

# Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Luis Alberto Ballado Aradias

CINVESTAV UNIDAD TAMAULIPAS

Cd. Victoria, Tamaulipas - 14 de agosto de 2023

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Planteamiento del problema
- 4 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 5 Metodología
- 6 Estado del Arte
- 7 Contribuciones o resultados esperados

# Robots Aéreos

Actualmente vemos VANTS o coloquialmente como drones, a los que se le pueden pasar rutas de puntos GPS para que recorra, pero no está siendo autónomo, sólo el piloto es reemplazado por un piloto automático.

- Ala fija (tipo avión)
- Ala rotatoria coaxial (tipo helicóptero)
- Alas rotatorias no coaxiales

# ¿Cómo funciona un cuadricóptero?

IMAGEN

# Control de cuadricóptero

Control independiente (desacoplado) de la altura, el avance, desplazamiento lateral y el cabeceo por medio de una combinación intuitiva de la velocidad de giro de los rotores (CITAR controles 2011)

Lograr que un multicoptero mantenga una posición estable no es una tarea fácil y se han propuesto diversas técnicas (CITAR control difuso, MPC, programacionn genetica..)

Diversas técnicas buscan proporcionar un sistema de control robusto, pero resultan ser técnicas con alto costo computacional, y los VANTS que vemos, los fabricantes hacen uso de controles ya conocidos como PID. Por la complejidad de estabilizar un VANT en el aire, se se aprovecha el desacople para realizar un control en cascada para encontrar la secuencia a aplicar al VANT

# Arquitectura de control

Las estructuras de **control reactivas** permiten, a través de relaciones simples de tipo **estimulo-respuesta** conocidas como *comportamientos*. De esta forma se logra separar los problemas del robot en sub-problemas (alta modularidad). permitiendo respuestas rápidas y robustas a los cambios que puedan efectuarse en el medio ambiente. Todo esto sin un modelo en memoria de su entorno.

Con este tipo de control no es posible garantizar que el robot sea capaz de encontrar una solución a un problema. Al no tener memoria no es posible resolver problemas que consideren estados pasados del robot.

IMAGEN DE ROMBA



La **arquitectura híbrida** reemplaza la planificación reactiva, por una ejecución reactiva. En lugar de tener secuencias, se emplean representaciones en memoria para elaborar un plan previo y sólo se vigila en tiempo real la correcta activación y ejecución de comportamientos.

IMAGEN

De esta forma, los tres módulos o capas de control son propuestos para el problema de autonomía.

- Un Planificador - Elabora un plan de ejecución para alcanzar el objetivo deseado
- Habilidades reactivas - Para resolver situaciones precisas
- Secuenciador - que conecta las dos anteriores

IMAGEN

# Planificación de trayectorias

Es un proceso de alto nivel que consume un gran tiempo de cómputo. Generalmente no se hace en un tiempo real, apesar que no existe un límite para la complejidad de la solución, generalmente se emplean lenguajes de alto nivel en esta parte.

IMAGE

# Controles Primitivos

Los controles de bajo nivel son un conjunto de funciones entre el estímulo recogido por los sensores y las acciones efectuadas por el robot. Siendo este un comportamiento o habilidad del robot.

IMAGE

Permiten resolver problemas como evadir obstáculos. Aquí se buscan soluciones y algoritmos en tiempo real.

# Secuenciador

Tiene acceso a la memoria, este recibe el plan desarrollado por la capa deliberativa (Planificador) y selecciona el comportamiento estableciendo los parámetros más adecuados de acuerdo a su contexto. Podemos encontrar programas ejecutándose en paralelo, hace uso de interrupciones para tratar situaciones que no se puedan resolver con el programa principal.

IMAGE

De esta forma, los tres módulos o capas de control son propuestos para el problema de autonomía.

