

Aplicaciones prácticas de los sistemas multi-UAV y enjambres aéreos

García-Aunon, P. *, Roldán, J.J., De León, J., Del Cerro, J., Barrientos, A.

Centro de Automática y Robótica (CAR), Universidad Politécnica de Madrid (UPM), 28006, Madrid, España

To cite this article: García-Aunon, P., Roldán, J.J., De León, J.; Del Cerro, J., Barrientos, A. 2021. Practical applications using multi-UAV systems and aerial robotic swarms. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 18, 230-241. <https://doi.org/10.4995/riai.2021.13560>

Resumen

A día de hoy, existen en el mercado una gran cantidad de aeronaves sin piloto que pueden ser comandadas con órdenes de alto nivel para realizar tareas complejas de forma casi automática, como por ejemplo el mapeo de explotaciones agrícolas. De forma natural, nos podemos preguntar si sería posible coordinar a un grupo de estos robots para realizar esas mismas tareas de forma más rápida, flexible y robusta. En este trabajo se repasan las tareas que se han planteado resolver con sistemas compuestos por grupos de aeronaves no tripuladas y los algoritmos empleados, así como los métodos y estrategias en los que están basados. Aunque el futuro de estos sistemas es prometedor, existen ciertos obstáculos legislativos y técnicos que frenan su implantación de forma generalizada.

Palabras clave: Multi-UAV, enjambres aéreos, tareas, despliegue, cobertura, búsqueda y rescate, vigilancia, monitorización, transporte

Practical applications using multi-UAV systems and aerial robotic swarms

Abstract

Nowadays, there are a large number of unmanned aircraft on the market that can be commanded with high-level orders to perform complex tasks almost automatically, such as mapping crop fields. We can ask ourselves if it would be possible to coordinate a group of these robots to perform those same tasks more quickly, flexibly and robustly. In this work, we summarize the tasks that have been studied to be solved with systems composed by groups of unmanned aircraft and the algorithms used, as well as the methods and strategies on which they are based. Although the future of these systems is promising, there are certain legislative and technical obstacles that stop their implementation in a generalized way.

Keywords: Multi-UAV, aerial swarms, tasks, deployment, coverage, search and rescue, surveillance, monitoring, transport

1. Introducción

Los vehículos aéreos no tripulados (o *Unmanned Aerial Vehicles en inglés, UAVs*) son aeronaves cuya principal característica es que no llevan a bordo ningún piloto que los controle, sino que se controlan de forma remota o vuelan directamente de forma autónoma. Sus ventajas son claras frente a sus homólogos tripulados: son más sencillos y ligeros, no están sujetos a una legislación tan estricta y compleja, y su pérdida no implica, en principio, la pérdida de vidas humanas, por lo que pueden ser empleados para misiones que entrañan cierto riesgo.

En los últimos años estos aparatos se han hecho increíblemente populares tanto para el público general como para el profesional. A día de hoy, es sencillo encontrar cuadricópteros (aeronaves con cuatro alas rotatorias) con una gran estabilidad y grado de autonomía por precios bajos (por debajo de los 500 e), algo difícilmente imaginable hace 10 años. Además, muchos fabricantes como Parrot o DJI han creado librerías para poder controlarlos mediante programas de desarrollo propio, permitiendo que centros educativos y de investigación, empresas e incluso particulares interesados puedan utilizarlos en tareas específicas.

*Autor para correspondencia: pablo.garcia.aunon@upm.es

Debido a la ya citada simplicidad y por lo tanto bajo coste de los *drones* (término utilizado por el público general para referirse a estos aparatos), una idea que surge rápidamente es el uso de varios de estos aparatos para llevar a cabo la tarea encomendada. Parece lógico pensar que si deseamos rastrear una zona catastrófica en busca de supervivientes, al hacerlo con cinco UAVs en lugar de uno, la tarea se acelerará. Por otro lado, habrá tareas que si no se llevan a cabo mediante más de un agente, no se podrán realizar (como por ejemplo, la vigilancia de un área muy amplia).

En este artículo se pretende hacer un repaso general sobre las tareas estudiadas hasta la fecha resueltas con sistemas compuestos por más de un vehículo aéreo no tripulado. En la Sección 2 se discuten las similitudes y diferencias entre los sistemas multi-robot y los enjambres. En la Sección 3, se repasan de forma superficial algunas de las estrategias y métodos en las que se basan los distintos algoritmos que intentan resolver las tareas propuestas. La Sección 4 es la principal de este trabajo, y en ella se detallan las distintas actividades que se han venido estudiando en los últimos 10 años, explicando con cierto detalle los algoritmos empleados y sus características. Finalmente en la Sección 5 se plantean algunas ideas sobre el futuro de los sistemas multi-UAV, así como algunos retos a los que se deberá enfrentar la industria.

2. Sistemas multi-robot y enjambre aéreos

Los sistemas compuestos por más de un robot presentan ventajas claras frente a los sistemas mono-agente debido a que la tarea a realizar puede ser subdividida en distintas tareas más sencillas y éstas ser asignadas a cada agente. De esta forma, la misión se lleva a cabo de una forma paralela, más rápida y probablemente con mayor robustez. Adicionalmente, se puede prediseñar a los agentes para que cumplan ciertas sub tareas específicas, de forma que éstos sean agentes especializados y, por lo tanto, más efectivos. Por el contrario, estos sistemas presentan la complejidad de que se deben crear métodos de coordinación y cooperación entre ellos.

Los enjambres robóticos surgen de un planteamiento inicial similar al de los sistemas multi-robot: completar una tarea compleja con un número elevado de agentes. Desarrollados desde finales de los años 80 e inspirados en el comportamiento de ciertos animales como hormigas, abejas o peces formando bancos, los enjambres robóticos están diseñados para realizar tareas de cierta complejidad mediante conjuntos grandes de robots simples a nivel individual. Estos agentes actúan de forma reactiva, tomando decisiones basadas en información limitada e interactuando de forma local con el resto de agentes del sistema. Tómese como ejemplo una colonia de hormigas en busca de alimento. Cada hormiga, de forma individual, es poco capaz de encontrar alimento: no es capaz de obtener información a grandes distancias y su capacidad de movimiento, orientación y comunicación es muy limitada. Sin embargo, una vez que una hormiga, siguiendo casi un movimiento aleatorio, encuentra una fuente de alimento, el resto de la colonia es capaz de llegar hasta ella gracias al rastro de feromonas que van depositando los individuos (camino que se va reforzando a medida que más hormigas pasan por él). Los aspectos claves de estos

sistemas son que sean escalables, es decir, que sean capaces de funcionar correctamente con un número creciente de agentes; flexibles para adaptarse a distintas situaciones y cambios de entorno; y robustos, de forma que la tarea se lleve a cabo a pesar de la pérdida o el mal funcionamiento de una parte de los agentes, del fallo de uno o varios elementos del sistema (como por ejemplo, las comunicaciones), o a pesar de que se den situaciones no previstas a priori.

Estas características deseadas imponen ciertas restricciones a los métodos utilizados en los enjambres. Por un lado, para conseguir robustez los métodos centralizados no son convenientes, ya que todo el sistema depende de una comunicación con el ordenador central que se puede perder. Por otro lado, los métodos deliberativos (es decir, aquellos que requieren una evaluación detallada de la información actualizada del entorno) no son apropiados si se desea escalabilidad, ya que el espacio de búsqueda de soluciones crece rápidamente con el número de agentes. Además, para conseguir flexibilidad ante cambios en el entorno, estaría contraindicado emplear de nuevo un sistema centralizado y/o deliberativo.

Las tareas que típicamente se han intentado resolver con enjambres robóticos han sido muy simples con robots terrestres, tales como el agrupamiento, sincronización, recolección de recursos, parada, formación de cadenas o despliegue. Se han considerado históricamente comunicaciones muy limitadas entre los agentes (por medio de leds, por ejemplo) o directamente sin ningún tipo de comunicaciones, con sensores locales (como medidores de distancia infrarrojos) y sin posicionamiento global.

Estas hipótesis de simplicidad de hardware pierden su sentido cuando consideramos aeronaves. Las tareas típicas que se intentan resolver con estos robots requieren de sistemas más sofisticados, como procesamiento de imágenes, posicionamiento global mediante satélites y comunicaciones más complejas. Son por tanto los métodos empleados en enjambres aéreos muy distintos de sus homólogos terrestres, acercándose más a lo que se entiende comúnmente como sistemas multi-robot. Aún así, se espera que un sistema multi-robot denominado de enjambre presente las características distintivas arriba ya comentadas, que lo distinguiría de un sistema multi-robot tradicional. En este artículo se presentarán métodos para tanto sistemas de enjambres aéreos como sistemas multi-UAV, estos últimos menos exigentes en cuanto a robustez, flexibilidad y escalabilidad.

3. Estrategias y métodos

Las tareas resueltas con sistemas multi-robot y enjambres robóticos hacen uso de algoritmos diseñados teniendo en cuenta las particularidades de estos tipos de sistemas. Una gran parte de estos algoritmos están basados, al menos conceptualmente, en una serie de estrategias y métodos básicos que en muchas ocasiones han sido observados en la naturaleza. En esta sección repasaremos brevemente los principales.

3.1. Patrones de movimiento

El mecanismo probablemente más ampliamente usado es el seguimiento de patrones de vuelo previamente determinados. Éstos consisten básicamente en un conjunto de reglas preestablecidas cuya aplicación resulta en patrones de movimiento.

