

Resumen

Los Vehículos Aéreos no Tripulados (o drones) ya han demostrado su utilidad en una gran variedad de aplicaciones. Hoy en día, se utilizan para fotografía, cinematografía, inspecciones y vigilancia, entre otros. Sin embargo, en la mayoría de los casos todavía son controlados por un piloto, que como máximo suele estar volando un solo dron cada vez. En esta tesis, tratamos de avanzar en paso más allá en esta tecnología al permitir que múltiples drones con capacidad para despegue y aterrizaje vertical trabajen de forma sincronizada, como una sola entidad. La principal ventaja de realizar vuelos en grupo, comúnmente denominado enjambre, es que se pueden realizar tareas más complejas que utilizando un solo dron. De hecho, un enjambre permite cubrir más área en el mismo tiempo, ser más resistente, tener una capacidad de carga más alta, etc. Esto puede habilitar el uso de nuevas aplicaciones, o una mejor eficiencia para las aplicaciones existentes. Sin embargo, una parte clave es que los miembros del enjambre deben organizarse correctamente, ya que, durante el vuelo, diferentes perturbaciones pueden provocar que sea complicado mantener el enjambre como una unidad coherente. Una vez que se pierde esta coherencia, todos los beneficios previamente mencionados de un enjambre se pierden también. Incluso, aumenta el riesgo de colisiones entre los elementos del enjambre. Por lo tanto, esta tesis se centra en resolver algunos de estos problemas, proporcionando un conjunto de algoritmos que permitan a otros desarrolladores crear aplicaciones de enjambres de drones.

Para desarrollar los algoritmos propuestos hemos incorporado mejoras al llamado ArduSim. Este simulador nos permite simular tanto la física de un dron como la comunicación entre drones con un alto grado de precisión. ArduSim nos permite implementar protocolos y algoritmos (bien probados) en drones reales con facilidad. Durante toda la tesis, ArduSim ha sido utilizado ampliamente. Su utilización ha permitido que las pruebas fueran seguras, y al mismo tiempo nos permitió ahorrar mucho tiempo, dinero y esfuerzo de investigación. Por lo tanto, se utilizó ArduSim para cada bloque de construcción que desarrollamos.

Comenzamos nuestra investigación sobre enjambres asignando posiciones aéreas para cada dron en el suelo. Suponiendo que los drones están ubicados aleatoriamente en el suelo, y que necesitan alcanzar una formación aérea deseada, buscamos una solución que minimice la distancia total recorrida por todos los drones. Para ello se empezó con un método de fuerza bruta, pero rápidamente nos dimos cuenta de que, dada su alta complejidad, este método funciona mal cuando el número de drones aumenta. Por lo tanto, propusimos una heurística. Como en todas las heurísticas, se realizó un compromiso entre complejidad y precisión. Al simplificar el problema, encontramos que nuestra heurística era capaz de calcular una solución muy rápidamente sin aumentar sustancialmente la distancia total recorrida. Además, implementamos el algoritmo de Kuhn-Munkres (KMA), un algoritmo que ha demostrado proporcionar la respuesta exacta (es decir, reducir la distancia total recorrida) en el menor tiempo posible. Después de muchos experimentos, llegamos a la conclusión de que nuestra heurística es más rápida, pero que la solución proporcionada por el KMA es ligeramente más eficiente. En particular, aunque la diferencia en la distancia total recorrida es pequeña, el uso de KMA reduce el número de trayectorias de vuelo que se cruzan entre sí, lo cual es una métrica importante para las siguientes propuestas.

Una vez que desarrollamos los algoritmos para asignar posiciones aéreas a cada dron en el suelo, comenzamos a desarrollar algoritmos para despegar todos esos drones. El objetivo de estos algoritmos es reducir el tiempo necesario para que todos los drones alcancen su

posición aérea, al mismo tiempo que garantizan que se mantenga una distancia segura entre ellos. La solución más sencilla es un procedimiento de despegue secuencial, pero este enfoque también es el más lento. Por lo tanto, lo mejoramos proponiendo primero un procedimiento de despegue semi-secuencial, y a continuación uno semi-simultáneo. Con este procedimiento semi-simultáneo de despegue, el algoritmo es capaz de reducir drásticamente el tiempo de despegue sin introducir ningún riesgo para las aeronaves.

Después de despegar, es importante que todos los drones puedan moverse de un punto a otro mientras mantienen una formación estable. Si un dron se desplaza un poco más rápido que los demás, con el tiempo, la formación podría romperse. Por lo tanto, diseñamos y desarrollamos un protocolo llamado $\text{\textit{MUSCOP}}$. Está basado en un esquema maestro-esclavo, donde el maestro envía mensajes a los esclavos para que sepan a dónde ir, y los esclavos envían su estado al maestro (el cual actúa como coordinador). $\text{\textit{MUSCOP}}$ obliga a todos los drones a esperar y resincronizarse en cada punto de referencia. Para hacer el protocolo más resistente, incluimos mecanismos para reemplazar al maestro en caso de fallo (por ejemplo, batería agotada, colisión, etc.). Se desarrolló un mecanismo similar para los esclavos, para que, en caso de que falle un esclavo, el resto del enjambre aún pueda continuar su misión. Como resultado, nuestro protocolo permite que un enjambre complete su misión, asegurándose de que los aviones se mantengan sincronizados, incluso en entornos complejos.

Además de estos algoritmos básicos, que son necesarios en cada vuelo de enjambre de drones, también centramos en características más avanzadas. Concretamente, desarrollamos un algoritmo para que los drones puedan cambiar su formación (por ejemplo, círculo, línea, matriz, etc.) durante el vuelo. El algoritmo decide primero qué dron tiene que ir a qué lugar, y luego, en función de la dirección a la que se dirigirá el dron, se cambia la altitud de la aeronave. Al usar este algoritmo, los drones que vuelan en diferentes direcciones volarán a diferentes altitudes. Por lo tanto, se minimiza el riesgo de colisiones.

Otra de las aportaciones realizadas consiste en un algoritmo que cambia automáticamente la altitud de un dron para que la elevación con respecto al nivel del suelo permanezca constante. Este es un detalle importante en regiones montañosas, donde la orografía del terreno puede ser muy variable, lo que puede provocar accidentes. Nuestro algoritmo utiliza modelos digitales de elevaciones y un controlador PID para controlar eficientemente la altitud de vuelo.

Finalmente, al final del vuelo, los drones tienen que aterrizar con precisión en un lugar específico. La precisión obtenida con el sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) a menudo no es suficiente, ya que puede tener un error de hasta 5 metros. Por lo tanto, creamos un algoritmo que, con el uso de una simple cámara, detecta un marcador ArUco que se coloca en el lugar exacto de aterrizaje que se está apuntando. Mientras desciende, el dron se dirige hacia el marcador ArUco. Usando este algoritmo, pudimos reducir el margen de error a un promedio de solo 11 cm.

En general, esta tesis de doctorado ofrece un marco completo para el desarrollo de aplicaciones de drones, y representa una contribución significativa a la comunidad de investigación que esperamos pueda ser aprovechada en investigaciones futuras.