- Un Planificador - Elabora un plan de ejecución para alcanzar el objetivo deseado
- Habilidades reactivas - Para resolver situaciones precisas
- Secuenciador - que conecta las dos anteriores

IMAGEN

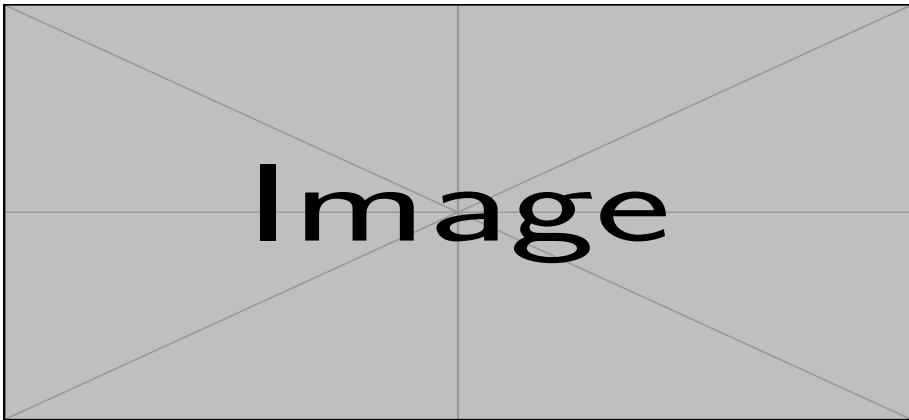


Figura 1: Real caption<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>blah blah blah

# Planificación Global vs. Local

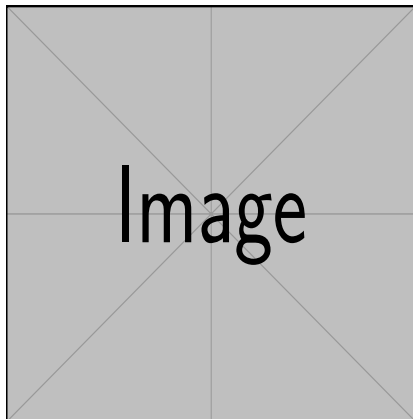


Image



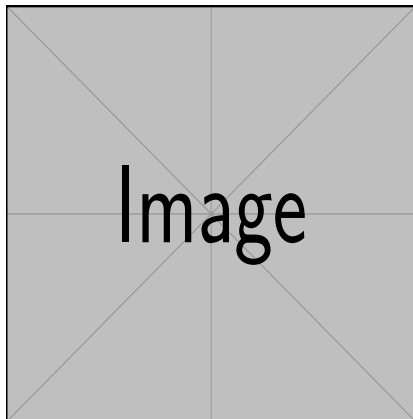
# ¿Qué es Planificar?

- Encontrar una secuencia valida de configuraciones para mover un robot del punto A al punto B; pero .. ¿Cómo?



# ¿Qué es Planificar?

- Encontrar una secuencia valida de configuraciones para mover un robot del punto A al punto B; pero .. ¿Cómo?
- Dados:
  - Configuracion inicial A
  - Configuracion objetivo B
  - Modelo del robot
  - Mapa del ambiente



# Configuraciones

- Configuración  $q$ : especifica todos los puntos del robot respecto a las coordenadas del sistema

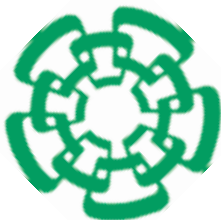
# Configuraciones

- Configuración  $q$ : especifica todos los puntos del robot respecto a las coordenadas del sistema
- Ejemplos:



# Espacio de Configuraciones

- Espacio de Configuración (C-space): espacio de todas las posibles configuraciones
- Ejemplos



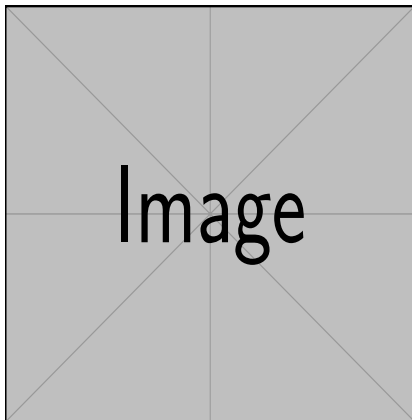
# Espacio de Configuraciones

- Espacio de Configuración (C-space): espacio de todas las posibles configuraciones
- Workspace: conjunto de puntos que el robot puede alcanzar.
- Ejemplos