Existen múltiples patrones frecuentemente empleados en el pasado, como el movimiento aleatorio, en espiral, cortadora de césped o por carriles. En la Figura 1(a), se ha representado un ejemplo de movimiento de tipo billar. Los patrones de movimiento se han mostrado útiles en diversas tareas, como la búsqueda, la vigilancia y el mapeo. Sus principales ventajas son la sencillez a la hora de desarrollarlos y su escalabilidad, ya que cada agente toma sus propias decisiones siguiendo dichos patrones; por otro lado, se adaptan mal a los cambios en las condiciones del entorno (por ejemplo, si cambia el número de agentes).

3.2. Campos de potenciales

Estos métodos están basados en los campos potenciales que se pueden encontrar en la naturaleza, como los campos eléctricos o gravitatorios. Se crean campos virtuales generados bien por agentes, obstáculos o puntos de interés de forma que cada agente reaccione de una determinada forma deseada ante ellos, cuya intensidad depende normalmente de la distancia. Un caso típico es crear campos potenciales que creen fuerzas repulsivas en obstáculos de forma que los agentes tiendan a alejarse de ellos (como el representado en la Figura 1(b)), o para mantener distancias apropiadas entre agentes. Al ser un método por lo general reactivo (aunque algunos algoritmos usan dichos campos potenciales para calcular rutas óptimas) se adapta bien a los cambios en el entorno, pese a que puede producir puntos de bloqueo.

3.3. Feromonas virtuales

Las feromonas son sustancias químicas depositadas por algunos seres vivos (como por ejemplo las hormigas) que son usadas como medio de comunicación sencillo (en el caso de las hormigas, marcan un camino que comunica potencialmente una fuente de alimento con el hormiguero). En el caso de la robótica, las feromonas son en la inmensa mayoría de las ocasiones virtuales, esto es, solo existen a nivel computacional en cada uno de las computadoras de los agentes, o en un ordenador central que distribuye dicha información. En robótica terrestre, se pueden encontrar varios ejemplos de feromonas que sí son físicamente depositadas en el entorno, por ejemplo mediante luz (Garnier et al., 2007) o alcohol (Fujisawa et al., 2008). En el caso de la búsqueda aérea, las feromonas virtuales son o bien depositadas o retiradas del entorno a medida que cada uno de los agentes visita una zona del mapa. De esta forma, los robots son guiados a zonas todavía no visitadas de una forma reactiva, y, por lo tanto, fácilmente escalable (ver Figura 1(c)). Aunque las feromonas virtuales han sido usadas para otros tipos de tareas, es en la búsqueda y la vigilancia donde más frecuentemente se han usado.

En la naturaleza, las feromonas suelen ser elementos que tienden a atraer a los miembros del grupo. Sin embargo, en robótica se ha usado este recurso tanto como un foco tractor como repulsivo. Adicionalmente, las feromonas animales sufren de una evaporación, disminuyendo su concentración con el tiempo, además de un fenómeno de dispersión hacia zonas colindantes. En su versión artificial, ambos fenómenos pueden ser o no tenidos en cuenta, modelándolos con distintas ecuaciones ajustadas a la tarea a realizar.

3.4. Redes de comportamientos

También inspiradas en la naturaleza, las redes de comportamiento consisten en conjuntos de módulos con misiones específicas que interactúan entre ellos de forma que las decisiones finales tomadas por cada agente son el resultado de una actividad conjunta. Por ejemplo, uno de esos módulos podría estar dedicado a alejarse de un obstáculo, y otro a dirigirse a zonas no exploradas. Los comportamientos son sencillos de programar a nivel individual, porque los diseñadores solo se deben enfocar en resolver una tarea en concreto. Sin embargo, la dificultad reside en conseguir comportamientos conjuntos que resuelvan la tarea global de forma efectiva. Por otro lado, estos métodos son reactivos en su gran mayoría, por lo que se adaptan bien a los cambios en el entorno.

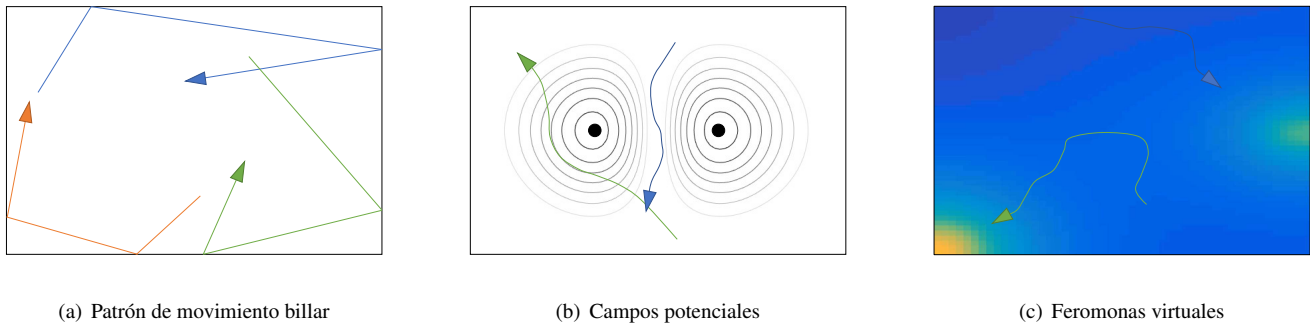
3.5. Optimización de trayectorias

Cuando se dispone de una información lo suficientemente completa del entorno y de los agentes, otra de las posibilidades es implementar algún método de optimización que calcule las mejores acciones a llevar a cabo por parte de los agentes. Por ejemplo, si se desea elaborar un mapa de un cultivo con varios cuadricópteros, se podría calcular previamente las trayectorias óptimas a seguir por cada uno de ellos para cubrir el área de la forma más eficiente posible. Los métodos de optimización empleados para los sistemas multi-UAV son diversos, y van desde el uso de la fuerza bruta o descenso por gradiente, hasta todo tipo de métodos heurísticos, como los algoritmos genéticos o optimización por enjambre de partículas.

La optimización de trayectorias es un método planificado y por lo tanto arroja resultados que son, por lo general, mejores que los métodos reactivos. Dichos algoritmos no permiten obtener resultados realmente óptimos, sino cuasi-óptimos; es decir, no se asegura que sean los mejores posibles, pero sí que sean de alta calidad, teniendo en cuenta limitaciones como calidad de la información del entorno o capacidad de cómputo. Presentan, por otro lado, una serie de inconvenientes que los hacen difícilmente aplicables en muchos casos. Por un lado, la información disponible debe ser lo más completa posible, y no solo la actual en el momento del cálculo, sino que se debe poder prever el estado del entorno durante toda la misión. Incluso si la calidad de la información es alta (lo cual en muchos casos no sucede), cualquier cambio no previsto en el entorno implicaría que las trayectorias antes calculadas dejarían de ser óptimas, ya que estaban basadas en una información ya obsoleta. Por otro lado, estos algoritmos implican un gran coste computacional, por lo que recalcular las trayectorias a medida que se va actualizando la información puede resultar inviable. Además, estos algoritmos escalan muy mal con el número de agentes y la complejidad del escenario debido a que el tamaño del espacio de las posibles soluciones se dispara fácilmente. Por ello, la optimización no se suele ejecutar a bordo de los agentes (que por otro lado, pueden no tener una información completa), sino en un ordenador central, transformando así el sistema en centralizado, con las desventajas que ello conlleva.

3.6. Ecuaciones dinámicas del movimiento

Para tareas con unos requerimientos dinámicos estrictos entre agentes, es usual encontrar algoritmos que se basan en el estudio de las ecuaciones dinámicas de las aeronaves de forma



(a) Patrón de movimiento billar

(b) Campos potenciales

(c) Feromonas virtuales

Figura 1: En la Figura 1(a), ejemplo de patrón de búsqueda de movimiento aleatorio de billar; los agentes vuelan en línea recta hasta llegar a un obstáculo o límite de zona, momento en el cual eligen de forma aleatoria una nueva dirección libre. En la Figura 1(b), dos obstáculos crean dos campos potenciales repulsivos que modifican la trayectoria de los agentes. En la Figura 1(c), dos puntos de interés emiten feromonas virtuales que atraen a los agentes.

conjunta, como un único sistema. Con requerimientos dinámicos estrictos aquí nos referimos a requisitos de posicionamiento o velocidades de referencia que provocan el acoplamiento de los controles de bajo nivel de cada agente. Por ejemplo, en el transporte conjunto de cargas, el movimiento de uno de los agentes tiene una repercusión directa en el movimiento del objeto que ayuda a portar, el cual a su vez impacta en el resto de agentes.

Los métodos basados en el análisis de las ecuaciones dinámicas o cinemáticas del sistema suelen ser complejos matemáticamente, en ocasiones irresolubles. Permiten obtener soluciones muy optimizadas, aunque su aplicación suele ser muy limitada y son sensibles a la precisión del modelo considerado.

4. Tareas cubiertas

4.1. Vuelo en formación

El vuelo en formación (Figura 2(a)) ha sido una de las primeras tareas estudiadas para ser implementada en sistemas multi-robot aéreos. Inspirada en las bandadas de pájaros y en los bancos de peces, la tarea consiste en el movimiento coordinado de un conjunto de agentes de forma que se respete unos intervalos de distancia mínimos y máximos entre los integrantes del grupo. La decisión general de hacia dónde se mueve el grupo se puede tomar de forma conjunta, mediante un líder del grupo, o bien ser fijada de forma externa. Las decisiones individuales del movimiento de cada agente se pueden tomar en un ordenador embarcado de forma descentralizada, o ser enviadas desde un ordenador central que realiza todos los cálculos y conoce el estado de cada agente, en cuyo caso el sistema sería centralizado. Al contrario que en otras tareas, los algoritmos de control aquí propuestos son en general de bajo nivel, es decir, actúan de forma mucho más directa y precisa en el movimiento de los agentes. Es por lo tanto de suma importancia el estudio detallado de la dinámica de los vehículos y una comunicación fiable entre ellos. Además, estos algoritmos se complementan con algún método para evitar colisiones con objetos estáticos, de manera que el grupo se adapta y modifica su trayectoria para evitar el obstáculo sin perder cohesión.

