

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

26 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 Matheson [2018], soluciones para el problema de la última milla, inclusive en espectáculos aéreos (solo por mencionar algunos). 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. Resolver eficazmente este problema permitiría mejorar la eficiencia y efectividad de las misiones de exploración en diversos campos, como la búsqueda y rescate Matheson [2018], la inspección de infraestructuras y entre otras.

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. Rouček et al. [2022]

La naturaleza es una fuente inmensa de soluciones a problemas como la locomoción de los robots no importa la criatura, o que desagradable tal vez ella pueda contener los secretos que nos llevarán algún día a las estrellas ó almenos nos traerán nuestras compras.

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

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(s) 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.

Supongamos que tengo un VANT y lo deseo mover de un punto A a un punto B. Para que el dron se pueda desplazar el dron debe cambiar las velocidades de sus propelas, cambiando estas velocidades lograrán desplazar el dron de acuerdo a cierta **configuración**. Esto podrá ser la respuesta de la salida de un algoritmo genetico.

¿Cómo podemos generar un modelo matemático que nos permita controlar y manipular nuestro objeto es el espacio?. A simples palabras en la cantidad de fuerza de momento es requerida para ir de un punto dado. Así que particularmente depende de una masa que rota.

Antecedentes y motivación para el proyecto

Hablar de por que necesitamos de robots colaborativos y cuales pueden ser sus ventajas y desventajas

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

Buscamos una arquitectura que funcione multirobot buscando el éxito de sus misiones de una forma segura y confiable

Aplicaciones

Transporte

- Diseño blah
- Improper Node/Node

Construcción e Inspección

- Improper Node/Node
- Improper Node/Node

Busqueda y rescate

- Improper Node/Node

- Improper Node/Node

Entrega de productos

- Improper Node/Node
- Improper Node/Node

Medicina

- Improper Node/Node
- Improper Node/Node

Piano Problem

Comunmente se relaciona al problema de planificación de rutas con el problema del mover un piano. Es un problema difícil ya que el piano es un objeto en 3D 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 parámetros 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.

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.

¿Qué es Planificación?

Es encontrar una secuencia de configuración válidas para mover al robot de un punto $A \rightarrow B$

Dados:

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

y la salida será la ruta que conectan los dos puntos.

Analogicamente, 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 más complicado.

Partimos que el robot cuenta con una configuración global, modelo del robot, y mapa del ambiente.

Planificación está en terminos de la configuración del robot. Siendo la configuración el minimo 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.

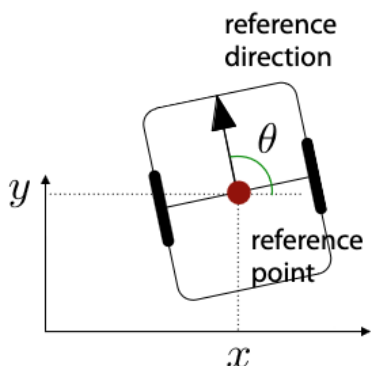


Figura 1: $q = (x, y, \theta)$

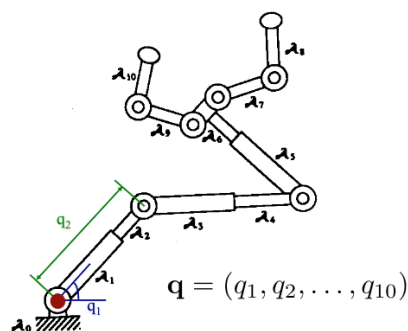


Figura 2: $q = (q1, q2, ..., q10)$

Espacio de configuraciones: Espacio de todas las posibles configuraciones.

