

Planificación y manejo de conflictos basado en Fast Marching Square para UAVs en entornos 3D de grandes dimensiones

Blanca López Palomino, Javier Muñoz Mendi y Luis Enrique Moreno Lorente
 RoboticsLab, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España
 bllopezp@ing.uc3m.es, jamunozm@ing.uc3m.es, moreno@ing.uc3m.es

Resumen

Los sistemas multi UAV se alzan en la actualidad como una solución potente a la hora de desempeñar y agilizar tareas que pueden resultar peligrosas o tediosas para las personas: tareas de búsqueda y rescate, inspección y vigilancia de instalaciones, entrega de mercancías, tareas de agricultura y conservación de la vida silvestre, etc. En este contexto, este trabajo propone una estrategia rápida de planificación de trayectorias en entornos 3D de grandes dimensiones para UAVs basada en Fast Marching Square y un sencillo y eficiente control de velocidad basado en prioridades como método de resolución de conflictos entre vehículos. El rendimiento del algoritmo se evalúa en base a ciertas medidas estadísticas recogidas convenientemente a lo largo de simulaciones.

Palabras clave: multi UAV; Fast Marching Square; evasión de colisiones; planificación de trayectorias; control de velocidad; entornos 3D.

1. Introducción

Debido al gran interés que suscita el desarrollo de sistemas capaces de operar de forma coordinada en escenarios complejos y de cubrir y agilizar aplicaciones que puedan resultar peligrosas o cansadas para las personas, los sistemas multi UAV (del inglés, *Unmanned Aerial Vehicle*) o multi dron (términos usados indistintivamente en la literatura) han atraído la atención de investigadores y empresas de una gran variedad de campos. Esto es así gracias a los niveles de seguridad y eficiencia que aportan estos sistemas, así como la posibilidad de operar en entornos complejos o incluso inaccesibles para las personas. Estas tareas incluyen operaciones de búsqueda y rescate [1], inspección de instalaciones [12], entrega de mercancías [14], vigilancia [13] y pueden encontrarse en los sectores militar, comercial o social.

Estos vehículos funcionan sin piloto y pueden presentar diferentes grados de autonomía. El nivel de autonomía de un dron puede variar desde el control remoto (donde un humano controla su mo-

vimiento) hasta la autonomía avanzada, en cuyo caso el movimiento del dron a través de su trayectoria se basa en un sistema de sensores y un sistema de comunicaciones robustos capaces de garantizar la seguridad de los vehículos durante su vuelo y la coordinación con el resto de vehículos que componen el enjambre. A su vez, esta coordinación puede estudiarse desde diferentes puntos de vista: a nivel de planificación de trayectorias, a nivel de modelado y control de los vehículos, como un problema de manipulación o comunicación entre drones o desde la asignación de tareas entre UAVs. Este trabajo se centra en la navegación y planificación de trayectorias.

La navegación es definida como el problema de llevar un vehículo desde un punto inicial hasta un punto destino, evitando en todo momento las colisiones con otros vehículos y con obstáculos del entorno. Esta cuestión se divide tradicionalmente en dos módulos o etapas independientes: módulo de planificación de trayectorias para que cada vehículo realice su misión y módulo de coordinación de los vehículos para evitar colisiones.

Para esta primera etapa, se encuentran en la literatura diferentes algoritmos de planificación de trayectorias aplicados a sistemas multi UAV. Dadas las grandes dimensiones de los entornos de aplicación para estos sistemas, los algoritmos más utilizados son aquellos basados en métodos de muestreo, por su rapidez de cómputo. Así, [18] implementa un algoritmo de RRT mejorado para la navegación de UAVs en entornos rurales. El método RRT se utilizó para construir la trayectoria original, que posteriormente fue modificada para ajustarse a las restricciones de movimiento del UAV. [9] realiza un análisis comparativo de los algoritmos A*, Theta* y Lazy Theta* para UAVs en entornos 2D y 3D. [6] combinan Q-learning y A* para establecer un modelo de planificación de trayectorias 3D para UAVs.

Para la segunda etapa, con el fin de prevenir que ocurra una colisión, el módulo controlador o módulo de coordinación debe ser capaz de lidiar con las siguientes tareas: detectar posibles amenazas de colisión, analizar la probabilidad de colisión real y definir los criterios de decisión y finalmente

implementar el algoritmo para evitar colisiones.

