

Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN
Unidad Tamaulipas
Protocolo de tesis

Título: Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Candidato: Luis Alberto Ballado Aradias

Asesor: Dr. José Gabriel Ramírez Torres

Co-Asesor: Dr. Eduardo Arturo Rodríguez Tello

27 de julio de 2023

Resumen

En las últimas décadas se ha visto un aumento en el interés de los Vehículos Aéreos No Tripulados (conocidos como VANT o coloquialmente drones), a la par que se han introducido nuevas tecnologías de comunicación, sensores y computación. Estos avances han sido aplicados al control de VANT, logrando crear diversas soluciones en vigilancia, búsqueda y rescate, soluciones para el problema de la última milla, inclusive en espectáculos aéreos (sólo por mencionar algunos) 24. Dichas aplicaciones suelen carecer de autonomía. 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. Tener la capacidad de percibir su entorno y usar la información para decidir cómo moverse son considerados altos niveles de autonomía. Para llegar a ello el robot debe resolver primero problemas como su localización, mapeo y navegación.

Se ha demostrado que es posible dotar de autonomía a un robot (móvil o aéreo) y las aplicaciones antes mencionadas son prueba de ello. Dichas soluciones parten de tener el problema de localización resuelto al ser aplicaciones en exteriores y poder hacer uso de sistemas de localización como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) o Sistema Global de Navegación por Satélite (Global Navigation Satellite System, GNSS). Los Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT) del mañana deberán de navegar en áreas urbanas de la mejor manera posible y tener la habilidad de trabajar en coordinación multi-VANT.

El enfoque de este trabajo es la creación y propuesta de una arquitectura de software capaz de coordinar múltiples Vehículos Aéreos No Tripulados con algoritmos para la exploración de áreas desconocidas y cambiantes. Convirtiéndose en un desafío en robótica móvil buscando coordinar y optimizar el movimiento de varios robots para explorar eficientemente un área desconocida. El objetivo pudiera ser maximizar la cobertura del área minimizando el tiempo requerido para completar la exploración. Este problema implica tomar decisiones complejas, como asignar tareas a los robots, evitar colisiones y planificar rutas óptimas. Factores como la comunicación entre robots, la incertidumbre del entorno y las limitaciones de recursos son considerados en este trabajo. Como humanidad aun tenemos lugares desconocidos que deseamos explorar (volcanes, ..etc.), entonces a los lugares que aún no podemos enviar gente, entonces podremos enviar máquinas.

Resolver eficazmente este problema permitiría mejorar la eficiencia y efectividad de las misiones de exploración en diversos campos, como la búsqueda y rescate, la inspección de infraestructuras y entre otras.

Palabras claves: coordinación multi-VANT, exploración multi-VANT, planificador de rutas 3D, arquitectura de software multi-VANT.

Datos Generales

Título de proyecto

Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Datos del alumno

Nombre: Luis Alberto Ballado Aradias
Matrícula: 220229860003
Dirección: Juan José de La Garza #909
Colonia: Guadalupe Mainero C.P. 87130
Teléfono (casa): +52 (833) 2126651
Teléfono (lugar de trabajo): +52 (834) 107 0220 + Ext
Dirección electrónica: luis.ballado@cinvestav.mx
URL: <https://luis.madlab.mx>

Institución

Nombre: CINVESTAV-IPN
Departamento: Unidad Tamaulipas
Dirección: Km 5.5 carretera Cd. Victoria - Soto la Marina.
Parque Científico y Tecnológico TECNOTAM,
Ciudad Victoria, Tamaulipas, C.P. 87130
Teléfono: (+52) (834) 107 0220

Beca de tesis

Institución otorgante: CONAHCYT
Tipo de beca: Maestría Nacional
Vigencia: Septiembre 2022 - Agosto 2024

Datos del asesor

Nombre: Dr. José Gabriel Ramírez Torres
Dirección: Km. 5.5 carretera Cd. Victoria - Soto la Marina
Parque Científico y Tecnológico TECNOTAM
Ciudad Victoria, Tamaulipas, C.P. 87130
Teléfono (oficina): (+52) (834) 107 0220 Ext. 1014
Institución: CINVESTAV-IPN
Departamento adscripción: Unidad Tamaulipas
Grado académico: Doctorado

Nombre: Dr. Eduardo Arturo Rodríguez Tello
Dirección: Km. 5.5 carretera Cd. Victoria - Soto la Marina
Parque Científico y Tecnológico TECNOTAM
Ciudad Victoria, Tamaulipas, C.P. 87130
Teléfono (oficina): (+52) (834) 107 0220 Ext. 1100
Institución: CINVESTAV-IPN
Departamento adscripción: Unidad Tamaulipas
Grado académico: Doctorado

Descripción del proyecto

El proyecto de estrategias para la exploración coordinada multi-VANT se centra en las ventajas de tener múltiples VANT trabajando en conjunto para mejorar la eficiencia y cobertura de la exploración proponiendo una arquitectura de software descentralizada que permita la coordinación eficiente de multi-VANT para tareas de exploración en entornos desconocidos y cambiantes.

Crear una arquitectura de software con algoritmos eficientes y rápidos capaces de completar una tarea complicada como lo es la exploración y coordinación.

Antecedentes y motivación para el proyecto

Con la llegada de las primeras cámaras 3D capaces de obtener valores de profundidad (RGB-D), mayores capacidades de almacenamiento en menos espacio nos permiten ver el entorno como realmente es \mathbb{R}^3 .

Con la propuesta de estructura de datos basada en grafos **octrees** por Meagher [1982], esta estructura de software ha sido ampliamente usado en gráficos 3D y motores de simuladores por tener una baja complejidad en el orden logaritmico.

En 2013 se introdujó un nuevo concepto para la representación de mapas 3D basados en los principios de los trabajos de Meagher [1982], haciendo que la representación de ocupación en entornos 3D se realice de manera eficiente para aplicaciones en robótica donde se necesitan algoritmos rápidos.

Los trabajos de Hornung et al. [2013] (OctoMap) es una extensión específica del Octree que se utiliza principalmente para representar mapas tridimensionales ocupados y desconocidos en entornos de robótica y navegación. En lugar de simplemente dividir el espacio en octantes, el OctoMap utiliza el Octree para modelar la probabilidad de ocupación en diferentes regiones del espacio.

La colaboración entre robots de manera coordinada ofrece ventajas en comparación con el uso de un solo robot como la distribución de tareas, redundancia de información, cubrir mayores áreas. Pero la coordinación y comunicación entre ellos puede aumentar la complejidad del sistema, para ello debemos de dotarlos de algoritmos rápidos para garantizar una operación eficiente.

El éxito de sus misiones dependen de alcanzar un determinado lugar para que puedan realizar ciertas acciones.

