

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS  
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Cinvestav Unidad Tamaulipas

## **Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT**

Tesis que presenta:

**Luis Alberto Ballado Aradias**

Para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias  
en Ingeniería y Tecnologías  
Computacionales**

Dr. Eduardo Arturo Rodríguez-Tello, Co-Director

Dr. José Gabriel Ramírez-Torres, Co-Director

Cd. Victoria, Tamaulipas, México.

Septiembre, 2024

# Índice General

<b>Índice General</b>	I
<b>Índice de Figuras</b>	III
<b>Índice de Tablas</b>	V
<b>Índice de Algoritmos</b>	VII
<b>Resumen</b>	IX
<b>Abstract</b>	XI
<b>Nomenclatura</b>	XIII
<b>1. Introducción</b>	1
1.1. Antecedentes y motivación	2
1.2. Planteamiento del problema	5
1.3. Hipótesis y preguntas de investigación	5
1.4. Objetivos	6
1.5. Solución propuesta	7
<b>2. Estado del Arte</b>	9
2.1. Introducción	10
2.2. Trabajos relacionados	11
2.2.1. Exploración	11
2.2.2. Representación medio ambiente 3D	12
2.2.3. Planificación de trayectorias	13
2.2.4. Generación de trayectoria	16
2.2.5. Coordinación multi-robot	18
<b>3. Marco Teórico</b>	21
3.1. Conceptos fundamentales	22
3.2. Funcionamiento de un VANT	24
3.3. Control de un VANT	25
3.4. Estimación de posición	25
3.4.1. Odometría visual inercial (Visual Inertial Odometry - VIO)	26
3.5. Planificación de trayectoria	26
3.5.1. Evasión de obstáculos	26
3.6. Representación medio ambiente	27
3.6.1. Ray casting	27

3.6.2. Point clouds . . . . .	28
3.7. Exploración multi-robot . . . . .	28
3.7.1. Asignación de tareas . . . . .	28
3.8. Arquitectura de un robot . . . . .	28
3.9. El uso del sistema operativo robótico ROS . . . . .	29
<b>4. Enfoque propuesto</b>	<b>33</b>
4.1. Diseño del sistema . . . . .	34
4.2. Máquina de estados para un VANT . . . . .	38
4.3. Aplicación de nodos en ROS . . . . .	40

# Índice de Figuras

4.1. Arquitectura de la solución propuesta . . . . .	35
4.2. Máquina de estados finitos . . . . .	38
4.3. Arquitectura de la solución propuesta . . . . .	40

# Índice de Tablas

2.1. Trabajos relacionados . . . . .	19
--------------------------------------	----

## Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

por

**Luis Alberto Ballado Aradias**

Cinvestav Unidad Tamaulipas

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 2024

Dr. José Gabriel Ramirez-Torres, Co-Director

Dr. Eduardo Arturo Rodriguez-Tello, Co-Director

En la última década se ha tenido un aumento en la investigación y el desarrollo en el campo de los vehículos aéreos no tripulados (VANTS), lo que ha dado lugar a importantes avances e innovaciones en esta área. Los sistemas con múltiples vehículos aéreos no tripulados (multi-VANT) permiten la adquisición simultánea de datos desde múltiples puntos de vista privilegiados, en comparación con robots terrestres, lo que permite mejorar la generación de mapas de entornos desconocidos. El uso de algoritmos de coordinación inteligente y la toma descentralizada de decisiones proporciona una mayor confiabilidad a estos sistemas, ya que cualquier falla o mal funcionamiento de un VANT puede ser compensado por los VANTS restantes. Además, un buen protocolo de comunicación permite una colaboración fluida entre los robots, mejorando su capacidad para moverse de un lugar a otro evitando obstáculos a su paso (navegar), descubrir un entorno desconocido adquiriendo información a su paso (explorar). Asimismo, la integración de sensores de última generación los convierte en herramientas útiles en diversos dominios que van desde el entretenimiento, hasta aplicaciones de vigilancia. La mayor parte de las aplicaciones que hacen uso de VANTS suelen carecer de autonomía, requiriendo la asistencia y vigilancia constantes de un usuario humano. Para que un robot se considere autónomo deberá tomar decisiones y realizar tareas sin necesidad de que alguien le diga qué hacer o guiarlo paso a paso.

El enfoque de este trabajo es la propuesta de una estrategia descentralizada, capaz de coordinar múltiples vehículos aéreos no tripulados con habilidades para la exploración, generación de mapas y planificación de trayectorias para explorar eficientemente un volumen desconocido.

## Strategies for coordinated multi-UAV exploration

by

**Luis Alberto Ballado Aradias**

Cinvestav Unidad Tamaulipas

Research Center for Advanced Study from the National Polytechnic Institute, 2024

Dr. José Gabriel Ramirez-Torres, Co-advisor

Dr. Eduardo Arturo Rodriguez-Tello, Co-advisor

In the last decade, there has been an increase in research and development in the field of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), leading to significant advancements and innovations in this area. Systems with multiple Unmanned Aerial Vehicles (multi-UAV) allow for the simultaneous acquisition of data from multiple vantage points, compared to ground robots, thus enhancing the generation of maps of unknown environments. The use of intelligent coordination algorithms and decentralized decision-making provides greater reliability to these systems, as any failure or malfunction of one UAV can be compensated for by the remaining UAVs. Additionally, effective communication protocols enable seamless collaboration among the robots, enhancing their ability to navigate from one place to another while avoiding obstacles (navigation) and to discover an unknown environment by acquiring information along the way (exploration). Likewise, the integration of state-of-the-art sensors turns them into useful tools in various domains like drones shows to vigilance and monitoring. Most applications that use UAVs often lack autonomy, requiring constant assistance and supervision from a human user. For a robot to be considered autonomous, it must make decisions and perform tasks without needing someone to tell it what to do or guide it step by step.

The focus of this work is on proposing a decentralized strategy capable of coordinating multiple unmanned aerial vehicles with exploration, mapping, and trajectory planning capabilities to efficiently explore an unknown volume.

# Nomenclatura

<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>UAS</b>	Unmanned Aerial System
<b>VANT</b>	Vehículo Aéreo No Tripulado
<b>SANT</b>	Sistema Aéreo No Tripulado
<b>MAVs</b>	Micro-Vehículos Aéreos no tripulados
<b>SLAM</b>	Simultaneous Localization and Mapping
<b>ESC</b>	Electronic Speed Control
<b>VIO</b>	Visual Inertial Odometry



# 1

## Introducción

Los robots de servicio son máquinas autónomas diseñadas con el objetivo de prestar servicio a los humanos fuera del ambiente industrial, convirtiéndose poco a poco en una parte esencial en nuestras vidas. Los podemos encontrar en diversos ámbitos, como en el entretenimiento, limpieza, logística, entre otras soluciones innovadoras.

Los vehículos aéreos no tripulados (VANTS) han evolucionado rápidamente y se han convertido en sistemas versátiles capaces de una amplia gama de aplicaciones, desde vigilancia hasta misiones de búsqueda y rescate. Entre ellas, las tareas de exploración en entornos complejos y dinámicos representan un área interesante y desafiante, donde la coordinación de múltiples vehículos aéreos no tripulados se vuelve primordial. Este tema es de creciente importancia a medida que los vehículos aéreos no tripulados (VANTS) continúan transformando distintas áreas, incluida la agricultura, el monitoreo ambiental, mantenimiento de infraestructuras (puentes, edificios, líneas eléctricas) y la respuesta a desastres naturales, reduciendo los riesgos y costos asociados con las inspecciones manuales.

Los vehículos aéreos no tripulados (VANTS) capaces de realizar tareas con autonomía generalmente cuentan con mayores capacidades de carga y procesamiento computacional, así como sensores capaces de percibir grandes volúmenes de datos en un tiempo reducido. Estos vehículos aéreos no tripulados (VANTS) se centran en realizar tareas sencillas y estáticas en áreas abiertas con rutas predeterminadas, o bien, en contextos de operación por control remoto por un usuario. Sin embargo en donde los espacios son estrechos, se optan por el uso de VANTS reducidos, comúnmente llamados Micro-vehículos aéreos no tripulados (MAVs).

La exploración de áreas desconocidas, a través de la sinergia de sistemas con múltiples vehículos aéreos no tripulados (Multi-VANTS) promete ser una solución innovadora. Al comprender y perfeccionar una estrategia para la coordinación de múltiples vehículos aéreos no tripulados (Multi-VANTS) en tareas de exploración, esperamos descubrir nuevas posibilidades, replicar o romper los límites existentes, y en última instancia, avanzar en los campos de la robótica y la exploración.

## 1.1 Antecedentes y motivación

### Antecedentes

La robótica móvil es una rama de la robótica que se enfoca en el diseño, construcción, programación y operación de robots capaces de moverse de manera autónoma o semi-autónoma en entornos diversos.

Uno de los primeros hitos importantes en la robótica móvil fué el desarrollo del robot shakey en la década de 1970, que se considera el primer robot móvil capaz de desplazarse evitando colisiones a su paso, sentando las bases en algoritmos de inteligencia artificial para búsquedas informadas surgiendo el algoritmo A\*.

Durante las décadas siguientes, se produjeron avances significativos en la miniaturización de componentes electrónicos, sensores y actuadores, lo que permitió la creación de robots móviles más

pequeños y versátiles. A finales del siglo XX, los robots móviles comenzaron a ser utilizados en una variedad de aplicaciones, como la exploración espacial, la agricultura, la vigilancia y la logística.