El vuelo en formación tiene tan solo utilidad práctica directa en aplicaciones como los espectáculos visuales (mencionados más adelante) o en misiones militares en las cuales se quiere

reducir la probabilidad de detección o por razones defensivas. Sin embargo, es utilizado por un lado para explorar y estudiar en detalle el control y la dinámica compleja de los sistemas compuestos por múltiples aeronaves, que en muchas ocasiones están expuestos a fuertes perturbaciones y cuya medición de posición y velocidad no está exenta de una incertidumbre relevante. Por otro lado, el vuelo en formación puede ser útil como método a emplear para llevar a cabo otra tarea, como por ejemplo el barrido de un área para buscar objetivos, el mapeado de un área, o el transporte coordinado de objetos.

Probablemente el primer trabajo sobre el movimiento conjunto de agentes fue presentado en 1987 por Craig Reynolds (Reynolds, 1987). Su modelo se basa en una red de comportamientos con tres módulos: separación entre los agentes, alineamiento de las velocidades y mantener cohesión del grupo. Cada agente (virtuales, denominados *Boids*) tiene conocimiento completo del entorno que le rodea, así como de la posición y velocidad de los agentes colindantes. El grupo puede moverse libremente de forma que la dirección predominante surge de la interacción conjunta de los integrantes, o bien seguir a un líder o huir de un agente enemigo, evitando obstáculos en el escenario. Aunque este simple modelo no fue diseñado para robots, ha servido como base para desarrollar una gran cantidad de algoritmos posteriormente.

Un buen ejemplo de vuelo en formación descentralizado de hasta 10 agentes fue presentado en (Vásárhelyi et al., 2014). Cada cuadricóptero conoce su posición y velocidad gracias a la señal GPS y transmite dicha información al grupo mediante un módulo Xbee. El algoritmo está basado en el modelo de Reynolds, configurado para mostrar robustez ante los retrasos en la recepción y procesamiento de la información proveniente de otros agentes (entorno a 0.2-0.4 s). El método también permite configurar al enjambre para que siga a un agente líder o a un objetivo, realizándose ensayos siguiendo trayectorias lineales, rectangulares y circulares. Al igual que con los *Boids*, también es posible el movimiento libre de los agentes, de forma que no se fuerza ningún movimiento predominante.

Más allá del control basado en los comportamientos propuestos por Reynolds, otros trabajos emplean campos potenciales para regular la distancia entre los agentes. En (Bennet et al., 2011) se propone un campo de velocidades creado a partir de dos campos potenciales virtuales de repulsión y guiado. Este

método, aunque más complejo, es más flexible que los anteriormente citados, ya que permite de forma explícita que el grupo se posicione con precisión para formar determinados patrones tridimensionales circulares, o incluso que se muevan y reconfiguren partiendo de un patrón a otro de forma controlada. Otra estrategia, también usada en robótica terrestre, es el guiado del enjambre mediante las ecuaciones hidrodinámicas; de esta forma, el grupo es modelado como un fluido que se mueve por el espacio, y es capaz de adaptarse para esquivar obstáculos (Silic et al., 2018).

Otros métodos basan la estabilidad del grupo en la percepción relativa, generalmente visual, del resto de los agentes. Esto evita la necesidad de transmitir continuamente la información sobre la posición a cada uno de los agentes dentro de un determinado rango, de forma que el método se acerca más al mundo natural (en el cual, por ejemplo, los pájaros solo perciben a los miembros de la bandada situados en su alcance visual). En (Schilling et al., 2018), una red neuronal detecta los cuadrópteros dentro del alcance visual sin necesidad de emplear marcadores haciendo uso de 6 cámaras, empleando el modelo de Reynolds para conseguir el movimiento conjunto de los agentes. La red neuronal es entrenada con un conjunto de datos generados en simulación.

4.2. Cobertura y despliegue

Otras de las tareas más estudiadas mediante grupos de UAVs son la cobertura y el despliegue. La *cobertura*, o 'Coverage' en inglés, consiste en, dada una huella de un sensor o un alcance de un sistema de comunicaciones embarcado en cada uno de los agentes, posicionar cada uno de ellos en localizaciones lo más óptimamente posible. Dicha optimalidad debe ser previamente definida; por ejemplo, suponiendo que los UAVs puedan observar mediante cámaras un determinado espacio bajo ellos, quizá se quieran posicionar los mismos de manera que cubran el mayor espacio posible, evitando la superposición de las imágenes recogidas. Otro ejemplo de cobertura sería el posicionamiento de un conjunto de UAVs para establecer una red de comunicaciones entre dos puntos aislados. En general, la idea de cobertura contempla solo el posicionamiento estático, sin considerar posibles adaptaciones a lo largo del tiempo. El *despliegue* ('Deployment' en inglés) es una tarea muy relacionada con la anterior, que consiste en el estudio del movimiento de los agentes desde un punto inicial hasta puntos finales estáticos. En el despliegue se tienen en cuenta las posibles colisiones entre los agentes durante su movimiento, así como con obstáculos estáticos en el escenario. Ambas tareas se han estudiado conjuntamente en el pasado combinándose: primero se generan los puntos finales donde los UAVs deberían estar situados, para posteriormente generar las trayectorias que los llevarán hasta dichas localizaciones.

En (Saska et al., 2014) se propone resolver la vigilancia de zonas de interés específico en un escenario con obstáculos mediante su cobertura visual desplegando un grupo de cuadrópteros situados inicialmente en una zona concreta. En primer lugar, se determinan las posiciones finales de los agentes evaluando una función de coste minimizada mediante una optimización por enjambre de partículas (*Particle Swarm Optimization*, PSO). A continuación, y teniendo en cuenta las limitaciones dinámicas de los cuadrópteros y los obstáculos, se

generan trayectorias apropiadas para cada agente utilizando el método de grafo de visibilidad.

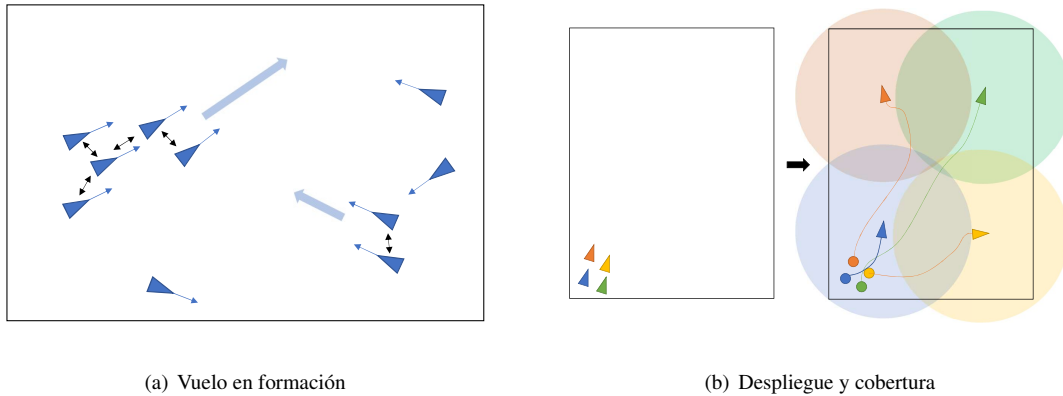
Una técnica extensamente utilizada tanto en robótica aérea como terrestre es la división del área de interés en subregiones mediante diagramas de Voronoi. En (Chen et al., 2017), los agentes están concentrados inicialmente en un punto del mapa. Se subdivide el área en celdas de Voronoi, que inicialmente no son iguales. Mediante comunicaciones locales y de forma distribuida, los agentes se mueven progresivamente de forma que el tamaño de dichas celdas se van igualando. La ventaja de esta técnica es que es distribuido y se adapta bien a los cambios del número de agentes. Otros trabajos, como (Savkin and Huang, 2019), realizan la distribución del espacio de forma centralizada, por lo que son potencialmente más rápidos y efectivos en su ejecución, aunque el sistema pierde escalabilidad y flexibilidad.

Otra de las implementaciones de estas tareas es el establecimiento de una conexión inalámbrica entre dos puntos, o dando cobertura a una determinada zona (despliegue de red). En (Reina et al., 2018) se propone un método de despliegue para conectar un gran número de nodos y que pondera tres objetivos: cobertura, tolerancia al fallo y redundancia. La posición óptima de los cuadrópteros es obtenida mediante un algoritmo genético con varias subpoblaciones que evolucionan paralelamente e intercambian ciertos miembros. Con un objetivo similar, en (Hauert et al., 2008) se despliegan 15 UAVs de ala fija que automáticamente vuelan de forma que puedan establecer comunicación entre una base y un usuario cuya localización no se conoce previamente. Lo más interesante de este trabajo es que los agentes no conocen su posición global (no disponen de GPS), tan solo su orientación y altura, y que el algoritmo es completamente distribuido. El sistema no solo es capaz de realizar su tarea satisfactoriamente a pesar de la sencillez de los agentes, sino que además es capaz retraerse una vez la misión finaliza, es decir, que los agentes son capaces de volver al punto base de forma autónoma.