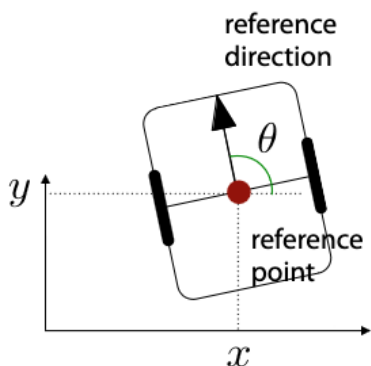


Figura 3: $q = (x, y, \theta)$

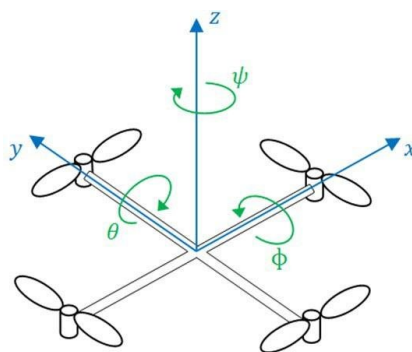


Figura 4: $q = (q1, q2, ..., q10)$

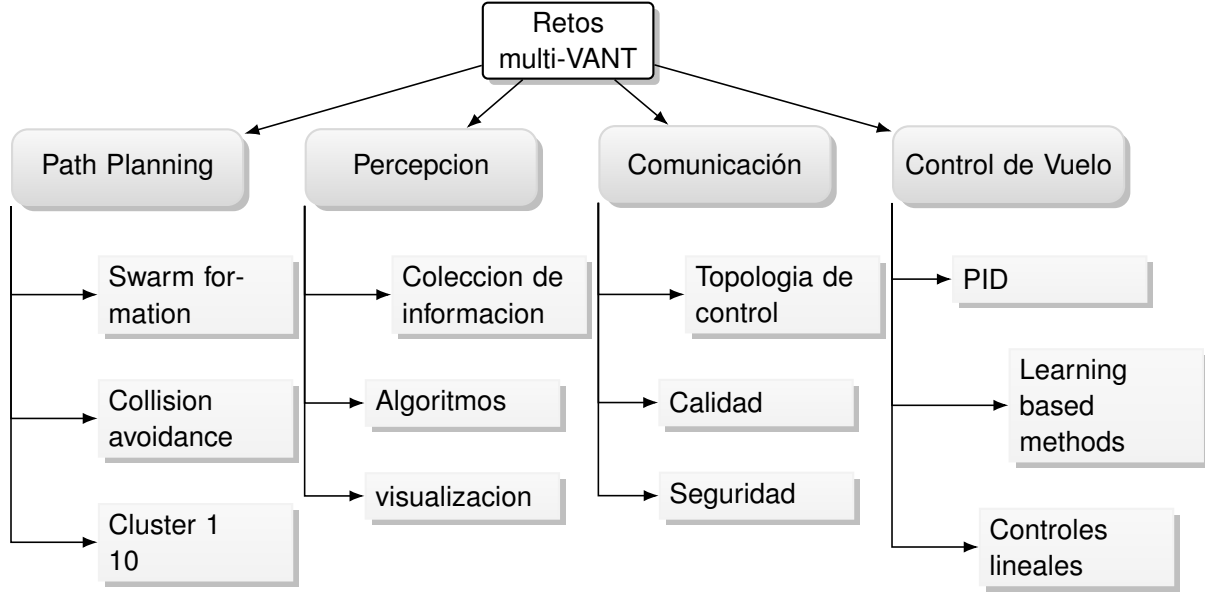
Es el espacio de configuraciones esta compuesto por los espacios libres (C_{free}) y espacios ocupado (con obstaculos) C_{obs} .