En paralelo, los avances en inteligencia artificial, visión por computadora, planificación de trayectorias y sistemas de control contribuyeron al desarrollo de robots móviles más autónomos y adaptables. El surgimiento de algoritmos de aprendizaje automático y técnicas de percepción avanzada ha permitido a los robots móviles interactuar de manera más efectiva con su entorno y tomar decisiones en tiempo real.

En la actualidad, la robótica móvil está experimentando un rápido crecimiento gracias a la convergencia de diversas tecnologías, como la computación en la nube y la robótica colaborativa. Se están desarrollando robots móviles cada vez más sofisticados y capaces de realizar una amplia gama de tareas en entornos dinámicos y no estructurados. Además, se espera que la robótica móvil desempeñe un papel crucial en aplicaciones futuras, como la asistencia en el hogar, la atención médica, la exploración submarina y la entrega de paquetes.

Un sistema autónomo de un vehículo aéreo no tripulado, consta de cuatro algoritmos:

- Generación de una representación del medio ambiente
- Planificación de trayectorias
- Evasión de obstáculos
- Comunicación

La computadora embebida para un sistema de navegación usado en vehículos aéreos no tripulados de menor tamaño, son de bajo rendimiento. Pero, su necesidad de autonomía sigue siendo la misma que un VANT de mayor tamaño. Es por ello que es necesario equiparlos con algoritmos de baja complejidad computacional.

La necesidad de coordinación entre múltiples VANTS en tareas de exploración, surge debido a las limitaciones individuales en cuanto a la extensión de terreno que pueden cubrir y su desempeño. La exploración de áreas extensas o peligrosas a menudo exige un enfoque colaborativo, donde los

VANTS trabajen juntos para optimizar la asignación de recursos y mejorar la recopilación y el análisis de datos.

Sin embargo, el camino hacia una coordinación entre múltiples vehículos aéreos no tripulados, presenta diversos desafíos. Las complejidades de gestionar un grupo de vehículos aéreos no tripulados, navegar en entornos dinámicos y distribuir tareas de forma inteligente son sólo algunas de las cuestiones que exigen nuestra atención.

## **Motivación**

El potencial del uso de los vehículos aéreos no tripulados en tareas de búsqueda y rescate, inspección, mapeo, vigilancia, entre otras, es de gran interés a explorar, debido a las habilidades de vuelo que presentan en favor de la realización de estas tareas, y en especial situaciones que podrían poner en riesgo a personas.

Enviar personal de rescate dentro de un edificio parcialmente colapsado en busca de sobrevivientes, es poner a más personas en un gran riesgo, pues no se sabe qué es lo que les espera en el interior del edificio; esto limita la capacidad de tomar buenas decisiones acerca de si es seguro seguir cierto camino.

Operar en ambientes como éste u otros similares requieren de robots con capacidades de navegar sobre terrenos difíciles y evadir obstáculos de forma segura para obtener información del entorno que pueda ser útil al personal de rescate.

Una posible solución consiste en un robot móvil aéreo (VANT) capaz de desplazarse sobre terrenos difíciles y navegar en espacios cerrados de manera segura, que además recabe información del entorno. Esto implica realizar tareas de reconocimiento del ambiente, evasión de obstáculos y seguimiento de trayectorias.

## 1.2 Planteamiento del problema

Dado un volumen de interés desconocido en un espacio cerrado que se desea explorar denotado como  $\mathcal{W}$ , tal que  $\mathcal{W} \subset \mathbb{R}^3$ .

- El volumen se discretiza usando unidades cúbicas tridimensionales (voxel) tomando valores  $v_{libre}, v_{ocup}, v_{desc}$ .
- Un conjunto de VANTS con una cámara RGB-D embarcadas denotado como  $\mathcal{V} = \{\mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2, \mathcal{V}_3, \dots, \mathcal{V}_n\}$ , comenzando cada uno en un estado inicial conocido  $q = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\}$ , y terminando en una configuración que maximice la construcción de un mapa.

Coordinar el conjunto de VANTs para reducir el tiempo total de exploración.

## 1.3 Hipótesis y preguntas de investigación

### Hipótesis

*“Una estrategia que coordine y asigne tareas de exploración para múltiples vehículos aéreos no tripulados de manera descentralizada, en combinación con una arquitectura de software diseñada para resolver problemas de localización, gestión de mapas y planificación de rutas, mejorará la eficiencia y cobertura de la exploración en interiores de un entorno desconocido”.*

### Preguntas de investigación

1. ¿Qué características de la dinámica de un vehículo aéreo no tripulado son cruciales para lograr trayectorias suaves y continuas?
2. ¿Podría un planificador de trayectorias que aproveche las regiones libres de obstáculos acelerar los desplazamientos de los vehículos aéreos no tripulados y, consecuentemente, reducir los tiempos de exploración?

3. ¿Qué mecanismos de coordinación existen dentro de la literatura que podrían ayudar en resolver el problema de exploración de múltiples vehículos aéreos no tripulados?

## 1.4 Objetivos

### Objetivo general

*“Desarrollar una estrategia de exploración descentralizada que permita resolver los problemas de coordinación para múltiples vehículos aéreos no tripulados en ambientes desconocidos.”.*

### Objetivos específicos

Para lograr nuestro objetivo principal, se consideran los siguientes objetivos específicos a cubrir:

- Desarrollar una arquitectura de software que resuelva los problemas de autonomía para un vehículo aéreo no tripulado (localización, manejo de mapas y planificación de trayectorias).
- Implementar un mecanismo de coordinación descentralizado que asigne tareas de exploración.
- Realizar pruebas y simulaciones de la solución propuesta en diversos entornos, analizando la relación tiempo de exploración y cobertura del área de interés.

## 1.5 Solución propuesta

Para abordar la exploración con múltiples vehículos aéreos no tripulados de manera descentralizada y considerando limitaciones en el alcance de la comunicación, se hace referencia al trabajo de Elizondo-Leal[8], que propone un algoritmo basado en un proceso de subasta, donde cada robot calcula ofertas de manera autónoma con el objetivo de contribuir al equipo de manera óptima. Cuando un robot alcanza su meta, toma decisiones basadas en su propio criterio, teniendo en cuenta a todos los miembros del equipo y el alcance de la comunicación, en un enfoque descentralizado sin necesidad de un módulo central.

Para validar la propuesta de exploración coordinada se necesita primero resolver la autonomía de un vehículo aéreo no tripulado diseñando una arquitectura que incluya la coordinación multi-robot propuesta en el trabajo doctoral de Elizondo-Leal[8].

1. Conocer los fundamentos que nos aproximen a realizar la tarea de exploración autónoma con múltiples VANTS.
2. Profundizar en la comprensión de los comandos de control y la generación de odometría para un VANT tipo cuadricóptero.
3. Obtener y procesar la información proveniente de un sensor de tipo RGB-D dentro del sistema operativo ROS.
4. Integrar un planificador de trayectoria reactivo que, combinado con la percepción recibida por la cámara RGB-D, nos permita evadir obstáculos en su paso y construir una representación tridimensional del medio ambiente.
5. Elaborar la exploración con un VANT de tipo cuadrotor.
6. Implementar la estrategia de exploración bajo los conceptos de cohesión, exploración y explotación.

# 2

## Estado del Arte

En este capítulo, se presenta un panorama de las distintas propuestas en exploración que involucran el uso de múltiples vehículos aéreos no tripulados (VANTs), evaluando tanto sus ventajas como sus limitaciones. Nuestra atención se centra especialmente en las propuestas relacionadas con la exploración multi-robot.

La exploración multi-robot se enfoca principalmente en guiar a cada robot de forma eficiente con la finalidad de obtener una representación del medio ambiente asumiendo, que la localización es perfecta y conocida en todo momento. Por otra parte, el problema de localización y mapeo simultáneo (SLAM) se enfoca en el problema de construir un mapa mientras se trata de localizar al robot dentro del mismo.

Para lograr una exploración efectiva, los robots deben coordinar sus acciones, compartir información sobre el entorno y planificar sus movimientos de manera inteligente, teniendo en cuenta la distribución de tareas, la comunicación entre robots y la detección de obstáculos.



## 2.1 Introducción

Las aplicaciones de la robótica industrial se han centrado en realizar tareas simples y repetitivas. La necesidad de robots con capacidad de identificar cambios en su entorno y reaccionar sin la intervención humana, da origen a los robots inteligentes. Aunado a ello, si deseamos que el robot se mueva libremente, los cambios en su entorno pueden aumentar rápidamente y complicar el problema de desarrollar un robot que muestre un comportamiento inteligente.

El despliegue rápido de robots en situaciones de riesgo, búsqueda y rescate ha sido un área ampliamente estudiada en la robótica móvil. Recientemente, concursos como el DARPA Subterranean (SubT) Challenge, buscan acelerar la investigación y desarrollo de tecnología en escenarios complejos subterráneos, donde factores como exploración, planeación y coordinación son clave para lograr los objetivos del Reto [26], la creación de una estrategia de exploración es pieza clave para el cumplimiento del reto.

La exploración de un ambiente desconocido empleando multi-VANT es un área relativamente nueva y con mucho crecimiento en los últimos años. Se han abordado una variedad de temas para lograr la exploración autónoma, desde la planificación de rutas para múltiples robots terrestres en tareas de exploración [29], estrategias para la coordinación y protocolos de comunicación [11]. Diversos estudios de aplicaciones multi-VANT se han realizado para resolver tareas como el monitoreo ambiental [1], la agricultura de precisión [22] y operaciones de búsqueda y rescate [28]. A pesar de que los VANTS comerciales modernos cuentan con avanzadas integraciones en los problemas de navegación. Siguen sin incorporar una solución completa de autonomía.

La dirección en que apunta el estado del arte actualmente se puede atribuir a los avances en tecnología en la última década que nos han permitido dotar de autonomía a VANTS de menor tamaño. Investigadores de diversas áreas, que incluyen las ciencias computacionales y la ingeniería, han contribuido al progreso de este campo.