Buscamos una arquitectura que funcione multi-robot buscando el éxito de sus misiones de una forma segura y confiable

Algunas aplicaciones multi-robot Cai and Yang [2012]:

- Almacenes automatizados
- Logística colaborativa
- Inspección de Infraestructuras
- Vigilancia de Áreas de interés
- Búsqueda y rescate
- Agricultura de precisión
- Limpieza y saneamiento
- Monitoreo Ambiental

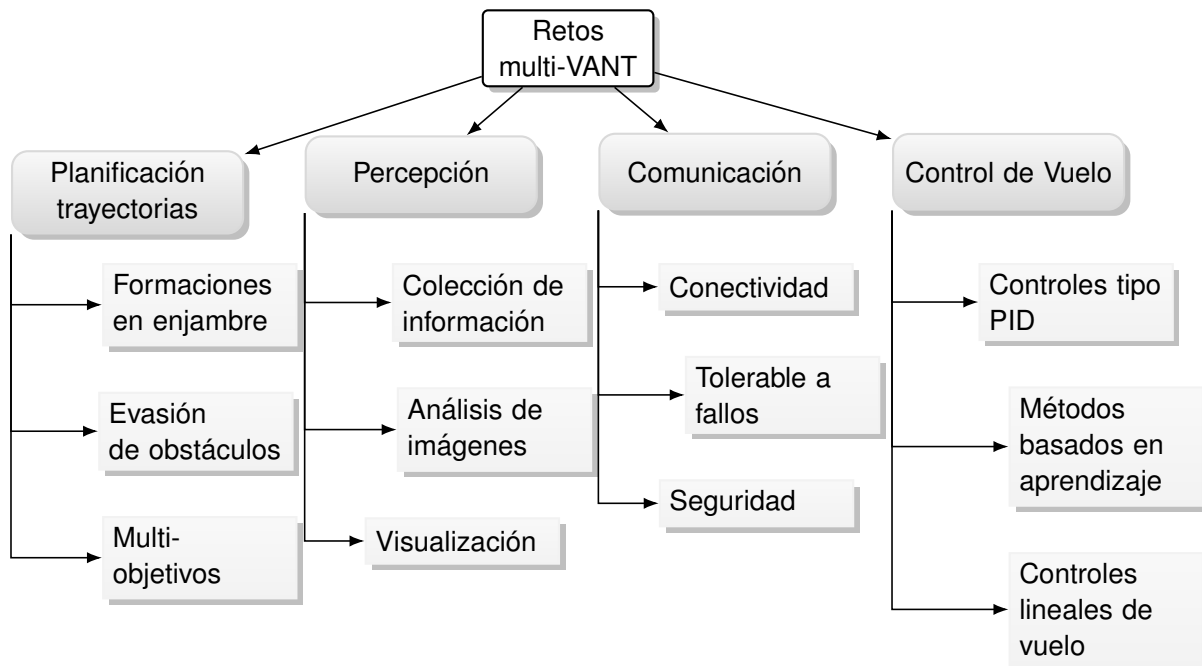
¿Qué es un robot? Podemos definir un robot como una máquina que sensa, piensa y actúa Bekey [2005]. Es por ello que debe de contar con sensores, poder procesar la información y actuadores que lo ayuden a su movilidad. Los sensores son necesarios para la obtención de información de su entorno. Comportamientos reactivos que no requieran procesar cierta información y una inteligencia para resolver diversos retos que se puedan presentar.

Existen tres preguntas en Robótica Móvil:

- ¿Dónde estoy?
- ¿A dónde voy?
- ¿Cómo llego ahí?

Para responder, el robot debe tener un modelo del ambiente, percibir y analizar el ambiente, planear y ejecutar sus movimientos.

El siguiente diagrama ilustra los retos multi-VANT a desarrollar en esta tesis.



Los robots autónomos son máquinas inteligentes capaces de ejecutar diversas tareas en un ambiente por sí mismos sin que alguien guíe sus movimientos Bekey [2005].

La autonomía de los robots se ha ampliado en diversos aspectos y no es extraño tener uno que ayuden en la limpieza del hogar.

¿Qué es la autonomía?

Autonomía es referente a sistemas capaces de operar en el mundo como lo conocemos sin un control que lo gobierne, siendo este un campo activo de investigación lo que ha causado que la autonomía de los robots se vea incrementada así como su inteligencia.

Problemas de control

Existen diversas capas de control. En niveles bajos de control queremos que los movimientos del robot sean estables sin oscilaciones, que no colisionen con obstáculos al mismo tiempo tener una estabilidad en sus movimientos. Esperamos que el comportamiento autónomo resuelva aspectos

como moverse al mismo tiempo evadir obstáculos. Arquitecturas de software que permiten este tipo de control regularmente se ejecutan en paralelo y son conocidas como behavior-based architectures Arkin [1998].

La organización de software asociada con los niveles de control tiene el nombre de **Arquitectura Software de control** de un robot.

Los controles de bajo nivel responden muy bien a técnicas de teoría de control Ramirez and Zeghloul [2001]. Considerando como entrada del sistema la posición que deseamos y su orientación. El error será la diferencia entre la posición deseada y la posición actual

Es necesario que la retroalimentación de este tipo de controles sea de alta velocidad para evitar que los errores aumenten a lo largo del tiempo evitando la inestabilidad.

Es común pensar que el control en ingeniería y el control biológico presentan diversas similitudes. Por un lado los sistemas en ingeniería tienen un valor de referencia pudiendo describirlos como sistemas lineales, los controles biológicos no son lineales.

A lo largo del desarrollo de la robótica móvil se han demostrado que estrategias de control basadas en comportamientos (behavior-based) presentan mejores desempeños Brooks [1986]. Factores como estos aumentan la autonomía y solucionan los problemas comunes como el de evitar obstáculos.

Sensores

Percibir información del entorno es una tarea que deben realizar constantemente los robots y la implementación de diversos sensores es necesaria. Diversos robots cuentan con sensores para detectar obstáculos en su camino siendo los sensores de tipo ultrasonico o lasers los más implementados, en los años recientes la incorporación y uso de cámaras son ampliamente utilizados buscando disminuir la cantidad de sensores que deba contar un robot autónomo.

Inteligencia

Decimos que un robot es una máquina que sensa, piensa y actúa. Las computadoras son el cerebro de los robots, convirtiéndose en elementos esenciales. Los avances en la tecnología han logrado disminuir los tamaños de los microprocesadores así como incrementado su velocidad y memoria

.

La RAE define Inteligencia como la capacidad de resolver problemas, para considerar un robot inteligente este debe cumplir diversos puntos:

1. **Procesar Información (Sensor)** Las lecturas provenientes de un sensor no son útiles para el control de un robot, será necesaria una capa de procesamiento que reduzca la carga del control principal.
2. **Reflejos** Sistemas vivos presentan un nivel alto de reacción (reflejos) que no involucran el procesar lo que está sucediendo.

3. **Programas con propósitos específicos** Soluciones para la navegación, localización y evasión de obstáculos deben de ser considerados en el software de un robot inteligente.
4. **Funciones Cognitivas** La inteligencia artificial esta proviendo un gran numero de funciones cognitivas como aprender y planear Zouganeli and Lentzas [2022].

La organización de estos componentes de control se conoce como **Arquitectura de Software de un Robot**. Generalmente en una estructura gerarquica con una capa de componentes reactivos en su capa de nivel mas baja y componentes que involucran planificación y aprendizaje en su nivel mas alto.

¿Qué es Planificación? Es encontrar una secuencia de configuración válidas para mover al robot de un punto $A \rightarrow B$

Dados los siguientes parámetros:

- Configuración inicial
- Configuración del robot
- Modelo del robot (Cinemática, Geometría del robot)
- Mapa del ambiente

la salida será la ruta que conectan los dos puntos.

Analógicamente, es como ir al supermercado con el carrito de compras evitando chocar con cosas mientras navegamos dentro de la tienda. Esto es fácil para nosotros los humanos, pero para los robots es complicado.