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

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

$$C_{obs} = C/C_{free}$$

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 $q \in \mathcal{C}$



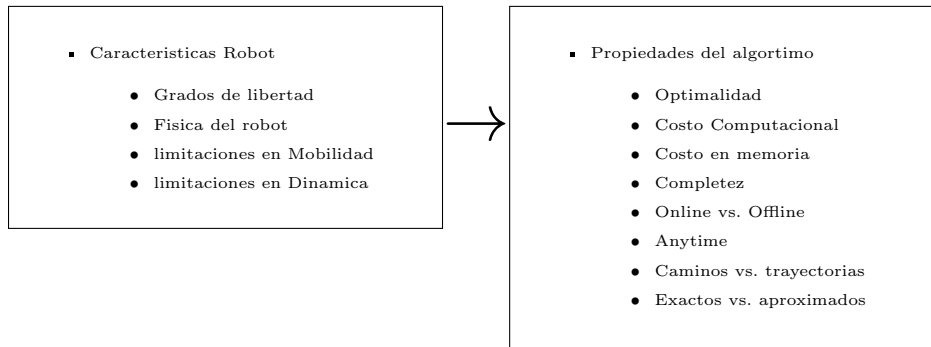
En el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Unidad Tamaulipas se han realizado investigaciones en el àrea de exploración multi-robot y diseño de prototipos de VANTS, lo cual sirve como antecedente para este trabajo.

Entre los trabajos más relevantes se encuentra la tesis doctoral de Elizondo Leal [2013] que tiene como objetivo general el diseño e implementación de la coordinación de multi-robot con un enfoque de auto-ofertas

Por otra parte trabajos de tesis de maestria de Sandoval García [2013] que tiene como objetivo general la Generación de mapas utilizando vehículos aéreos no tripulados de baja altitud.

Este trabajo desarrolla usando una combinacion entre la tecnica y tecnica de ... en especial el algoritmo de ... Los resultados de este trabajo muestran un buen desempeño del sistema de control.... La robustez se alcanza para las perturbaciones.

Otra investigacion relevante se encuentra en la tesis de doctorado del CINVESTAV Unidad Guadalajara Campos-Macías et al. [2020], Villanueva Grijalva [2015]. El objetivo principal de este trabajo es el de realizar seguimiento ..



Panorama de métodos de planificación

- Geométricos
 - Grafos de visibilidad, descomposición en celdas, diagramas de voronoi, etc.
- Campos de potencial
 - Frentes de onda, funciones de navegación, etc.
- Basados en búsqueda
 - Dijkstra, A*, D*, D* Lite, etc.
- Basados en pruebas
 - RRT, RRT*, PRM, etc.
- Trayectorias
 - Mínimo tiempo/energía, etc.
- Bioinspirados
 - Redes Neuronales, Algoritmos Genéticos, Ant Colony Optimisation, etc.

Metodo	Completez	Óptimo	Escalable	Notas
Visibility	Si	Si	No	<ul style="list-style-type: none">■ Mucho espacio libre■ Mala escalabilidad■ El robot pasa cerca de obstáculos
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■ Susceptible 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

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]. Frecuentemente definimos a un robot como una máquina capaz de sentir, pensar y actuar. En Inteligencia Artificial dichos sistemas se les conoce como **agentes**. Los robots se distinguen de los agentes ya que su implementación se lleva a cabo en el mundo real recibiendo información del exterior a través de sensores.

Estando sujetos a las leyes que rigen el mundo físico (ya que tienen masa e inercia). Parte esencial de un robot hoy en día, es el uso de computadoras que incrementan la velocidad de procesamiento con funciones cognitivas complejas.

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.

Es común encontrar robots que no sean autónomos, siendo este un campo activo de investigación lo que ha causado que la autonomía de los robots se vea incrementada así como su inteligencia.

¿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.

Problemas de control

Existen diversas capas de control. En niveles bajos de control queremos que los movimientos del robot sean estables sin oscilaciones. En otra capa de control podemos pensar en robots 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 de control de un robot.

Los controles de bajo nivel hacen uso de 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, Maes

& Brooks 1990; Arkin 1998; Beer 1990) Siendo un factor que aumenta la autonomia en dificultades comunes como evitar obstaculos. Brooks et al. (Citar articulo) propusieron estrategias reactivas. El robot sensa su entorno y reacciona con los comportamientos requeridos.