Sin embargo, la necesidad de una arquitectura de software descentralizada que englobe los retos

de exploración, junto con un mecanismo de coordinación para múltiples VANTS, surge como una área de investigación prometedora que garantice el funcionamiento correcto de los componentes necesarios para realizar tareas de exploración coordinada multi-VANT.

En esta revisión del estado del arte se citan trabajos relacionados a la coordinación multi-VANT para tareas de exploración, que sirven de guía para la realización de este trabajo.

La exploración es una tarea fundamental en robótica, el objetivo es construir un mapa de un espacio desconocido con ayuda de un algoritmo de planificación de trayectoria que guiará al robot donde moverse. Una representación del ambiente (mapa) es necesaria para tomar la decisión de la mejor ruta hacia un mayor conocimiento del espacio que lo rodea.

## 2.2 Trabajos relacionados

El presente texto se centra en el estado del arte de las estrategias para la exploración coordinada con múltiples Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), abordando diversos temas fundamentales en este campo de investigación. La exploración, la representación del medio ambiente en 3D, la planificación de trayectorias, la generación de trayectorias y la coordinación multirobot son aspectos cruciales que influyen en el diseño y la implementación de sistemas autónomos para la exploración coordinada. En este contexto, se analizan las tendencias actuales, los enfoques más relevantes y los desafíos existentes.

### 2.2.1 Exploración

Para poder construir una buena representación del ambiente, debemos comprender como realizar una exploración. En una planificación para una exploración, después de una observación, el robot debe decidir donde moverse.

Buscando acelerar la exploración, el robot debe percibir el ambiente desconocido lo más rápido posible. En la literatura existen dos principales técnicas:

- Next Best View (NBV) planning - El planificador elige la siguiente posición en base a la percepción y una función de utilidad que maximice la ganancia de información.
- Basado en fronteras - La estrategia es simple y eficiente al asignar rutas al robot en base a la frontera más cercana.

Los trabajos de Cieslewski et al.[6], Bartolomei et al.[2] se enfocan en la exploración haciendo uso de estrategias basadas en fronteras.

Mientras que los trabajos de Papachristos et al.[24], Selin et al.[27], Zhou et al.[35], que también trabajan en el problema de exploración autónoma. Utilizan la estrategia de Next Best View Planner guiando al robot donde puedan aportar más información en la construcción del medio ambiente (mapa). Por el contrario McGuire et al.[18], al tener un comportamiento tipo bug guía su exploración con el uso de su propuesta denominada Swarm Gradient Bug Algorithm.

### 2.2.2 Representación medio ambiente 3D

Con la llegada de las primeras cámaras capaces de obtener valores de profundidad (RGB-D), y con mayores capacidades de almacenamiento en menos espacio, nos permiten tratar el medio ambiente a través de representaciones tridimensionales. Podemos citar por ejemplo la propuesta de estructura de datos basada en grafos octrees por Meagher[19] con una baja complejidad en el orden logarítmico, por consiguiente en el año 2013 se introdujo un nuevo concepto para la representación de mapas 3D basados en esos principios, haciendo que la representación de entornos 3D se realice de manera eficiente para aplicaciones en robótica donde se necesitan algoritmos rápidos. Los trabajos de Hornung et al.[13] introducen los Octomaps, que se utilizan para representar mapas tridimensionales como subdivisiones marcadas como ocupadas, desocupadas y desconocidas, para aplicaciones de navegación.

En recientes trabajos Min et al.[20] proponen dar solución a los cuellos de botella que se presentan en el Octomap buscando acelerar los tiempos de cómputo en la construcción de mapas a partir de

la implementación de Aceleradores Gráficos GPU.

Los trabajos de [Cieslewski et al. \[6\]](#) hacen uso de la representación del entorno por medio de una rejilla tridimensional (voxel grids), la versión tridimensional de la rejilla de ocupación empleada en robótica móvil terrestre, para planificar trayectorias de exploración. [Usenko et al. \[31\]](#) proponen el uso del mapa centrando al robot en un círculo tridimensional de tamaño fijo, por su parte [Mohta et al. \[21\]](#) hacen uso de un mapa híbrido formado con la combinación de un mapa local 3D con un mapa global en 2D. [Florence et al. \[9\]](#) propone un framework para el manejo de datos para mapas 3D a partir de la información de una cámara de profundidad (RGB-D). La propuesta hace uso de una estructura con cuadrículas de ocupación y datos de profundidad.

Diversos trabajos en los que se incluyen a [Gao et al. \[10\]](#), [Lin et al. \[16\]](#), [\[23\]](#) [\[23\]](#), añaden una estructura adicional a su representación del medio ambiente, usando distancias que permiten la evasión de obstáculos de forma segura. Sin embargo estas soluciones pueden ser costosas requiriendo un mayor procesamiento de computo.

[Collins and Michael \[7\]](#) usan una representación local del mapa con ayuda de una estructura de datos KD-Tree. Usa un mapa representado en voxels, mientras que un grafo topológico representa todo el entorno explorado. Por otra parte el trabajo de [McGuire et al. \[18\]](#) no hace uso de un mapa. Al generar movimientos reactivos tipo bug, logra generar una navegación autónoma con odometría visual.

Los trabajos de [Papachristos et al. \[24\]](#), [Selin et al. \[27\]](#), [Campos-Macías et al. \[3\]](#), [Zhou et al. \[35\]](#), [Bartolomei et al. \[2\]](#), optan por el uso de OctoMaps. Haciendo de la representación de ambientes en 3D con octomaps un estandar en la robótica moderna.

### 2.2.3 Planificación de trayectorias

Uno de los desafíos clave en la colaboración de múltiples VANTS es la planificación de rutas. Se han desarrollado diversos algoritmos para optimizar la planificación de rutas dentro de la robótica móvil, minimizando los riesgos de colisión y mejorando la eficiencia en sus misiones. Estos algoritmos

tienen en cuenta varios factores como las restricciones del robot y la ubicación del objetivo, para generar trayectorias seguras.

El objetivo principal de los algoritmos de planificación de trayectorias, es el de guiar al robot desde el punto de inicio al punto destino. Los trabajos por [Lumelsky and Stepanov\[17\]](#), dieron respuesta a problemáticas de navegación eficiente, que no requieren de una representación del medio ambiente y emplean, por lo tanto, pocos recursos computacionales y de memoria (algoritmos tipo bug).

Matemáticamente, el problema de planificación de trayectorias es resuelto a través del modelado del medio ambiente utilizando grafos, siendo un grafo una representación matemática de vértices y aristas. [Hart et al.\[12\]](#), al mejorar el algoritmo de Dijkstra para el robot Shakey, logró navegar en una habitación que contenía obstáculos fijos. El objetivo principal del algoritmo A\* es la eficiencia en la planificación de rutas al incorporar una heurística. A su vez, el algoritmo D\*, propuesto por [Stentz\[30\]](#), ha demostrado operar de manera eficiente ante obstáculos dinámicos; en comparación con el algoritmo A\* que vuelve a ejecutarse al encontrarse con un obstáculo no previsto inicialmente, el algoritmo D\* usa la información previa para buscar una nueva ruta hacia el objetivo.

Por otra parte, el algoritmo RRT (Rapidly Exploring Random Trees), propuesto por [LaValle\[15\]](#), es ampliamente usado para la planificación de rutas en robots modernos. El algoritmo construye de forma incremental una estructura de árbol mediante un muestreo aleatorio en el espacio de configuraciones, uniendo aleatoriamente nuevas posiciones al árbol existente hasta alcanzar la posición final. Las modificaciones realizadas al algoritmo RRT por [Karaman and Frazzoli\[14\]](#), incorporando una heurística de costo por recorrer, permite encontrar rutas casi óptimas de manera eficiente.

En recientes trabajos de [Yang et al.\[34\]](#), muestran la capacidad de implementación de algoritmos clásicos de planificación de trayectorias, como los grafos de visibilidad, para tareas en entornos conocidos y no conocidos, utilizando una representación del ambiente a base de polígonos, logrando un rápido planificador que también resuelve obstáculos nuevos en el ambiente, logrando resultados comparables a las estrategias más recientes como D\* e inclusive RRT\*.

Un enfoque muy recurrente para abordar el problema de planificación de trayectorias, es el uso de las metaheurísticas bio-inspiradas (Algoritmos Genéticos (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization (ACO), Firefly Algorithm (FA)). Estas estrategias se inspiran en sistemas y procesos biológicos para resolver problemas complejos de optimización.

Las metaheurísticas han demostrado ser efectivas para resolver una amplia gama de problemas de optimización; sin embargo, su adopción en el campo de la robótica móvil se ve limitada por las restricciones de ejecución en tiempo real. La robótica a menudo implica la toma de decisiones en tiempo real, donde los robots deben responder rápidamente a entornos cambiantes. Las metaheurísticas suelen requerir extensos recursos computacionales y temporales para converger en una solución óptima, lo que puede no ser factible en aplicaciones de robótica en tiempo real, particularmente en vehículos aéreos con limitado poder de cómputo. El control y la planificación en tiempo real en robótica a menudo requieren algoritmos de baja complejidad computacional, como la planificación clásica o los enfoques de control reactivo.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que ciertamente hay áreas dentro de la robótica donde las metaheurísticas se han aplicado con éxito, como la planificación de rutas de robots en entornos complejos, la robótica de enjambres o la asignación de tareas en sistemas de múltiples robots. Los enfoques híbridos que combinan metaheurísticas con optimización basada en modelos o algoritmos específicos de tareas pueden aprovechar las fortalezas de ambos y proporcionar soluciones efectivas para aplicaciones en la robótica.

