

# Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Luis Alberto Ballado Aradias

CINVESTAV UNIDAD TAMAULIPAS

Cd. Victoria, Tamaulipas - 25 de octubre de 2023

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Hipótesis y Objetivos
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Resumen



- **Aplicaciones** en lugares inaccesibles o peligrosos
- **Múltiples VANT** pueden reducir el tiempo de exploración
- **Limitaciones** en carga, procesamiento y batería influyen en el tiempo de vuelo

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto**
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Hipótesis y Objetivos
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Descripción del proyecto

La meta de este trabajo es la creación de una estrategia para la exploración de ambientes desconocidos de manera coordinada con múltiples vehículos aéreos no tripulados (VANTS).

- Exploración con algoritmos de baja complejidad computacional.
- Habilidad de cubrir ambientes en interiores sin señal GPS.
- Con una carga de tareas de exploración distribuida con el grupo de VANTS.



† Ilustración Multi-VAN  
<https://dronevideos.com/>

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto**
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Hipótesis y Objetivos
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Vehículos aéreos no tripulados (VANT)

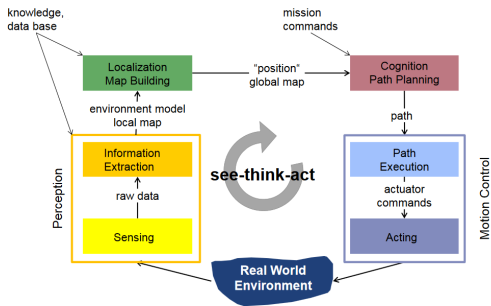


Clasificación VANTS  
Handbook of Unmanned Aerial Vehicles 2020

# Arquitectura híbrida

El robot puede reaccionar de manera rápida a estímulos del entorno, al mismo tiempo que tiene la capacidad de planificar y tomar decisiones de alto nivel.

- Adaptable al lidiar con situaciones predecibles como imprevistas.
- Permite una respuesta rápida a estímulos del entorno.
- Optimiza el rendimiento del robot al gestionar las tareas simples y repetitivas, liberando recursos para tareas deliberativas más complejas.
- Es escalable.



† Ciclo See-Think-Act  
ETH - Note Class Autonomous mobile robot 2015



# Sistema autónomo VANT

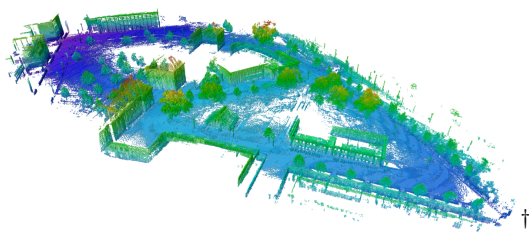
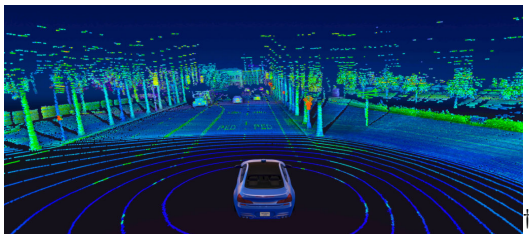
Un sistema autónomo de un vehículo aéreo no tripulado consta de tres algoritmos.

- Generación de una representación del entorno.
- Evasión de obstáculos.
- Planificación de trayectorias.

La computadora embebida usado en un VANT Micro es de bajo rendimiento, pero su necesidad de autonomía sigue siendo la misma que un VANT de mayor tamaño. Es necesario dotarlos de algoritmos de baja complejidad computacional.



# Mapeo

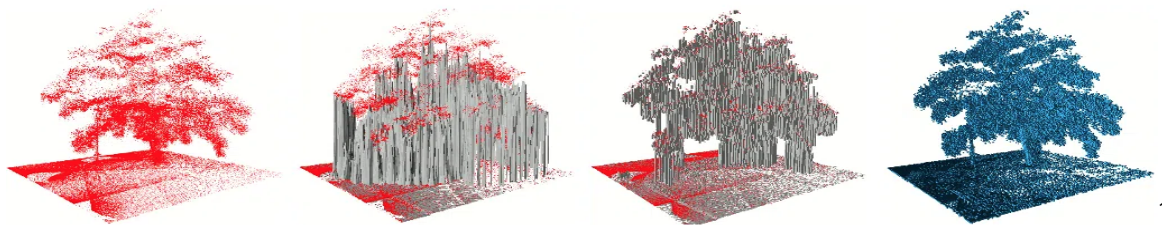


Es la construcción de un mapa del entorno, realizada por un robot, utilizando información espacial obtenida durante el paso del tiempo. [Wallgrün 2010]

Fuentes de información:

- Escáners láser tipo LIDAR.
- Cámaras RGBD.

# Representacion 3D



- Nube de puntos.
- Mapa de elevación.
- Superficies multi-nivel.
- Octrees.