Sensores

Percibir informacion del entorno es una tarea que deben realizar constantemente los robots y la implementacion de sensores de diversos sensores es necesaria. Diversos robots cuentan con sensores para detectar obstaculos en su camino siendo los sensores de tipo ultrasonico o lasers los mas implementados. Diversas soluciones con sistemas de vision son ampliamente utilizados buscando disminuir la cantidad de sensores que deba contar un robot autonomo.

Inteligencia

Decimos que un robot es una maquina que sensa, piensa y actua. Las computadoras son el cerebro de los robots, convirtiendose en elementos esenciales. Los avances en la tecnologia han logrado disminuir los tamaños de los microprocesadores asi como incrementado su velocidad y memoria . Logrando tener robots cada vez mas complejos.

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

1. **Procesar Informacion (Sensar)** Las lecturas provenientes de un sensor no son utiles para el control de un robot, sera necesaria una capa de procesamiento que reduzca la carga del control principal.
2. **Reflejos** Sistemas vivientes presentan un nivel alto de reaccion (reflejos) que no involucran el procesar lo que esta sucediendo.
3. **Programas con propositos especificos** Soluciones para la navegacion, localizacion y evacion de obstaculos deben de ser considerados en el software de un robot inteligente.
4. **Funciones Cognitivas** La inteligencia aritificial ((ARTICULOS)) esta proviendo un gran numero de funciones cognitivas como aprender y planear.

La organizacion 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 planificacion y aprendizaje en su nivel mas alto.

El desarrollo de la robotica tiene dos rumbos, una se centra en manipulacion de objetos encambio la otra en su movilidad.

Por un lado encontramos la robotica industrial, su desarrollo comenzo para facilitar la remocion de materiales radioactivos despues de la Segunda Guerra Mundial. Comunmente los robots manipuladores no cuentan con sensores, teniendo preprogramadas las trayectorias que debe seguir. Robots industriales recientes hacen uso diversos sensores que les permiten contar con mayor autonomia. Por otro lado la robotica de servicios, que generalmente encontramos robots que cuenten con cierto grado de movilidad (ruedas, voladores, patas ..etc).

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(s) 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(s) 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], Gupta et al. [2016], J. Senthilnath [2017], Mohsan et al. [2023], 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 se han aplicado teorías de grafos para la obtención de la mejor ruta. Los comportamientos reactivos son primordiales si pensamos en un agente autónomo.

La coordinación de múltiples-VANT(s) ofrece numerosos beneficios y oportunidades en diversos campos y aplicaciones.

- Eficiencia y cobertura
- Redundancia y tolerancia a fallos
- Adaptabilidad a entornos dinámicos
- Distribución de carga de trabajo
- Aprendizaje colaborativo

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(s) para realizar tareas de manera colaborativa y eficiente. Sin embargo, esta coordinación plantea diversas problemáticas que deben abordarse.

La coordinación de múltiples VANT(s) implica la necesidad de establecer una comunicación efectiva entre ellos. Los VANT(s) 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(s) 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(s) 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(s). 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(s) 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, etc.

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(s) asignado(s) a la tarea T_m en función del tiempo t
- Información recolectada: C_i , representa la información recolectada por el/los VANT(s) 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:

- ¿Es posible crear una arquitectura de software capaz de coordinar multiples-VANTS para tareas en exploración de manera lineal $O(n)$?
- ¿Cuáles son los mejores algoritmos conocidos adecuados para correr en una raspberry pi?

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

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]; Tsardoulas, 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].

