

Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Luis Alberto Ballado Aradias

Asesores:

Dr. José Gabriel Ramírez-Torres

Dr. Eduardo Rodríguez-Tello

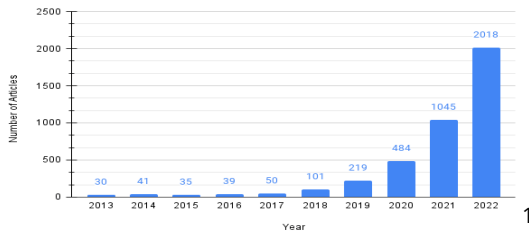
CINVESTAV UNIDAD TAMAULIPAS

Cd. Victoria, Tamaulipas - 24 Abril 2024

Contenido

- 1 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación
- 4 Objetivos generales y particulares
- 5 Estado del arte
- 6 Enfoque propuesto
- 7 Resultados
- 8 Conclusiones
- 9 Cronograma de actividades

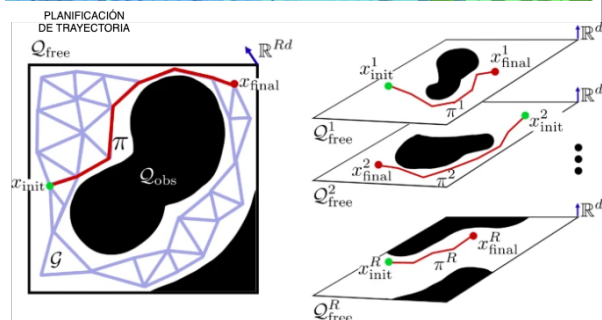
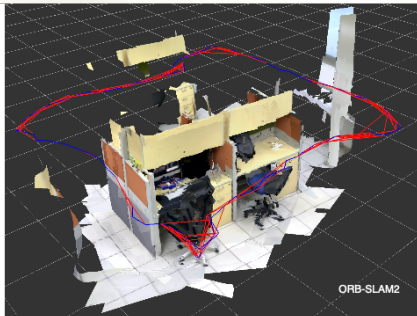
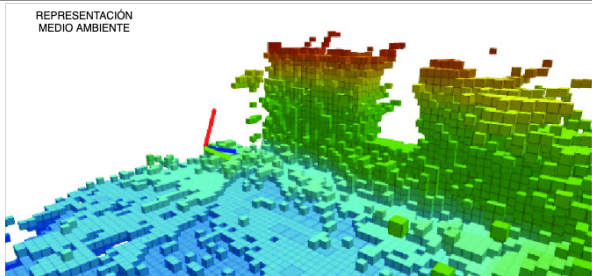
Antecedentes 1/3



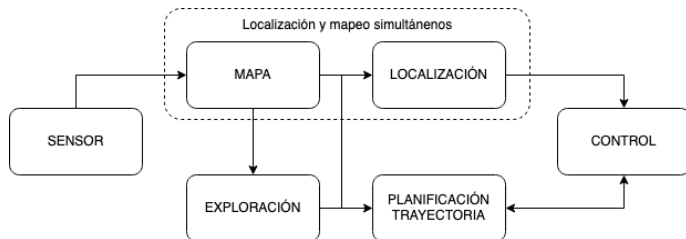
- **UAV** (*Vehículo Aéreo No Tripulado - VANT*) \implies **UAS** (*Sistemas Aéreos No Tripulado - SANT*)
- **Aplicaciones** en lugares inaccesibles o peligrosos.
- **Múltiples VANT** pueden reducir el tiempo de exploración y aumentar la confianza del sistema.
- **Limitaciones** en carga, procesamiento y batería influyen en el tiempo de vuelo.