Para ello, es obligatorio disponer de cierta información sobre la trayectoria o posición del vehículo a evitar. Así, se han propuesto múltiples y variadas soluciones para abordar el problema del manejo de colisiones. Se pueden encontrar algoritmos geométricos, donde la estrategia principal se conoce como obstáculos de velocidad [16], que se define geoméricamente como el conjunto de velocidades a evitar por el vehículo ya que llevarían a una colisión con otro elemento en algún momento del tiempo [5]. Otras opciones consisten en algoritmos basados en métodos de visión, incluyendo aquellos enfocados en trabajar con parámetros del sensor como el campo de visión [3] o los basados en parámetros del UAV como el ángulo azimutal relativo del vehículo [10]. Técnicas de procesamiento puro de imágenes [11] son también una alternativa comúnmente utilizada. Asimismo, se pueden encontrar estrategias basadas en algoritmos de planificación de trayectorias [4] y campos potenciales [17], así como algoritmos basados en problemas de optimización [7]. Por último, están aquellas estrategias personalizadas que, sin seguir ninguna metodología específica, pretenden desarrollar una estrategia de evasión de colisiones lo más sencilla posible para obtener la menor carga computacional, cuestión que puede verse perjudicada en estrategias más complejas [2, 15]. Estas estrategias se basan en cambios de altitud o desviaciones laterales de los vehículos mediante procesos de decisión sencillos.

Diversas cuestiones de seguridad han hecho imposible –e ilegal– hasta el día de hoy el vuelo de drones a baja altura en la mayoría de situaciones y entornos civiles, ya que las tecnologías relacionadas con el guiado y el control remoto de los drones no han alcanzado un nivel de preparación suficiente para garantizar la seguridad de personas e infraestructuras. En este contexto, la asociación europea SESAR (Single European Sky ATM Research) ha pedido “acción urgente en la dimensión del espacio aéreo, en particular en el desarrollo del llamado U-SPACE”, un nuevo marco diseñado para integrar de forma segura las operaciones con drones a bajo nivel (por debajo de 120 metros de altura de vuelo) en el espacio aéreo europeo. En este marco se encuentra el proyecto LABYRINTH-H2020, en el que se encuadra a su vez este trabajo. Por su parte, aquí se propone una estrategia rápida de planificación de trayectorias en entornos 3D de grandes dimensiones para UAVs basada en Fast Marching Square y un sencillo y eficiente control de velocidad basado en prioridades como método de resolución de conflictos entre vehículos.

El resto de este documento se organiza como sigue.

La sección 2 detalla todas las características de la estrategia de planificación de trayectorias y gestión de conflictos propuesta. La sección 3 presenta las medidas estadísticas recogidas para evaluar el rendimiento de la estrategia. Por último, en la sección 4 se exponen las principales conclusiones extraídas del desarrollo de este trabajo.

2. Entorno, planificador de trayectorias y módulo controlador

En esta sección se presenta la descripción del algoritmo desarrollado. Se detallan por tanto el entorno de simulación utilizado, el módulo planificador de trayectorias y el módulo controlador de trayectorias. Cabe destacar que en este proyecto los drones son considerados como un móvil puntual que ocupa una posición determinada en el espacio libre del entorno.

2.1. Entorno de planificación

El conjunto de aplicaciones al que este trabajo se dirige se encuadra dentro del panorama civil (zonas portuarias, carreteras, aeropuertos, zonas urbanas...) con el fin de realizar tareas de vigilancia de instalaciones, control de tráfico y reparto de material de primeros auxilios en escenarios de emergencia. Los entornos con los que se trabaja corresponden a escenarios reales. Estos se modelan como una matriz de ocupación 3D, la cual se obtiene utilizando las coordenadas y los mapas de elevación del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Un ejemplo de estos escenarios urbanos se puede visualizar en la Figura 1, que corresponde a la zona del estadio Santiago Bernabéu de Madrid. La resolución del mapa es de 5 m para cada escenario, en las tres dimensiones del espacio. El tamaño de estos escenarios puede ser de hasta 18 km².

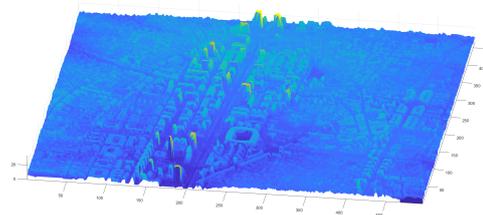


Figura 1: Entorno de la zona del estadio Santiago Bernabéu en Madrid (España).