This paper investigates the path planning problem of an unmanned aerial vehicle (UAV) for completing a raid mission through ultra-low altitude flight in complex environments. The UAV needs to avoid radar detection areas, low-altitude static obstacles, and low-altitude dynamic obstacles during the flight process. Due to the uncertainty of low-altitude dynamic obstacle movement, this can slow down the convergence of existing algorithm models and also reduce the mission success rate of UAVs. In order to solve this problem, this paper designs a state detection method to encode the environmental state of the UAVs direction of travel and compress the environmental state space. In considering the continuity of the state space and action space, the SD-TD3 algorithm is proposed in combination with the double-delayed deep deterministic policy gradient algorithm (TD3), which can accelerate the training convergence speed and improve the obstacle avoidance capability of the algorithm model. Further, to address the sparse reward problem of traditional reinforcement learning, a heuristic dynamic reward function is designed to give real-time rewards and guide the UAV to complete the task. The simulation results show that the training results of the SD-TD3 algorithm converge faster than the TD3 algorithm, and the actual results of the converged model are better Zhang et al. [2023]

Recently, unmanned aerial vehicles (UAVs) or drones have emerged as a ubiquitous and integral part of our society. They appear in great diversity in a multiplicity of applications for economic, commercial, leisure, military and academic purposes. The drone industry has seen a sharp uptake in the last decade as a model to manufacture and deliver convergence, offering synergy by incorporating multiple technologies. It is due to technological trends and rapid advancements in control, miniaturization, and computerization, which culminate in secure, lightweight, robust, more-accessible and cost-efficient UAVs. UAVs support implicit particularities including access to disaster-stricken zones, swift mobility, airborne missions and payload features. Despite these appealing benefits, UAVs face limitations in operability due to several critical concerns in terms of flight autonomy,

path planning, battery endurance, flight time and limited payload carrying capability, as intuitively it is not recommended to load heavy objects such as batteries. As a result, the primary goal of this research is to provide insights into the potentials of UAVs, as well as their characteristics and functionality issues. This study provides a comprehensive review of UAVs, types, swarms, classifications, charging methods and regulations. Moreover, application scenarios, potential challenges and security issues are also examined. Finally, future research directions are identified to further hone the research work. We believe these insights will serve as guidelines and motivations for relevant researchers Mohsan et al. [2023].

TEXTOS DEL HANDBOOK Siciliano and Khatib [2016].

Path planning with collision avoidance for unmanned aerial vehicles (UAVs) in environments with moving obstacles is a complex process of navigation, often considered a hard optimization problem. Ordinary resolution algorithms may fail to provide flyable and collision-free paths under the time-consumption constraints required by the dynamic 3D environment. In this paper, a new parallel multiobjective multiverse optimizer (PMOMVO) is proposed and successfully applied to deal with the increased computation time of the UAV path planning problem in dynamic 3D environments. Collision constraints with moving obstacles and narrow pass zones were established based on a mathematical characterization of any intersection with lines connecting two consecutive drones positions. For the implementation, a multicore central processing unit (CPU) architecture was proposed according to the concept of master-slave processing parallelization. Each subswarm of the entire PMOMVO population was granted to a corresponding slave, and representative solutions were selected and shared with the master core. Slaves sent their local Pareto fronts to the CPU core representing the master that merged the received set of nondominated solutions and built a global Pareto front. Demonstrative results and nonparametric ANOVA statistical analyses were carried out to show the effectiveness and superiority of the proposed PMOMVO algorithm compared to other homologous, multiobjective metaheuristics Jarray et al. [2022]

Path planning is one of the most important problems to be explored in unmanned aerial vehicles (UAVs) for finding an optimal path between source and destination. Although, in literature, a lot of research proposals exist on the path planning problems of UAVs but still issues of target location and identification persist keeping in view of the high mobility of UAVs. To solve these issues in UAVs path planning, optimal decisions need to be taken for various mission-critical operations performed by UAVs. These decisions require a map or graph of the mission environment so that UAVs are aware of their locations with respect to the map or graph. Keeping focus on the aforementioned points, this paper analyzes various UAVs path planning techniques used over the past many years. The aim of path planning techniques is not only to find an optimal and shortest path but also to provide the collision-free environment to the UAVs. It is important to have path planning techniques to compute a safe path in the shortest possible time to the final destination. In this paper, various path planning techniques for UAVs are classified into three broad categories, i.e., representative techniques, cooperative techniques, and non-cooperative techniques. With these techniques, coverage and connectivity of the UAVs network communication are discussed and analyzed. Based on each category of UAVs path planning, a critical analysis of the existing proposals has also been done. For better understanding, various comparison tables using parameters such as-path length, optimality, completeness, cost-efficiency, time efficiency, energy-efficiency, robustness and collision avoidance are also included in the text. In addition, a number of open research problems based on UAVs path planning and UAVs network communication are explored to provide deep insights to the readers Aggarwal and Kumar [2020]