---

<sup>1</sup>OctoMap: An Efficient Probabilistic 3D Mapping Framework Based on Octrees [Hornung et al. (2013)]

# Planificación de movimiento

Indica a un robot como moverse de un punto a otro en su entorno. Implica la generación de trayectorias y movimientos que permiten a los robots cumplir sus tareas o alcanzar sus objetivos mientras evitan obstáculos <sup>1</sup>.

Por representación del Espacio

- Grafos de visibilidad.
- Diagramas de Voronoi.
- Descomposición por celdas.

Por muestreo

- Consulta única (RRT)
- Consulta múltiple (PRM)

Por Grafos

- BFS, DFS
- A\*, D\*
- Dijkstra

---

<sup>1</sup>Different Cell Decomposition Path Planning Methods for Unmanned Air Vehicles A Review [Debnath et al. (2020)]

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema**
- 5 Hipótesis y Objetivos
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Planteamiento del problema

Dada un área de interés desconocida en un espacio cerrado que se desea explorar denotada como  $\mathcal{A}$ , tal que  $\mathcal{A} \subset \mathbb{R}^3$ .

- Un voxel  $v$  que representa el espacio contenido en  $\mathcal{A}$  que es obtenido dividiendo recursivamente el área de interés  $\mathcal{A}$  en ocho partes de igual tamaño, el voxel puede tomar los valores de libre, ocupado y desconocido o no explorado de notados como  $v_{libre}$ ,  $v_{ocup}$ ,  $v_{desc}$ . La región ocupada son obtenidas mediante un sensor basado en un modelo de ocupación probabilístico.
- Un conjunto de VANTS denotado como  $\mathcal{V} = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$  siendo  $n$  el número total de VANTS disponibles y una configuración inicial  $q$  cuya cardinalidad es el número de VANTS disponibles denotado como  $q = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\}$ .

La estrategia propuesta debe tomar en cuenta las limitaciones de comunicación, sensores y energía, para distribuir las tareas de exploración entre todos los miembros del equipo de VANTS, así como establecer trayectorias seguras y libres de obstáculos para cada uno de los VANTS.

La función objetivo tomará en cuenta objetivos específicos del problema:

- Maximizar la cobertura del área explorada
- Asegurar la consistencia de la información recolectada y fusionada en un único mapa, compartido entre todos los VANTS

# Preguntas de investigación

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

- ¿Cuáles son los principales desafíos técnicos y operativos que impiden la coordinación de múltiples vehículos aéreos no tripulados en tareas de exploración?
- ¿Cómo se pueden aprovechar las tecnologías de vanguardia, desde sensores avanzados hasta algoritmos de inteligencia artificial, para superar estos desafíos?
- ¿Cuáles son las implicaciones de una mejor coordinación de múltiples vehículos aéreos no tripulados para diversos sectores, incluida la exploración autónoma en interiores?

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Hipótesis y Objetivos**
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados



# Hipótesis

La implementación de una estrategia de exploración coordinada utilizando múltiples vehículos aéreos no tripulados (multi-VANT) en entornos complejos, permitirá obtener mejores resultados en comparación con la exploración individual (mono-VANT). Esta coordinación eficiente se traducirá en una reducción del tiempo y los recursos necesarios para completar la exploración, así como en una mayor cobertura del área de interés. Además, se espera que la exploración coordinada multi-VANT mejore la calidad de los datos recopilados, lo que permitirá tomar decisiones más informadas y eficaces en diversos campos, como la cartografía, la vigilancia, el monitoreo y la respuesta a desastres naturales.

# Objetivos generales y específicos del proyecto

## 1 General

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

# Objetivos generales y específicos del proyecto

## 1 General

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

## 2 Particulares

- Evaluar y comparar diferentes algoritmos de coordinación y planificación de vuelo para la exploración coordinada multi-VANT.
- Elegir la representación del ambiente en 3D con menor complejidad computacional que nos ayude en crear trayectorias para los VANTS.
- Realizar pruebas y simulaciones de la solución propuesta en entornos complejos, analizando métricas como tiempo de exploración, cobertura del área de interés y calidad de los datos recopilados.

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Hipótesis y Objetivos
- 6 Metodología**
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Metodología

## **Etapas 1. Análisis y diseño de la solución propuesta**

Esta etapa comprende 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 múltiples robots en tareas de exploración, detectando áreas de oportunidad para el desarrollo de una estrategia descentralizada de coordinación.

## **Etapas 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, utilizando una herramienta de simulación de robots de libre acceso, cumpliendo estándares de modularidad de diseño.