Como se puede comprobar, muchos de estos trabajos están basados en técnicas de optimización y son, por lo tanto, centralizados. Estas propuestas tienen dos claros inconvenientes: son difícilmente escalables, ya que la optimización se vuelve más compleja al aumentar el número de agentes, y son poco robustos y flexibles, ya que cualquier cambio en las condiciones del escenario (número de agentes, cambios en las condiciones de cobertura) obliga a optimizar de nuevo las posiciones y trayectorias, y enviar la información a los agentes.

4.3. Exploración, búsqueda y vigilancia

La resolución de estas tareas por medio de un grupo de vehículos aéreos es de especial interés por las capacidades intrínsecas de las aeronaves, que les permite cubrir grandes espacios de terreno rápidamente, no viéndose afectadas por la orografía. En la *exploración* (Figura 3(a)), los agentes deben moverse de forma coordinada para descubrir los límites de un determinado espacio, generalmente cerrado, como por ejemplo el interior de un edificio. Es por ello, que la exploración con UAVs ha sido mucho menos estudiada que otro tipo de tareas. La tarea de *búsqueda* consiste en cubrir un espacio, cuyos límites en principio se consideran como conocidos, para encontrar los elementos buscados, como por ejemplo personas u objetivos (Figura 3(b)). Generalmente durante la búsqueda, cada porción



(a) Vuelo en formación

(b) Despliegue y cobertura

Figura 2: En la Figura 2(a), ejemplo esquemático de vuelo en formación; algunos agentes se agrupan manteniendo ciertas restricciones de distancia y dirección de vuelo; se pueden formar varios grupos, e incluso que algunos agentes vuelen de forma libre. En la Figura 2(b), ejemplo de despliegue y cobertura; al inicio, los agentes se encuentran agrupados, y deben desplegarse para cubrir de la mejor manera posible el área de interés.

de espacio debe ser observado una única vez, si se considera que la probabilidad de detección de un objetivo al ser observado es igual a 1; sin embargo, si dicha probabilidad es menor, o si se considera que los objetivos son móviles, será necesario barrer el área más de una vez. Muy relacionada con esta última misión es la *vigilancia*, que es básicamente una búsqueda repetida indefinidamente en una zona delimitada (Figura 3(c)). Se asume en esta tarea que los objetivos pueden aparecer en cualquier momento en la zona de interés, por lo que es necesario barrer continuamente dicha área actualizando la información de la que se dispone. Un caso particular de la vigilancia es el *patrullaje*, que consiste en vigilar zonas que no se pueden considerar como puramente bi o tridimensionales (por ejemplo, un contorno de una zona protegida, los pasillos de un edificio, o las calles de una ciudad).

Dado que en estas tareas el espacio físico, ya sea una superficie o un volumen, es un papel clave en el desarrollo de la misión, es muy común plantear una subdivisión del mismo mediante una malla bi o tridimensional. Los agentes por lo tanto se moverían entre los nodos de dicha malla para llevar a cabo la tarea, siendo el número de posibles decisiones limitado.

4.3.1. Exploración

Un proyecto interesante de exploración espacial usando un equipo de drones fue presentado en (St-Onge et al., 2019). En la zona de ensayos PANGAEA-X de la Agencia Espacial Europea (ESA), el equipo experimentó el uso de un enjambre de cuadricópteros heterogéneo para explorar zonas desconocidas en un entorno similar al lunar o marciano. El operador podía comandar la flota de dos maneras: bien indicando waypoints a ser seguidos por los cuadricópteros, o bien marcando zonas de interés en el mapa y dejando que el propio sistema se organizase de forma autónoma y descentralizada, y comandase los movimientos de los agentes. La eficiencia con la que se llevaron a cabo las distintas pruebas así como la carga cognitiva del operador fueron medidas, mostrando que el sistema con mayor grado de automatización era mejor.

Con la intención de recoger datos de nubes tipo cúmulus para poder generar modelos más realistas, en (Verdu et al., 2019) se analizan posibles patrones de vuelo para delimitar su perímetro o recabar información de su interior.

En un entorno de interiores, en (Mahdoui et al., 2017) se plantea un algoritmo de exploración con un grupo de microdrones. Dicho algoritmo es distribuido, y considera que cada dron está equipado con una cámara RGB-D mediante la cual van generando un mapa. Los agentes comparten datos entre ellos y mediante una función de utilidad eligen puntos en la frontera conocida para ir explorado el espacio desconocido.

4.3.2. Búsqueda

En cuanto a la búsqueda, en (García-Aunon and Barrientos, 2018a) los autores presentan un algoritmo basado en comportamientos para sistemas aéreos en enjambres para labores de búsqueda en espacios abiertos con forma rectangular. Dicho algoritmo está compuesto por 6 comportamientos: búsqueda basada en feromonas, mantener distancia, volar en formación, conservar energía, evitar colisiones y moverse en dirección diagonal. Los parámetros pueden ser optimizados y adaptados a diferentes escenarios (García-Aunon and Barrientos, 2018b) (diferente número de agentes, velocidades, tamaños de huella del sensor, tamaño del escenario y forma). La solución es comparada con distintos patrones de búsqueda, obteniendo mejores resultados.

En (Cimino et al., 2015), se combina el depósito de feromonas al detectar un objetivo con comportamientos de movimiento coordinado con otros agentes (separación, alineamiento y cohesión) y evitación de obstáculos. Se estudian diversos escenarios con distinto número de obstáculos y objetivos, analizando el tiempo tardado en la búsqueda con hasta 200 drones. En (Oh and Suk, 2010), los autores proponen usar una red neuronal para guiar un grupo de UAVs hacia zonas no visitadas usando como agente repelente las feromonas depositadas por los mismos.

Basado en un conjunto de 4 comportamientos (seguimiento de contorno, evitación de colisión, descenso de gradiente y movimiento aleatorio) que son evaluados de forma continua, en (Erignac, 2007) se resuelve de forma satisfactoria la búsqueda en un área mallada. Por otro lado, en (Maza and Ollero, 2007), el espacio es dividido en zonas y cada una de ellas asignada a cada uno de los drones disponibles, los cuales los recorren de forma ordenada siguiendo un patrón establecido. También me-

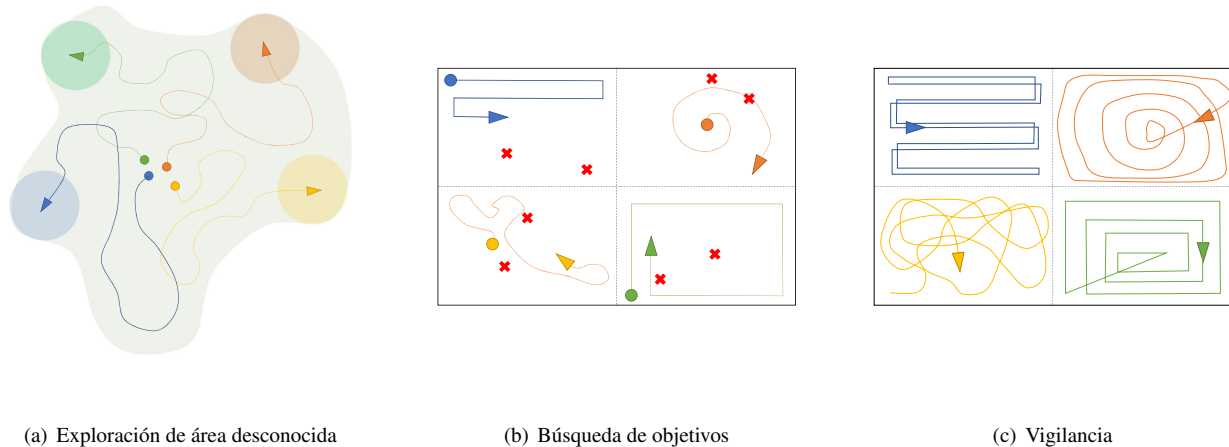


Figura 3: En la Figura 3(a), exploración de un área desconocida; en un primer momento, los agentes se encuentran localizados en una zona, y deben moverse de forma que exploren el área a su alrededor para descubrir potenciales puntos de interés. En la Figura 3(b), ejemplo de búsqueda en un área delimitada; una de las posibles técnicas es asignar zonas de igual tamaño a los distintos agentes, los cuales se moverán (siguiendo patrones o cualquier otra estrategia) para localizar posibles objetivos. En la Figura 3(c), ejemplo de vigilancia, que es básicamente una búsqueda que se repite de forma continuada.

dianete patrones establecidos, en (George et al., 2011) se comparan tres estrategias distintas: movimiento aleatorio, movimiento en líneas y mallado de área.

En lo relativo al uso de métodos basados en optimización, en (Perez-Carabaza et al., 2018) se propone el uso de un algoritmo de colonia de hormigas (*Ant Colony Optimization, ACO*) para encontrar y planificar trayectorias que maximizan la probabilidad de encontrar un objetivo. Este método tiene la bondad de ser óptimo durante una ventana de tiempo futura y de poder incluir una creencia previa sobre la posible localización de objetivos. Sin embargo, al igual que otros métodos basados en optimización, el coste computacional crece rápidamente con el número de UAVs, amplitud de los pasos temporales (longitud de la trayectoria planificada) y tamaño del área. Un trabajo similar puede encontrarse en Lanillos et al. (2014), también basado en ventanas temporales deslizantes y optimización descentralizada.

4.3.3. Vigilancia

Como se ha mencionado anteriormente, la vigilancia guarda una estrecha relación con la búsqueda, ya que no es más que una búsqueda que debe repetirse con cierta frecuencia para satisfacer unos requisitos mínimos de actualización de la información de interés. Tanto es así, que muchos de los métodos empleados en la vigilancia son aplicables a la búsqueda, o necesitan pequeñas variaciones para ser utilizable en ambas tareas.