2.2. Método Fast Marching Square para planificación de trayectorias

El método Fast Marching Square (FM2) es una variación del método Fast Marching (FMM) original. FM2 crea un mapa de velocidad o viscosidad

dato un mapa binario de ocupación propagando un frente de onda que toma todos los obstáculos como puntos de origen. Los valores del mapa de velocidad van de 0 a 1, representando los tiempos de llegada del frente de onda desde el obstáculo más cercano y a su vez la velocidad máxima permitida para el vehículo en cada punto. Los obstáculos implicarán velocidades iguales a cero, mientras que los puntos del espacio suficientemente alejados de los obstáculos permitirán velocidades máximas.

A continuación, se propaga otro frente de onda desde el punto final deseado para la trayectoria hasta la posición actual del vehículo, considerando el mapa de velocidades. El resultado es un mapa de potencial que no contiene mínimos locales, con un único mínimo global en el punto final. Para calcular la trayectoria, se realiza un descenso de gradiente sobre el mapa de potencial a partir de la posición actual del vehículo.

Al calcular la trayectoria que deben seguir los vehículos, el método FM2 obtendrá la trayectoria más corta desde la posición inicial hasta la posición de destino que permita a los vehículos navegar a las velocidades más altas. Para ilustrar mejor el funcionamiento del método FM2, se calcula una trayectoria 2D para un entorno sencillo y se muestra en la Figura 2. Se puede observar que la trayectoria obtenida con el método FM2 es suave y reproducible por un robot, gracias al cálculo del mapa de velocidad.

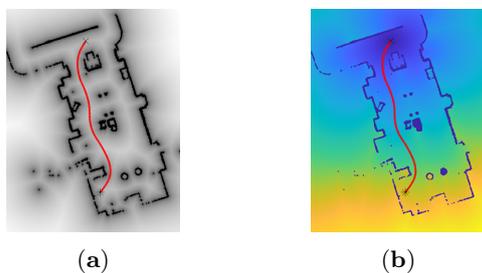


Figura 2: Implementación del FM2. (a) Mapa de velocidades. (b) Representación de los tiempos de llegada del frente de onda.

Las misiones consideradas para este trabajo son denominadas GO2POINT. En estas, el objetivo es que en cada una un vehículo viaje desde un punto inicial hasta un punto final.

2.2.1. Imposición de niveles de vuelo

Uno de los puntos fuertes del método Fast Marching es la relativa facilidad con la que se pueden incorporar restricciones en el proceso de planificación de las trayectorias. Basta con definir una nueva matriz (de las mismas dimensiones que el entorno de trabajo) en la que las celdas corres-

pondientes a las zonas a restringir aporten valores de velocidad bajos y luego añadir (simplemente por multiplicación matricial) estas restricciones a las ya impuestas en los mapas de viscosidad previamente obtenidos.

Esto ha permitido la imposición de niveles de vuelo, que pretenden limitar los casos de conflicto, entendiendo éstos como situaciones de riesgo en las que dos o más vehículos se encuentran a una distancia inferior a una determinada distancia de seguridad establecida. En concreto, se establecen cuatro niveles de vuelo diferentes respecto al nivel del suelo (que puede ser irregular). El nivel de vuelo asignado a cada misión dependerá de su dirección de vuelo. La estrategia pretende eliminar principalmente los conflictos de los drones que vuelan en direcciones opuestas ya que son, según la estrategia de resolución implementada y explicada a continuación, los más problemáticos. Así, los drones que vuelan en ángulos opuestos estarán separados, a priori, por mínimo la distancia de seguridad D_{seg} que se considere. Un ejemplo de asignación de nivel de vuelo para misiones individuales GO2POINT puede verse en la Figura 3, donde se pueden distinguir trayectorias a diferentes niveles.

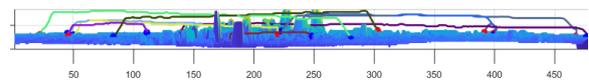


Figura 3: Ejemplo de asignación del nivel de vuelo según la dirección del mismo. Vista frontal de los alrededores del Estadio Santiago Bernabéu.

2.2.2. FM2 modificado para entornos de grandes dimensiones

En previos trabajos [8], el método FM2 para entornos de tres dimensiones era usado directamente para planificar una trayectoria 3D para los vehículos. En este trabajo, se presenta un método innovador en el que el método FM2 ha sido modificado para resultar rápido y óptimo computacionalmente en el cálculo de trayectorias 3D en entornos de grandes dimensiones.