In order to solve the path planning problem about multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) attacking multiple targets under static environment, the method based on consistency theory is proposed in this paper. The Voronoi diagram method is used to create threat field and the total

path cost is established firstly. Then, path planning model is constructed and the payment function of multiple UAVs path planning is designed. The idea that multiple UAVs cooperatively seek the optimal path based on consistency theory is further defined by establishing the path solving framework, the purpose of which is that multiple UAVs take off and arrive at prescribed target points at the same time. Finally, the simulation experiment is conducted, the results of which demonstrate that using the consistency theory combined with Voronoi diagram can guarantee the optimal path of UAVs and complete multiple UAVs cooperatively attacking multiple targets Chen et al. [2017]

so developed. For RRT planning method, most time has been spent on collision. Numerous works are focused on 3D scenario. In [7], an improved RRT algorithm is implemented for UAV navigation in field environments. The initial path was created by RRT method and then the path was pruned to fit the motion constrain of UAV. Simple RRT only gives optimal result when the sample iteration reaches infinity though we can stop at required resolution. Recently various optimal RRT path planning algorithms have been developed towards reducing planning time, cost of the path or requirement of the motion constrain[8]. However, few of these try to solve the planning problem in multiple UAVs traversing environment, especially for the problems that contain rich static and pop-up obstacles [9][11].

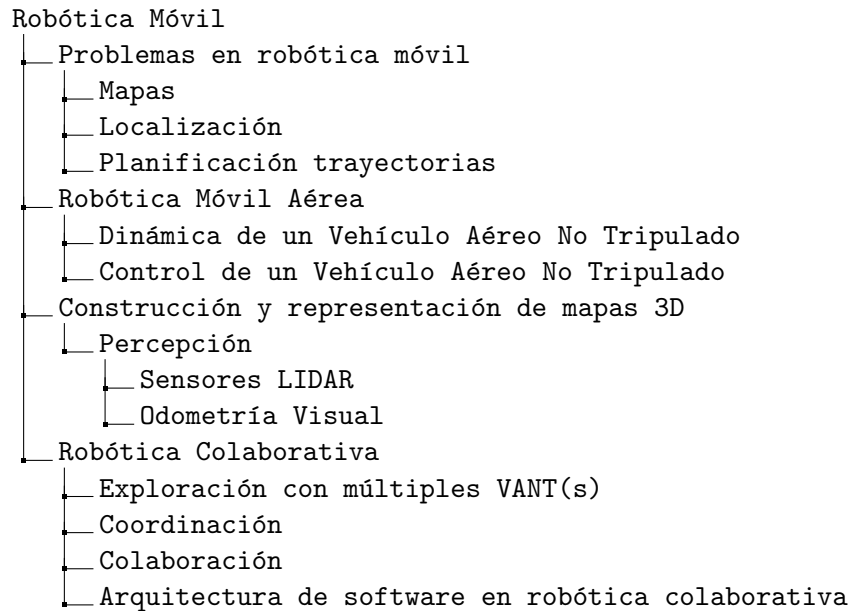
In this paper, we develop a path planning algorithm for multiple UAVs traversing from their starting locations to corresponding goal locations in the presence of both static and dynamic obstacles. When a UAV detects a new obstacle, a new path is first found quickly and then depending on the cooperative path planning strategy is run to produce a better path. Zu et al. [2018]