En lugar de planificar trayectorias, los autores en Cieslewski et al.[6], emplean un enfoque reactivo que genera comandos de velocidad instantáneos hacia las fronteras descubiertas. Papachristos et al.[24], Campos-Macías et al.[3] construye un árbol de exploración rápido y aleatorio (RRT) con un costo relacionado al número de nuevos voxels para identificar el próximo objetivo, y un segundo RRT para trazar una ruta hacia el punto de vista seleccionado minimizando la incertidumbre en la posición y puntos de referencia del robot. Por su parte, Selin et al.[27] introduce nodos con un alto potencial de ganancia de información en un RRT para utilizarlos como objetivos de planificación

después de que el agente ha explorado su entorno cercano.

[Oleynikova et al.][23] que también se ocupa del problema de exploración, incorpora un objetivo adicional de alcanzar una meta para abordar de manera explícita el problema de quedarse atrapado en mínimos locales. Eligen la próxima meta al seleccionarla con cierta probabilidad desde el objetivo global.

[Mohta et al.][21], [Gao et al.][10] y [Lin et al.][16] emplean la información generada en la etapa de planificación para establecer un problema de optimización que produzca trayectorias seguras y dinámicamente viables. Todos buscan generar un corredor seguro para restringir la optimización.

[Mohta et al.][21], [Lin et al.][16], y [Florence et al.][9] emplean un algoritmo A\* para planificar una trayectoria para buscar una distancia mínima hacia la siguiente frontera.

[18][18] presenta una solución de navegación para enjambres de pequeños multi-VANTS que exploran entornos desconocidos sin señal de GPS de forma centralizada. Éste trabajo propone el algoritmo Swarm Gradient Bug (SGBA), que maximiza la cobertura al hacer que los robots se muevan en diferentes direcciones lejos del punto de partida. Los robots navegan por el entorno y enfrentan obstáculos estáticos sobre la marcha mediante la odometría visual y algoritmos tipo BUG para el seguimiento de paredes. Además, se comunican entre sí para evitar colisiones y maximizar la eficiencia de la búsqueda. Para regresar al punto de partida, los robots realizan una búsqueda de gradiente hacia una señal Bluetooth de baja potencia.

Independientemente del enfoque utilizado para generar la ruta, un aspecto crítico para la navegación libre de colisiones en entornos desconocidos es imponer restricciones en el plan de movimiento para navegar dentro del campo de visión actual hacia el siguiente punto de referencia, utilizada por los métodos en [Zhou et al.][35] y [Bartolomei et al.][2]

#### 2.2.4 Generación de trayectoria

La propuesta de [Gao et al.][10] busca confinar toda la trayectoria dentro del espacio libre. Plantean un programa cuadrático (QP, por sus siglas en inglés) con restricciones, representando la trayectoria

en forma de curvas de Bezier por tramos. Mohta et al.[21] formulan un QP para la generación de trayectorias donde, además de las restricciones habituales de velocidad, aceleración y jerk, agregan un término en la función de costo proporcional al cuadrado de la distancia entre la trayectoria y los segmentos de línea de la trayectoria modificada. Para asignar tiempo a cada segmento de spline, lo cual es crucial para la viabilidad del QP y la calidad de la trayectoria resultante, utilizan los tiempos obtenidos ajustando un perfil de velocidad trapezoidal a través de los segmentos.

Usenko et al.[31] plantean un problema de replanificación local como la optimización de una función de costo compuesta por un término que penaliza las desviaciones de posición y velocidad al final de la trayectoria, así como un costo por colisión. La trayectoria local se representa a través de un B-spline cúbico uniforme, lo cual simplifica el cálculo de los términos de costo. Por otro lado, Lin et al.[16] formulan un problema de optimización no lineal utilizando polinomios de octavo orden para representar la trayectoria.

Cieslewski et al.[6] emplea un modo reactivo para generar comandos de velocidad instantáneos basados en las fronteras que se observan en el momento. Para aquellas fronteras dentro del alcance del sensor de profundidad, la velocidad deseada será la máxima y estará orientada hacia el volumen desconocido. En contraste, para las fronteras más cercanas al robot, la velocidad deseada será menor. Por otro lado, el algoritmo presentado por Florence et al.[9], busca un movimiento primitivo 3D que maximice el progreso euclidiano hacia el objetivo global, teniendo en cuenta las probabilidades de colisión para trayectorias completas en entornos con obstáculos.

Adicionalmente, es crucial abordar de manera explícita las restricciones dinámicas del movimiento lineal del robot para garantizar su permanencia en áreas seguras. En específico, los trabajos de Cieslewski et al.[6], Usenko et al.[31], Selin et al.[27], Lin et al.[16], Collins and Michael[7] y McGuire et al.[18] no gestionan las restricciones dinámicas de forma explícita. En contraste, los algoritmos propuestos en Florence et al.[9], Gao et al.[10], Oleynikova et al.[23], Papachristos et al.[24], Mohta et al.[21], Campos-Macías et al.[3], Zhou et al.[35] y Bartolomei et al.[2] que abordan de manera explícita las restricciones dinámicas del robot.



### 2.2.5 Coordinación multi-robot

Además de la planificación de rutas, la coordinación de múltiples robots para la exploración requiere de una estrategia de comunicación efectiva, que garantice la coherencia del mapa que se va generando. Se han investigado diferentes protocolos de comunicación y estrategias de intercambio de información para permitir la colaboración. Algunos enfoques utilizan comunicación directa entre los robots, mientras que otros emplean una arquitectura de red donde los múltiples robots se comunican a través de una infraestructura descentralizada [Chen and Hung[4], Bartolomei et al.[2], Zhou et al.[35], Bartolomei et al.[2], mostrando la tolerancia a fallas en equipos para tareas de búsqueda y rescate.

En recientes trabajos [5][5] ha demostrado descentralizar la tarea de SLAM para la creación de mapas en tareas de exploración multi-VANT eliminando el bloque de optimización, haciendo uso de técnicas de machine learning (teach and repeat).

La dirección que apunta el estado del arte, es en la repartición inteligente de tareas para un problema multi-agente en tareas de exploración.

En el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Unidad Tamaulipas se han realizado investigaciones en el área de exploración multi-robot y diseño de prototipos de VANTS, lo cual sirve como antecedente para este trabajo. Este relevante desarrollo, propuesto por [Elizondo-Leal[8], tiene como objetivo principal el despliegue de una estrategia de coordinación para múltiples robots móviles basado en un enfoque de auto-ofertas (método húngaro).

Tabla 2.1: Trabajos relacionados

REFERENCIA	APLICACIÓN	GENERACIÓN MAPA	PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIA	GENERACIÓN TRAYECTORIA	SENSOR RGB-D	DINÁMICA VANT	multi-VANT
Cieslewski et al. [6]	Exploración	3D Grid	Basado en fronteras	Control directo de velocidad	✓	✗	✗
Usenko et al. [31]	Punto Objetivo	Cuadrícula egocéntrica Voxel 3D	Offline RRT*	Curvas de Bezier	✓	✗	✗
Mohta et al. [21]	Punto Objetivo	3D-Local y 2D-Global	A*	Programación cuadrática	✗	✓	✗
Lin et al. [16]	Punto Objetivo	3D voxel array TSDF	A*	Optimización cuadrática	✗	✗	✗
Papachristos et al. [24]	Exploración	Octomap	Next Best View Planner (NBVP)	Control directo de velocidad	✗	✓	✗
Oleynikova et al. [23]	Punto Objetivo	Voxel Hashing TSDF	Next Best View Planner (NBVP)	Optimización cuadrática	✓	✓	✗
Gao et al. [10]	Punto Objetivo	Mapa de cuadrícula	Método de marcha rápida	Optimización cuadrática	✗	✓	✗
Florence et al. [9]	Punto Objetivo	Busqueda basada en visibilidad	2D A*	Control predictivo por modelo (MPC)	✓	✓	✗
Selin et al. [27]	Exploración	Octomap	Next Best View Planner (NBVP)	Control directo de velocidad	✗	✗	✗
McGuire et al. [18]	Exploración	NA	Swarm Gradient Bug Algorithm (SGBA)	Control directo de velocidad	✗	✗	✓
Collins and Michael [7]	Punto Objetivo	KD Tree + Mapa en Voxel	Búsqueda en Grafo	Movimientos suaves	✓	✗	✗
Campos-Macías et al. [3]	Punto Objetivo	Octree	Rapidly Exploring Random Trees (RRT)	Basado en contornos	✓	✓	✗
Cieslewski [5]	Exploración	Octomap	Basado en fronteras	Control directo de velocidad	✓	✓	✓
Zhou et al. [35]	Exploración	Octomap HGrid	Next Best View Planner (NBVP)	Control directo de velocidad	✓	✓	✓
Bartolomei et al. [2]	Exploración	Octomap	Basado en fronteras	Control directo de velocidad	✓	✓	✓

# 3

## Marco Teórico

La exploración coordinada con múltiples vehículos aéreos no tripulados es un área de investigación actual en la robótica móvil, con aplicaciones en campos como la vigilancia, la exploración de áreas de difícil acceso y la respuesta a emergencias. Para comprender plenamente este tema, es crucial tener una sólida comprensión de los fundamentos teóricos que sustentan tanto la representación del movimiento de los vehículos aéreos no tripulados como los algoritmos para planificación de trayectorias y coordinación que facilitan su trabajo conjunto para alcanzar objetivos comunes mientras evitan colisiones y construyen una representación del medio ambiente.

Al comprender estos aspectos teóricos fundamentales, estaremos preparados para abordar los desafíos de la exploración coordinada con múltiples vehículos aéreos no tripulados.