Good path planning technology of mobile robot can not only save a lot of time, but also reduce the wear and capital investment of mobile robot. Several methodologies have been proposed and reported in the literature for the path planning of mobile robot. Although these methodologies do not guarantee an optimal solution, they have been successfully applied in their works. The purpose of this paper is to review the modeling, optimization criteria and solution algorithms for the path planning of mobile robot. The survey shows GA (genetic algorithm), PSO (particle swarm optimization algorithm), APF (artificial potential field), and ACO (ant colony optimization algorithm) are the most used approaches to solve the path planning of mobile robot. Finally, future research is discussed which could provide reference for the path planning of mobile robot. Zhang et al. [2018]

La planificación está en términos de la configuración del robot. Siendo la configuración el mínimo conjunto de parámetros que necesitamos respecto a los Grados de Libertad del robot o dada una configuración podemos saber donde esta.

Configuración del robot \mathbf{q} especifica todos los puntos del robot en relación con un sistema de coordenadas fijo.

Espacio de configuraciones: Es el espacio de todas las posibles configuraciones.

Es el espacio de configuraciones esta compuesto por los espacios libres (C_{free}) y espacios ocupado (con obstáculos) C_{obs} .

Sea $\mathcal{W} = \mathbb{R}^m$, $\mathcal{O} \in \mathcal{W}$ el conjunto de obstaculos, $\mathcal{A}(q)$ las configuraciones del robot $q \in \mathcal{C}$

- $C_{free} = \{q \in \mathcal{C} \mid \mathcal{A}(q) \cap \mathcal{O} = \emptyset\}$
- $C_{obs} = \mathcal{C} / C_{free}$

donde $\mathcal{W} = \mathbb{R}^m$ es el espacio de trabajo del robot, $\mathcal{O} \in \mathcal{W}$ es el conjunto de obstaculos, y $\mathcal{A}(q)$ son las configuraciones del robot $q \in \mathcal{C}$.

Comúnmente se relaciona al problema de planificación de rutas con el problema del mover un piano (**piano movement problem**). Es un problema difícil ya que el piano es un objeto en \mathbb{R}^3 que puede rotar y trasladarse. La **planificación de rutas**, es similar. Ya que queremos mover al robot a un punto específico.

En problemas clásicos de planificación de rutas decimos que el camino óptimo es el camino más corto, hay distintas formas cualitativas de poder ver un camino corto (Minimizando la energía en la trayectoria .etc).

Nuestra solución se centra en buscar la posible manera más rápida de llegar de un punto al otro.

La planificación de rutas presenta diversos retos:

- Restricciones físicas del robot (su geometría o forma)
- Dinámica del robot
- Incertidumbres de lecturas de sensores (ruido)

Para crear rutas seguras, debemos respetar las restricciones para que el robot pueda ejecutar los movimientos en el mundo real.

Entonces, si le ordenamos al robot que ejecute una acción particular a través de su interfaz de control, ¿qué tan seguros estaremos de que el robot realmente llegó a ese punto sin estar observándolo?

Los problemas que emergen de la planificación de trayectorias es la **escalabilidad** y **eficiencia computacional**.

Considerando mover un VANT en 3D que puede trasladarse y rotar. El problema será en optimizar varios parametros por los 6 DoF (Grados de libertad) que cuenta y si queremos algoritmos que corran en tiempo real (que se ejecuten rápido) dentro de dispositivos computacionales limitados.

Finalmente habrá obstáculos o otros robots en el ambiente que nuestra solución de arquitectura deba considerar en su planificación. El robot debe sensor los obstáculos y evitarlos.

Robots aereos

Claramente los problemas inherentes al control de vehiculos aereos son diferentes a los que pueda presentar un robot en tierra. Y su control recae en el ajuste de los angulos presentes en los tres ejes (roll, pitch, yaw).

Millones de Vehículos Aéreos No Tripulados, o también conocidos como drones, han presentado una adopción masiva en diferentes aplicaciones, desde usos civiles (búsqueda y rescate, monitoreo industrial, vigilancia), hasta aplicaciones militares Shakhathreh et al. [2019]. La popularidad de los VANT es atribuida a su movilidad.

La idea de utilizar múltiples robots aéreos en un sistema coordinado se basa en el comportamiento de los enjambres de animales, como las abejas o los pájaros, que trabajan juntos de manera colaborativa para lograr objetivos comunes. Esta inspiración biológica ha llevado al desarrollo de algoritmos y técnicas para coordinar y controlar múltiples VANT en diferentes aplicaciones.

El interés en la investigación e innovación de soluciones con Vehículos Aéreos No Tripulados ha crecido exponencialmente en años recientes Daponte et al. [2015], Mohsan et al. [2023], Gupta et al. [2016], J. Senthilnath [2017], Zhou et al. [2017].

En recientes años, dotar a los VANT de inteligencia para explotar la información recolectada de sensores a bordo, ha sido y es un área estudiada en robótica móvil área (construcción de mapas) Shukla and Karki [2016]. Buscando probar diferentes teorías de control, convirtiéndolos problemas típicos de control 2D (péndulo inverso fijo) a un ambiente 3D, teniendo más variables a controlar para mantener el equilibrio del péndulo y al mismo tiempo lograr el movimiento y las maniobras deseadas del dron en el espacio tridimensional Hehn and D’Andrea [2011].

El despliegue rápido de robots en situaciones de riesgo, búsqueda y rescate ha sido un área ampliamente estudiada en la robótica móvil. Donde existen concursos DARPA CHALLENGE donde todos los factores como exploración, planeación y coordinación son clave para lograr los objetivos del Reto Rouček et al. [2022].

Panorama de métodos de planificación

La siguiente tabla muestra los métodos de planificación de trayectorias.

Metodo	Completez	Óptimo	Escalable	Notas
Grafo de visibilidad	Si	Si	No	<ul style="list-style-type: none"> Mucho espacio libre Mala escalabilidad El robot pasa cerca de obstaculos
Voronoi	Si	No	No	<ul style="list-style-type: none"> Espacio libre máximo Rutas conservadoras Mala escalabilidad
Potential field	Si	No	Depende del ambiente	<ul style="list-style-type: none"> Depende del ambiente Fácil de implementar Suceptible a mínimos locales
Dijkstra/A*	Si	Grid	No	<ul style="list-style-type: none"> Más rápido que la búsqueda desinformada A* usa una función heurística para impulsar la búsqueda de manera eficiente Mala escalabilidad
PRM	Si	Grafo	Si	<ul style="list-style-type: none"> Eficiente para problemas con consultas múltiples Completez probabilística Camino irregular
RRT	Si	No	Si	<ul style="list-style-type: none"> Eficiente para problemas de consulta única Completez probabilística Camino irregular

Planteamiento del problema

La coordinación de múltiples-VANT (Vehículos Aéreos No Tripulados) es un desafío complejo en el campo de la robótica y la exploración de áreas desconocidas. A medida que la tecnología de los Vehículos Aéreos No Tripulados continúa avanzando y se vuelven más accesibles, se presenta la oportunidad de utilizar equipos de múltiples VANT para realizar tareas de manera colaborativa y eficiente. Sin embargo, esta coordinación plantea diversas problemáticas que deben abordarse.