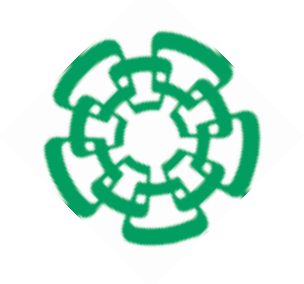
# Espacio de Configuración

- Free space  $C_{free}$  and obstacle space  $C_{obs}$  second item bla bla bla bla some more text bla bla This is an example text with a citation from third item bla bla bla bla some more text bla bla bla bla bla bla



# Problema de Planificacion

- Given a start configuration  $q_s$  and a goal configuration  $q_g$ , encontrar un camino continuo que satisfice  $\tau(0) = q_s, \tau(1) = q_g$ , y  $\tau : [0, 1] \rightarrow C_{free}$



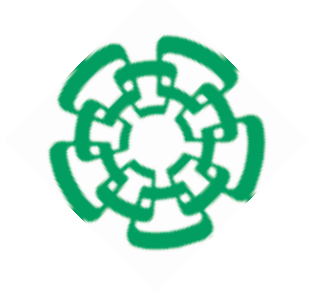


# Panorama de métodos de planificación

- 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.

# Metodos Geometricos

- Mapa de ruta con la informacion de la conectividad de los espacios libres
  - Vertice
  - Arista
- Planes usando algoritmos de grafos



# Metodos Geometricos

- Grafo de visibilidad
- Idea: Conectar todos los vertices visibles de los obstaculos
- Planear un camino desde el inicio al objetivo atravez de las aristas: Conectar todos los vertices visibles de los obstaculos
- Camino mas corto para obstaculos poligonales
- Limitantes: Muy cerca de los obstaculos



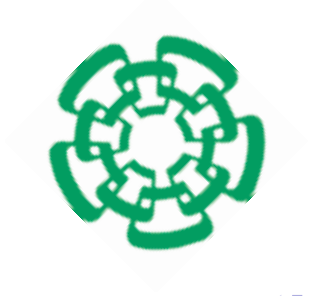
# Metodos Geometricos

- Diagramas de voronoi
- Idea: Conectar todos los vertices visibles de los obstaculos
- Planea una ruta



# Metodos Geometricos

- Diagrama de voronoi
- Beneficios
  - Rutas conservadoras
  - Similar al comportamiento humano
- Limitaciones
  - Difícil de calcular para altas dimensionalidades
  - Inestable - cambios mínimos en el entorno el diagrama cambia completamente



# Metodos Campo de potencial

- El Robot es una masa redonda en un plano inclinado
- Los campos de potencial artificial son funciones derivables  
 $U : R^m \implies R$
- Potencial de atraccion
- Potencial de repulsion

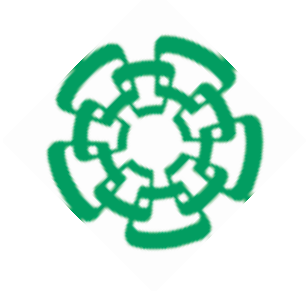
$$A * B = C$$



# Metodos Campo de potencial

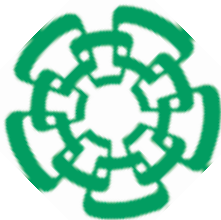
- Consideraciones
  - Modelo del potencial
  - Solucion del metodo
- Idea: seguir el gradiente negativo con uso de desenso de gradiente

$$F(q) = -\Delta U(q)$$



# Metodos Campo de potencial

- Beneficios
  - Implementacion sencilla
  - Evacion de obstaculos online
- Limitaciones
  - Escalabilidad
  - Minimo local