## 3.1 Conceptos fundamentales

### Exploración o localización y mapeo simultáneo

Una diferencia clave entre el problema de localización y mapeo simultáneo (SLAM) y la exploración radica en sus objetivos y enfoques:

El objetivo principal de la **localización y mapeo simultáneo** (SLAM) es estimar simultáneamente la trayectoria del robot y construir un mapa del entorno desconocido en el que se encuentra.

De manera similar, el objetivo principal de la **exploración** es recorrer y mapear un área desconocida de manera eficiente y completa, sin necesariamente enfocarse en la localización precisa del robot en tiempo real.

Sin embargo el enfoque de la **localización y mapeo simultáneo** (SLAM) se centra en la fusión de datos de sensores (como cámaras, LIDAR, etc.) con algoritmos de estimación de estado (como filtros de Kalman extendidos o métodos basados en grafos) para actualizar la estimación de la posición del robot y construir un mapa del entorno.

Por otra parte, el enfoque de la **exploración** se centra en la planificación de trayectorias y la toma de decisiones para guiar al robot a través del entorno de manera que se maximice la cobertura del área a explorar y se minimice el tiempo y los recursos necesarios.

### Navegación

En la fase de exploración, el robot debe escoger el objetivo más óptimo y diseñar rutas varias veces hasta que la exploración esté completa. Por consiguiente, es esencial contar con una estrategia de navegación sólida para que cada robot pueda moverse de forma segura y efectiva, sorteando obstáculos y solucionando cualquier interferencia con otros robots en su camino.

## Coordinación

Varios robots pueden realizar tareas de manera más rápida que un solo robot. No obstante, un sistema con más robots no aumenta su productividad en comparación con un solo robot, debido a diversos factores como interferencia entre robots y redundancia en la exploración. La coordinación se vuelve esencial para maximizar las ventajas de tener un sistema multi-robot.

## Comunicación

La coordinación entre robots se logra gracias a su capacidad para intercambiar información, generalmente utilizando tecnologías de comunicación por radio. Es esencial garantizar una comunicación constante para evitar discrepancias en la información entre los diferentes robots. Esto presenta desafíos importantes en el desarrollo e implementación de algoritmos para sistemas con múltiples robots, ya que además de cumplir con las tareas de colaboración, los robots deben asegurar la continuidad de la conexión en la red de comunicación.

## Sistema de ejes coordenados

El sistema de ejes coordenados en tres dimensiones (3D) es una herramienta fundamental en la representación y comprensión del espacio tridimensional. Consiste en tres ejes:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , que se intersectan en un punto de origen común. Estos ejes proporcionan un marco de referencia para describir la posición y orientación de objetos en el espacio 3D, facilitando el análisis de información espacial. Un entendimiento de este sistema es importante para la planificación de trayectorias, la navegación, la representación del medio ambiente para el diseño de sistemas autónomos, incluyendo los vehículos aéreos no tripulados (VANTS).

## Coordenadas homogéneas

Las coordenadas homogéneas son una herramienta matemática esencial en la representación y manipulación de la posición y orientación de vehículos aéreos no tripulados (VANTS) en un entorno tridimensional. Este enfoque permite expresar las transformaciones geométricas de manera compacta. Al utilizar coordenadas homogéneas, se pueden representar tanto las traslaciones como las rotaciones en un único marco de referencia, lo que simplifica los cálculos. Este enfoque es fundamental para el desarrollo de sistemas autónomos con habilidades de exploración coordinada, ya que proporciona una base matemática sólida para la comprensión y manipulación del movimiento de los vehículos aéreos no tripulados (VANTS).

## Transformaciones geométricas

En el contexto de los vehículos aéreos no tripulados (VANTS), las transformaciones geométricas son herramientas fundamentales para comprender y manipular la posición y orientación de los vehículos en un espacio tridimensional. Estas transformaciones se utilizan para describir cambios en la posición, la rotación y el tamaño de los objetos en un sistema de coordenadas. Comprenden operaciones como la traslación y la rotación, que permiten modelar y simular el movimiento de los VANTS.

## 3.2 Funcionamiento de un VANT

Un vehículo aéreo no tripulado (VANT) es un robot móvil aéreo que gracias a su privilegiada perspectiva aérea han captado la atención a más de una persona.

Su funcionamiento se basa en una serie de componentes clave, que incluyen una plataforma de vuelo equipada con sistemas de propulsión, sensores, actuadores y una unidad de procesamiento central. Estos dispositivos pueden variar en tamaño, forma y capacidad.

El vuelo de un VANT se controla mediante comandos enviados desde una estación terrestre o mediante algoritmos de control autónomo a bordo. Estos comandos ajustan la velocidad, dirección y altitud del VANT, permitiéndole moverse de manera precisa y eficiente en el espacio aéreo.

El funcionamiento de un VANT se ve influenciado por una serie de factores, incluyendo las condiciones meteorológicas, las regulaciones gubernamentales, la autonomía de la batería y la calidad de los datos de los sensores. La seguridad y la fiabilidad son consideraciones críticas en el diseño y operación de estos sistemas, lo que requiere un enfoque cuidadoso en la planificación, desarrollo y prueba de cada componente.

### 3.3 Control de un VANT

El control es un aspecto crucial en la investigación y desarrollo de sistemas autónomos aéreos. Este proceso implica el diseño y la implementación de algoritmos y estrategias que permiten a los VANTs realizar tareas específicas de manera eficiente y segura. Se abordan diversos aspectos del control, como la estabilización, la navegación, la planificación de trayectorias y la interacción con el entorno. La investigación en este campo se centra en mejorar la precisión, y la capacidad de adaptación de los algoritmos de control, así como en la integración de tecnologías de la inteligencia artificial clásica. El control efectivo de los VANTs es fundamental para una amplia gama de aplicaciones.

### 3.4 Estimación de posición

El proceso de estimación de posición en vehículos aéreos no tripulados (VANTs) es fundamental para su operación autónoma. Este proceso implica el uso de sensores y algoritmos para determinar la posición y orientación del VANT en relación con un sistema de coordenadas global. Los VANTs suelen utilizar una combinación de sensores, como IMU, cámaras y LIDAR, para recopilar información sobre su entorno y su movimiento. A partir de estos datos, se aplican algoritmos de estimación, como el

filtro de Kalman extendido (EKF) o el filtro de partículas, para integrar la información de los sensores y calcular la posición estimada del VANT con respecto al tiempo.

### 3.4.1 Odometría visual inercial (Visual Inertial Odometry - VIO)

Es una tecnología avanzada utilizada en vehículos aéreos no tripulados (VANTs) que combina datos visuales y de sensores inerciales para estimar la posición y orientación del vehículo en tiempo real. Este enfoque aprovecha la información visual de cámaras a bordo y la información de acelerómetros y giroscopios para calcular con precisión la trayectoria del VANT en entornos dinámicos. Al fusionar la información de múltiples fuentes sensoriales, la odometría visual inercial (VIO por sus siglas en inglés) supera las limitaciones individuales de cada sensor y proporciona una estimación confiable del movimiento del VANT.

## 3.5 Planificación de trayectoria

El tema de la planificación de trayectorias es de vital importancia, abarcando un conjunto diverso de técnicas y enfoques para garantizar la navegación segura y eficiente de estos dispositivos en entornos complejos y dinámicos. Este proceso implica la generación de rutas que permitan a los VANTs alcanzar sus destinos mientras evitan obstáculos y cumplen con restricciones operativas, como minimizar el consumo de energía o maximizar la cobertura de área explorada. Desde métodos clásicos basados en grafos, hasta enfoques más avanzados que integran técnicas de aprendizaje automático y optimización.

### 3.5.1 Evasión de obstáculos

El desarrollo de estrategias efectivas para la evasión de obstáculos es un componente crítico en el diseño de sistemas autónomos. Se centra en desarrollar algoritmos y técnicas para permitir que los robots se desplacen de manera segura en entornos complejos y dinámicos. Estos sistemas permiten a



los robots detectar y evitar obstáculos, ya sean estáticos o en movimiento, utilizando sensores como cámaras, láseres o ultrasonidos. Los algoritmos de evasión de obstáculos pueden basarse en enfoques como la planificación de trayectorias, el mapeo de entornos y el aprendizaje automático. El objetivo es garantizar que los robots puedan navegar de manera autónoma y evitar colisiones mientras realizan sus tareas asignadas.

## 3.6 Representación medio ambiente

Estas representaciones espaciales permiten a los robots construir y mantener mapas detallados y precisos del entorno que los rodea, lo que les permite tomar decisiones inteligentes y seguras en tiempo real. Los Octomaps, que se basan en estructuras de datos de tipo octree, permiten una representación eficiente de la información de obstáculos y espacio libre en 3D, lo que facilita la planificación de trayectorias y la evasión de obstáculos. Por otro lado, los HGrids son una alternativa que utiliza una cuadrícula híbrida para representar el entorno, combinando una cuadrícula regular con una estructura de árbol para adaptarse a la complejidad del terreno. Ambos enfoques son ampliamente utilizados en robótica móvil y sistemas autónomos para mejorar la percepción del entorno y la navegación en entornos 3D, lo que resulta crucial en aplicaciones como la exploración de terrenos desconocidos.

### 3.6.1 Ray casting

El raycasting es una técnica fundamental en la percepción que permite detectar obstáculos y mapear el entorno tridimensional de manera eficiente. Consiste en emitir rayos desde el robot móvil en direcciones específicas y detectar las intersecciones con objetos o superficies en el entorno. Estas intersecciones proporcionan información crucial sobre la geometría del entorno, que se utiliza para generar mapas tridimensionales y planificar trayectorias seguras y eficientes para la navegación autónoma.