Para ello, el problema de planificación 3D se transforma convenientemente en un problema de planificación 2D. Se parte de que los vehículos volarán a un nivel de vuelo determinado, respecto al nivel de suelo (que puede ser irregular). A continuación, los obstáculos 3D que interfieren con el nivel de vuelo deseado para la misión se proyectan en un mapa 2D sobre el que se planifica la trayectoria. Posteriormente, la altura de la trayectoria se reconstruye convenientemente teniendo en cuen-

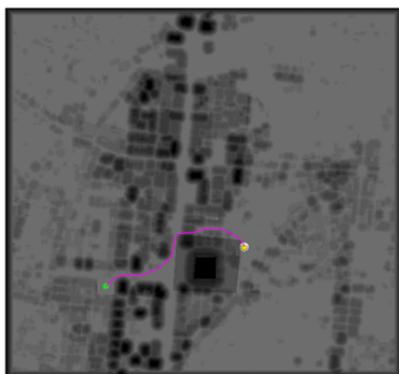


Figura 4: Mapa de viscosidad 2D para el planificador proyectado 2D basado en FM2. Trayectoria en magenta.

ta los obstáculos, así como la diferencia de altitud entre el punto de partida del dron, el punto de destino y el nivel de vuelo. Estos cambios de altura hacia/desde el nivel de vuelo se reconstruyen considerando un valor máximo de pendiente, según las velocidades máximas de ascenso y descenso de los vehículos. Un ejemplo de mapa 2D utilizado por este tipo de planificador se muestra en la Figura 4, donde también se representa la trayectoria 2D resultante. La reducción de la dimensionalidad conseguida acelera considerablemente el tiempo de computación dedicado al cálculo de las trayectorias, a la vez que la calidad de las trayectorias es preservada. Este algoritmo ha sido denominado planificador proyectado 2D basado en FM2.

2.2.3. Pasajes de vuelo libre

Otra de las restricciones impuestas en la planificación de trayectorias es la denominada bloqueo de trayectorias. En esta estrategia, los UAV pueden establecer una reserva espacial en el mapa de velocidades (*i.e.*, un área tubular de vuelo libre) alrededor de sus trayectorias para que ningún otro vehículo pueda cruzar este área. El objetivo de esta estrategia es evitar que dos o más vehículos compartan el mismo espacio de vuelo y así evitar cualquier posible interacción conflictiva. Para no bloquear excesivamente el espacio aéreo, los vehículos bloquean únicamente la parte de trayectoria que les queda por recorrer. Esta reserva de área está limitada en su radio a la distancia D_{seg} . Un ejemplo de uso de esta estrategia se representa en la Figura 5, en la que se puede ver que trayectorias previamente planificadas se fijan a valores de viscosidad cero (color negro).

Esta estrategia está enfocada principalmente para enjambres de UAV de ala fija. Dado que este tipo de vehículos no puede realizar giros bruscos en su trayectoria ni detenerse por completo, el obje-

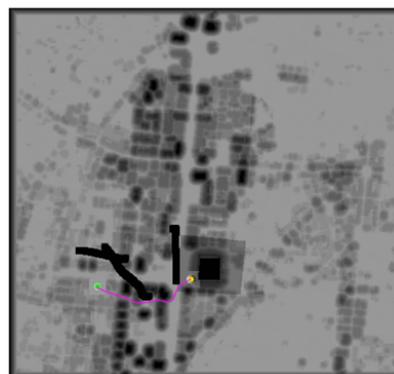


Figura 5: Mapa de viscosidad para la planificación de la trayectoria de un UAV utilizando el planificador proyectado 2D basado en FM2 y pasajes de vuelo libre de trayectorias previamente planificadas, representados en negro.

tivo principal es eliminar de antemano cualquier conflicto para el enjambre de UAV, de modo que no sea necesario modificar el plan de vuelo ni la trayectoria. En este trabajo esta estrategia será usada para planificar las maniobras de evasión de colisiones que no puedan ser evitadas por el modo general de resolución, que será explicado a continuación.

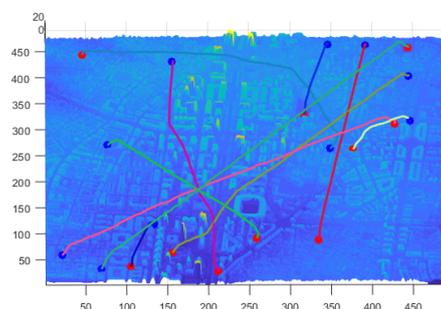


Figura 6: Representación del entorno simulado con 10 trayectorias planificadas.

La Figura 6 muestra un ejemplo del entorno de simulación junto a 10 trayectorias planificadas por el módulo planificador.

