de recarga móviles. También se ha utilizado el *Orienteering Problem* (OP), donde se modela de manera más explícita la capacidad limitada de batería de cada vehículo. Penicka et al. [5] proponen el uso del método metaheurístico VNS para misiones multi-UAV de recolección de datos modeladas como un OP.

Más específicamente para misiones de inspección de líneas eléctricas, Agarwal et al. [6] utilizan un problema de enrutado de grafos para optimizar la cobertura de una red eléctrica con múltiples UAVs de batería limitada, proponiendo otro resolutor heurístico. Recientemente, también se han utilizado métodos basados en STL (del inglés *Signal Temporal Logic*) para especificar misiones multi-UAV de inspección en líneas eléctricas [7]. El método optimiza las trayectorias de los vehículos considerando sus dinámicas, distancias de seguridad y la energía consumida. Además, replanifica cuando ante eventos externos que desvíen a los UAVs del plan inicial.

Contribuciones al estado del arte: La mayoría de los métodos mencionados calculan planes óptimos fijos, y necesitan conocer las características del problema de antemano. La tesis investigará algoritmos más avanzados que puedan aprender en tiempo real ciertas características como el consumo de batería de los UAVs; y de este modo poder anticiparse a eventos de falta de batería, aplicando planes de contingencia y siendo más robustos ante fallos para extender la autonomía del sistema.

Los métodos de planificación ante incertidumbres son apropiados para añadir capacidades cognitivas a un sistema que tenga que interaccionar con humanos en entornos dinámicos, ya que permiten optimizar los planes prediciendo las intenciones más probables de los humanos y los resultados de las acciones a futuro. El principal problema es su complejidad computacional, ya que el espacio de búsqueda de planes crecería exponencialmente con el número de UAVs y con el horizonte de tiempo a futuro en el que se vaya a planificar.

Existen planificadores *online* que reducen parcialmente esa complejidad limitando el espacio de búsqueda según las posibilidades del agente o UAV en cada momento. Para ello se construye un árbol con los planes más probables dado el estado actual del agente, y son los que se evalúan para encontrar el óptimo. Estos planificadores necesitan mantener una distribución de probabilidad sobre el estado de cada agente (*belief*), que puede ser compleja en problemas multi-agente. Para limitar esta complejidad, se puede utilizar el método de Monte-Carlo para modelar los *beliefs* mediante un número finito de muestras aleatorias, y simular posibles planes para guiar la búsqueda de solución de manera eficiente. Recientemente, se han publicado planificadores online basados en Monte-Carlo [8][9] que son capaces de abordar problemas bastante complejos, gracias a implementaciones algorítmicas con paralelización.

Hablando de algoritmos más específicamente diseñados para problemas multi-agente, también existen planificadores ante incertidumbres que utilizan métodos de Monte-Carlo de



manera descentralizada, consiguiendo que emerjan comportamientos cooperativos entre los agentes [10][11]. La escalabilidad de los planificadores multi-agente se puede mejorar explotando la interdependencia entre agentes, para crear modelos reducidos más eficientes que sólo intercambian la información necesaria entre agentes [12]. Otros enfoques son jerárquicos, creando distintos niveles de abstracción que simplifiquen el problema, por ejemplo con la generación de macro-acciones. Omidshafiei et al. [13] proponen un método jerárquico para resolver un problema de entrega de paquetes con múltiples UAVs en dominios continuos, creando macro-acciones a partir de secuencias de acciones de bajo nivel. El método permite a los agentes tomar decisiones de manera descentralizada y asíncrona.

Contribuciones al estado del arte: Aunque ya existen algunos planificadores online eficientes para trabajar con dominios continuos y con múltiples UAVs, la mayoría utilizan modelos codificados previamente a mano para las incertidumbres. La tesis investigará métodos cognitivos que permitan aprender esos modelos en tiempo real y adaptar los planes consecuentemente. También se desarrollarán métodos más eficientes y escalables para múltiples UAVs; haciendo que los UAVs planifiquen individualmente, pero compartan información durante el transcurso de la misión que sea aprovechada por sus planificadores para hacer emerger comportamientos

La realidad mixta es una tecnología bastante novedosa que combina técnicas de realidad aumentada y virtual. La realidad aumentada consiste en superponer información en tiempo real en imágenes reales, a través de gráficos artificiales; mientras que la realidad virtual recrea un entorno completamente virtual. En entornos mixtos el usuario puede ver escenas combinadas con objetos reales y virtuales, y puede interactuar con estos últimos.

La realidad mixta se está utilizando recientemente en aplicaciones para operar con UAVs, por ejemplo para indicar cómo tomar ciertas fotografías [14] o incorporando mapas 3D del entorno donde el UAV tiene que navegar [15]. Esta tecnología es particularmente útil cuando los UAVs tienen que interactuar con humanos [16][17], que es el foco de esta tesis.