# Metodos basados en busquedas

- Planificación a partir de un grafo  $G = (V, E)$ 
  - $V$  es un conjunto de vertices  $\rightarrow$  configuraciones
  - $E$  es un conjunto de aristas  $\rightarrow$  conecciones libres de colisiones
- Aplicar algoritmos de busqueda para encontrar un camino
  - DFS, BFS, Dijkstra,  $A^*$ , etc.
- Ejemplo: Grafo de visibilidad + Dijkstra



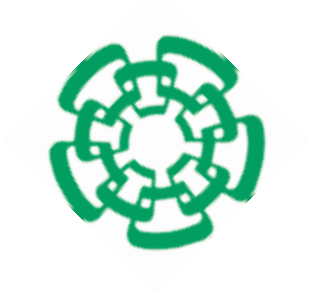
# Metodos basados en busquedas

- Mapa por celdas (Caso especial de un grafo)
- Se subdivide el  $C_{free}$  en pequeñas celdas
- Permite planificaciones con metodos discretos



# Metodos basados en busquedas

- Ejemplo: Algoritmo de **Dijkstra** Expande los nodos con una distancia minima al nodo de origen



# Metodos basados en busquedas

- Ejemplo: Algoritmo **A\*** Considera una heuristica basada en la distancia al objetivo



# Metodos a partir de pruebas

- Ejemplo: Probabilistic roadmap (PRM)  
fase de aprendizaje

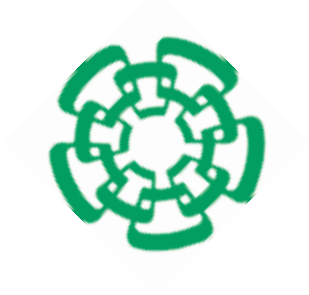


fase de busquedas



# Metodos a partir de pruebas

- Ejemplo: Rapidly-exploring random tree (RRT)



Comparación de métodos				
Metodo	Completo	Optimo	Escalable	Notas
Visibility	Si	Si	No	Poca escalabilidad, el robot pasa cerca de los obstaculos
Voronoi	Si	No	No	Poca escalabilidad
Potential field	Si	No	Depende del ambiente	Facil de implementar, susceptible a minimos locales
Dijkstra/A*	Si	Grid	No	A* usa una funcion heuristica que guia la busqueda mas eficiente, Poca escalabilidad
PRM	Si	Grafo	Si	Eficiente para multi-busquedas, completez probabilistica
RRT	Si	No	Si	Eficiente para problemas simples, completez probabilistica

# Sistemas Multi-Robot

- Dado un conjunto de robots que pueden cooperar y comunicarse entre si para realizar ciertas tareas





# Un solo robot vs. Multi-Robot

- Ventajas

- Mejor
- Mejor
- Mejor
- Mejor

- Desventajas

- Mejor
- Mejor
- Mejor
- Mejor

# Taxonomia Multi-Robot

- Comportamiento colectivo
- Comunicacion
- Tomar desiciones
- Formulacion del problema

# Centralizado vs. Descentralizado

- Centralizado
- Descentralizado
- Híbrido

# Centralizado: Acoplado

- Plan directly in joint
- For  $K$  robots:
- Use standard planning methods
- Problem space
- Computationally

# Centralizado: Desacoplado

- First Plan for each robot
- Then
- Not complete, not optimal

# Descentralizado

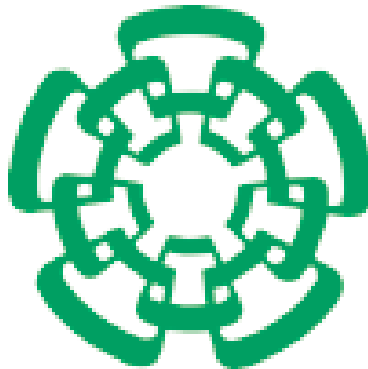
- Information
- Suboptimal
- Implicit or explicit
- Coordination strategies..