2.3. Módulo controlador

Este módulo se encarga de realizar la fase de evasión de colisiones durante el tiempo de vuelo. Esto se lleva a cabo de forma iterativa en un bucle. Los conflictos considerados en este trabajo son los que pueden producirse entre vehículos. Por lo tanto, esto implica que trabajan de forma cooperativa y su posición y trayectorias pueden ser conocidas.

2.3.1. Detección de conflictos

La identificación de conflictos nuevos se realiza de forma sencilla mediante una comprobación de distancia entre vehículos. Por parejas de drones, se analiza la distancia entre los vehículos. En primer lugar, se estudia si los dos vehículos analizados están más cerca que un valor de distancia preliminar de seguridad en el plano horizontal lo suficientemente grande ($\approx 10D_{seg}$). Si es así, se siguen examinando sus trayectorias restantes. Si no es así, no se detecta por ahora ningún conflicto potencial entre esos vehículos. Esta comprobación preliminar permite un mayor margen de maniobra, ya que los conflictos pueden identificarse con antelación.

Si se cumple esta condición y se requiere un análisis más profundo de las trayectorias, se evalúa la distancia entre ambas para cada uno de sus *waypoint*. Se considera que existe un conflicto si ambas trayectorias están más cerca que un determinado valor umbral de distancia, en cualquier punto. Este análisis se lleva a cabo tanto en distancia relativa total, como en el plano horizontal y eje vertical de manera independiente. Si las trayectorias no cumplen este requisito, al estar más alejadas entre sí, no se considera por ahora ningún conflicto potencial entre esos vehículos.

2.3.2. Resolución de conflictos

El principio de funcionamiento de la estrategia de resolución es el siguiente: uno de los drones en conflicto detiene su vuelo, mientras que el otro continúa su trayectoria normalmente. Esta estrategia sencilla permite lograr un bajo tiempo de cómputo y una estrategia eficiente y escalable al mismo tiempo.

Para asignar la prioridad de conflicto para un par de drones, se comprueba expresamente que el vehículo elegido como prioritario pueda realmente avanzar en su trayectoria sin colisionar con el otro vehículo. Esto se comprueba calculando cuál es la distancia mínima que se producirá entre ellos (ya que se conocen sus respectivas trayectorias). La prioridad se asigna entonces convenientemente como para mantener la mayor distancia posible entre los vehículos.

Hay que considerar que un dron puede estar en conflicto al mismo tiempo con más de un vehículo. Por lo tanto, tras analizar la situación para todas las posibles parejas de drones, cada vehículo toma el valor de velocidad necesario para respetar cualquier posible conflicto activo.

Un conflicto activo entre dos vehículos se considera finalizado si ya no cumple las mismas condiciones establecidas para detectar nuevos conflictos.

La distancia mínima entre drones considerada para garantizar una resolución segura del conflicto mediante esta estrategia es la denominada D_{seg} . En el caso de que ninguno de los vehículos del par pueda continuar su vuelo respetando esta distancia, existen dos escenarios posibles:

- **Ambos vehículos en movimiento** (*i.e.*, no son vehículos no prioritarios en otros conflictos con otros drones). Ante esta situación, se comprueba que ambos vehículos están suficientemente separados en distancia (más de $\approx 6D_{seg}$) en su posición actual y en sus próximos *waypoints* más cercanos. Si es así, se permite que ambos vehículos continúen su camino por el momento.

En el caso de que no se cumpla esta condición de distancia, ambos vehículos detendrán su vuelo y se intentará replanificar la trayectoria de uno de ellos para que ambos vehículos puedan cumplir su misión. Esta metodología de replanificación se tratará con más detalle más adelante.

- **Al menos uno de los vehículos está detenido** (*i.e.*, es vehículo no prioritario en al menos otro conflicto con otros drones). En este caso, ambos vehículos detienen su vuelo por el momento hasta que se resuelvan los conflictos en los que son vehículos no prioritarios.

2.3.3. Situaciones de bloqueo en conflicto

Dado que los conflictos pueden producirse entre más de dos drones y que estos conflictos son siempre estudiados e identificados por parejas de drones, es posible que se produzcan situaciones de bloqueo. En estos casos, varios drones se detienen innecesariamente y, dada la forma en que se resuelven los conflictos, estas situaciones no pueden ser resueltas de forma natural según el algoritmo implementado, dejando a los vehículos afectados parados indefinidamente.

Para cada conflicto de este tipo detectado, se estudia si alguno de los drones implicados puede avanzar sin acercarse al resto de los drones en conflicto a una distancia inferior a la distancia de seguridad considerada D_{seg} . Para ello, se analizan las distancias entre las trayectorias de los drones implicados. Si algún dron cumple esta condición, el conflicto puede resolverse. El primer dron analizado que cumpla la condición reanudará su vuelo.