Por ejemplo, en (García-Aunon et al., 2019a) se presenta una modificación del algoritmo de búsqueda basado en comportamientos (ya comentado en el apartado anterior) para adaptarlo a la vigilancia. El método es testeado en un banco de ensayos de interiores con hasta 8 drones y se plantea un caso real en el que se debe detectar y observar intrusos (robots terrestres) en la zona vigilada. Por otro lado, otra variante del mismo algoritmo original ha sido usado para la detección de coches

en una ciudad virtual denominada *SwarmCity* (García-Aunon et al., 2019b), (Roldán et al., 2019). Otros trabajos, como (Qu et al., 2015), emplean de forma intensiva feromonas virtuales para guiar a los agentes en la zona de búsqueda. Dichos agentes no se limitan a reaccionar con la concentración de las mismas, sino que depositan o retiran de forma apropiada.

Por otro lado, en (Nigam et al., 2011), cada uno de los agentes selecciona la próxima celda a la que dirigirse siguiendo una política basada en la edad de la información y en las celdas seleccionadas por los otros agentes. El algoritmo es evaluado midiendo la edad media de la información de todo el área y se muestran datos experimentales en un banco de ensayos con hasta 8 cuadricópteros.

En otros trabajos, como en (Li, 2015) los drones siguen un patrón establecido volando en formación para barrer de forma periódica la zona de vigilancia. En (Acevedo et al., 2013), el área irregular a vigilar se divide en porciones y son asignadas de forma distribuida empleando comunicaciones uno a uno; si el número de agentes cambia, el sistema se reconfigura para reasignar los espacios de vigilancia de forma equilibrada.

4.4. Tareas de salvamento y rescate

Comprenden un conjunto de distintas tareas necesarias para misiones de salvamento, tales como la búsqueda de personas desaparecidas en alta mar o en zonas montañosas, el rastreo de zonas donde ha ocurrido una catástrofe en busca de supervivientes, o la creación de redes de comunicaciones para dar cobertura a equipos de rescate. En el pasado se han utilizado UAVs para estas tareas en escenarios reales, pero su utilidad se ha limitado en casi todos los casos a proporcionar imágenes desde un punto elevado, siendo los UAVs controlados manualmente de forma individual. Sin embargo, los sistemas multi-UAV autónomos podrían ser de gran utilidad en un futuro no muy lejano.

En el caso específico de la implementación de estos sistemas para salvamento y rescate, existen diversos aspectos particulares a tener en cuenta. Por un lado, los entornos considerados son realistas y, por lo tanto, más complejos. Considérese por ejemplo la búsqueda de una persona desaparecida en un entorno montañoso; si se despliega un grupo de UAVs, se deberá tener en cuenta que la orografía está alejada de ser plana, existen diversos obstáculos a evitar (como árboles, cambios de altura, salientes rocosos o edificios) y es posible que las comunicaciones entre agentes o entre agentes y el puesto de control se vean ocluidas. Por otro lado, la percepción del entorno no se puede considerar como ideal; no es lo mismo detectar a una persona perdida en un bosque denso con poca visibilidad desde un punto elevado que detectarla en una zona llana sin vegetación. En general, se puede decir que los algoritmos multi-UAV desarrollados específicamente para búsqueda o vigilancia obvian la complejidad de un escenario real propio de misiones de rescate.

En (Waharte and Trigoni, 2010) se propone el uso de cuadrópteros para la búsqueda de personas desaparecidas en entornos naturales. Se divide el área de búsqueda con una cuadrícula y a medida que los agentes van observando las distintas zonas, el mapa de densidad de probabilidad de encontrar un objetivo se actualiza utilizando métodos bayesianos. Dicho mapa de probabilidad puede ser inicializado dependiendo de las características naturales; por ejemplo, encontrar a una persona perdida en las inmediaciones de un camino es más probable que encontrarla en medio de un río. En este trabajo se comparan 3 estrategias para comandar a los agentes: heurístico voraz, basado en campos potenciales y procesos de Markov parcialmente observables. En un entorno de simulación donde se tienen en cuenta oclusiones por la presencia de obstáculos (como por ejemplo árboles), se prueban los tres algoritmos, siendo los procesos de Markov la solución con mejor resultado, aunque requiere una potencia de cálculo que puede llegar a ser excesivo. Un ejemplo muy realista de apoyo de un UAV en la búsqueda de una persona perdida en un entorno complejo se presenta en (Niedzielski et al., 2018).

En casos de desastres naturales como terremotos o inundaciones, los sistemas multi-UAV también han demostrado ser potencialmente útiles. En (Beck et al., 2018) se plantea el despliegue de un grupo de UAVs que buscarían de forma autónoma a posibles supervivientes generando trayectorias óptimas basadas en la señal de los teléfonos móviles personales. Para validar el método propuesto, se estudia su comportamiento en una simulación realista basada en el terremoto que asoló Haití en 2010.

Como se ha mencionado anteriormente, una de las tareas prácticas del despliegue y cobertura es proporcionar conectividad en zonas remotas o aisladas debido a algún desastre natural que ha inhabilitado las infraestructuras de comunicaciones. Los sistemas multi-UAV pueden ser empleados tanto para comunicar bases terrestres separadas, o bases terrestres con un grupo de UAVs trabajando en la zona de desastre (Tuna et al., 2014), como para proporcionar cobertura de comunicaciones a cualquier usuario que lo requiera (Zhao et al., 2019).

4.5. Monitorización del medio ambiente y agricultura

En esta sección se cubren todas aquellas tareas relacionadas con la observación y acción sobre el medio ambiente para

su monitorización y protección. Adicionalmente, se ha incluido tareas relativas a la agricultura y la ganadería. Como sucedía en las tareas de salvamento y rescate, se aplican para estas misiones métodos y algoritmos que muy similares a los empleados para búsqueda y vigilancia.

Los incendios forestales son catástrofes naturales (en ocasiones provocadas) que por desgracia ocurren cada vez de manera más frecuente debido a la crisis climática. La monitorización preventiva de zonas sensibles a los incendios, la detección y alerta temprana de posibles focos, el seguimiento de un fuego declarado y el apoyo a las labores de extinción, el control de daños de la zona afectada, o incluso el reconocimiento de posibles culpables en casos de incendios provocados, son tareas que podrían verse claramente beneficiadas con el uso de sistemas multi-UAV (Stavros et al., 2019), (Twidwell et al., 2016), Carrasco et al. (2020). Todas estas tareas tienen las características de ser muy extensas y dispersas (por ejemplo, varios focos de fuego, o distintas direcciones de avance), además de ser peligrosas, por lo que existe cierta probabilidad de pérdida de algún agente. Es por ello que los sistemas redundantes, flexibles y no pilotados, con gran capacidad de paralelización, como los aquí estudiados, son especialmente útiles.

Una tarea similar a la detección de incendios y la determinación de su perímetro es la detección de vertidos en el mar. Entre los muchos trabajos dedicados a este tema, se puede destacar (Odonkor et al., 2019), en el cual un enjambre de drones es desplegado desde un barco en la zona de búsqueda, dividida con una malla de ocupación y que contiene la información sobre la probabilidad de que haya un vertido o no en cada celda. El algoritmo consta de tres fases: fase de exploración, el al cual los agentes se mueven por el mapa en busca de vertidos de forma aleatoria recopilando los datos iniciales; fase de mapeo, en la cual se utiliza la información ya obtenida para moverse por el mapa de forma más inteligente; y fase de seguimiento de límite del vertido, en la cual se delimita y monitoriza los vertidos encontrados. El algoritmo es distribuido y los requerimientos de comunicaciones entre los agentes son bajos.

También se ha estudiado en el pasado el uso de múltiples agentes aéreos para realizar mediciones meteorológicas (Reuder et al., 2012), tomar muestras biológicas en búsqueda de patógenos con dos UAVs de forma coordinada (Techy et al., 2010), localizar fuentes de emisión de gases contaminantes (Fu et al., 2019) o monitorizar el nivel de polución del aire con grupos grandes de cuadrópteros (Alvear et al., 2017).

Finalmente, cabe destacar el uso de los sistemas multi-UAV en la agricultura, tareas de especial relevancia por su impacto económico directo (Ju and Son, 2018). Este tipo de tareas suele ser más planificable y, por lo tanto, no se requiere en general un sistema altamente flexible y adaptable a cambios imprevistos. Por lo tanto, una de las bondades de los enjambres robóticos no resulta de especial interés en este campo, no así su alta capacidad de paralelizar tareas. En Barrientos et al. (2011) se elabora un mapa de la zona de cultivo de forma conjunta; primero, se subdivide la zona en tantas partes como robots aéreos haya disponibles, para a continuación planificar las trayectorias óptimas para cada agente; finalmente, el mosaico de fotos obtenido es postprocesado para elaborar el mapa completo del cultivo. En (Albani et al., 2017) un enjambre de drones es utilizado para monitorizar el crecimiento de malas hierbas en cultivos. El

área es dividida en cuadrículas, y la función de probabilidad de densidad de malas hierbas se va actualizando a medida que los agentes van observando repetidamente las celdas. En cuanto al control del movimiento, cada agente decide qué celda visitar a continuación basándose en una función de probabilidad que tiene en cuenta la distancia a dicha celda y su estimación de densidad, excluyendo celdas ya escogidas por otros agentes.