La coordinación de múltiples VANT implica la necesidad de establecer una comunicación efectiva entre ellos. Los VANT deben intercambiar información relevante sobre su posición, estado, objetivos y otros datos importantes. La comunicación debe ser confiable, de baja latencia y capaz de manejar múltiples enlaces de manera simultánea. Además, los protocolos de comunicación deben ser seguros para proteger la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos.

Otro desafío es la planificación de rutas y la toma de decisiones distribuida. Los VANT deben coordinar sus movimientos para evitar colisiones y lograr una cobertura eficiente del área objetivo. Esto implica la necesidad de desarrollar algoritmos y estrategias que permitan la planificación de rutas dinámicas, considerando los obstáculos y las restricciones del entorno. Además, los VANT deben tomar decisiones colaborativas para adaptarse a situaciones imprevistas o cambios en el entorno.

La asignación de tareas también es un aspecto crítico en la coordinación de múltiples VANT. Cada VANT puede tener diferentes capacidades y sensores especializados, por lo que es importante asignar tareas de acuerdo con las fortalezas individuales de cada robot. Además, los VANT deben colaborar en la recolección y procesamiento de datos, evitando la duplicación de esfuerzos optimizando el uso de los recursos disponibles.

Dada un área de interés A desconocida que se desea explorar,

- Un conjunto de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) denotados como $V = V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$, donde n es el número total de VANT's disponibles
- Un conjunto de tareas de exploración denotados como $T = T_1, T_2, T_3, T_m$, donde m es el número total de tareas a realizar.

restricciones y requisitos específicos del problema, como límites de tiempo, obstáculos a evitar. Para cada tarea de exploración T_m , se definen las siguientes variables:

- Posición inicial: $p_i(x, y, z)$, representa la posición inicial del VANT o los múltiples-VANTs asignados a la tarea T_m
- Trayectoria: α_i , describe la trayectoria seguida por el/los VANT asignado(s) a la tarea T_m en función del tiempo t
- Información recolectada: C_i , representa la información recolectada por el/los VANT asignado(s) durante la exploración

La función objetivo variará según los objetivos específicos del problema.

- Maximizar la cobertura del área de interés A
- Minimizar el tiempo total requerido para cubrir el área de interés A
- Maximizar la cantidad de información recolectada

Con base en lo anterior, surgen las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuáles son los mejores algoritmos conocidos adecuados para correr en una tarjeta electrónica con recursos limitados?
- ¿Es posible crear una arquitectura de software capaz de coordinar múltiples-VANTS para tareas en exploración de manera eficiente?

Hipótesis

Es posible crear una arquitectura de software para coordinar multiples-VANTS en exploracion que sea de orden lineal capaz de contar con una representacion del ambiente en voxels.

Objetivos generales y específicos del proyecto

General

Diseñar una arquitectura de software descentralizada capaz de resolver los problemas de localización, mapeo, navegación y coordinación multi-VANT en ambientes desconocidos y dinámicos para tareas de exploración en interiores.

De manera más específica, se listan los siguientes objetivos:

1. **Construcción propuesta** Evaluar las soluciones en la literatura asociados con la coordinación multi-VANT. Enfocándose en aspectos como la comunicación, evasión de obstáculos, asignación de tareas y sincronización de información. En base a esta valoración, construir una arquitectura de software para la coordinación multi-VANT.
2. **Valoración (prueba) propuesta** Emplear una herramienta de simulación de libre uso para robótica, para el desarrollo y puesta en marcha de una propuesta de arquitectura de software capaz de realizar el control multi-VANT y evaluar el desempeño de dicha arquitectura.
3. **Comparación y análisis** Comparar y analizar los resultados obtenidos con enfoques existentes en la coordinación multi-VANT, mostrando las ventajas y desventajas de la estrategia propuesta. Con base a estos análisis proponer recomendaciones y pautas prácticas para la implementación y aplicación de la estrategias de coordinación multi-VANT en escenarios reales, considerando factores como la escalabilidad, la robustez y los recursos computacionales requeridos.

Metodología

La metodología propuesta se divide en tres etapas, iniciando en septiembre del 2023. A continuación se detallan cada una de las actividades que se plantean realizar en cada una.

Etapa 1. Análisis y diseño de la solución propuesta

En esta etapa se comprende en la revisión de la literatura de manera más completa, que permita contar con la información necesaria para la elección de los mejores algoritmos para abordar cada una de las problemáticas asociadas con la coordinación de trayectorias. Una vez realizada la elección de los algoritmos que se usarán para la propuesta de arquitectura de software, se procederá a revisar y estudiar las arquitecturas para los robots colaborativos. Finalmente, se realizará el diseño de la arquitectura.

Las actividades específicas a realizarse en la etapa 1, son:

E1.A1. Revisión estado del arte Ampliar la revisión de la literatura sobre coordinación y exploración multi-VANT.

E1.A2. Evaluación de aptitudes Revisar y documentar los aspectos relevantes (asi como sus limitantes) que permiten la colaboración, coordinación y balanceo de la carga de trabajo multi-VANT.

E1.A3. Selección de algoritmos Seleccionar los algoritmos para planificación de trayectorias y exploración en ambientes desconocidos representativos para un entorno de computación restringida.

E1.A4. Elaboración de solución Definir la arquitectura de software para escenarios en aplicaciones multi-VANT apegadas a las especificaciones de computadora de placa reducida (Raspberry Pi, Esp32 ... etc.).

E1.A5. Documentación Etapa 1 Elaborar la documentación de la revisión del estado del arte y del trabajo realizado que formará parte de la tesis.

E1.A6. Revisión de tesis Revisión y corrección de avances con los asesores.

Etapa 2. Implementación y validación

Esta etapa se centra en el desarrollo e implementación del diseño de la arquitectura de software para la coordinación multi-VANT.

Las actividades específicas a realizarse en la etapa 2, son:

E2.A1. Selección Simulador Al tener definida la arquitectura de software y conocer las estructuras de datos que se utilizaran, evaluar los diversos simuladores para robótica de libre uso. (Revisar temas de modelos 3D, dinámica del robot, representación del ambiente 3D, simulación de sensores).

E2.A2. Creación modelo 3D Crear un modelo 3D en base al simulador seleccionado apegandose a las dimensiones de un VANT que se pueda replicar.

E2.A3. Control de desplazamientos Crear movimientos y control de un VANT y múltiples VANT, algoritmos que forman parte de la capa reactiva del VANT.

E2.A4. Desarrollo de visualización de datos A partir de la selección del sensor, se desarrollará la forma de representar el entorno 3D dentro del simulador elegido.

E2.A5. Desarrollo de algoritmos de exploración En base a la revisión del estado del arte se implementará el algoritmo propuesto para la exploración con un VANT

E2.A6. Implementación un solo VANT Realizar pruebas y corregir errores en base a los desarrollos realizados.

E2.A7. Simulación un solo VANT Realizar pruebas de simulación con un solo VANT de la solución propuesta.

E2.A8. Desarrollo de coordinación Al contar con la exploración y navegación exitosa de un solo VANT, se procede al desarrollo de coordinación multi-VANT.

E2.A9. Implementación multi-VANT Realizar pruebas y corregir errores en base a los desarrollos realizados para la coordinación multi-VANT.

E2.A10. Simulación multi-VANT Realizar pruebas de simulación multi-VANT de la solución propuesta.