¹UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next [Nex et al. (2022)]

Antecedentes 2/3 - ROBOT AUTÓNOMO



Antecedentes 3/3 - EXPLORACIÓN



- **Sensar**
 - **Creación Mapa**
 - **Localización en Mapa**
 - **Exploración** Aumentar la base de conocimiento del Mapa
 - **Planificación trayectoria** Trayectorias hacia nuevas fronteras
 - **Control** Toma de decisiones y ejecución de trayectorias
- El ciclo se repite hasta completar la exploración -

Motivación del proyecto



Contenido

- 1 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema**
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación
- 4 Objetivos generales y particulares
- 5 Estado del arte
- 6 Enfoque propuesto
- 7 Resultados
- 8 Conclusiones
- 9 Cronograma de actividades

Planteamiento del problema

Crear una Coordinar un conjunto de vehiculos aereos no tripulados Explorar un volumen desconocido tal que $V \subset R^3$ con un conjunto de robots aéreos autónomos $R = R_1, R_2, \dots, R_n$, siendo n la cardinalidad del conjunto de robots aéreos. Cada robot cuenta con capacidades de generar una representación del medio ambiente, localizarse y generar trayectorias que minimicen la incertidumbre de la localización y el mapeo, evaluada a través de una métrica sobre la creencia probabilística de la pose del robot y la posición de los puntos de referencia. El problema de exploración puede formularse globalmente como el de partir de una configuración inicial libre de colisiones y derivar puntos de vista que cubran el volumen previamente desconocido, determinando qué partes del espacio inicialmente inexplorado están libres o ocupadas. Para este proceso, el volumen se discretiza en un mapa de ocupación M consistente en voxeles cúbicos $m \in M$ con una longitud de arista r . La operación está sujeta a las restricciones dinámicas del vehículo y a las limitaciones del sistema de sensores. Dado que las capacidades perceptivas de la mayoría de los sensores terminan en las superficies, los espacios huecos o bolsillos estrechos a veces pueden permanecer inexplorados, lo que lleva a un volumen residual.

Contenido

- 1 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación**
- 4 Objetivos generales y particulares
- 5 Estado del arte
- 6 Enfoque propuesto
- 7 Resultados
- 8 Conclusiones
- 9 Cronograma de actividades

Hipótesis

Una estrategia que coordine y asigne tareas de exploración para múltiples VANTS de manera descentralizada, en combinación con una arquitectura de software diseñada para resolver problemas de localización, gestión de mapas y planificación de rutas, mejorará la eficiencia y cobertura de la exploración en interiores de un entorno desconocido.

Preguntas de investigación

- ¿Qué características de la dinámica del VANT se deben considerar en el simulador para lograr trayectorias suavizadas y continuas?
- ¿El uso de un planificador de trayectorias que explore las regiones libres de obstáculos contribuirá a acelerar los desplazamientos de los VANTS y, por ende, a reducir los tiempos de exploración?
- ¿Qué mecanismos de coordinación existen dentro de la literatura que podrían ayudar en resolver el problema de exploración multi-VANT?

Contenido

- 1 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación
- 4 Objetivos generales y particulares**
- 5 Estado del arte
- 6 Enfoque propuesto
- 7 Resultados
- 8 Conclusiones
- 9 Cronograma de actividades

Objetivos generales y particulares

1 Objetivo General:

Desarrollar una estrategia de exploración descentralizada que permita resolver los problemas de coordinación para múltiples VANTS en ambientes desconocidos.

Objetivos generales y particulares

1 Objetivo General:

Desarrollar una estrategia de exploración descentralizada que permita resolver los problemas de coordinación para múltiples VANTS en ambientes desconocidos.

2 Objetivos Particulares:

- Desarrollar una arquitectura de software que resuelva los problemas de autonomía para un VANT (localización, manejo de mapas y planificación de trayectorias).
- Implementar un mecanismo de coordinación descentralizado que asigne tareas de exploración.
- Realizar pruebas y simulaciones de la solución propuesta en diversos entornos, analizando la relación tiempo de exploración y cobertura del área de interés.