## **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, compilación y análisis de los resultados.

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Hipótesis y Objetivos
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte**
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Estado del Arte

REFERENCIA	REPRESENTACION	BUSQUEDA	TRAYECTORIA
Cieslewski et al. (2017)[3]	Octomap	Basado en fronteras	Control directo de velocidad
Usenko et al. (2017)[15]	Cuadrícula egocéntrica	Offline RRT*	Curvas de Bezier
Mohta et al. (2017)[11]	mapa 3D-Local y 2D-Global	A*	Progración cuadrática
Lin et al. (2017)[9]	3D voxel array TSDF	A*	Optimización cuadrática
Papachristos et al. (2017)[13]	Octomap	NBVP	Control directo de velocidad
Oleynikova et al. (2018)[12]	Voxel Hashing TSDF	NBVP	Optimización cuadrática
Gao et al. (2018)[7]	Mapa de cuadrícula	Método de marcha rápida	Optimización cuadrática

REFERENCIA	REPRESENTACION	BUSQUEDA	TRAYECTORIA
Florence et al. (2018)[6]	Busqueda basada en visibilidad	2D A*	Control predictivo por modelo (MPC)
Selin et al. (2019)[14]	Octomap	Next Best View Planner (NBVP)	Control directo de velocidad
McGuire et al. (2019)[10]	NA	Swarm Gradient Bug Algorithm (SGBA)	Control directo de velocidad
Collins and Michael (2020)[4]	KD Tree + Mapa en Voxel	Búsqueda en Grafo	Movimientos suaves
Campos-Macías et al. (2020)[2]	Octree	Rapidly Exploring Random Trees (RRT)	Basado en contornos
Zhou et al. (2023)[18]	Octomap HGrid	NBVP	Control directo de velocidad
Westheider et al. (2023)[17]	Mapa de cuadrícula	Deep Reinforcement Learning	Control directo de velocidad
Bartolomei et al. (2023)[1]	Mapa de cuadrícula	NBVP	Control directo de velocidad



# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Hipótesis y Objetivos
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados**

## Contribuciones o resultados esperados

Se espera que un mecanismo de coordinación en tareas de exploración con múltiples VANTS produzcan mejoras significativas en eficiencia, cobertura y adaptabilidad en la exploración.

### 1 Documentación y códigos liberados

- Algoritmo para la exploración multi-VANT
- Algoritmo para la planificación de rutas multi-VANT
- Protocolo de comunicación y coordinación descentralizados multi-VANT que formaran parte de la arquitectura de software

# Contribuciones o resultados esperados

Se espera que un mecanismo de coordinación en tareas de exploración con múltiples VANTS produzcan mejoras significativas en eficiencia, cobertura y adaptabilidad en la exploración.

## 1 Documentación y códigos liberados

- Algoritmo para la exploración multi-VANT
- Algoritmo para la planificación de rutas multi-VANT
- Protocolo de comunicación y coordinación descentralizados multi-VANT que formaran parte de la arquitectura de software

## 2 Validación de la solución en un simulador

- Análisis comparativo de la cobertura alcanzada por los algoritmos de coordinación.
- Evaluación comparativa del consumo de recursos entre algoritmos de coordinación avanzados y métodos tradicionales.
- Evaluación de mecanismos de evasión de obstáculos en tiempo real, especialmente en entornos no estructurantes e impredecibles.

# Contribuciones o resultados esperados

Se espera que un mecanismo de coordinación en tareas de exploración con múltiples VANTS produzcan mejoras significativas en eficiencia, cobertura y adaptabilidad en la exploración.

## 1 Documentación y códigos liberados

- Algoritmo para la exploración multi-VANT
- Algoritmo para la planificación de rutas multi-VANT
- Protocolo de comunicación y coordinación descentralizados multi-VANT que formaran parte de la arquitectura de software

## 2 Validación de la solución en un simulador

- Análisis comparativo de la cobertura alcanzada por los algoritmos de coordinación.
- Evaluación comparativa del consumo de recursos entre algoritmos de coordinación avanzados y métodos tradicionales.
- Evaluación de mecanismos de evasión de obstáculos en tiempo real, especialmente en entornos no estructurantes e impredecibles.

## 3 Tesis impresa

# Bibliografía I

- 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.
- S. K. Debnath, R. Omar, S. Bagchi, E. N. Sabudin, M. H. A. S. Kandar, K. Foyso, and T. K. Chakraborty. Different cell decomposition path planning methods for unmanned air vehicles-a review. In *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pages 99–111. Springer Nature Singapore, July 2020. doi: 10.1007/978-981-15-5281-6\_8. URL [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5281-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5281-6_8).
- 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. 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.
- A. Hornung, K. M. Wurm, M. Bennewitz, C. Stachniss, and W. Burgard. OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. *Autonomous Robots*, 2013. doi: 10.1007/s10514-012-9321-0. URL <https://octomap.github.io>. Software available at <https://octomap.github.io>.
- 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>.
- 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>.
- K. Mohta, M. Watterson, Y. Mulgaonkar, S. Liu, C. Qu, A. Makeneni, 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>.

# Bibliografía II

- 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.
- 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.
- 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>.
- J. O. Wallgrün. *Hierarchical Voronoi Graphs*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-10345-2. URL <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10345-2>.
- J. Westheider, J. Rückin, and M. Popović. Multi-uav adaptive path planning using deep reinforcement learning, 2023.
- 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.