2.3.4. Maniobras de esquivación

Se ha añadido también a la estrategia un módulo de replanificación de trayectorias. Como se ha

comentado anteriormente, este se utiliza para realizar maniobras de esquivación entre vehículos cuando el método general de control de velocidad no garantiza resolver un conflicto y asegurar la distancia de seguridad entre los vehículos.

En este caso, del par de drones implicados en el conflicto, uno de ellos (arbitrariamente elegido) replanificará su ruta considerando la trayectoria restante del otro como un obstáculo. Este comportamiento se implementa gracias a la funcionalidad de reserva de pasos tubulares de vuelo libre comentada anteriormente. De esta manera, se garantiza que el par de vehículos no tendrá ninguna interacción conflictiva posterior.

2.3.5. Control de despegue

Una última funcionalidad del módulo controlador de trayectorias es la de garantizar un despegue seguro para los vehículos. De esta manera, cuando un vehículo ha de iniciar su misión y despegar, el módulo controlador le dará paso únicamente cuando ningún otro vehículo se encuentre en vuelo a menos de $\approx 6D_{seg}$ en el plano horizontal.

3. Experimentación y resultados

Diseñados los módulos de planificación de trayectorias y manejo de conflictos para un sistema multi UAV, se realizan una serie de simulaciones para analizar y comprobar su rendimiento. El algoritmo diseñado es implementado en MATLAB. Como referencia, las pruebas se realizan en un ordenador de 16 GB de RAM y una CPU AMD Ryzen 5 3600. Estas pruebas se llevan a cabo para diferentes números de misiones simulatáneas: 5, 10, 15, 20 y 25. Por tanto, se cuenta con un total de 5 ejecuciones. Cada una de estas misiones corresponde a un vehículo UAV. Para cada simulación se realizan 60000 iteraciones del bucle de control de trayectorias, donde cada iteración equivale a 1 segundo de vuelo real. Cuando una de las misiones finaliza, una nueva es planificada. Para cada una de ellas, los puntos inicial y final son elegidos arbitrariamente.

El entorno simulado en el que se realizan las pruebas corresponde al mostrado en la Figura 1. La resolución es de 5 metros por celda. La velocidad máxima de los vehículos es fijada a 4 celdas por segundo. Las trayectorias planificadas tienen típicamente una fase inicial de subida hasta el nivel de vuelo establecido, una fase de vuelo en dicho nivel, y una fase de descenso hasta el punto final. La pendiente máxima fijada de subida y bajada para el planificador es de 50 grados. En base a la experimentación, la distancia de seguridad D_{seg} fijada es de 7 celdas (35 metros). En base a esto, los

niveles de vuelo se establecen a las alturas siguientes respecto al suelo: 55, 75, 95 y 115 metros de altura, respectivamente. Así, los drones que vuelan en ángulos opuestos están separados, a priori, por 40 metros de altitud. Las distancias umbrales para identificar un conflicto se fijan a 11 celdas en distancia relativa total y 9 celdas en el plano horizontal junto a 6 celdas en el eje vertical para el análisis por separado. La imposición de niveles de vuelo permite establecer una distancia menos restrictiva en el eje vertical.

Tabla 1: Datos estadísticos recogidos I. Medidas de media y desviación mediana absoluta.

	TECM [s]	NCM	NUAVS	TED [s]
5 UAV	2.75±3.40	0.43±0.70	4.78±0	4.56±5.93
10 UAV	5.33±6.62	0.94±1.23	9.14±0.39	9.77±12.32
15 UAV	8.16±9.50	1.44±1.71	13.05±0.49	16.02±18.82
20 UAV	11.10±12.44	1.87±2.10	16.52±0.35	23.42±26.57
25 UAV	14.64±15.68	2.28±2.42	19.47±0.93	32.70±36.65

Se recogen una serie de medidas estadísticas para comprobar el rendimiento de la estrategia. Estas se muestran en las tablas 1 y 2. Estas medidas se toman para cada ejecución y son las siguientes: tiempo de espera en conflicto por misión (TECM), número de conflictos en una misión (NCM), número de vehículos volando simultáneamente en cada iteración (NUAVS), tiempo de espera hasta despegar (TED), número total de conflictos identificados (NTC), número total de misiones completadas (NTMC) y distancia mínima dada entre vehículos (DM). Cada fila de las tablas corresponde al número de UAVs de la ejecución.

Tabla 2: Datos estadísticos recogidos II.