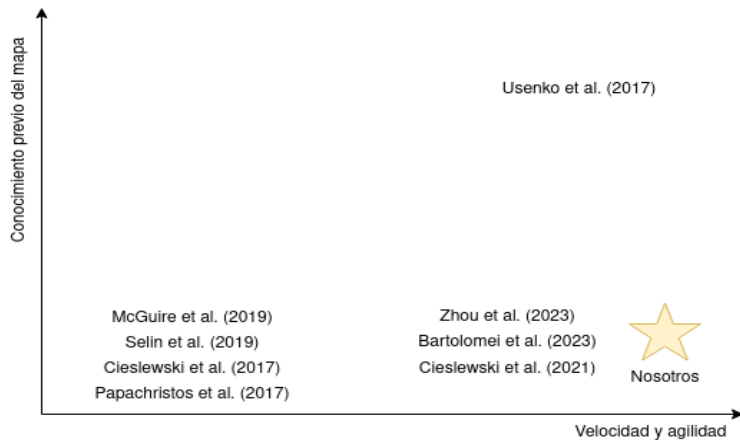
Contenido

- 1 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación
- 4 Objetivos generales y particulares
- 5 Estado del arte**
- 6 Enfoque propuesto
- 7 Resultados
- 8 Conclusiones
- 9 Cronograma de actividades

Estado del arte

REFERENCIA	APLICACIÓN	GENERACION MAPA	PLANIFICACION DE RUTA	GENERACION TRAYECTORIA	SENSOR RGB-D	DINAMICA VANT
Cieslewski et al. (2017)[4]	Exploración	Octomap	Basado en fronteras	Control directo de velocidad	✓	✗
Usenko et al. (2017)[15]	Punto Objetivo	Cuadrícula egocéntrica	Offline RRT*	Curvas de Bezier	✗	✓
Mohta et al. (2017)[10]	Punto Objetivo	mapa 3D-Local y 2D-Global	A*	Programación cuadrática	✗	✓
Lin et al. (2017)[8]	Punto Objetivo	3D voxel array TSDF	A*	Optimización cuadrática	✗	✗
Papachristos et al. (2017)[13]	Exploración	Octomap	Next Best View Planner (NBVP)	Control directo de velocidad	✗	✗
Oleynikova et al. (2018)[12]	Punto Objetivo	Voxel Hashing TSDF	Next Best View Planner (NBVP)	Optimización cuadrática	✓	✓
Gao et al. (2018)[7]	Punto Objetivo	Mapa de cuadrícula	Método de marcha rápida	Optimización cuadrática	✗	✓
Florence et al. (2018)[6]	Punto Objetivo	Busqueda basada en visibilidad	2D A*	Control predictivo por modelo (MPC)	✓	✓
Selin et al. (2019)[14]	Exploración	Octomap	Next Best View Planner (NBVP)	Control directo de velocidad	✗	✗
McGuire et al. (2019)[9]	Exploración	NA	Swarm Gradient Bug Algorithm (SGBA)	Control directo de velocidad	✗	✗
Collins and Michael (2020)[5]	Punto Objetivo	KD Tree + Mapa en Voxel	Búsqueda en Grafo	Movimientos suaves	✓	✓
Campos-Macías et al. (2020)[2]	Punto Objetivo	Octree	Rapidly Exploring Random Trees (RRT)	Basado en contornos	✓	✓
Cieslewski (2021)[3]	Exploración	Octomap	Basado en fronteras	Control directo de velocidad	✓	✗
Zhou et al. (2023)[16]	Exploración	HGrid	Next Best View Planner (NBVP)	Control directo de velocidad	✓	✓
Bartolomei et al. (2023)[1]	Exploración	HGrid	Basado en fronteras	Control directo de velocidad	✓	✓

Dirección estado del arte



Contenido

- 1 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación
- 4 Objetivos generales y particulares
- 5 Estado del arte
- 6 Enfoque propuesto**
- 7 Resultados
- 8 Conclusiones
- 9 Cronograma de actividades

Enfoque propuesto

El objetivo principal es efectuar una exploracion con multiples vants de forma coordinada y descentralizada.