4.6. Mapeo y reconstrucción visual

Mapear significa construir un mapa virtual con la información relevante que se desea a partir de una realidad física, como por ejemplo la elevación de un terreno para su estudio topológico. Muchas de las tareas de mapeo ya han sido estudiadas en las secciones anteriores; por ejemplo, una búsqueda de un objetivo en una zona, o la detección de malas hierbas en un campo cultivado, se podrían considerar también como mapeos.

La reconstrucción visual consiste en la elaboración de un modelo, generalmente tridimensional, de un objeto. Para ello, en primer lugar se debe recopilar información geométrica de dicho objeto, esto es, recoger la información para colocar en el espacio las distintas geometrías que componen el objeto. En segundo lugar y opcionalmente, se pueden tomar imágenes referenciadas del objeto para usarlas como textura en el modelo final resultante. En el caso de los sistemas multi-UAVs, la reconstrucción se suele hacer de objetos de gran tamaño que de llevarse a cabo con un solo agente requerirían mucho tiempo.

Una tarea muy estudiada en estos últimos años, sobre todo con agentes terrestres, es el mapeo y localización simultánea (*Simultaneous localization and mapping, SLAM*). Dicha tarea consisten en explorar un entorno desconocido recopilando información geométrica del mismo (generalmente distancias hasta obstáculos u objetos), elaborándose un mapa durante dicho proceso a la vez que el agente es capaz de localizarse en dicho mapa en construcción. El SLAM permite a agentes móviles planificar trayectorias sobre mapas incompletos en construcción.

Un tema vital y característico en estas misiones en cruzamiento y la fusión de los datos. En muchos casos, la información obtenida por cada agente es recibida en un servidor central, que la procesa y distribuye entre todos los agentes.

Un problema típico que puede resolverse paralelizándolo es la elaboración de un mapa visual de un terreno. En (Santamaría et al., 2013), el área en cuestión es subdividido en porciones asignadas a cada agente, teniendo en cuenta zonas no volables y distintas huellas de la cámara. En otro trabajo con el mismo objetivo (Lyu et al., 2015), la elaboración del mapa se realiza con el movimiento coordinado de los agentes, de manera que el espacio es barrido de forma coordinada. En el caso de que se desee mapear una zona con muy poca recepción de un sistema GNSS (como por ejemplo un cañón profundo), se ha propuesto en el pasado utilizar parejas de UAVs (Cledat and Cucci, 2017). Un cuadricóptero volaría a mayor altura donde la recepción de la señal para el posicionamiento global fuera aceptable, mientras que otro realizaría dicho mapeo a menor altura, utilizando al primero para conocer su posición global con precisión.

En (Cole et al., 2010) se estudia el uso de un sistema multi-UAV de ala fija para mapear el terreno identificando ciertas características y construir un mapa común de forma autónoma y descentralizada. Los ensayos reales se llevaron a cabo mediante un sistema compuesto por 2 aviones que reconocían objetivos

de color blanco, reduciendo la incertidumbre de su localización a medida que se van observando durante más tiempo; se demuestra empíricamente que cuando los dos agentes toman decisiones conjuntamente, la eficiencia de la misión aumenta.

Otros ejemplos de mapeo con estos sistemas son la detección y reconstrucción de obstáculos para dar soporte a agentes terrestres (Kim et al., 2014), la realización de mapas de radiación en caso de catástrofe (Han et al., 2013), o el mapeo 3D de grandes áreas con estructuras tales como edificios (Darrah et al., 2017).

En el caso de la reconstrucción visual, en (Hinzmann et al., 2016) se utiliza un grupo heterogéneo de vehículos no tripulados para realizar una reconstrucción tridimensional georeferenciada de una zona tras una catástrofe, que es proporcionada al equipo de rescate, ayudando en las labores de planificación. En (Zheng et al., 2018) la reconstrucción que se lleva a cabo es de un edificio, obteniéndose un modelo con gran precisión.

Entre los trabajos que estudian el uso de sistemas multi-UAV para SLAM, cabe destacar (Schmuck and Chli, 2017). En dicho trabajo, los agentes recopilan información visual del entorno y lo envían a un ordenador que ejerce de servidor. Dado que el tratamiento de toda la información proveniente de cada uno de los agentes es pesado computacionalmente, se lleva a cabo en dicho servidor. El mapa completo es actualizado por este ordenador central, que solo distribuye información local a cada agente para disminuir las necesidades computacionales a bordo de cada cuadricóptero. Se presentan resultados experimentales con dos drones movidos manualmente en un entorno de interiores, y con 4 drones en exteriores. Este método tiene la desventaja de ser centralizado, es decir, de requerir una conexión continua con un punto central. En otro interesante trabajo (Cieslewski et al., 2018), se propone un método completamente descentralizado. Aunque elimina el punto central de la arquitectura del sistema, las comunicaciones son ahora agente a agente, por lo que su complejidad aumenta al aumentar su número. Los autores sin embargo consiguen que con el método propuesto las comunicaciones solo crezcan linealmente con el número de robots.

4.7. Transporte

Si se desea transportar una carga de un punto a otro, utilizar métodos aéreos presenta grandes ventajas. Ahora bien, si la carga es demasiado pesada para un solo vehículo aéreo, o se desea disponer de cierta robustez en el transporte, el uso de más de un vehículo puede ser necesario.

Una gran parte de los trabajos que estudian el transporte conjunto de cargas lo hacen estudiando con detalle la dinámica del sistema compuesto por cada uno de los agentes y la carga, considerando uniones carga-agente mediante cables. Este tipo de uniones es complejo de modelar debido a que éstos no funcionan a compresión, por lo que el sistema se convierte en híbrido, dificultando el análisis de las ecuaciones de la dinámica. Por otro lado, en muchos trabajos se necesita conocer la posición de cada agente y de la carga en todo momento con gran precisión y una alta frecuencia, incluso se requiere calcular sus derivadas de alto orden. Esta información se puede obtener en bancos de ensayos de interiores mediante un sistema visual de seguimiento de movimiento, pero es mucho más complicado en exteriores.

El transporte de una masa puntual y de un cuerpo rígido suspendidos por cables mediante n cuadricópteros es abordado en (Sreenath and Kumar, 2013). Se analizan las ecuaciones dinámicas del sistema, separando el caso de una masa puntual y de un cuerpo rígido, y los casos especiales $n = 1$ para el primer tipo de carga, y $n = 3$ para el segundo. Demostrando que estos sistemas son diferencialmente planos y que son sistemas híbridos diferencialmente planos, se calculan trayectorias válidas teniendo en cuenta tensiones de cable mayores o iguales a cero, de manera que la carga se coloque en la posición y orientación deseada. Se llevaron a cabo tanto pruebas simuladas como experimentales en un banco de ensayos de interiores con un sistema de captura de movimiento.

En (Rastgoftar and Atkins, 2018), los cables son substituidos por una estructura rígida ligera, de forma que los esfuerzos de compresión sí pueden ser transmitidos a la carga. El método propuesto es descentralizado haciendo uso de un grafo de comunicaciones, escalable, asegura la evitación de colisiones y puede transportar tanto cargas rígidas como deformables, aunque requiere de un medidor de fuerza en la estructura que soporta la carga. Existen una notable cantidad de trabajos que, al igual que el aquí mencionado, requieren de uniones rígidas entre la carga y los agentes. En otro trabajo (Wang et al., 2018) se va más allá y, suponiendo también uniones rígidas con la carga pero sin necesidad de medir la tensión de éstas, el transporte se consigue de forma completamente descentralizada y sin comunicaciones entre agentes, pudiéndose seguir trayectorias dadas en entornos complejos.

En cuanto a entornos exteriores, cabe destacar el trabajo presentado en (Bernard et al., 2011), en el cual se transporta una carga de 4 kg mediante tres helicópteros autónomos en un campo de vuelo abierto, usando solo como sistema de posicionamiento la señal de GPS. Durante los tests, se midieron velocidades de viento de 30 km/h e incluso rachas de 50 km/h, demostrando el sistema una gran robustez.

4.8. Otras tareas

En este apartado se cubren tareas menos estudiadas, con menor impacto socio-económico o cuya implantación presenta complicaciones aún no resueltas.

En el campo de la construcción mediante robots aéreos, es de especial relevancia el trabajo llevado a cabo en los últimos años por el Instituto Técnico de Zúrich (*ETH*). Por un lado, se ha demostrado la viabilidad de levantar puentes colgantes de cuerdas entre dos puntos separados por unos 10 m (Mirjan et al., 2013). Un grupo de tres cuadricópteros¹ van tejiendo el puente entre dos estructuras tubulares a ambos lados de forma completamente autónoma, haciendo nudos con las cuerdas para que la estructura resultante sea segura. Una vez finalizado, se comprueba que el puente es capaz de aguantar el peso de una persona, que puede pasar a través de él con seguridad. Por otro lado, también se propone la construcción de estructuras cerradas compuestas por bloques similares a los ladrillos (Augugliaro et al., 2014). Cuatro cuadricópteros vuelan a una zona de recogida de los ladrillos de foam y los colocan ordenadamente para construir la fachada de un edificio de 6 metros de altura. El

proceso dura unas 18 horas y los cuadricópteros pueden volver a recargar sus baterías a cuatro estaciones de forma autónoma.

En el entorno espacial, el despliegue de sistemas multi-robot ha sido propuesto para múltiples tareas. Dichos sistemas espaciales presentan las mismas ventajas e inconvenientes que sus homólogos aéreos, pero con el problema añadido de su alto coste de despliegue, aunque actualmente se han realizado despliegues de decenas e incluso cientos de satélites con un mismo lanzador. Algunos trabajos (Hadaegh et al., 2014) incluso proponen el uso de centenares o incluso miles de femtosatélites (con un peso menor de 100 gramos) que podrían ser usados para crear sensores de un tamaño mucho más grande que el que se conseguiría con un solo satélite, crear redes de comunicaciones (proyecto actualmente en marcha por SpaceX denominado Starlink), o como redes de sensores distribuidos.