### 3.6.2 Point clouds

El uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) para la captura y procesamiento de nubes de puntos (point clouds) ha emergido como una herramienta poderosa en una amplia gama de aplicaciones, desde la cartografía y la topografía hasta la inspección de infraestructuras y la monitorización medioambiental. Las nubes de puntos, que consisten en conjuntos masivos de puntos tridimensionales que representan la superficie de objetos y entornos, proporcionan información detallada y precisa sobre la estructura y la geometría de los mismos.

## 3.7 Exploración multi-robot

El concepto de exploración multi-robot con vehículos aéreos no tripulados (VANTs) es una área de investigación que aprovecha las capacidades colectivas de múltiples robots para explorar y mapear entornos desconocidos de manera eficiente y precisa. Esta estrategia ofrece ventajas significativas sobre la exploración con un solo robot, incluyendo una mayor cobertura del área, tiempos de exploración reducidos y una mayor robustez ante fallos individuales.

### 3.7.1 Asignación de tareas

El desarrollo de sistemas multi-robot ha generado un interés creciente en la coordinación y asignación de tareas, especialmente en aplicaciones que requieren la colaboración de múltiples VANT para lograr objetivos comunes de la mejor manera posible.

## 3.8 Arquitectura de un robot

La arquitectura de un robot integra diversos componentes y subsistemas que trabajan en conjunto para permitir al robot percibir su entorno, planificar y ejecutar acciones, y comunicarse con su entorno

y otros sistemas, lo que le permite realizar tareas específicas de manera autónoma.

- **Arquitectura de control:** La arquitectura de control consiste en la implementación de tres capas que permiten organizar los algoritmos en grupos específicos de acuerdo al tipo de acceso requerido. Las capas se listan a continuación.
  - **Capa de planificación:** Es la capa de más alto nivel, contiene algoritmos que no son de tiempo real y que pueden demandar altos recursos computacionales. Módulos de planificación de trayectoria, representación del medio ambiente son los incorporados en esta capa. Su función es evaluar los planes para alcanzar objetivos establecidos por la exploración.
  - **Capa de secuenciador:** Es la capa mediadora entre la capa de planificación y la capa de habilidades. Activa los módulos solicitados por el planificador proporcionando los argumentos necesarios para cada habilidad y reporta a la capa superior eventos que pueden generar cambios en los planes establecidos.
  - **Capa de habilidades:** Es la capa que ejecutará las instrucciones que modifican el estado del vehículo accediendo a su hardware, se conoce como capa de ejecución reactiva y se encarga de las respuestas en tiempo real de los eventos en el medio ambiente. En esta capa se localizan las habilidades reactivas como los módulos de evasión de obstáculos, seguir contrornos entre otros.

### 3.9 El uso del sistema operativo robótico ROS

El desarrollo de soluciones en robótica no es una tarea fácil, la escalabilidad y las capacidades de los robots son cada vez mayores, debido a la miniaturización de componentes que han permitido el desarrollo en robots con recursos limitados.

El uso de ROS (Robot Operating System) emerge como un componente esencial en el diseño y desarrollo de robótica, incluidos los vehículos aéreos no tripulados (VANTs). ROS proporciona

una plataforma flexible y modular que facilita la integración de hardware, la implementación de algoritmos de control y la comunicación entre componentes en un entorno distribuido. Este sistema operativo robótico ofrece una amplia gama de herramientas y recursos que agilizan el desarrollo de aplicaciones, permitiendo concentrarse en la implementación de soluciones innovadoras en lugar de abordar problemas de infraestructura.

El Sistema Operativo Robótico (ROS) se basa en programas modulares o procesos tratados como grafos de un nodo. Cada nodo en ejecución procesa información de forma paralela y la comparte con otros procesos con los que se comunica dentro del sistema.

A continuación se describen las principales características del Sistema Operativo Robótico (ROS):

- Capaz de construir sistemas basados en múltiples procesos en diferentes equipos anfitriones conectados a través de una red, permitiendo realizar ejecuciones paralelas en distintas computadoras a bordo.
- La codificación se puede llevar en diversos lenguajes de programación como: C/C++ y python.

Los principales conceptos en que ROS trabaja es bajo el paradigma publicador-suscriptor. A continuación se listan diversos tecnicismos usados en ROS.

- **rosmaster**: Módulo de control, en el que cada nodo existente en el sistema debe registrarse, este módulo mantiene una lista de todos los nodos y tópicos en el sistema.
- **Nodo**: Son módulos de programa que efectúan funciones específicas en la aplicación y comparten información a través de tópicos, servicios o por medio del servidor de parámetros. Su desarrollo es modular, cada nodo es un proceso independiente permitiendo que sea tolerante a fallos. La información generada por cada nodo puede ser publicada a través del intercambio de mensajes y otros nodos pueden suscribirse a ese tópico.
- **Tópico**: Es el canal de comunicación usado para el intercambio de información entre los nodos. Un nodo recibirá los mensajes de un tópico previo a una suscripción al tópico.

- **Mensaje:** Estructura de datos definida que puede contener tipos datos como enteros, flotantes, booleanos, puntos, entre otros.
- **Servicios:** Responde a peticiones de un cliente, los servicios son contenidos dentro de un nodo (servicio) que responde con información de respuesta a la solicitud de otros nodos (clientes).
- **Paquetes:** Contiene los archivos de configuración, y los programas (nodos) para la funcionalidad del robot.

# 4

## Enfoque propuesto

El enfoque propuesto para la tesis estrategias para la exploración coordinada multi-VANT, se centra en el desarrollo de un sistema autónomo que emplea varios vehículos aéreos no tripulados (VANTS) para explorar y mapear entornos desconocidos de manera coordinada. Después de identificar técnicas y algoritmos relevantes, nuestro enfoque se centra en el diseño detallado del sistema y su implementación en un entorno simulado.

El diseño e implementación de un sistema autónomo que integre tecnologías avanzadas, complementado con una distribución de tareas de forma descentralizado. Permitirá abordar los desafíos inherentes a la exploración coordinada con múltiples vehículos aéreos no tripulados.

En resumen, el enfoque propuesto aborda el desafío de la exploración coordinada multi-VANT mediante la integración de algoritmos que doten de autonomía a múltiples vehículos aéreos no tripulados y la evaluación práctica de su desempeño en diversos ambientes.

## 4.1 Diseño del sistema

El diseño de un sistema autónomo implica la integración de software para permitir que un vehículo aéreo no tripulado realice operaciones de forma independiente y segura. Este sistema incluye componentes como sensores, actuadores, sistemas de comunicación y unidades de procesamiento. En términos de software, se requieren algoritmos para control de vuelo, planificación de trayectorias, percepción del entorno y toma de decisiones.

Los componentes principales de la solución propuesta son:

- Sistema de percepción
- Fusión de sensores
- Estimación de posición
- Representación del mundo
- Planificador de trayectorias
- Navegación
- Exploración
- Coordinación

La imagen [4.1](#) muestra la arquitectura propuesta, compuesta por los componentes previamente indicados que dotan de autonomía a un vehículo aéreo no tripulado (VANT).

En el diagrama, podemos observar que la interconexión entre los componentes cumple con un flujo de información importante proveniente de la representación del medio ambiente y el mantenimiento del mapa. Así mismo la estimación de posición es necesaria para la planificación hacia las fronteras y ampliar el conocimiento del medio ambiente (mapa).

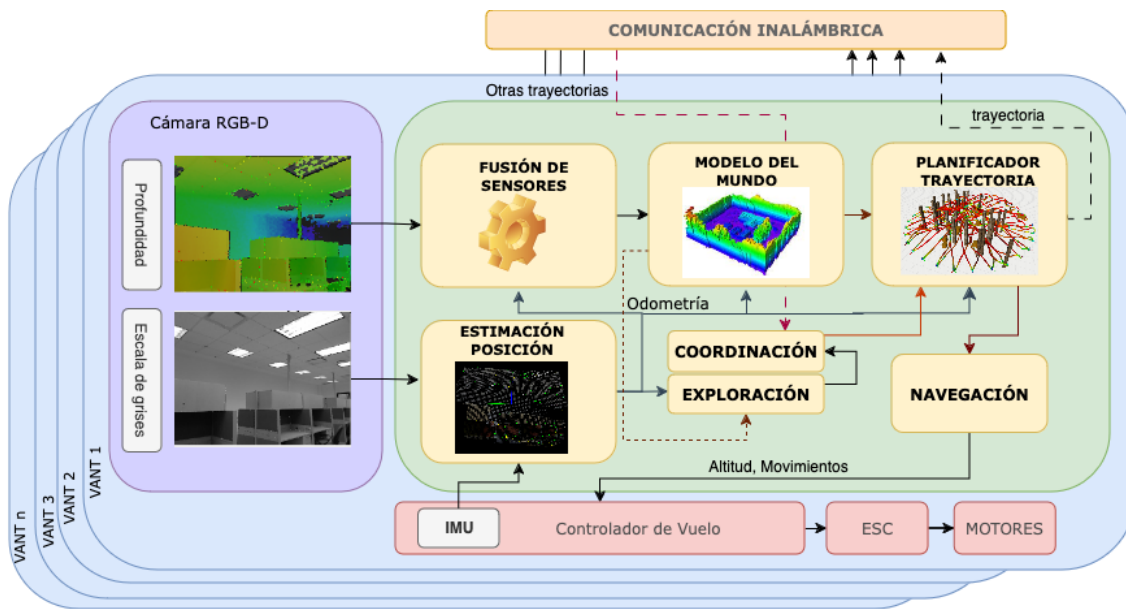


Figura 4.1: Arquitectura de la solución propuesta

## Sistema de percepción

Al hacer uso del simulador dinámico usado en el trabajo de [Zhou et al.](#) y [Bartolomei et al.](#) que utilizan la odometría de referencia de los vehículos aéreos no tripulados (VANTS), suponiendo que cada agente está equipado con una cámara de profundidad que mira hacia adelante cuya resolución es 640x480px y un campo de visión de 80°x60°.