- 1.- Conocer los fundamentos matematicos que nos aproximen realizar la tarea de exploración autonoma. - Donde estoy, a donde voy y cómo llego ahí
- 2.- Definir el uso de un simulador que nos permita validar la solución propuesta
- 3.- Conocer los algoritmos que nos acerquen a la solucion
- 4.- Coordinar
 - Crear la arquitectura para dotar de autonomia a los drones
 - Crear una exploración autonoma para un VANT
 - Evaluación de fronteras

Contenido

- 1 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación
- 4 Objetivos generales y particulares
- 5 Estado del arte
- 6 Enfoque propuesto
- 7 Resultados**
- 8 Conclusiones
- 9 Cronograma de actividades

Resultados

- El uso de ROS que nos resuelve el problema de computo distribuido, y comprender su arquitectura nos ayuda en formular y validar nuestra arquitectura que es escalable
- La configuración de un archivo .launch en ROS nos permite crear nodos con la cardinalidad de los VANT que deseamos en nuestra simulación
- Al completar la exploración de un VANT de forma autonoma, l

Discusión

EL USO DEL SIMULADOR Y COMPRESION DEL SISTEMA ROS EN EL LENGUAJE C++ Y PYTHON Conocer las herramientas que nos permitirá la validación de nuestro enfoque

Contenido

- 1 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación
- 4 Objetivos generales y particulares
- 5 Estado del arte
- 6 Enfoque propuesto
- 7 Resultados
- 8 Conclusiones**
- 9 Cronograma de actividades

Conclusiones

QUE PONEMOS

Contenido

- 1 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación
- 4 Objetivos generales y particulares
- 5 Estado del arte
- 6 Enfoque propuesto
- 7 Resultados
- 8 Conclusiones
- 9 Cronograma de actividades

Cronograma de actividades

	Cuatrimestre 4				Cuatrimestre 6				Cuatrimestre 6			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Etapas 1												
E1.A1. Revisión literatura relevante												
E1.A2. Selección de algoritmos												
E1.A3. Diseño de la arquitectura de software												
E1.A4. Documentación Etapa 1												
E1.A5. Revisión de tesis Etapa 1												
Etapas 2												
E2.A1. Selección Simulador												
E2.A2. Visualización de datos												
E2.A3. Control de desplazamientos												
E2.A4. Desarrollo de algoritmo de exploración												
E2.A5. Implementación y simulación												
E2.A6. Desarrollo de coordinación												
E2.A7. Implementación y simulación												
E2.A8. Documentación Etapa 2												
E2.A9. Revisión de tesis Etapa 2												
Etapas 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												

Cronograma actualizado

	Cuatrimestre 4				Cuatrimestre 5				Cuatrimestre 6			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Etapas												
E1.A1. Revisión literatura relevante												
E1.A2. Selección de algoritmos												
E1.A3. Diseño de la arquitectura de software												
E1.A4. Documentación Etapa 1												
E1.A5. Revisión de tesis Etapa 1												
E2.A1. Selección Simulador												
E2.A2. Visualización de datos												
E2.A3. Control de desplazamientos												
E2.A4. Desarrollo de algoritmo de exploración												
E2.A5. Implementación y simulación												
E2.A6. Desarrollo de coordinación												
E2.A7. Implementación y simulación												
E2.A8. Documentación Etapa 2												
E2.A9. Revisión de tesis Etapa 2												
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												

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. *Decentralized Multi-Agent Visual SLAM*. PhD thesis, University of Zurich, Febrero 2021. URL https://rpg.ifi.uzh.ch/docs/thesis_Cieslewski_final.pdf.
- 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.
- 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.
- 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. Mäkinen, 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>.
- F. Nex, C. Armenakis, M. Cramer, D. Cucci, M. Gerke, E. Honkavaara, A. Kukko, C. Persello, and J. Skaloud. Uav in the advent of the twenties: Where we stand and what is next. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 184:215–242, Feb. 2022. ISSN 0924-2716. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006>.
- 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>.
- 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.