Autonomous BVLOS Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are gradually gaining their share in the drone market. Together with the demand for extended levels of autonomy comes the necessity for high-performance obstacle avoidance and navigation algorithms that will allow autonomous drones to operate with minimum or no human intervention. Traditional AI algorithms have been extensively used in the literature for finding the shortest path in 2-D or 3-D environments and navigating the drones successfully through a known and stable environment. However, the situation can become much more complicated when the environment is changing or not known in advance. In this work, we explore the use of advanced artificial intelligence techniques, such as reinforcement learning, to successfully navigate a drone within unspecified environments. We compare our approach against traditional AI algorithms in a set of validation experiments on a simulation environment, and the results show that using only a couple of low-cost distance sensors it is possible to successfully navigate the drone beyond the obstacles Chronis et al. [2023].

Drones are poised to become an integral part of smart cities and improve overall life experience in the sense of monitoring pollution, accident investigation, fire-fighting, package delivery, supporting first responder activities, delivering medicine, monitoring traffic, and supervising construction sites. Drone technology can further lead to enormous secondary benefits such as reducing power consumption, conserving resources, reducing pollution, accessing hazardous and disaster areas, and increasing preparedness for emergencies Alsamhi et al. [2019].

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].



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. Stentzz[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 abordarse.

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.

Trabajos relacionados:

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]	Linear 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

- S. Aggarwal and N. Kumar. Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges. *Computer Communications*, 149:270–299, 2020. ISSN 0140-3664. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.014>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366419308539>.
- S. H. Alsamhi, O. Ma, M. S. Ansari, and F. 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.
- G. A. Bekey. *Autonomus Robots From Biological Inspiration to Implementation and Control*. MIT Press, 1st edition, 2005. ISBN 9780262534185.
- L. Campos-Macías, D. Gómez-Gutiérrez, R. Aldana-López, R. de la Guardia, and J. 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.
- L. Campos-Macías, R. Aldana-López, R. Guardia, J. I. Parra-Vilchis, and D. 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>.
- X. Chen, G.-y. Li, and X.-m. Chen. Path planning and cooperative control for multiple uavs based on consistency theory and voronoi diagram. In *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, pages 881–886, 2017. doi: 10.1109/CCDC.2017.7978644.
- C. Chronis, G. Anagnostopoulos, E. Politi, A. Garyfallou, I. Varlamis, and G. Dimitrakopoulos. Path planning of autonomous uavs using reinforcement learning. *Journal of Physics: Conference Series*, 2526(1):012088, jun 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2526/1/012088. URL <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2526/1/012088>.
- T. Cieslewski, E. Kaufmann, and D. 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.
- M. 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.
- P. Daponte, L. D. Vito, G. Mazzilli, F. Picariello, S. Rapuano, and M. Riccio. Metrology for drone and drone for metrology: Measurement systems on small civilian drones. *2015 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, pages 306–311, 2015.
- J. C. Elizondo Leal. *Estrategia Descentralizada para la Exploración Multi-Robot, incluyendo Restricciones en Rango de Comunicación*. PhD thesis, CINVESTAV Unidad Tamaulipas, Junio 2013.
- P. R. Florence, J. Carter, J. Ware, and R. Tedrake. Nanomap: Fast, uncertainty-aware proximity queries with lazy search over local 3d data, 2018.
- F. Fraundorfer, L. Heng, D. Honegger, G. H. Lee, L. Meier, P. Tanskanen, and M. 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.