## Estimación de posición

La estimación hace uso de la técnica descrita en el trabajo [Xu et al.](#), que ayuda a la localización del VANT y los demás miembros del equipo manteniendo un mismo marco de referencia.

## Fusión de sensores

La función de sensores ayuda a que en el paso previo, se puedan obtener las posiciones aproximadas del equipo de VANTS. Los valores de odometría y el ángulo de inclinación, se fusionan con los datos



obtenidos por una nube de puntos.

## Representación del mundo

Una vez conocida la estimación de posición, cada vehículo aéreo no tripulado será capaz de intercambiar y actualizar su base de conocimiento para una toma de decisiones informada.

## Exploración

La exploración se basa en el concepto de fronteras propuesto por [Yamauchi](#), debido a que mantiene una lista de fronteras activas. Permitiendo que cada vehículo aéreo no tripulado pueda contar con una copia y actualizarla durante su ejecución.

La estrategia de exploración se fundamenta en un proceso de autoevaluación, dentro de un sistema descentralizado y resistente a fallos totales de cualquier miembro del equipo. Cada robot determina su propia oferta, predice las acciones que tomarían los otros miembros del equipo y elige una frontera para sí mismo. [\[8\]](#)

## Coordinación

La coordinación usa un mecanismo de ofertas basado en la asignación de objetivos y la restricción en el rango de la comunicación para coordinar las acciones de los robots. Al hacer uso del mecanismo de coordinación presentado en el trabajo de [Elizondo-Leal](#). Se trata de un procedimiento completamente descentralizado y asíncrono, donde cada dron calcula la oferta de los demás miembros del equipo y la suya propia. Esta información es utilizada para tomar decisiones sin entorpecer las decisiones de los otros miembros ni requerir sincronización con ellos. Además, si otro robot detecta el objetivo seleccionado, envía una señal de detención para informar al primer robot de que su objetivo ha sido explorado, obligándolo así a iniciar un nuevo proceso de ofertas para elegir otro objetivo [\[8\]](#).

## Planificador de trayectorias

Dentro del planificador, se propone el uso y mantenimiento de un diagrama de Voronoi en 3D, qué, a medida del conocimiento del medio ambiente gracias al sistema de percepción, se podrán suavizar los puntos generando una curva de bezier respecto al punto que el VANT deba trasladarse.

Una representación de los obstáculos en el espacio de velocidades denominado Polígono de Velocidades Admisibles (PVA) [25] con uso de un modelo de amortiguador en función de la distancia entre el robot y el obstáculo.

Para el problema de navegación, el proceso es representado por el cálculo de la mínima distancia entre el polígono de velocidades factibles y el punto que describe la velocidad de referencia.

Esto significa que puede generar trayectorias que son suaves y eficientes en términos de energía, lo que es especialmente importante en aplicaciones donde se requiere un movimiento preciso y controlado, como la navegación de robots móviles en entornos con obstáculos dinámicos o en situaciones donde se necesita evitar colisiones.

Además, el PVA puede adaptarse fácilmente a diferentes tipos de robots móviles y entornos, lo que lo hace ampliamente utilizado en la planificación de trayectorias para una variedad de aplicaciones. Su capacidad para generar trayectorias suaves y eficientes lo convierte en una herramienta valiosa para mejorar la navegación y el rendimiento de los robots móviles en diversas situaciones y entornos.

## Navegación

Un enfoque reactivo nos ayuda en aprovechar las velocidades que nuestro VANT puede navegar analizando los obstáculos. De forma que la velocidad se irá reduciendo en base a que la velocidad relacionada al error de detectar un objeto.

Bajo ese comportamiento se podrá acelerar en espacios abiertos y navegar con cuidado cuando se aproxime a zonas estrechas y angostas.

## 4.2 Máquina de estados para un VANT

Para una mayor comprensión y control de los posibles estados que los VANTS pueden tomar en las tareas de exploración se abstraen como posibles acciones que deba tomar respecto al estado en que se encuentre ver imagen [4.2](#).

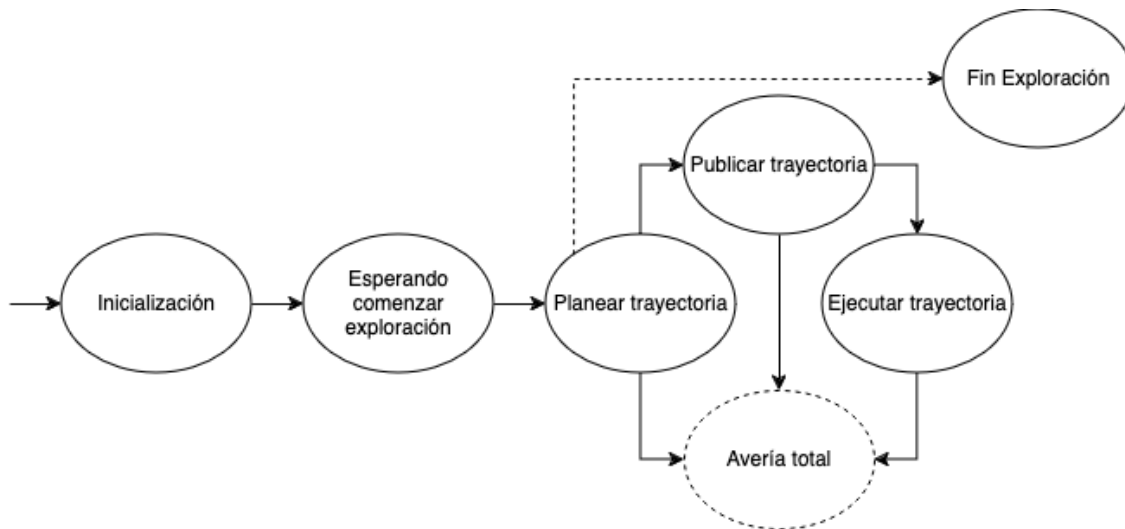


Figura 4.2: Máquina de estados finitos

Así, cada vehículo aéreo no tripulado se encuentra en uno de tres estados posibles:

### Iniciación

La inicialización constará en todos los procesos antes de comenzar la exploración:

- Situar a los VANTS en su punto inicial conocido.
- Hacer que los VANTS esperen el cambio de estado para iniciar la exploración.

### Esperando comenzar exploración

En este estado, los VANTS esperarán iniciar la exploración manteniendo el vuelo en el punto de inicio. Una vez alcanzando este estado, se planifica una trayectoria hacia la frontera cercana.

## Planeación trayectoria

Al mantener una representación del medio ambiente, sirve de ayuda para generar una trayectoria que nos aproxime a los puntos de interés. Éste estado el vehículo aéreo no tripulado se encuentra en el proceso de análisis de información y de auto-oferta para seleccionar el objetivo que más beneficie a la exploración. Una vez que se encuentre con un objetivo, se procede a navegar hacia él.

## Publicar trayectoria

Notificar la trayectoria una vez que se haya validado que existe un camino. Para ello se hace uso del algoritmo A\*

## Ejecución trayectoria

Al contar con una trayectoria que me guía hacia el próximo punto a alcanzar y con ayuda del planificador local que nos permita resolver los problemas de colisiones, el vehículo aéreo no tripulado se desplaza hacia el objetivo definido. Si el objetivo ha sido explorado, se inicia un nuevo proceso de auto-oferta [8].

## Avería total

Un vehículo aéreo no tripulado deja de funcionar totalmente y se excluye del proceso de exploración.

## Terminación

Una vez agotada la lista de fronteras a explorar, el proceso de exploración habrá llegado a su fin. No se considera que los VANTS regresen al punto inicial, ya que habrán completado el principal objetivo de proporcionar el mapa.

## 4.3 Aplicación de nodos en ROS

Los nodos en ROS se representan como un grafo dirigido en base a los mensajes que los nodos puedan generar, cada nodo corre en paralelo y tiene su propio ciclo de vida.

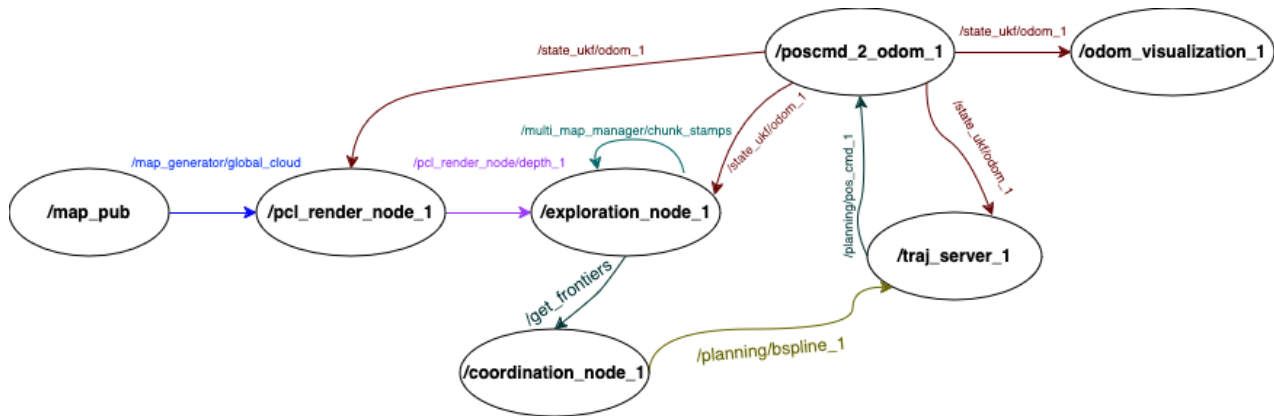


Figura 4.3: Arquitectura de la solución propuesta

### Nodo map pub

La creación del mapa, a partir de un archivo obtenido mediante un sensor capaz de almacenar una nube de puntos. En nuestro caso, hacemos uso de una cámara kinect v1 y el software RTABMAP para grabar un recorrido a una superficie en interiores que nos ayudará en la propuesta de ciertas geometrias para la tarea de exploración.