E2.A11. Documentación Etapa 2 Elaborar la documentación del desarrollo e implementación de la propuesta de arquitectura de software para la coordinación multi-VANT que formará parte de la tesis.

E2.A12. Revisión de tesis Revisión y corrección de capítulos con los asesores.

Etapas 3. Evaluación experimental, resultados y conclusiones

Partiendo del prototipo y las simulaciones desarrolladas en la etapa anterior, en esta etapa se realizan todas las actividades relacionadas con la evaluación, recabación de resultados y la escritura de los capítulos restantes de la tesis. Además se realizará el proceso de graduación y actividades relacionadas.

Las actividades específicas a realizarse en la etapa 3, son:

E3.A1. Experimentación de solución Experimentos para evaluar el desempeño de la solución propuesta creada en la etapa anterior.

E3.A2. Recopilación de resultados Recabar la información de los resultados, realizar su análisis y generar la documentación correspondiente.

E3.A3. Documentación Etapa 3 Elaborar la documentación de los resultados obtenidos y conclusiones que formará parte de la tesis.

E3.A4. Revisión de tesis Revisión y corrección de tesis con los asesores.

E3.A5. Divulgación Escribir un artículo científico, con los hallazgos de esta tesis y participar en actividades de difusión.

E3.A6. Proceso de titulación Comenzar el proceso de titulación

Cronograma de actividades (plan de trabajo)

	Cuatrimestre 1				Cuatrimestre 2				Cuatrimestre 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Etap 1												
E1.A1. Revisión estado del arte												
E1.A2. Evaluación de aptitudes												
E1.A3. Selección de algoritmos												
E1.A4. Elaboración de solución												
E1.A5. Documentación Etapa 1												
E1.A6. Revisión de tesis Etapa 1												
Etap 2												
E2.A1. Selección Simulador												
E2.A2. Creación modelo 3D												
E2.A3. Control de desplazamientos												
E2.A4. Desarrollo de visualización de datos												
E2.A5. Desarrollo de algoritmos de exploración												
E2.A6. Implementación un solo VANT												
E2.A7. Simulación un solo VANT												
E2.A8. Desarrollo de coordinación												
E2.A9. Implementación multi-VANT												
E2.A10. Simulación multi-VANT												
E2.A11. Documentación Etapa 2												
E2.A12. Revisión de tesis												
Etap 3												
E3.A1. Experimentación de solución												
E3.A2. Recopilación resultados												
E3.A3. Documentación Etapa 3												
E3.A4. Revisión de tesis												
E3.A5. Divulgación												
E3.A6. Proceso de titulación												

Infraestructura

Para el desarrollo de este proyecto de investigación, se hará uso de un equipo de cómputo con las siguientes características:

- iMac (21.5-inch, Late 2015)
- Procesador 2.8 GHz Quad-Core Intel Core i5
- Memoria Ram 8 GB 1867 MHz DDR3
- Graphics Intel Iris Pro Graphics 6200 1536 MB
- Almacenamiento 1 TB

Estado del arte

Las aplicaciones de la robótica 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 un comportamiento inteligente. Dentro de la robótica móvil inteligente se han propuesto estrategias de comportamiento reactivas, algoritmos que imitan el comportamiento de insectos y el cómo se desplazan en un entorno.

El objetivo principal de los algoritmos de navegación es el de guiar al robot desde el punto de inicio al punto destino. Los trabajos por V. Lumelsky y A. Stephanov, et al. [11], dieron respuesta a problemáticas de navegación eficiente y de poca memoria (Algoritmos tipo bug).

Se considera a P. Hart, N. Nilsson et al. como los creadores del algoritmo A* en 1968 [12], al mejorar el algoritmo de Dijkstra para el robot Shakey, que debía navegar en una habitación que contenía obstáculos fijos. El objetivo principal del algoritmo A* es la eficiencia en la planificación de rutas. Otros algoritmos propuestos por A. Stentz [13] han demostrado operar de manera eficiente ante obstáculos dinámicos, a comparación del algoritmo A* que vuelve a ejecutarse al encontrarse con un obstáculo, el algoritmo D* usa la información previa para buscar una ruta hacia el objetivo.

La colaboración de múltiples VANTs (vehículos aéreos no tripulados), también conocidos como VANTs, ha surgido como una área de investigación prometedora en los últimos años [1,2,3,5]. La capacidad de coordinar y colaborar entre sí permite a los VANTs realizar tareas complejas de manera eficiente, abriendo nuevas posibilidades en una amplia gama de aplicaciones, desde la vigilancia y la logística hasta la exploración y la respuesta a desastres [1,2].

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 la colisión y mejorando la eficiencia de sus misiones [5,6]. Estos algoritmos tienen en cuenta varios factores, como las restricciones de vuelo, la energía restante de los VANTs y las ubicaciones objetivo, para generar trayectorias seguras y eficientes.

Además de la planificación de rutas, la coordinación de los VANTs requiere una comunicación efectiva. Se han investigado diferentes protocolos de comunicación y estrategias de intercambio de información para permitir la colaboración entre los VANTs. Algunos enfoques utilizan comunicación directa entre los VANTs, mientras que otros emplean una arquitectura de red donde los VANTs se comunican a través de una infraestructura centralizada [6]. La elección del enfoque depende de las características de la aplicación y las restricciones del sistema.

La colaboración de múltiples VANTs también puede implicar la formación de formaciones o la realización de tareas coordinadas. Para ello, se han desarrollado algoritmos de control distribuido que permiten a los VANTs mantener posiciones relativas estables y realizar movimientos coordinados. Estos algoritmos [14] pueden basarse en técnicas de seguimiento y control de formaciones, y se han aplicado en diferentes contextos, desde la inspección de infraestructuras hasta la búsqueda y rescate.

En términos de validación y evaluación, se utilizan simulaciones y pruebas reales para verificar el rendimiento y la eficacia de los sistemas de colaboración de múltiples VANTs. Las simulaciones permiten evaluar diferentes escenarios y ajustar los parámetros del sistema antes de las pruebas reales. Los casos de prueba reales proporcionan información sobre la implementación y la eficiencia en situaciones del mundo real, y pueden ayudar a identificar desafíos adicionales que deben abor-

darse.

La adquisición de datos es el primer paso en la representación de mapas 3D con VANTs. Los VANTs pueden llevar a cabo vuelos sobre un área de interés, capturando imágenes desde diferentes ángulos y alturas[15]. Estas técnicas aprovechan la información de correspondencia entre las imágenes para calcular la posición y orientación relativa de las cámaras y reconstruir la estructura tridimensional del entorno.

Los VANTs pueden utilizar sensores LiDAR (Light Detection and Ranging) para capturar datos 3D. Los sensores LiDAR emiten pulsos de luz láser y miden el tiempo que tarda en reflejarse en los objetos circundantes. Esto permite obtener información precisa sobre la distancia y la posición tridimensional de los objetos en el entorno. Los datos LiDAR pueden combinarse con las imágenes capturadas para generar mapas 3D completos y detallados.

De acuerdo al Survey de Alsamhi et al. [2019], los VANT están preparados para convertirse en una parte integral de las ciudades inteligentes y mejorar la experiencia de vida en general en el sentido de monitorear la contaminación, investigar accidentes, combatir incendios, entregar paquetes, respaldar las actividades de primeros auxilios, entregar medicamentos, monitorear el tráfico y supervisar sitios de construcción.