- F. Gao, W. Wu, Y. Lin, and S. 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.
- S. Grzonka, G. Grisetti, and W. Burgard. A fully autonomous indoor quadrotor. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(1):90–100, 2012. doi: 10.1109/TRO.2011.2162999.
- L. Gupta, R. Jain, and G. 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.
- M. Hehn and R. 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.
- A. D. 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.
- R. Jarray, S. Bouall  gue, H. Rezk, and M. Al-Dhaifallah. Parallel multiobjective multiverse optimizer for path planning of unmanned aerial vehicles in a dynamic environment with moving obstacles. *Drones*, 6(12), 2022. ISSN 2504-446X. doi: 10.3390/drones6120385. URL <https://www.mdpi.com/2504-446X/6/12/385>.
- M. Jones, S. Djahel, and K. 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>.
- K. Kumar and N. 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>.
- Y. Lin, F. Gao, T. Qin, W. Gao, T. Liu, W. Wu, Z. Yang, and S. 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>.
- R. Matheson. Fleets of drones could aid searches for lost hikers, Nov 2018. URL <https://news.mit.edu/2018/fleets-drones-help-searches-lost-hikers-1102>.
- K. N. McGuire, C. D. 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>.
- S. A. H. Mohsan, N. Q. H. Othman, A. Li, Yanlong, M. H., and M. A. 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>.
- K. Mohta, M. Watterson, Y. Mulgaonkar, S. Liu, C. Qu, A. Makineni, K. Saulnier, K. Sun, A. Zhu, J. Delmerico, K. Karydis, N. Atanasov, G. Loianno, D. Scaramuzza, K. Daniilidis, C. J. Taylor, and V. Kumar. Fast, autonomous flight in GPS-denied and cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 35(1):101–120, Dec. 2017. doi: 10.1002/rob.21774. URL <https://doi.org/10.1002/rob.21774>.

- H. Oleynikova, Z. Taylor, R. Siegwart, and J. 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>.
- C. Papachristos, S. Khattak, and K. 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.
- G. Ramirez and S. 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.
- T. Rouček, M. Pecka, P. Čížek, T. Petříček, J. Bayer, V. Šalanský, T. Azayev, D. Heřt, M. Petrлік, T. Báča, V. Spurný, V. Krátký, P. Petráček, D. Baril, M. Vaidis, V. Kubelka, F. Pomerleau, J. Faigl, K. Zimmermann, M. Saska, T. Svoboda, and T. Krajník. System for multi-robotic exploration of underground environments CTU-CRAS-NORLAB in the DARPA subterranean challenge. *Field Robotics*, 2(1):1779–1818, Mar. 2022. doi: 10.55417/fr.2022055. URL <https://doi.org/10.55417/fr.2022055>.
- H. Sandoval García. Generación de mapas utilizando vehículos aéreos no tripulados de baja altitud. Master’s thesis, CINVESTAV Unidad Tamaulipas, Febrero 2013.
- M. Selin, M. Tiger, D. Duberg, F. Heintz, and P. 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.
- H. Shakhathreh, A. H. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha, Z. Dou, E. Almaita, I. Khalil, N. S. Othman, A. Khreishah, and M. 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.
- S. Shen, N. Michael, and V. 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.
- A. Shukla and H. 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>.
- B. Siciliano and O. Khatib, editors. *Springer Handbook of Robotics*. Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-32552-1. URL <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>.
- S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox. *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. The MIT Press, 2005. ISBN 0262201623.
- V. Usenko, L. von Stumberg, A. Pangercic, and D. 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>.
- O. A. Villanueva Grijalva. Control de un vehículo aéreo no tripulado (auv) para reconocimiento en interiores. Master’s thesis, CINVESTAV Unidad Guadalajara, Septiembre 2015.

- J. Westheider, J. Rückin, and M. Popović. Multi-uav adaptive path planning using deep reinforcement learning, 2023.
- D. Zhang, Z. Xuan, Y. Zhang, J. Yao, X. Li, and X. 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>.
- B. Zhou, H. Xu, and S. 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.
- H. Zhou, H. Kong, L. Wei, D. Creighton, and S. 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.
- W. Zu, G. Fan, Y. Gao, Y. Ma, H. Zhang, and H. Zeng. Multi-uavs cooperative path planning method based on improved rrt algorithm. In *2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pages 1563–1567, 2018. doi: 10.1109/ICMA.2018.8484400.

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