# Subfigures in Beamer

You can see in Figure 2 that I have inserted two images, Figures 2a and 2b, that I can reference independently.



(a) Image of the nature V1.



(b) Image of the nature V2.

Figura 2: Two images I want to insert.

# Using Columns

¡text!

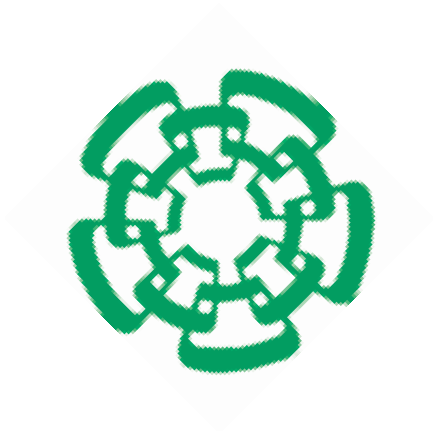
¡text!



# Stuff famous linguists asked

Hola mundo Zahroof et al. (2023) <sup>1</sup>

# First images in beamer



# Using Columns

¡text!



# List

- Point A
- Point B
  - part 1
  - part 2
- Point C
- Point D

# Pictures

Observe Figure 3: it is the first figure I have inserted in beamer.

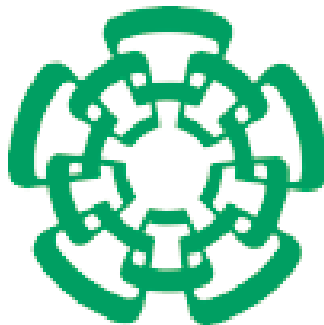


Figura 3: lion!!

¡text!

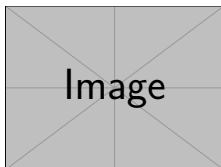
# Figure with other content

Here I can explain in detail what the figure See Zahroof et al. (2023). represents.



**Figura 4:** A figure that is next to a certain explanation.

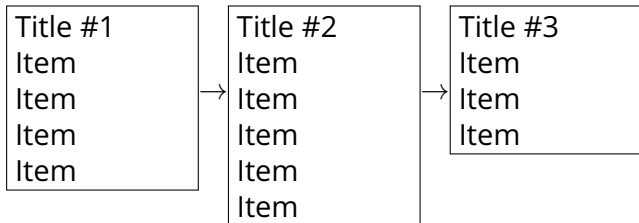
# Factorization Methods



**“The problem of distinguishing prime numbers from composites, and of resolving composite numbers into their prime factors, is one of the most important and useful in all of arithmetic.”**

– Carl Friedrich Gauss

- Pollard's  $p - 1$  algorithm (1974)
- Dixon's Random Squares Algorithm (1981)
- Quadratic Sieve (QS): Pomerance (1981)
- Williams'  $p + 1$  method (1982)



Cita 1 (Zahroof et al., 2023)

Cita 2 Xiao, Zhu, Wang, and Miao (2018)

Cita 3 Xiao et al. (2018)

Cita 4 Xiao et al. (2018)

Cita 5 Xiao et al. (2018, chap. 2)

(Zahroof et al., 2023, chap. 2)

(see Zahroof et al., 2023)

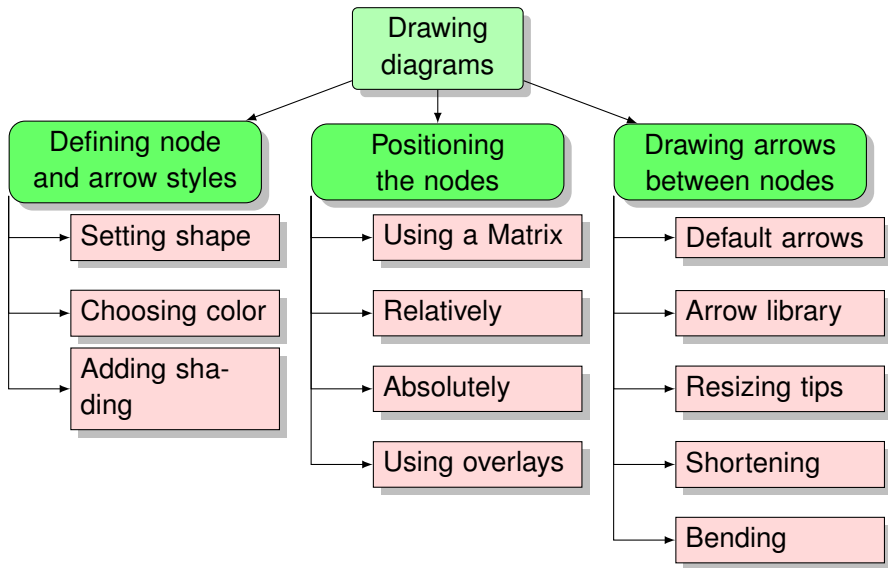
(see Zahroof et al., 2023, chap. 2)

(Zahroof, Liu, Zhou, and Kumar, 2023)

Xiao et al. (2018); Zahroof et al. (2023)

Zahroof, Liu, Zhou, and Kumar, 2023





## Resumen

Las últimas décadas se ha visto una explosión en el interés de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs o drones), a la par que se han introducido nuevas tecnologías de comunicaciones y cómputo en la nube. Los avances en comunicación han permeado al control de VANTs logrando crear soluciones en búsqueda y rescate, así como soluciones de entrega en la última milla. La mayoría de estas aplicaciones carecen de ser autónomas. Para lograr la autonomía primero se deben resolver problemas clásicos en robótica móvil (Mapeo, Localización y Navegación).

Se ha demostrado que es posible dotar de autonomía a un VANT y la mayoría de las soluciones son en exteriores con una mejor lectura de un sensor GPS. Los drones del mañana deberán navegar en áreas urbanas de la mejor manera posible y tener la habilidad de trabajar en coordinación con múltiples agentes. El enfoque de este trabajo es la creación y propuesta de una arquitectura capaz de coordinar múltiples-VANTs.

**Palabras claves:** multi-VANT, coordinación multi-agente, arquitectura multi-VANT, 3D Path finding

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Planteamiento del problema
- 4 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 5 Metodología
- 6 Estado del Arte
- 7 Contribuciones o resultados esperados

# Descripción del proyecto

El proyecto de estrategias para la exploración coordinada múlti-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 que con ayuda de algoritmos que permitan la coordinación eficiente de múltiples-VANT(s) para llevar a cabo tareas de exploración en entornos desconocidos y cambiantes.

# Antecedentes y motivación para el proyecto

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 [1]. La popularidad de los VANTs es atribuida a su movilidad omnidireccional.

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). Ésta inspiración biológica ha llevado al desarrollo de algoritmos y técnicas para coordinar y controlar múltiples VANTs en diferentes aplicaciones.

El interés en la investigación e innovación de soluciones con Vehículos Aéreos No Tripulados ha crecido exponencialmente en años recientes [2,7,8,9,10].

En recientes años, dotar a los VANTs de inteligencia para explotar la información recolectada de sensores a bordo ha sido y es un área de estudio en robótica móvil aérea (construcción de mapas)[3]. Así también los VANTs han sido un modelo interesante de estudio en control por ser marginalmente estable. Convirtiéndolo los problemas típicos de control 2D (péndulo inverso fijo) a ambientes 3D [4].

Calcular la ruta más corta entre dos puntos en un ambiente 3D es un problema NP-hard[21]. La mayoría de planificadores de rutas hacen uso de heurísticas y metaheurísticas para generar el óptimo más cercano

### Beneficios coordinación múlti-VANT

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

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Planteamiento del problema**
- 4 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 5 Metodología
- 6 Estado del Arte
- 7 Contribuciones o resultados esperados

# Planteamiento del problema

La coordinación multi-VANT es un desafío complejo y plantea diversas problemáticas que deben abordarse.

- Coordinación - Establecer comunicación efectiva entre los múltiples VANTs. Intercambiar información relevante. Tener baja latencia en su comunicación.



# Planteamiento del problema

La coordinación multi-VANT es un desafío complejo y plantea diversas problemáticas que deben abordarse.

- Coordinación - Establecer comunicación efectiva entre los múltiples VANTs. Intercambiar información relevante. Tener baja latencia en su comunicación.
- Planificación - Los VANTs deben coordinar sus movimientos para evitar colisiones y lograr una cobertura eficiente del área objetivo.

# Planteamiento del problema

La coordinación multi-VANT es un desafío complejo y plantea diversas problemáticas que deben abordarse.

- Coordinación - Establecer comunicación efectiva entre los múltiples VANTs. Intercambiar información relevante. Tener baja latencia en su comunicación.
- Planificación - Los VANTs deben coordinar sus movimientos para evitar colisiones y lograr una cobertura eficiente del área objetivo.
- Asignación de tareas - Se busca evitar la duplicación de esfuerzos optimizando el uso de recursos disponibles.

Dada un área de interés **A** desconocido que se desea explorar, un conjunto de VANTs denotados como  $V = V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ , donde  $n$  es el número total de VANTs disponibles, un conjunto de tareas de exploración denotados como  $T = T_1, T_2, T_3, \dots, T_m$ , donde  $m$  es el número total de tareas a realizar.

Teniendo restricciones y requisitos específicos del problema, como límites de tiempo, obstáculos a evitar ... etc.

Para las tareas de exploración  $T_m$ , se considerarán las siguientes variables:

- Posición inicial:  $p_i(x, y, z)$ , posición inicial VANTs
- Trayectoria:  $\alpha_i$ , trayectoria seguida por los VANTs asignados a la tarea  $T_m$  en función del tiempo  $t$
- Información recolectada:  $C_i$ , representa la información recolectada por los VANTs asignados durante la exploración

La función objetivo puede cambiar, algunos ejemplos pueden ser:

- 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

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Planteamiento del problema
- 4 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 5 Metodología
- 6 Estado del Arte
- 7 Contribuciones o resultados esperados

# Objetivos generales y específicos del proyecto

## 1 General

Desarrollo e implementación de una arquitectura de software tolerante a fallas para la coordinación de múltiples VANTs con un enfoque simulado en búsqueda y rescate.

# Objetivos generales y específicos del proyecto

## ① General

Desarrollo e implementación de una arquitectura de software tolerante a fallas para la coordinación de múltiples VANTs con un enfoque simulado en búsqueda y rescate.

## ② Particulares

- Generación del modelo dinámico de un VANT
- Creación de algoritmos reactivos de baja memoria que garanticen evitar colisiones

# Objetivos generales y específicos del proyecto

## ① General

Desarrollo e implementación de una arquitectura de software tolerante a fallas para la coordinación de múltiples VANTs con un enfoque simulado en búsqueda y rescate.

## ② Particulares

- Generación del modelo dinámico de un VANT
- Creación de algoritmos reactivos de baja memoria que garanticen evitar colisiones
- Eficiencia y rendimiento del sistema



# Objetivos generales y específicos del proyecto

## ① General

Desarrollo e implementación de una arquitectura de software tolerante a fallas para la coordinación de múltiples VANTs con un enfoque simulado en búsqueda y rescate.