Además, la tecnología de drones puede conducir a enormes beneficios secundarios, como la reducción del consumo de energía, la conservación de recursos, la reducción de la contaminación, el acceso a áreas peligrosas y de desastre y el aumento de la preparación para emergencias.

Los trabajos de Shen et al. [2011], Grzonka et al. [2012] y Fraundorfer et al. [2012] son pioneros en demostrar la navegación autónoma de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT). Estos estudios demostraron que los VANT pueden seguir puntos de referencia en el mapa, evitar obstáculos y llevar a cabo tareas de exploración en entornos complejos. Sin embargo, aunque mostraron avances significativos, no lograron alcanzar una autonomía total. Los primeros carecen de planificación interna, mientras que los segundos dependían de un mapeo previo fuera de línea para su funcionamiento.

Los avances en hardware y software informáticos, la disponibilidad de sensores robustos pero ligeros, como cámaras de profundidad, y módulos integrados de localización basados en visión, junto con desarrollos algorítmicos, han permitido recientemente maniobras de navegación precisas y agresivas de VANT en entornos desconocidos, como los métodos propuesto por Thrun et al. [2005]; Tsardoulis, Iliakopoulou, Kargakos y Petrou (2016), y por Cadena et al. (2016).

Se presenta una solución de navegación mínima para enjambres de diminutos robots voladores que exploran entornos desconocidos sin señal de GPS. Los enjambres de pequeños robots voladores tienen un gran potencial para explorar entornos desconocidos, especialmente en interiores. Su pequeño tamaño les permite moverse en espacios estrechos y su ligereza los hace seguros para operar alrededor de humanos. Hasta ahora, esta tarea ha sido difícil debido a la falta de estrategias de navegación adecuadas. La ausencia de infraestructura externa implica que cualquier intento de posicionamiento debe ser realizado por los propios robots. Las soluciones de vanguardia, como la localización y el mapeo simultáneos, todavía requieren demasiados recursos. Este artículo presenta el algoritmo "Swarm Gradient Bug"(SGBA), una solución de navegación mínima que permite a un enjambre de diminutos robots voladores explorar autonomamente un entorno desconocido y regresar posteriormente al punto de partida. SGBA 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 comportamientos de 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 un faro de referencia. Se estudiaron los aspectos colectivos de SGBA, demostrando que permite que un grupo de cuadricópteros comerciales estándar de 33 gramos explore con éxito un entorno del mundo real. El potencial de aplicación se ilustra mediante una misión de búsqueda y rescate de prueba en la que los robots capturaron imágenes para encontrar víctimas en un entorno de oficina. Los algoritmos desarrollados se generalizan a otros tipos de robots y sientan las bases para abordar misiones igualmente complejas con enjambres de robots en el futuro. McGuire et al. [2019].

El texto destaca el potencial de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) para tener un impacto significativo en situaciones donde es demasiado arriesgado o costoso depender del trabajo humano. Los UAV autónomos, que completan tareas colaborativamente mientras gestionan su vuelo básico y tareas relacionadas de forma independiente, presentan oportunidades adicionales junto con desafíos de investigación y regulación. Las mejoras en la construcción y componentes de los UAV, así como en el hardware de computación embebida, mecanismos de comunicación y sensores que pueden ser montados a bordo de un UAV, están cerca del punto en el que el despliegue comercial de flotas de UAV autónomos será técnicamente posible. Para alcanzar este potencial, los UAV deberán operar de manera segura y confiable en entornos complejos y potencialmente cambiantes, con especial énfasis en la planificación de rutas, la detección de obstáculos y la evitación de colisiones. La encuesta presenta una clasificación original de la complejidad del entorno y analiza críticamente el estado actual del arte en cuanto a enfoques de planificación de rutas para UAV. Además, resalta los desafíos existentes en la modelización y representación de la complejidad del entorno, así como en los enfoques de planificación de rutas, y plantea preguntas abiertas de investigación junto con futuras direcciones. Jones et al. [2023]

En los últimos años, el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) para llevar a cabo estudios aéreos remotos se ha vuelto prominente. Sin embargo, este tipo de encuestas basadas en UAVs enfrenta varios problemas operativos, como terrenos complicados, recursos limitados de los UAVs, obstáculos, limitaciones de sensores y otros factores ambientales. Para abordar estos desafíos y alcanzar múltiples objetivos, como reducir la longitud del recorrido, maximizar la cobertura y limitar el tiempo de encuesta, se requiere una optimización multiobjetivo. Los UAVs necesitan una planificación efectiva de la ruta de cobertura (CPP) para generar la ruta ideal, considerando diversas restricciones ambientales para la operación autónoma. En este artículo, se exploran y analizan las investigaciones existentes sobre las diversas técnicas utilizadas en la planificación de rutas de cobertura para UAVs, brindando una visión general de los métodos más avanzados en CPP para UAVs. El estudio discute los principales desafíos y requisitos de CPP para UAVs, y presenta diversos enfoques propuestos en la literatura para abordar estos problemas. Se exploran diversos patrones de vuelo geométricos para el área de interés con despliegue de UAVs, además de estrategias de cobertura para múltiples UAVs y múltiples regiones, lo que proporciona una nueva dimensión a las operaciones basadas en UAVs. También se considera el consumo de energía de los UAVs durante CPP, un factor esencial que afecta su duración de vuelo y misión. La selección del algoritmo CPP se determina según los requisitos únicos de la aplicación de los UAVs, como el tamaño y forma de la región a cartografiar, la existencia de obstáculos y la resolución de cobertura deseada. El estudio también incluye estrategias de planificación de rutas en un entorno tridimensional y la cobertura dinámica. Además, se comparan las estrategias existentes utilizando diferentes métricas de rendimiento para evaluar el éxito de las misiones de cobertura. Finalmente, se examinan los problemas y las preocupaciones sin resolver relacionadas con la planificación de rutas de cobertura de UAVs para proporcionar conocimientos valiosos a los lectores. Kumar and Kumar [2023].

El artículo de Zhang et al. [2023] investiga el problema de planificación de rutas de un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para completar una misión de incursión a través de un vuelo de baja altitud en entornos complejos. El VANT debe evitar las áreas de detección de radar, los obstáculos

estáticos de baja altitud y los obstáculos dinámicos durante el proceso de vuelo. Debido a la incertidumbre del movimiento dinámico de obstáculos a baja altitud, puede ralentizar la convergencia de los modelos de algoritmos existentes y también reducir la tasa de éxito de la misión de los VANT. Para resolver este problema, este artículo diseña un método de detección de estado para codificar el estado ambiental de la dirección de viaje de los VANT y comprimir el espacio de estado ambiental. Al considerar la continuidad del espacio de estado y el espacio de acción, se propone el algoritmo SD-TD3 en combinación con el algoritmo de política de gradiente determinista de doble retraso (TD3), que puede acelerar la velocidad de convergencia de entrenamiento y mejorar la capacidad de evasión de obstáculos del modelo de algoritmo. Además, para abordar el problema de la recompensa escasa del aprendizaje por refuerzo tradicional, se ha diseñado una función de recompensa dinámica heurística para otorgar recompensas en tiempo real y guiar al UAV para completar la tarea. Los resultados de la simulación muestran que los resultados de entrenamiento del algoritmo SD-TD3 convergen más rápido que el algoritmo TD3.