En general, humanos que trabajan colaborativamente, pueden intuir las intenciones de otros mediante gestos u otros comportamientos sociales; pero si ya intervienen UAVs en el equipo, es más complejo inferir sus intenciones y movimientos. A la hora de interactuar entre operarios y equipos multi-UAV, las tecnologías de realidad mixta pueden ayudar a resolver este problema de inferencia de movimiento de los UAV [18], permitiendo la ejecución conjunta de tareas de manera más eficiente.

Contribuciones al estado del arte: Esta tesis pretende investigar el uso de tecnologías de realidad mixta también para aplicaciones de inspección con equipos multi-UAV, combinando vistas tomadas desde distintos puntos para recrear entornos visuales más completos para el operario, y mejorando la interacción hombre-máquina del sistema durante tareas colaborativas.

METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

Se utilizará como problema inspirador de la tesis el de los aerial co-workers para tareas colaborativas de inspección con humanos. Los UAVs tendrán que: ir a inspeccionar mediante imágenes ciertos lugares indicados por los operarios; monitorizar a los operarios en altura desde diferentes puntos de vista, para supervisar su seguridad durante la operación; y recoger herramientas de una estación en tierra para entregarlas a algún operario en altura. Las interacciones entre UAVs y operarios han de ser seguras y eficientes; y estarán apoyadas por dispositivos de realidad mixta para transferir información en tiempo real e



indicar comandos de alto nivel, como qué puntos inspeccionar, regular la distancia a la que monitorizan los UAVs, etc. Además, el sistema tendrá capacidades cognitivas para planificar en vuelo posibles recargas, y ser capaces de interactuar con los humanos de manera inteligente, adelantándose a situaciones tras inferir sus intenciones a través de gestos o movimientos.

Se utilizará una aproximación jerárquica, con un planificador de alto nivel encargado de activar distintos controladores de bajo nivel. El planificador de alto nivel detectará las tareas requeridas por los operarios, y las distribuirá de manera centralizada entre los UAVs, planificando las recargas necesarias. Además, este planificador reaccionará en tiempo real ante posibles fallos reasignando tareas y ejecutando planes de contingencia. También tendrá capacidades cognitivas para interactuar con humanos de manera eficiente. Los planificadores de bajo nivel se encargarán de controlar el movimiento de los UAVs para ejecutar las distintas tareas, por ejemplo volar hacia un lugar a inspeccionar o a la posición de un operario esperando una herramienta. La investigación de la tesis estará centrada en la planificación de alto nivel, y se utilizarán algoritmos del estado del arte para los controladores de bajo nivel.

T1: Planificación cooperativa con autonomía extendida. En esta tarea se desarrollará un algoritmo de planificación de alto nivel para asignar tareas a un equipo multi-UAV teniendo en cuenta limitaciones de batería. El método será robusto ante fallos, reasignando las tareas en caso de evolución inesperada de los planes originales; anticipándose al hecho de que algún UAV se quede sin batería. Se formulará un nuevo problema de optimización dinámico, que integrará información sobre las baterías en tiempo real; y se implementarán los planes de contingencia mediante árboles de comportamiento (*behavior trees*).

T2: Planificación cognitiva ante incertidumbres. En esta tarea se desarrollará un algoritmo para la toma de decisiones ante incertidumbres, que será utilizado en el planificador de alto nivel para interacciones cooperativas con humanos. Se inferirán las intenciones del humano mediante detección de gestos u otros indicadores, y se considerarán en el plan para interactuar con él de manera más eficaz y segura. Por ejemplo, un UAV sólo decidirá acercarse a realizar una entrega cuando el humano parezca aceptar la interacción. Se estudiarán nuevos planificadores de Monte-Carlo que escalen para sistemas multi-UAV.

T3: Tecnologías de realidad aumentada. En esta tarea se estudiará el uso de la realidad aumentada para la interacción del sistema multi-UAV con los operarios. Se planteará el uso de un sistema similar a las gafas *HoloLens* para crear vistas compuestas del entorno, combinando imágenes simultáneas de UAVs desde distintos puntos de vista. También se usará el dispositivo para indicar intenciones de los operadores.

T4: Integración y experimentación real. En esta tarea se realizarán los trabajos de integración de software necesarios para implementar los algoritmos en una flota real de UAVs. También se realizarán pruebas experimentales en un entorno realista de inspección de líneas eléctricas.

TAREAS	GANTT																																																				
	AÑO 1												AÑO 2												AÑO 3												AÑO 4																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48					
T1																																																					
T2																																																					
T3																																																					
T4																																																					
REDACCIÓN																																																					



Figura 2. Diagrama de Gantt.

En la Figura 2 se describe la distribución temporal de las tareas en los 48 meses de duración de la tesis. Las tareas T1, T2 y T3 tendrán fases similares, y solapan parcialmente en el tiempo para aprovechar sinergias. Cada una constará de estudio bibliográfico, diseño e implementación del método, pruebas en simulación y redacción de publicaciones. La tarea T4 es transversal y conllevará experimentación real con. Los meses del 43 al 48 se dedicarán a la redacción de la memoria final de tesis.