La última tarea o aplicación citada en este artículo es la más impresionante visualmente y la más conocida por el público en general: los espectáculos visuales con drones. En estas exhibiciones, que se han hecho virales en los últimos 5 años, un conjunto de cientos de drones equipados con leds se mueven de forma coordinada para formar imágenes en el cielo que son visible desde kilómetros de distancia. Debido a que estos sistemas son desarrollados y explotados por empresas privadas, no hay mucha información disponible sobre cómo se consiguen coordinar tales cantidades de agentes ni como se posicionan en el espacio con tanta precisión. Sin embargo, es muy probable que las trayectorias sean calculadas durante la preparación previa del espectáculo, y la coordinación de todos los agentes se lleve a cabo bien por una señal de sincronización desde un ordenador central, o bien con los relojes internos de cada robot. En cuanto al posicionamiento, en interiores se usa bien odometría visual (con un suelo con una textura apropiada) o un sistema de posicionamiento visual o por radio frecuencia. En cuanto a su uso en exteriores, algunas empresas usan sistemas RTK-GPS (Real Time Kinematics) para conseguir errores de posicionamiento entorno a 5 cm. El actual record de número de estos drones coordinados al mismo tiempo lo ostenta Intel, que el 15 de julio de 2018 consiguió poner en vuelo 2066 drones Shooting Star simultáneamente por su 50 aniversario en California, EEUU.

5. Futuro de los sistemas multi-UAV

En este artículo se ha intentado transmitir una idea general de las posibles tareas que se podrían resolver con grupos de UAVs, así como sus ventajas, inconvenientes y posibles retos a resolver. Aunque los beneficios sociales y económicos son claros, a día de hoy prácticamente ninguno de estos sistemas están siendo usados de forma práctica real, a excepción de los espectáculos aéreos (entiéndase los sistemas con un grupo de UAVs operando simultáneamente). La razón principal es las restricciones legislativas actuales en la mayoría de los países. Dichas limitaciones, aunque también pesan sobre el uso individual de los UAVs, acaban siendo especialmente restrictivos cuando el sistema es altamente automatizado y compuesto por muchas aeronaves. Por ejemplo, el Real Decreto 1036/2017, normativa vigente en España a día de hoy, establece

¹Vídeo disponible de la construcción y prueba del puente: <https://youtu.be/CCDIuZUFETc>

en su Artículo 29, punto 3, que "El piloto y los observadores no podrán realizar sus funciones respecto de más de una aeronave pilotada por control remoto (RPA) al mismo tiempo". Es decir, que debe haber un piloto habilitado supervisando a cada aeronave, lo que casi imposibilita de facto la viabilidad económica y práctica de muchos de los sistemas aquí estudiados. Otro problema adicional es la existencia de una preocupación generalizada sobre el impacto en la privacidad si estos sistemas se extendiesen sobre zonas pobladas.

Parece claro que la próxima industria en empezar a explotar las aeronaves no tripuladas será la del transporte de paquetería. La población demanda cada vez más productos pedidos por internet que sean entregados a las pocas horas, por lo que su entrega por medios aéreos presenta claras ventajas medioambientales y de liberación del espacio público. Desde hace años se vienen usando estos sistemas en zonas con muy poca población y con infraestructuras de comunicación de superficie limitadas para el envío urgente de medicamentos, como en Ruanda, Congo y en algunas islas del Pacífico. Por otro lado, en el pasado sí se han hecho múltiples pruebas puntuales en otras partes del mundo, pero no ha sido hasta principios de 2019 cuando se ha otorgado el primer permiso comercial por parte de la Autoridad Civil de Seguridad Aérea de Australia a una empresa. *Project Wing*, perteneciente a Google, podrá transportar pequeños paquetes de comida, bebida o medicamentos sobre la ciudad de Camberra tras 18 meses de pruebas. A esta aprobación le siguió meses después otra de la agencia homóloga estadounidense para poder operar en Virginia. Amazon también está realizando esfuerzos considerables por implantar su sistema *Prime Air*, que promete entregas de paquetes de hasta 5 libras de peso en menos de 30 minutos.

También existen limitaciones técnicas o, al menos, aspectos técnicos que deben desarrollarse para el uso seguro de los UAVs para todas las tareas en general. Por ejemplo, la navegación segura y ágil en entornos complejos como calles o espacios con vegetación, la integración en el espacio aéreo controlado, el desarrollo de mecanismos de seguridad que eviten el impacto con aeronaves tripuladas, y mecanismos que mitiguen la posibilidad de causar daños a terceros en caso de accidente (por ejemplo, mediante el uso de paracaídas). Las tareas más complejas que pueden requerir equipos de UAVs grandes, como la búsqueda y la vigilancia, requieren de más investigaciones especialmente en términos de comunicaciones entre los agentes y capacidad de cómputo a bordo para asegurar que el sistema es completamente distribuido.

En los últimos años la legislación vigente ha ido avanzando de forma notable, y se esperan pasos importantes en el desarrollo del marco jurídico en los años venideros. Es de imaginar que a medida que los órganos reguladores vaya recopilando evidencias de que los sistemas automatizados son fiables, así como desarrollando procedimientos de certificación adecuados, la regulación irá permitiendo realizar actuaciones más complejas. También el desarrollo y la implantación de algunas tecnologías como el 5G jugarán un papel clave en el uso de estos sistemas.

Agradecimientos

Las investigaciones que han dado como resultado este trabajo han sido financiadas por RoboCity2030-DIH-CM, 426 Ma-

drid Robotics Digital Innovation Hub, S2018/NMT-4331, financiadas por los Programas de Actividades I+D en la Comunidad Madrid, y por el proyecto TASAR (Team of Advanced Search And Rescue Robots), PID2019-105808RB-I00, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Gobierno de España).

Referencias

- Acevedo, J. J., Arrue, B. C., Maza, I., Ollero, A., 2013. Cooperative large area surveillance with a team of aerial mobile robots for long endurance missions. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 70 (1-4), 329–345.
- Albani, D., Jsselmuiden, J., Haken, R., Trianni, V., 2017. Monitoring and mapping with robot swarms for agricultural applications. In: 2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). IEEE, pp. 1–6.
- Alvear, O., Zema, N. R., Natalizio, E., Calafate, C. T., 2017. Using uav-based systems to monitor air pollution in areas with poor accessibility. *Journal of Advanced Transportation* 2017.
- Augugliaro, F., Lupashin, S., Hamer, M., Male, C., Hehn, M., Mueller, M. W., Willmann, J. S., Gramazio, F., Kohler, M., D'Andrea, R., 2014. The flight assembled architecture installation: Cooperative construction with flying machines. *IEEE Control Systems Magazine* 34 (4), 46–64.
- Barrientos, A., Colorado, J., Cerro, J. d., Martínez, A., Rossi, C., Sanz, D., Valente, J., 2011. Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots. *Journal of Field Robotics* 28 (5), 667–689.
- Beck, Z., Teacy, W. L., Rogers, A., Jennings, N. R., 2018. Collaborative online planning for automated victim search in disaster response. *Robotics and Autonomous Systems* 100, 251–266.
- Bennet, D. J., MacInnes, C., Suzuki, M., Uchiyama, K., 2011. Autonomous three-dimensional formation flight for a swarm of unmanned aerial vehicles. *Journal of guidance, control, and dynamics* 34 (6), 1899–1908.
- Bernard, M., Kondak, K., Maza, I., Ollero, A., 2011. Autonomous transportation and deployment with aerial robots for search and rescue missions. *Journal of Field Robotics* 28 (6), 914–931.
- Carrasco, Á. M., Novoa, S. C., Al-Kaff, A., Fernández, F. G., Gómez, D. M., de la Escalera Hueso, A., 2020. Vehículo aéreo no tripulado para vigilancia y monitorización de incendios. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*.
- Chen, S., Li, C., Zhuo, S., 2017. A distributed coverage algorithm for multi-uav with average voronoi partition. In: 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE, pp. 1083–1086.
- Cieslewski, T., Choudhary, S., Scaramuzza, D., 2018. Data-efficient decentralized visual slam. In: 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 2466–2473.
- Cimino, M. G., Lazzeri, A., Vaglini, G., 2015. Combining stigmergic and flocking behaviors to coordinate swarms of drones performing target search. In: 2015 6th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA). IEEE, pp. 1–6.
- Cledat, E., Cucci, D., 2017. Mapping gnss restricted environments with a drone tandem and indirect position control. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 4, 1.
- Cole, D. T., Thompson, P., Göktoğan, A. H., Sukkarieh, S., 2010. System development and demonstration of a cooperative uav team for mapping and tracking. *The International Journal of Robotics Research* 29 (11), 1371–1399.
- Darrah, M., Trujillo, M. M., Speransky, K., Wathen, M., 2017. Optimized 3d mapping of a large area with structures using multiple multirotors. In: 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, pp. 716–722.
- Erignac, C., 2007. An exhaustive swarming search strategy based on distributed pheromone maps. In: AIAA Infotech@ Aerospace 2007 Conference and Exhibit. p. 2822.
- Fu, Z., Chen, Y., Ding, Y., He, D., 2019. Pollution source localization based on multi-uav cooperative communication. *IEEE Access* 7, 29304–29312.
- Fujisawa, R., Imamura, H., Hashimoto, T., Matsuno, F., 2008. Communication using pheromone field for multiple robots. In: 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, pp. 1391–1396.
- García-Aunon, P., Barrientos, A., 2018a. Comparison of heuristic algorithms in discrete search and surveillance tasks using aerial swarms. *Applied Sciences* 8 (5), 711.