Este artículo presenta un método para la planificación de trayectorias en línea en entornos conocidos. El algoritmo propuesto es una fusión de técnicas basadas en muestreo y optimización basada en modelos a través de programación cuadrática. El primero se utiliza para generar eficientemente una ruta libre de obstáculos, mientras que el último tiene en cuenta las restricciones dinámicas del robot para generar una trayectoria dependiente del tiempo. La principal contribución de este trabajo radica en la formulación de un problema de optimización convexa sobre la ruta libre de obstáculos generada, lo que garantiza que sea factible. Por lo tanto, a diferencia de los métodos propuestos anteriormente, no se requieren formulaciones iterativas. El método propuesto ha sido comparado con enfoques de vanguardia, mostrando una mejora significativa en la tasa de éxito y el tiempo de cálculo. Para ilustrar la efectividad de este enfoque para la planificación en línea, se aplicó el método propuesto a la navegación autónoma fluida de un quadcopter en múltiples entornos que consisten en hasta 200 obstáculos. Los escenarios presentados a continuación son algunos de los experimentos con mayor densidad de obstáculos para la planificación y navegación en línea reportados hasta la fecha. Campos-Macías et al. [2017].

REFERENCIA	MAPA	Planificador de rutas	Generación trayectoria	Simulador	Percepción	MULTI-VANT
Cieslewski et al. [2017]	Octomap	Frontier Based	Direct Velocity Control	Gazebo	siete	X
Usenko et al. [2017]	Egocentric Grid	Oct-tree	A*	webots	LiDAR	X
Mohta et al. [2017]	3D local map and 2D global map	Oct-tree	A*	webots	LiDAR	X
Lin et al. [2017]	TSDF	Celdas	D* Lite	gazebo	Camara	✓
Papachristos et al. [2017]	Octomap	Grafo	RRT	airsim	siete	X
Oleynikova et al. [2018]	Voxel Hashing TSDF & ESDF	Oct-tree	A*	webots	LiDAR	X
Gao et al. [2018]	Regular ESDF Grid Map	Oct-tree	A*	webots	LiDAR	X
Florence et al. [2018]	Search over views	Oct-tree	A*	webots	LiDAR	X
Selin et al. [2019]	Octomap	Oct-tree	A*	webots	LiDAR	X
Collins [2019]	KD Tree + Sliding Voxel Map	Voronoi	A*	gazebo	LiDAR	X
Campos-Macías et al. [2020]	Octree	Grafo	RRT*	matlab	Camara	X
Zhou et al. [2023]	HGrid	Grafo	RRT	airsim	siete	X
Westheider et al. [2023]	Grid Mapping	Grafo	RRT	airsim	siete	X

Contribuciones o resultados esperados

1. Documentación, y códigos liberados
 - Algoritmo para la planificación de rutas
 - Protocolos de comunicación y coordinación
 - Coordinación en entornos dinámicos
2. Simulación de solución
 - Simulaciones detalladas y pruebas en entornos controlados
 - Métricas como tiempo de respuesta, consumo de energía y la capacidad de adaptación a diferentes escenarios.
3. Tesis impresa.

Referencias

- [1] Saeed H. Alsamhi, Ou Ma, Mohammad Samar Ansari, and Faris A. Almalki. Survey on collaborative smart drones and internet of things for improving smartness of smart cities. *IEEE Access*, 7:128125–128152, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2934998.
- [2] Ronald C. Arkin, editor. *Behavior-Based Robotics*. MIT Press, 1998. doi: 10.1007/978-3-319-32552-1. URL <https://mitpress.mit.edu/9780262529204/behavior-based-robotics/>.
- [3] George A. Bekey. *Autonomous Robots From Biological Inspiration to Implementation and Control*. MIT Press, 1st edition, 2005. ISBN 9780262534185.
- [4] R. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(1):14–23, 1986. doi: 10.1109/JRA.1986.1087032.
- [5] Yifan Cai and Simon X. Yang. A survey on multi-robot systems. In *World Automation Congress 2012*, pages 1–6, 2012.
- [6] Leobardo Campos-Macías, David Gómez-Gutiérrez, Rodrigo Aldana-López, Rafael de la Guardia, and José I. Parra-Vilchis. A hybrid method for online trajectory planning of mobile robots in cluttered environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(2):935–942, 2017. doi: 10.1109/LRA.2017.2655145.
- [7] Leobardo Campos-Macías, Rodrigo Aldana-López, Rafael Guardia, José I. Parra-Vilchis, and David Gómez-Gutiérrez. Autonomous navigation of MAVs in unknown cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 38(2):307–326, may 2020. doi: 10.1002/rob.21959. URL <https://doi.org/10.1002/rob.21959>.
- [8] Titus Cieslewski, Elia Kaufmann, and Davide Scaramuzza. 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, 2017. doi: 10.1109/IROS.2017.8206030.
- [9] Matthew Collins. Efficient planning for high-speed mav flight in unknown environments using sparse topological graphs. Master’s thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, August 2019.
- [10] Pasquale Daponte, Luca De Vito, Gianluca Mazzilli, Francesco Picariello, Sergio Rapuano, and Maria Riccio. Metrology for drone and drone for metrology: Measurement systems on small civilian drones. *2015 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, pages 306–311, 2015.
- [11] Peter R. Florence, John Carter, Jake Ware, and Russ Tedrake. Nanomap: Fast, uncertainty-aware proximity queries with lazy search over local 3d data, 2018.
- [12] Friedrich Fraundorfer, Lionel Heng, Dominik Honegger, Gim Hee Lee, Lorenz Meier, Petri Tanskanen, and Marc Pollefeys. Vision-based autonomous mapping and exploration using a quadrotor mav. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 4557–4564, 2012. doi: 10.1109/IROS.2012.6385934.
- [13] Fei Gao, William Wu, Yi Lin, and Shaojie Shen. 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, 2018. doi: 10.1109/ICRA.2018.8462878.