El solicitante se integrará en el grupo de investigación receptor, asistiendo a las reuniones grupales semanales y participando en las actividades que pudieran estar relacionadas con su proyecto. Además, tendrá reuniones semanales con su director para el seguimiento del trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Pillac et al. (2013). *A review of dynamic vehicle routing problems*. European Journal of Operational Research, 225(1):1–11.
- [2] Dorling et al. (2017). *Vehicle routing problems for drone delivery*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 47(1):70–85.
- [3] Campbell et al. (2018). *Drone arc routing problems*. Networks, 72.
- [4] Yu et al. (2018). *Algorithms for Routing of Unmanned Aerial Vehicles with Mobile Recharging Stations*. ICRA, pp. 5720-5725.
- [5] Pěnička et al. (2019). *Data collection planning with non-zero sensing distance for a budget and curvature constrained unmanned aerial vehicle*. Autonomous Robots, 43:1937–1956.
- [6] Agarwal et al. *Line coverage with multiple robots*. ICRA, pages 3248–3254.
- [7] Silano et al. (2021). *Power Line Inspection Tasks with Multi-Aerial Robot Systems via Signal Temporal Logic Specifications*. IEEE RA-L, 6(2):4169–4176.
- [8] Garg et al. (2019). *DESPOT- α : Online POMDP Planning With Large State And Observation Spaces*. Robotics: Science and Systems.
- [9] Cai et al. (2018). *HyP-DESPOT: A Hybrid Parallel Algorithm for Online Planning under Uncertainty*. The International Journal of Robotics Research, 40(2–3), 558-573.
- [10] Best et al. (2019). *Dec-MCTS: Decentralized planning for multi-robot active perception*. The International Journal of Robotics Research, 38(2–3), 316–337.
- [11] Chen et al. (2016). *Decentralized Patrolling Under Constraints in Dynamic Environments*. IEEE Transactions on Cybernetics, 46(12), pp. 3364-3376.
- [12] Renoux et al. (2015). *A decision-theoretic planning approach for multi-robot exploration and event search*. IROS, pp. 5287-5293.
- [13] Omidshafiei et al. (2017). *Decentralized Control of Multi-Robot Partially Observable Markov Decision Processes Using Belief Space Macro-Actions*. The International Journal of Robotics Research, 36(2): 231–58.



[14] Huang et al. (2019). *Flight, Camera, Action! Using Natural Language and Mixed Reality to Control a Drone*. ICRA, pp. 6949-6956.

[15] Liu et al. (2020). *An Augmented Reality Interaction Interface for Autonomous Drone*. arXiv:2008.02234.

[16] Hönig et al. (2015). *Mixed reality for robotics*. IROS, pp. 5382-5387.

[17] Szafir et al. (2017). *Designing planning and control interfaces to support user collaboration with flying robots*. The International Journal of Robotics Research, 36(5-7):514-542.

[18] Walker et al. (2018). *Communicating Robot Motion Intent with Augmented Reality*. International Conference on Human-Robot Interaction.

Informe del director. Máximo 500 palabras:

El proyecto de tesis se considera realista y viable, y estará soportado por un grupo investigador con dilatada experiencia en sistemas multi-UAV para distintas aplicaciones, entre ellas tareas de inspección. En particular, el director es también experto en planificación multi-UAV y ante incertidumbres. Los miembros del equipo son IP o participantes de numerosos proyectos europeos y nacionales en este sentido. En particular, las actividades de la tesis están incluidas dentro del proyecto europeo AERIAL-CORE (H2020-ICT-2019-871479), en el que participan todos los miembros del equipo investigador que avala la tesis. Dentro de este proyecto, se realizarán pruebas en plantas piloto con líneas eléctricas, donde podrán probarse los métodos desarrollados en la tesis. Una vez finalizado, actividades similares de inspección multi-UAV también están incluidas en los proyectos DURABLE (Interreg-EAPA_986/2018) y el recién concedido OMICRON (H2020-MG-2020-955269), de los cuales es IP un miembro del equipo (Ángel Rodríguez). Para la experimentación del doctorando también se contará con un equipo multi-UAV financiado por el proyecto de la Junta de Andalucía MULTICOP (FEDER-US-1265072), del cual es IP el director (Jesús Capitán).

El doctorando se integrará en un grupo con amplia experiencia en la temática y donde podrá explotar sinergias, y que además dispone de instalaciones para vuelos de UAVs en interiores y exteriores. Los profesores Jesús Capitán y Ángel Rodríguez, junto con un grupo de doctorandos, han participado en dos ocasiones en la competición MBZIRC (vencedores en 2020), que es la más relevante a nivel internacional para aplicaciones multi-UAV. Además, el doctorando podrá colaborar con investigadores de otros centros en los proyectos en los que participa el grupo, con la posibilidad de realizar estancias investigadoras.

Firma del director:

Firma del solicitante: