



Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Luis Alberto Ballado Aradias

CINVESTAV UNIDAD TAMAULIPAS

Cd. Victoria, Tamaulipas - 23 de julio 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

Problemas en la robótica

- Encontrar la ruta más corta
- Physical robot constrains
- Uncertainties: Sensing and actuation
- Escalabilidad y eficiencia computacional
- Obstáculos dinámicos y en movimiento

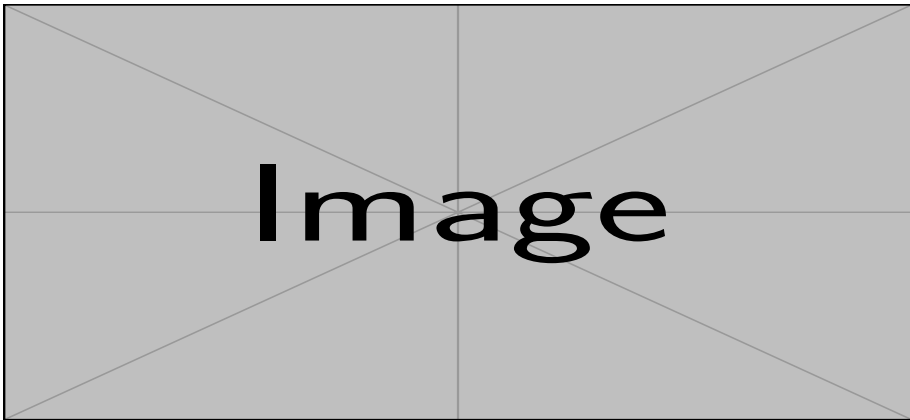


Figura 1: Real caption¹

¹blah blah blah

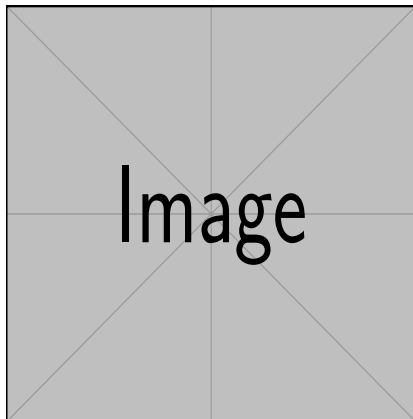
Planificación Global vs. Local



Image

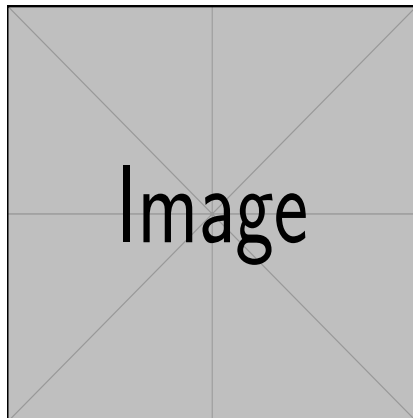
¿Qué es Planificar?

- 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

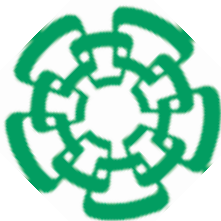
Configuraciones

- 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



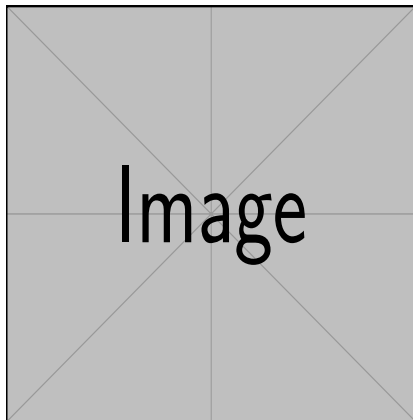
Espacio de Configuraciones

- 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

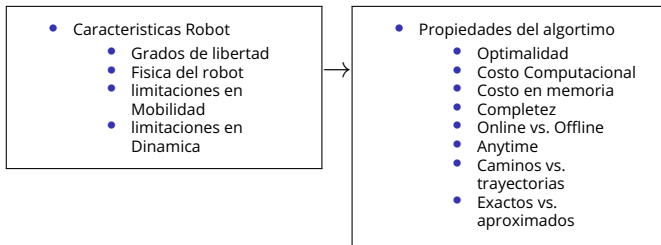


Problema de Planificacion

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



Consideraciones

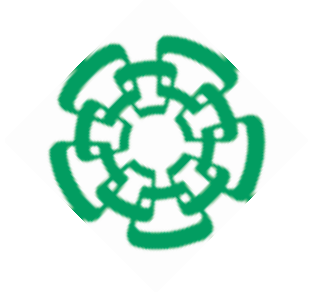


Panorama de métodos de planificación

- 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



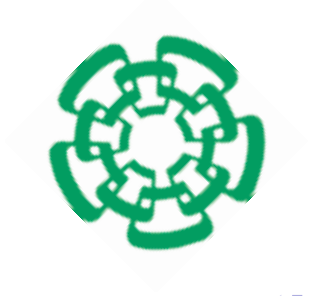
Metodos Geometricos

- 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



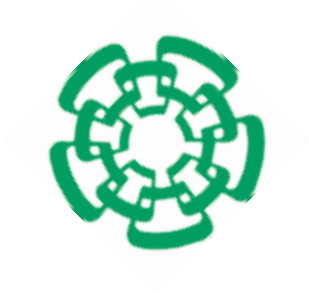
Metodos basados en busquedas

- 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

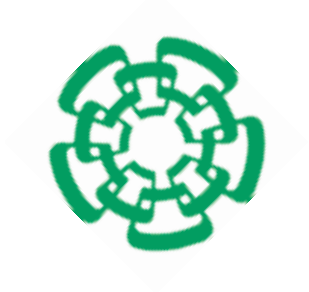


fase de busquedas



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

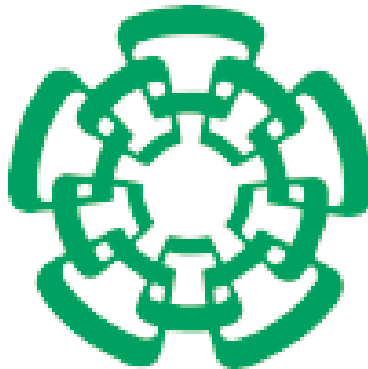
- Information
- Suboptimal
- Implicit or explicit
- Coordination strategies..

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

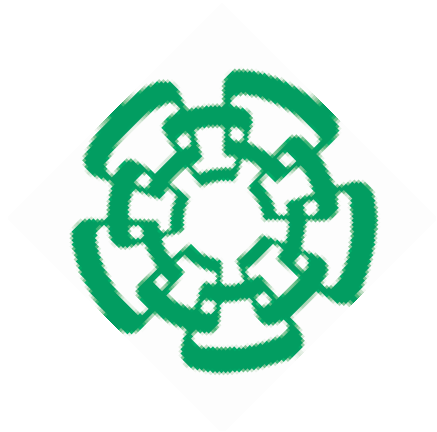
¡text!

¡text!

Stuff famous linguists asked

Hola mundo Zahroof et al. (2023) ¹

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.

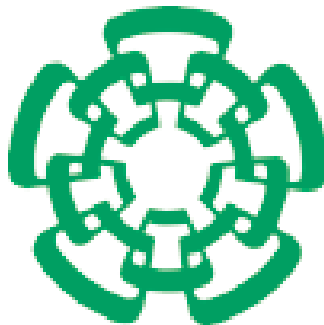
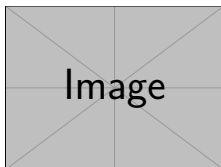


Figura 4: A figure that is next to a certain explanation.

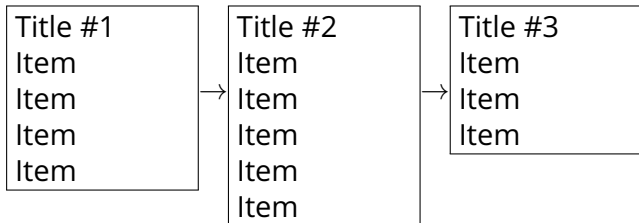
Factorization Methods



“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)

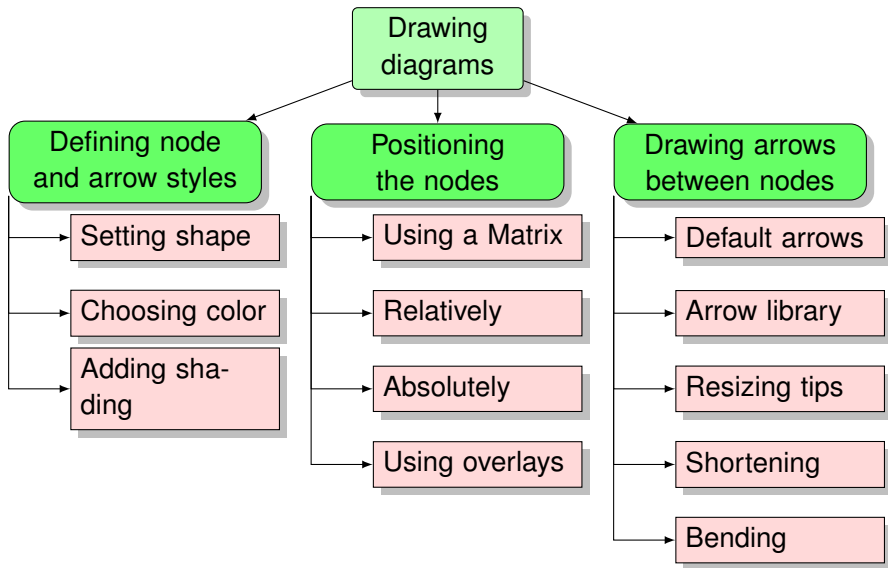
(see Zahroof et al., 2023)

(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: α_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

Estado del Arte

Robótica Móvil

- Robótica Móvil Terrestre
- Robótica Móvil Aérea
 - Dinámica de un Vehículo Aéreo No Tripulado
 - Control de un Vehículo Aéreo No Tripulado
- Problemas en la Robótica Móvil
 - Mapas
 - Construcción y representación de mapas 3D
 - Percepción
 - Sensores LiDAR
 - Sensores Cámaras (Odometría Visual)
 - Localización
 - Planificación de trayectorias
- Robótica Colaborativa (múltiples robots)
 - Exploración
 - Coordinación
 - Colaboración
- Arquitectura de Software en robótica

La **robótica móvil** ha experimentado avances significativos en los últimos años, transformando múltiples sectores y abriendo nuevas posibilidades en la automatización.

Los robots móviles se pueden ver como sistemas autónomos capaces de moverse y operar en entornos cambiantes y complejos sin la necesidad de guías físicas.

En cuanto a la navegación, se han desarrollado técnicas de localización y mapeo simultáneos (SLAM) más precisas y eficientes, permitiendo construir mapas detallados de su entorno y ubicarse con mayor precisión en tiempo real. Además, se han mejorado los algoritmos de planificación de trayectorias para garantizar movimientos seguros y eficientes en entornos dinámicos.

Robótica Móvil

- Robótica Móvil Terrestre (con ruedas)
 - Ackerman
 - Triciclo clásico
 - Omnidireccionales
 - Diferenciales

Robótica Móvil

- Robótica Móvil Terrestre (con ruedas)
 - Ackerman
 - Triciclo clásico
 - Omnidireccionales
 - Diferenciales
- Robótica Móvil Aérea
 - Ala fija
 - Rotores
 - Rotor único
 - Multi-rotor

Robótica Móvil

- Robótica Móvil Terrestre (con ruedas)
 - Ackerman
 - Triciclo clásico
 - Omnidireccionales
 - Diferenciales
- Robótica Móvil Aérea
 - Ala fija
 - Rotores
 - Rotor único
 - Multi-rotor
- Híbridos VTOL

JOUAV VTOL



Muti-rotor



Fixed-wing



Take-off &
land anywhere



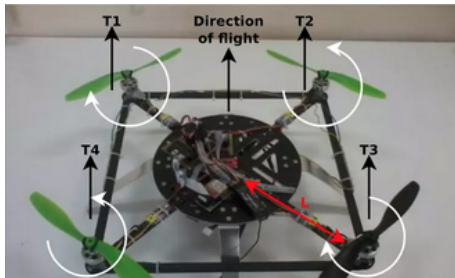
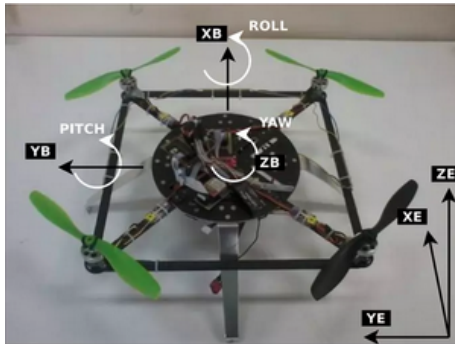
Long flight time



Easy to use



Dinámica de un Vehículo Aéreo No Tripulado



Problemas en la Robótica móvil

- Mapas
- Localización
- Planificación de trayectorias

Construcción y representación de mapas 3D

Percepción

- Sensores LiDAR
- Sensores Cámaras (Odometría Visual)

Planificación de trayectorias

Dentro de la literatura a esta problemática se encuentran estudios que minimizan el tiempo de vuelo [16], la altitud de vuelo [17], y la velocidad del dron [18].

Podemos categorizar los planificadores de trayectoria dos grupos **offline y online**. Los planificadores Online dado que utilizan sensores y reaccionan a obstáculos no garantizan en dar el camino más óptimo.

Apesar que existen múltiples estudios donde reducen el problema de 3D a 2D [19,20]. Limitando la movilidad del VANT haciendo que los algoritmos propuestos para robótica móvil terrestre puedan ser aplicados directamente.

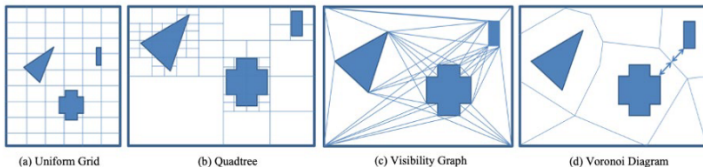


Figura 5: Representación del medio ambiente

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

- Z. Xiao, B. Zhu, Y. Wang, and P. Miao. Low-complexity path planning algorithm for unmanned aerial vehicles in complicated scenarios. *IEEE Access*, 6:57049–57055, 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2873084.
- R. Zahroof, J. Liu, L. Zhou, and V. Kumar. Multi-robot localization and target tracking with connectivity maintenance and collision avoidance. In *2023 American Control Conference (ACC)*, pages 1331–1338, 2023. doi: 10.23919/ACC55779.2023.10155978.