- [14] Slawomir Grzonka, Giorgio Grisetti, and Wolfram Burgard. A fully autonomous indoor quadrotor. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(1):90–100, 2012. doi: 10.1109/TRO.2011.2162999.
- [15] Lav Gupta, Raj Jain, and Gabor Vaszkun. Survey of important issues in uav communication networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 18(2):1123–1152, 2016. doi: 10.1109/COMST.2015.2495297.
- [16] Markus Hehn and Raffaello D’Andrea. A flying inverted pendulum. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 763–770, 2011. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980244.
- [17] Armin Hornung, Kai M. Wurm, Maren Bennewitz, Cyrill Stachniss, and Wolfram Burgard. OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. *Autonomous Robots*, 2013. doi: 10.1007/s10514-012-9321-0. URL <https://octomap.github.io>. Software available at <https://octomap.github.io>.
- [18] Akanksha Dokania J. Senthilnath, Manasa Kandukuri. Application of uav imaging platform for vegetation analysis based on spectral-spatial methods. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 140(0168-1699):8–24, 2017. doi: 10.1016/j.compag.2017.05.027.
- [19] Michael Jones, Soufiene Djahel, and Kristopher Welsh. Path-planning for unmanned aerial vehicles with environment complexity considerations: A survey. *ACM Comput. Surv.*, 55(11), feb 2023. ISSN 0360-0300. doi: 10.1145/3570723. URL <https://doi.org/10.1145/3570723>.
- [20] Krishan Kumar and Neeraj Kumar. Region coverage-aware path planning for unmanned aerial vehicles: A systematic review. *Physical Communication*, 59:102073, 2023. ISSN 1874-4907. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2023.102073>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490723000769>.
- [21] Yi Lin, Fei Gao, Tong Qin, Wenliang Gao, Tianbo Liu, William Wu, Zhenfei Yang, and Shaojie Shen. Autonomous aerial navigation using monocular visual-inertial fusion. *Journal of Field Robotics*, 35(1):23–51, July 2017. doi: 10.1002/rob.21732. URL <https://doi.org/10.1002/rob.21732>.
- [22] K. N. McGuire, C. De Wagter, K. Tuyls, H. J. Kappen, and G. C. H. E. de Croon. Minimal navigation solution for a swarm of tiny flying robots to explore an unknown environment. *Science Robotics*, 4(35):eaaw9710, 2019. doi: 10.1126/scirobotics.aaw9710. URL <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/scirobotics.aaw9710>.
- [23] Donald Meagher. Geometric modeling using octree encoding. *Computer Graphics and Image Processing*, 19(2):129–147, June 1982. doi: 10.1016/0146-664x(82)90104-6. URL [https://doi.org/10.1016/0146-664x\(82\)90104-6](https://doi.org/10.1016/0146-664x(82)90104-6).
- [24] Syed Agha Hassnain Mohsan, Nawaf Qasem Hamood Othman, Alsharif Li, Yanlong, Mohammed H., and Muhammad Asghar Khan. Unmanned aerial vehicles (uavs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intelligent Service Robotics*, 16(1), 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/s11370-022-00452-4>.
- [25] Kartik Mohta, Michael Watterson, Yash Mulgaonkar, Sikang Liu, Chao Qu, Anurag Makeneni, Kelsey Saulnier, Ke Sun, Alex Zhu, Jeffrey Delmerico, Konstantinos Karydis, Nikolay Atanasov, Giuseppe Loianno, Davide Scaramuzza, Kostas Daniilidis, Camillo Jose Taylor, and Vijay Kumar. Fast, autonomous flight in GPS-denied and cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 35(1):101–120, December 2017. doi: 10.1002/rob.21774. URL <https://doi.org/10.1002/rob.21774>.

- [26] Helen Oleynikova, Zachary Taylor, Roland Siegwart, and Juan Nieto. Safe local exploration for replanning in cluttered unknown environments for microaerial vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3):1474–1481, jul 2018. doi: 10.1109/lra.2018.2800109. URL <https://doi.org/10.1109/lra.2018.2800109>.
- [27] Christos Papachristos, Shehryar Khattak, and Kostas Alexis. Uncertainty-aware receding horizon exploration and mapping using aerial robots. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4568–4575, 2017. doi: 10.1109/ICRA.2017.7989531.
- [28] Gabriel Ramirez and Said Zeghloul. Collision-free path planning for nonholonomic mobile robots using a new obstacle representation in the velocity space. *Robotica*, 19(5):543–555, 2001. doi: 10.1017/S0263574701003484.
- [29] Tomáš Rouček, Martin Pecka, Petr Čížek, Tomáš Petříček, Jan Bayer, Vojtěch Šalanský, Teymur Azayev, Daniel Heřt, Matěj Petrлік, Tomáš Báča, Vojtech Spurný, Vít Krátký, Pavel Petráček, Dominic Baril, Maxime Vaidis, Vladimír Kubelka, François Pomerleau, Jan Faigl, Karel Zimmermann, Martin Saska, Tomáš Svoboda, and Tomáš Krajník. System for multi-robotic exploration of underground environments CTU-CRAS-NORLAB in the DARPA subterranean challenge. *Field Robotics*, 2(1):1779–1818, March 2022. doi: 10.55417/fr.2022055. URL <https://doi.org/10.55417/fr.2022055>.
- [30] Magnus Selin, Mattias Tiger, Daniel Duberg, Fredrik Heintz, and Patric Jensfelt. Efficient autonomous exploration planning of large-scale 3-d environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2):1699–1706, 2019. doi: 10.1109/LRA.2019.2897343.
- [31] Hazim Shakhatreh, Ahmad H. Sawalmeh, Ala Al-Fuqaha, Zuochao Dou, Eyad Almaita, Issa Khalil, Noor Shamsiah Othman, Abdallah Khreishah, and Mohsen Guizani. Unmanned aerial vehicles (uavs): A survey on civil applications and key research challenges. *IEEE Access*, 7: 48572–48634, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909530.
- [32] Shaojie Shen, Nathan Michael, and Vijay Kumar. Autonomous multi-floor indoor navigation with a computationally constrained mav. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 20–25, 2011. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980357.
- [33] Amit Shukla and Hamad Karki. Application of robotics in onshore oil and gas industry - a review part i. *Robotics and Autonomous Systems*, 75:490–507, 2016. ISSN 0921-8890. doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.09.012>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889015002006>.
- [34] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. The MIT Press, 2005. ISBN 0262201623.
- [35] Vladyslav Usenko, Lukas von Stumberg, Andrej Pangercic, and Daniel Cremers. 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, sep 2017. doi: 10.1109/iros.2017.8202160. URL <https://doi.org/10.1109/iros.2017.8202160>.
- [36] Jonas Westheider, Julius Rückin, and Marija Popović. Multi-uav adaptive path planning using deep reinforcement learning, 2023.
- [37] Danyang Zhang, Zhaolong Xuan, Yang Zhang, Jiangyi Yao, Xi Li, and Xiongwei Li. Path planning of unmanned aerial vehicle in complex environments based on state-detection twin delayed deep deterministic policy gradient. *Machines*, 11(1), 2023. ISSN 2075-1702. doi: 10.3390/machines11010108. URL <https://www.mdpi.com/2075-1702/11/1/108>.

- [38] Han-ye Zhang, Wei-ming Lin, and Ai-xia Chen. Path planning for the mobile robot: A review. *Symmetry*, 10(10), 2018. ISSN 2073-8994. doi: 10.3390/sym10100450. URL <https://www.mdpi.com/2073-8994/10/10/450>.
- [39] Boyu Zhou, Hao Xu, and Shaojie Shen. Racer: Rapid collaborative exploration with a decentralized multi-uav system. *IEEE Transactions on Robotics*, 39(3):1816–1835, 2023. doi: 10.1109/TRO.2023.3236945.
- [40] Hailing Zhou, Hui Kong, Lei Wei, Douglas Creighton, and Saeid Nahavandi. On detecting road regions in a single uav image. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(7):1713–1722, 2017. doi: 10.1109/TITS.2016.2622280.
- [41] Evi Zouganeli and Athanasios Lentzas. Cognitive robotics - towards the development of next-generation robotics and intelligent systems. In *Communications in Computer and Information Science*, pages 16–25. Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-031-17030-0_2. URL https://doi.org/10.1007/978-3-031-17030-0_2.

Fecha de inicio

Fecha de terminación

Septiembre de 2023

Agosto de 2024

Firma del alumno: _____

Comité de aprobación del tema de tesis

Dr. José Gabriel Ramírez Torres

Dr. Eduardo Arturo Rodríguez Tello

Dr. 3

Dr. 4