- García-Aunon, P., Barrientos, A., 2018b. Control optimization of an aerial robotic swarm in a search task and its adaptation to different scenarios. *Journal of computational science* 29, 107–118.
- García-Aunon, P., del Cerro, J., Barrientos, A., 2019a. Behavior-based control for an aerial robotic swarm in surveillance missions. *Sensors* 19 (20), 4584.
- García-Aunon, P., Roldán, J. J., Barrientos, A., 2019b. Monitoring traffic in future cities with aerial swarms: Developing and optimizing a behavior-based surveillance algorithm. *Cognitive Systems Research* 54, 273–286.
- Garnier, S., Tache, F., Combe, M., Grimal, A., Theraulaz, G., 2007. Alice in pheromone land: An experimental setup for the study of ant-like robots. In: 2007 IEEE Swarm Intelligence Symposium. IEEE, pp. 37–44.
- George, J., Sujit, P., Sousa, J. B., 2011. Search strategies for multiple uav search and destroy missions. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 61 (1-4), 355–367.
- Hadaegh, F. Y., Chung, S.-J., Manohara, H. M., 2014. On development of 100-gram-class spacecraft for swarm applications. *IEEE Systems Journal* 10 (2), 673–684.
- Han, J., Xu, Y., Di, L., Chen, Y., 2013. Low-cost multi-uav technologies for contour mapping of nuclear radiation field. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 70 (1-4), 401–410.
- Hauert, S., Winkler, L., Zufferey, J.-C., Floreano, D., 2008. Ant-based swarming with positionless micro air vehicles for communication relay. *Swarm Intelligence* 2 (2-4), 167–188.
- Hinzmann, T., Stastny, T., Conte, G., Doherty, P., Rudol, P., Wzorek, M., Galceran, E., Siegwart, R., Gilitschenski, I., 2016. Collaborative 3d reconstruction using heterogeneous uavs: System and experiments. In: *International Symposium on Experimental Robotics*. Springer, pp. 43–56.
- Ju, C., Son, H., 2018. Multiple uav systems for agricultural applications: control, implementation, and evaluation. *Electronics* 7 (9), 162.
- Kim, J. H., Kwon, J.-W., Seo, J., 2014. Multi-uav-based stereo vision system without gps for ground obstacle mapping to assist path planning of ugv. *Electronics Letters* 50 (20), 1431–1432.
- Lanillos, P., Gan, S. K., Besada-Portas, E., Pajares, G., Sukkarieh, S., 2014. Multi-uav target search using decentralized gradient-based negotiation with expected observation. *Information Sciences* 282, 92–110.
- Li, W., 2015. Persistent surveillance for a swarm of micro aerial vehicles by flocking algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 229 (1), 185–194.
- Lyu, Y., Pan, Q., Zhang, Y., Zhao, C., Zhu, H., Tang, T., Liu, L., 2015. Simultaneously multi-uav mapping and control with visual servoing. In: 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, pp. 125–131.
- Mahdoui, N., Frémont, V., Natalizio, E., 2017. Cooperative exploration strategy for micro-aerial vehicles fleet. In: 2017 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI). IEEE, pp. 180–185.
- Maza, I., Ollero, A., 2007. Multiple uav cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms. In: *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*. Springer, pp. 221–230.
- Mirjan, A., Gramazio, F., Kohler, M., Augugliaro, F., D'Andrea, R., 2013. Architectural fabrication of tensile structures with flying machines. *Green Design, Materials and Manufacturing Processes*, 513–518.
- Niedzielski, T., Jurecka, M., Miziński, B., Remisz, J., Ślopek, J., Spallek, W., Witek-Kasprzak, M., Kasprzak, L., Świerczyńska-Chłaściak, M., 2018. A real-time field experiment on search and rescue operations assisted by unmanned aerial vehicles. *Journal of Field Robotics* 35 (6), 906–920.
- Nigam, N., Bieniawski, S., Kroo, I., Vian, J., 2011. Control of multiple uavs for persistent surveillance: algorithm and flight test results. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 20 (5), 1236–1251.
- Odonkor, P., Ball, Z., Chowdhury, S., 2019. Distributed operation of collaborating unmanned aerial vehicles for time-sensitive oil spill mapping. *Swarm and Evolutionary Computation* 46, 52–68.
- Oh, S.-H., Suk, J., 2010. Evolutionary design of the controller for the search of area with obstacles using multiple uavs. In: *ICCAS 2010*. IEEE, pp. 2541–2546.
- Perez-Carabaza, S., Besada-Portas, E., Lopez-Orozco, J. A., Jesus, M., 2018. Ant colony optimization for multi-uav minimum time search in uncertain domains. *Applied Soft Computing* 62, 789–806.
- Qu, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., 2015. A uav solution of regional surveillance based on pheromones and artificial potential field theory. In: 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, pp. 380–385.
- Rastgoftar, H., Atkins, E. M., 2018. Cooperative aerial lift and manipulation (calm). *Aerospace Science and Technology* 82, 105–118.
- Reina, D., Tawfik, H., Toral, S., 2018. Multi-subpopulation evolutionary algorithms for coverage deployment of uav-networks. *Ad Hoc Networks* 68, 16–32.
- Reuder, J., Jonassen, M. O., Ólafsson, H., 2012. The small unmanned meteorological observer sumo: Recent developments and applications of a micro-uav for atmospheric boundary layer research. *Acta Geophysica* 60 (5), 1454–1473.
- Reynolds, C. W., 1987. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. Vol. 21. ACM.
- Roldán, J. J., García-Aunon, P., Peña-Tapia, E., Barrientos, A., 2019. Swarm-city project: Can an aerial swarm monitor traffic in a smart city? In: 2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops). IEEE, pp. 862–867.
- Santamaria, E., Segor, F., Tchouchenkov, I., 2013. Rapid aerial mapping with multiple heterogeneous unmanned vehicles. In: *ISCRAM*. Citeseer.
- Saska, M., Chudoba, J., Přečůl, L., Thomas, J., Loianno, G., Třešňák, A., Vonásek, V., Kumar, V., 2014. Autonomous deployment of swarms of micro-aerial vehicles in cooperative surveillance. In: 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, pp. 584–595.
- Savkin, A. V., Huang, H., 2019. Asymptotically optimal deployment of drones for surveillance and monitoring. *Sensors* 19 (9), 2068.
- Schilling, F., Lecoeur, J., Schiano, F., Floreano, D., 2018. Learning vision-based cohesive flight in drone swarms. *arXiv preprint arXiv:1809.00543*.
- Schmuck, P., Chli, M., 2017. Multi-uav collaborative monocular slam. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 3863–3870.
- Silic, M. B., Song, Z., Mohseni, K., 2018. Anisotropic flocking control of distributed multi-agent systems using fluid abstraction. In: 2018 AIAA Information Systems-AIAA Infotech@ Aerospace. p. 2262.
- Sreenath, K., Kumar, V., 2013. Dynamics, control and planning for cooperative manipulation of payloads suspended by cables from multiple quadrotor robots. *rn 1 (r2), r3*.
- St-Onge, D., Kaufmann, M., Panerati, J., Ramtoula, B., Cao, Y., Coffey, E. B., Beltrame, G., 2019. Planetary exploration with robot teams. *IEEE Robotics & Automation Magazine*.
- Stavros, E. N., Agha, A., Sirota, A., Quadrelli, M., Ebadi, K., Yun, K., 2019. Smoke sky—exploring new frontiers of unmanned aerial systems for wildland fire science and applications. *arXiv preprint arXiv:1911.08288*.
- Techy, L., Schmale III, D. G., Woolsey, C. A., 2010. Coordinated aerobiological sampling of a plant pathogen in the lower atmosphere using two autonomous unmanned aerial vehicles. *Journal of Field Robotics* 27 (3), 335–343.
- Tuna, G., Nefzi, B., Conte, G., 2014. Unmanned aerial vehicle-aided communications system for disaster recovery. *Journal of Network and Computer Applications* 41, 27–36.
- Twidwell, D., Allen, C. R., Detweiler, C., Higgins, J., Laney, C., Elbaum, S., 2016. Smoke sky—exploring new frontiers of unmanned aerial systems for fire management. *Frontiers in Ecology and the Environment* 14 (6), 333–339.
- Vásárhelyi, G., Virágh, C., Somorjai, G., Tarcai, N., Szörényi, T., Nepusz, T., Vicssek, T., 2014. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots. In: 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, pp. 3866–3873.
- Verdu, T., Hattenberger, G., Lacroix, S., 2019. Flight patterns for clouds exploration with a fleet of uavs.
- Waharte, S., Trigoni, N., 2010. Supporting search and rescue operations with uavs. In: 2010 International Conference on Emerging Security Technologies. IEEE, pp. 142–147.
- Wang, Z., Singh, S., Pavone, M., Schwager, M., 2018. Cooperative object transport in 3d with multiple quadrotors using no peer communication. In: 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 1064–1071.
- Zhao, N., Lu, W., Sheng, M., Chen, Y., Tang, J., Yu, F. R., Wong, K.-K., 2019. Uav-assisted emergency networks in disasters. *IEEE Wireless Communications* 26 (1), 45–51.
- Zheng, X., Wang, F., Li, Z., 2018. A multi-uav cooperative route planning methodology for 3d fine-resolution building model reconstruction. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 146, 483–494.