### Nodo pcl render node 1

La actualización en base a la posición del VANT, el nodo pcl render node 1, nos arrojará la información en base a las capacidades del campo de visión del VANT. En nuestro caso, las imágenes de profundidad son de 4.5 m..

## **Nodo poscmd 2 odom 1**

Conversión del comando de posiciones a valores de odometria de un VANT.

## **Nodo exploration node 1**

La lógica de exploración se realiza en el nodo de exploración, gracias a la versatilidad de los archivos tipo launch dentro de ROS, permite la creación de diversos nodos respecto a la cardinalidad de agentes en nuestro sistema.

## **Nodo coordination node 1**

Adoptamos una coordinación descentralizada, donde los agentes intercambian información de su mapa, próximos destinos a cubrir. Con el objetivo de asignar y repartir las áreas de exploración y construir la representación del medio ambiente de forma colaborativa.

## **Nodo traj server 1**

Además de la planificación inicial de las trayectorias, el nodo de trayectorias también supervisa continuamente el progreso de los UAV durante la misión. Esto implica ajustar las trayectorias en tiempo real para adaptarse a cambios en el entorno, como la detección de obstáculos móviles o la aparición de nuevas áreas de interés. Esta capacidad de reacción en tiempo real es fundamental para garantizar la seguridad y el éxito de la misión, especialmente en entornos dinámicos y cambiantes.

## **Nodo odom visualization 1**

El nodo de visualización muestra los datos en tiempo real procedentes de cada uno de los VANTS en RVIZ. Y nos permite conocer lo que está sucediendo en el área de exploración en cualquier

momento. La visualización de los objetos y las fronteras en la simulación se actualizan en el nodo `odom visualization 1`, actualizando los valores conforme la exploración avanza.

# Bibliografía

- [1] Alsamhi, S. H., Ma, O., Ansari, M. S., and Almalki, F. A. (2019). Survey on collaborative smart drones and internet of things for improving smartness of smart cities. *IEEE Access*, 7:128125–128152.
- [2] Bartolomei, L., Teixeira, L., and Chli, M. (2023). Fast multi-uav decentralized exploration of forests. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(9):5576–5583.
- [3] Campos-Macías, L., Aldana-López, R., Guardia, R., Parra-Vilchis, J. I., and Gómez-Gutiérrez, D. (2020). Autonomous navigation of MAVs in unknown cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 38(2):307–326.
- [4] Chen, B.-S. and Hung, T.-W. (2023). Integrating local motion planning and robust decentralized fault-tolerant tracking control for search and rescue task of hybrid uavs and biped robots team system. *IEEE Access*, 11:45888–45909.
- [5] Cieslewski, T. (2021). *Decentralized Multi-Agent Visual SLAM*. PhD thesis, University of Zurich.
- [6] Cieslewski, T., Kaufmann, E., and Scaramuzza, D. (2017). Rapid exploration with multi-rotors: A frontier selection method for high speed flight. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 2135–2142.
- [7] Collins, M. and Michael, N. (2020). Efficient planning for high-speed mav flight in unknown environments using online sparse topological graphs. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 11450–11456.
- [8] Elizondo-Leal, J. C. (2013). *Estrategia Descentralizada para la Exploración Multi-Robot, incluyendo Restricciones en Rango de Comunicación*. PhD thesis, CINVESTAV Unidad Tamaulipas.



- [9] Florence, P. R., Carter, J., Ware, J., and Tedrake, R. (2018). Nanomap: Fast, uncertainty-aware proximity queries with lazy search over local 3d data.
- [10] Gao, F., Wu, W., Lin, Y., and Shen, S. (2018). Online safe trajectory generation for quadrotors using fast marching method and bernstein basis polynomial. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 344–351.
- [11] Gielis, J., Shankar, A., and Prorok, A. (2022). A critical review of communications in multi-robot systems. *Current Robotics Reports*, 3(4):213–225.
- [12] Hart, P. E., Nilsson, N. J., and Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2):100–107.
- [13] Hornung, A., Wurm, K. M., Bennewitz, M., Stachniss, C., and Burgard, W. (2013). OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. *Autonomous Robots*. Software available at <https://octomap.github.io>.
- [14] Karaman, S. and Frazzoli, E. (2011). Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *The International Journal of Robotics Research*, 30(7):846–894.
- [15] LaValle, S. M. (1998). Rapidly-exploring random trees : a new tool for path planning. *The annual research report*.
- [16] Lin, Y., Gao, F., Qin, T., Gao, W., Liu, T., Wu, W., Yang, Z., and Shen, S. (2017). Autonomous aerial navigation using monocular visual-inertial fusion. *Journal of Field Robotics*, 35(1):23–51.
- [17] Lumelsky, V. J. and Stepanov, A. A. (1987). Path-planning strategies for a point mobile automaton moving amidst unknown obstacles of arbitrary shape. *Algorithmica*, 2(1-4):403–430.
- [18] McGuire, K. N., Wagter, C. D., Tuyls, K., Kappen, H. J., and de Croon, G. C. H. E. (2019). Minimal navigation solution for a swarm of tiny flying robots to explore an unknown environment. *Science Robotics*, 4(35):eaaw9710.

- [19] Meagher, D. (1982). Geometric modeling using octree encoding. *Computer Graphics and Image Processing*, 19(2):129–147.
- [20] Min, H., Han, K. M., and Kim, Y. J. (2020). Accelerating probabilistic volumetric mapping using ray-tracing graphics hardware.
- [21] Mohta, K., Watterson, M., Mulgaonkar, Y., Liu, S., Qu, C., Makineni, A., Saulnier, K., Sun, K., Zhu, A., Delmerico, J., Karydis, K., Atanasov, N., Loianno, G., Scaramuzza, D., Daniilidis, K., Taylor, C. J., and Kumar, V. (2017). Fast, autonomous flight in GPS-denied and cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 35(1):101–120.
- [22] Mukhamediev, R. I., Yakunin, K., Aubakirov, M., Assanov, I., Kuchin, Y., Symagulov, A., Levashenko, V., Zaitseva, E., Sokolov, D., and Amirgaliyev, Y. (2023). Coverage path planning optimization of heterogeneous uavs group for precision agriculture. *IEEE Access*, 11:5789–5803.
- [23] Oleynikova, H., Taylor, Z., Siegwart, R., and Nieto, J. (2018). Safe local exploration for replanning in cluttered unknown environments for microaerial vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3):1474–1481.
- [24] Papachristos, C., Khattak, S., and Alexis, K. (2017). Uncertainty-aware receding horizon exploration and mapping using aerial robots. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4568–4575.
- [25] Ramirez, G. and Zeghloul, S. (2001). Collision-free path planning for nonholonomic mobile robots using a new obstacle representation in the velocity space. *Robotica*, 19(5):543–555.
- [26] Rouček, T., Pecka, M., Čížek, P., Petříček, T., Bayer, J., Šalanský, V., Azayev, T., Heřt, D., Petrlik, M., Báča, T., Spurný, V., Krátký, V., Petráček, P., Baril, D., Vaidis, M., Kubelka, V., Pomerleau, F., Faigl, J., Zimmermann, K., Saska, M., Svoboda, T., and Krajník, T. (2022).

- System for multi-robotic exploration of underground environments CTU-CRAS-NORLAB in the DARPA subterranean challenge. *Field Robotics*, 2(1):1779–1818.
- [27] Selin, M., Tiger, M., Duberg, D., Heintz, F., and Jensfelt, P. (2019). Efficient autonomous exploration planning of large-scale 3-d environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2):1699–1706.
- [28] Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., and Guizani, M. (2019). Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges. *IEEE Access*, 7:48572–48634.
- [29] Sharma, S. and Tiwari, R. (2016). A survey on multi robots area exploration techniques and algorithms. In *2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT)*. IEEE.
- [30] Stentz, A. (1994). Optimal and efficient path planning for partially-known environments. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3310–3317 vol.4.
- [31] Usenko, V., von Stumberg, L., Pangercic, A., and Cremers, D. (2017). Real-time trajectory replanning for MAVs using uniform b-splines and a 3d circular buffer. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE.
- [32] Xu, H., Zhang, Y., Zhou, B., Wang, L., Yao, X., Meng, G., and Shen, S. (2022). Omni-swarm: A decentralized omnidirectional visual–inertial–uwb state estimation system for aerial swarms. *IEEE Transactions on Robotics*, 38(6):3374–3394.
- [33] Yamauchi, B. (1997). A frontier-based approach for autonomous exploration. In *Proceedings 1997 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation CIRA'97. 'Towards New Computational Principles for Robotics and Automation'*, pages 146–151.

- 
- [34] Yang, F., Cao, C., Zhu, H., Oh, J., and Zhang, J. (2022). Far planner: Fast, attemptable route planner using dynamic visibility update.
- [35] Zhou, B., Xu, H., and Shen, S. (2023). Racer: Rapid collaborative exploration with a decentralized multi-uav system. *IEEE Transactions on Robotics*, 39(3):1816–1835.