	NTC	NTMC	DM [celdas]
5 UAV	1225	2847	8.14
10 UAV	4959	5266	7.28
15 UAV	10525	7297	7.58
20 UAV	16664	8891	7.03
25 UAV	23083	10124	7.1882

Como se puede observar a través de los datos recogidos, el número total de conflictos en cada ejecución, así como los conflictos en cada misión aumentan con el número de drones que pueden volar simultáneamente. Sin embargo, la distancia de seguridad D_{seg} de 7 celdas (35 metros) es preservada en todo momento, garantizando la buena resolución de estos conflictos a través de la estrategia del módulo controlador desarrollada. Los tiempos de espera, tanto para iniciar el despegue como en vuelo por conflicto, aumentan también proporcionalmente con el número de drones. Sin embargo, el número total de misiones completadas por el enjambre aumenta también según dicho factor. El

número de vehículos volando simultáneamente se acerca también al número máximo de drones establecido para cada ejecución, señalando también que los tiempos de espera no son excesivos y el tráfico aéreo circula con fluidez. Por último, se registra un tiempo de ejecución para el planificador proyectado 2D basado en FM2 –incluido procesamiento de la trayectoria– de 0.1 segundos para el caso más desfavorable (trayectoria que va desde una esquina a la opuesta del entorno, ≈ 680 celdas) y un tiempo de cómputo medio para el bucle de control de ≈ 0.07 segundos para el conjunto de ejecuciones. Todas estas medidas son muestra del comportamiento robusto y eficiente de las estrategias desarrolladas.

4. Conclusiones

El objetivo de este trabajo ha sido diseñar, implementar y analizar una estrategia de planificación de trayectorias y manejo de conflictos para sistemas multi UAV en entornos 3D complejos. Este algoritmo se divide en tres etapas. En primer lugar, se obtiene el entorno de trabajo en 3D que simula un entorno urbano real. Posteriormente, en este entorno, los vehículos realizan misiones individuales punto-a-punto hacia y desde puntos del espacio libre elegidos aleatoriamente. Las trayectorias seguidas para realizar estas misiones se calculan utilizando una innovadora versión desarrollada del algoritmo de planificación Fast Marching Square, denominada planificador proyectado 2D basado en FM2. Este planificador proporciona trayectorias suaves y óptimas tanto en términos de distancia como de tiempo y, además, permite añadir ciertas restricciones de tráfico de interés con relativa facilidad. Una de estas restricciones consiste en establecer niveles de vuelo para garantizar una cierta distancia de seguridad entre los UAVs y así limitar el número de conflictos potenciales, que se tratan en la tercera etapa del algoritmo: el módulo controlador o de coordinación de trayectorias.

Los conflictos son tratados en esta tercera etapa mediante una técnica de resolución sencilla basada en una comprobación de distancia entre vehículos para la identificación de conflictos y un control básico de velocidad basado en prioridades para resolverlos. Sendos módulos replanificador basado en FM2 y de resolución de situaciones de bloqueo han sido diseñados para dotar de mayor robustez a la estrategia de control. La capacidad de la solución implementada para prevenir, minimizar y resolver los conflictos que pudieran producirse mientras los drones completan sus misiones se ha estudiado mediante varias medidas estadísticas.

De los resultados obtenidos, destaca especialmente

que todos los conflictos ocurridos han podido ser resueltos garantizando la distancia de seguridad, lo que demuestra la gran capacidad del algoritmo para evitar situaciones de colisión. Además, se ha conseguido un buen valor de tiempo computacional para el planificador y el bucle de control lo que abre la posibilidad de aplicar el algoritmo a un sistema real. En este sentido y para futuras aplicaciones, el método deberá ajustarse adecuadamente a la cinemática de los vehículos implicados y, en consecuencia, las distancias de seguridad aquí utilizadas podrán modificarse convenientemente. En un futuro se plantea introducir la variable temporal como parte del módulo planificador, para conseguir un mayor conocimiento y control de los planes de vuelo obtenidos para las misiones.

Agradecimientos

Investigación financiada por la comisión europea Innovation and Networks, a través del proyecto LABYRINTH-H2020. Acuerdo de subvención H2020-MG-2019-TwoStages-861696. También, la investigación ha recibido financiación de RoboCity2030-DIH-CM, Madrid Robotics Digital Innovation Hub, S2018/NMT-4331, fundada por “Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid” y confundada por los Fondos Sociales Europeos (FSE) de la UE.