## ② Particulares

- Generación del modelo dinámico de un VANT
- Creación de algoritmos reactivos de baja memoria que garanticen evitar colisiones
- Eficiencia y rendimiento del sistema
- Adaptabilidad y flexibilidad, la coordinación multi-VANT debe ser adaptable a cambios en el entorno, nuevos objetivos y adaptable a la incorporación o salida de VANTs durante la exploración

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Planteamiento del problema
- 4 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 5 Metodología**
- 6 Estado del Arte
- 7 Contribuciones o resultados esperados

# Metodología

## 1 Revisión de literatura

- Realizar una revisión de la literatura científica y técnica relacionada con la coordinación de múltiples VANTs
- Identificar los enfoques existentes, algoritmos y tecnologías usadas en la coordinación de múltiples VANTs

# Metodología

## 1 Revisión de literatura

- Realizar una revisión de la literatura científica y técnica relacionada con la coordinación de múltiples VANTs
- Identificar los enfoques existentes, algoritmos y tecnologías usadas en la coordinación de múltiples VANTs

## 2 Análisis y diseño de la solución propuesta

- Identificar los requisitos clave para una coordinación eficiente
- Propuesta de algoritmos y políticas de navegación que permitan la coordinación eficiente
- Estrategias para la repartición de tareas y gestión de recursos.

# Metodología

## 1 Revisión de literatura

- Realizar una revisión de la literatura científica y técnica relacionada con la coordinación de múltiples VANTs
- Identificar los enfoques existentes, algoritmos y tecnologías usadas en la coordinación de múltiples VANTs

## 2 Análisis y diseño de la solución propuesta

- Identificar los requisitos clave para una coordinación eficiente
- Propuesta de algoritmos y políticas de navegación que permitan la coordinación eficiente
- Estrategias para la repartición de tareas y gestión de recursos.

## 3 Implementación y validación

- Hacer uso de simuladores (Son baratos, rápidos .. pero la solución está lejos de la solución propuesta en el ambiente real).
- Evaluar el desempeño de la coordinación

# Metodología

## 1 Revisión de literatura

- Realizar una revisión de la literatura científica y técnica relacionada con la coordinación de múltiples VANTs
- Identificar los enfoques existentes, algoritmos y tecnologías usadas en la coordinación de múltiples VANTs

## 2 Análisis y diseño de la solución propuesta

- Identificar los requisitos clave para una coordinación eficiente
- Propuesta de algoritmos y políticas de navegación que permitan la coordinación eficiente
- Estrategias para la repartición de tareas y gestión de recursos.

## 3 Implementación y validación

- Hacer uso de simuladores (Son baratos, rápidos .. pero la solución está lejos de la solución propuesta en el ambiente real).
- Evaluar el desempeño de la coordinación

## 4 Evaluación, resultados y conclusiones

- Analizar y comparar los resultados obtenidos con otros enfoques existentes.
- Identificar posibles mejoras y áreas de investigación futuras

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Planteamiento del problema
- 4 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 5 Metodología
- 6 Estado del Arte**
- 7 Contribuciones o resultados esperados

Cieslewski et al. (2017)  
Usenko et al. (2017)  
Mohta et al. (2017)



Lin et al. (2017)  
Papachristos et al. (2017)  
Oleynikova et al. (2018)

Gao et al. (2018)  
Florence et al. (2018)  
Selin et al. (2019)

Collins and Michael (2020)  
Campos-Macías et al. (2020)  
Zhou et al. (2023)

Westheider et al. (2023)  
Bartolomei et al. (2023)

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Planteamiento del problema
- 4 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 5 Metodología
- 6 Estado del Arte
- 7 Contribuciones o resultados esperados

# Contribuciones o resultados esperados

## 1 Códigos a disposición de la comunidad

# Contribuciones o resultados esperados

- 1 Códigos a disposición de la comunidad
- 2 Simulación de solución

# Contribuciones o resultados esperados

- 1 Códigos a disposición de la comunidad
- 2 Simulación de solución
- 3 Tesis impresa



# Bibliography

- L. Bartolomei, L. Teixeira, and M. Chli. Fast multi-uav decentralized exploration of forests. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(9): 5576–5583, 2023. doi: 10.1109/LRA.2023.3296037.
- 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>.
- 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 and N. Michael. Efficient planning for high-speed mav flight in unknown environments using online sparse topological graphs. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 11450–11456, 2020. doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9197167.