English summary

Fast Marching Square-based planning and conflict management strategy for UAVs in large 3D environments

Abstract

Multi-UAV systems are currently emerging as a powerful solution to perform and speed up tasks that can be dangerous or tedious for people: search and rescue tasks, inspection and surveillance of facilities, delivery of goods, agriculture and wildlife conservation tasks, etc. In this context, this work proposes a fast trajectory planning strategy in large 3D environments for UAVs based on Fast Marching Square and a simple and efficient priority-based speed control method for resolving conflicts between vehicles. The performance of the algorithm is evaluated based on certain statistical measures collected throughout simulations.

Keywords: multi UAV; Fast Marching Square; collision avoidance; path planning; speed control; 3D environments.

Referencias

- [1] E. T. Alotaibi, S. S. Alqefari, and A. Koubaa. LSAR: Multi-UAV Collaboration for Search and Rescue Missions. *IEEE Access*, 7:55817–55832, 2019.
- [2] T. Baca, D. Hert, G. Loiano, M. Saska, and V. Kumar. Model predictive trajectory tracking and collision avoidance for reliable outdoor deployment of unmanned aerial vehicles. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 6753–6760. IEEE, 2018.
- [3] R. Beard and J. Saunders. Reactive vision based obstacle avoidance with camera field of view constraints. In *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, page 7250, 2008.
- [4] M. El Khaili. Visibility Graph For Path Planning In The Presence Of Moving Obstacles. *Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)*, 4(4):2250–3498, 2014.
- [5] P. Fiorini and Z. Shiller. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles. *The International Journal of Robotics Research*, 17(7):760–772, 1998.
- [6] D. Li, W. Yin, W. E. Wong, M. Jian, and M. Chau. Quality-oriented hybrid path planning based on a* and q-learning for unmanned aerial vehicle. *IEEE Access*, 10:7664–7674, 2022.
- [7] Y. Li, W. Du, P. Yang, T. Wu, J. Zhang, D. Wu, and M. Perc. A satisficing conflict resolution approach for multiple uavs. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2):1866–1878, 2018.
- [8] B. Lopez, J. Muñoz, F. Quevedo, C. A. Monje, S. Garrido, and L. E. Moreno. Path planning and collision risk management strategy for multi-uav systems in 3d environments. 2021.
- [9] D. Mandloi, R. Arya, and A. K. Verma. Unmanned aerial vehicle path planning based on a* algorithm and its variants in 3d environment. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 12(5):990–1000, 2021.
- [10] A. McFadyen, A. Durand-Petiteville, and L. Mejias. Decision strategies for automated visual collision avoidance. *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2014 - Conference Proceedings*, pages 715–725, 2014.
- [11] T. Mori and S. Scherer. First results in detecting and avoiding frontal obstacles from a monocular camera for micro unmanned aerial vehicles. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1750–1757, 2013.
- [12] M. D. Phung, T. H. Dinh, Q. P. Ha, et al. System architecture for real-time surface inspection using multiple uavs. *IEEE Systems Journal*, 14(2):2925–2936, 2019.
- [13] J. Scherer and B. Rinner. Persistent multi-uav surveillance with energy and communication constraints. In *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pages 1225–1230. IEEE, 2016.
- [14] R. Shakeri, M. A. Al-Garadi, A. Badawy, A. Mohamed, T. Khattab, A. K. Al-Ali, K. A. Harras, and M. Guizani. Design challenges of multi-uav systems in cyber-physical applications: A comprehensive survey and future directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4):3340–3385, 2019.
- [15] V. Spurný, T. Báča, M. Saska, R. Pěnička, T. Krajník, J. Thomas, D. Thakur, G. Loiano, and V. Kumar. Cooperative autonomous search, grasping, and delivering in a treasure hunt scenario by a team of unmanned aerial vehicles. *Journal of Field Robotics*, 36(1):125–148, 2019.
- [16] C. Y. Tan, S. Huang, K. K. Tan, and R. S. H. Teo. Three Dimensional Collision Avoidance for Multi Unmanned Aerial Vehicles Using Velocity Obstacle. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 97(1):227–248, 2020.
- [17] J. Tang, J. Sun, C. Lu, and S. Lao. Optimized artificial potential field algorithm to multi-unmanned aerial vehicle coordinated trajectory planning and collision avoidance in three-dimensional environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 233(16):6032–6043, 2019.
- [18] W. Zu, G. Fan, Y. Gao, Y. Ma, H. Zhang, and H. Zeng. Multi-uavs cooperative path planning method based on improved rrt algorithm. In *2018 IEEE international conference on mechatronics and automation (ICMA)*, pages 1563–1567. IEEE, 2018.



© 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).