

Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Luis Alberto Ballado Aradias

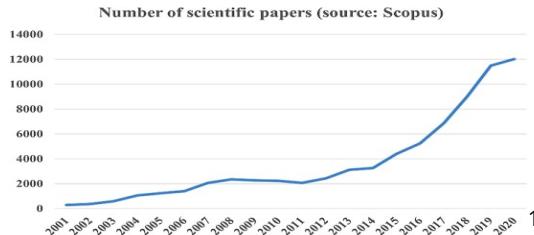
CINVESTAV UNIDAD TAMAULIPAS

Cd. Victoria, Tamaulipas - 27 de noviembre de 2023

Contenido

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

Descripción del proyecto



- **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

Principales preguntas que un robot autónomo debe responder ¹

- ¿Dónde estoy? \implies Localización
- ¿A dónde voy? \implies Cognición
- ¿Cómo llego hasta ahí? \implies Planificación de trayectoria

¹Visual map making for a mobile robot [Brooks (1985)]

Antecedentes

Principales preguntas que un robot autónomo debe responder ¹

- ¿Dónde estoy? \implies Localización
- ¿A dónde voy? \implies Cognición
- ¿Cómo llego hasta ahí? \implies Planificación de trayectoria

Para resolver estas preguntas, el robot debe:

- Tener un modelo del ambiente (dado, o autónomamente construido)
- Localizarse dentro del ambiente
- Planear y ejecutar los movimientos

¹Visual map making for a mobile robot [Brooks (1985)]

Localización - ¿Dónde estoy?

Problema de Localización y Mapeo Simultáneos ¹

- **VER:** El Robot utiliza la lectura de sus sensores para encontrarse a el mismo.
- **ACTUAR:** El Robot, se mueve hacia adelante
 - Movimiento estimado a partir de las lecturas de la odometría.
 - Acumulación de incertidumbre.
- **VER:** Lectura de sus sensores nuevamente para localizarse a sí mismo

Belief update (Fusión de información) ^{2 3}

¹Simultaneous localization and mapping: part I [Durrant-Whyte and Bailey (2006)]

²Uncertain geometry in robotics [Durrant-Whyte (1988)]

³Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics [Smith et al. (1988)]

Cognición - ¿A dónde voy?

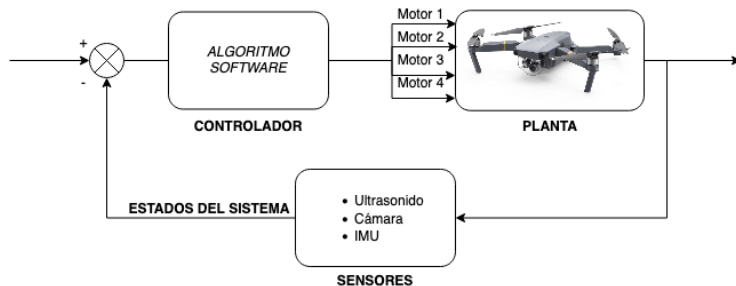


Figura: Diagrama control lazo cerrado VANT

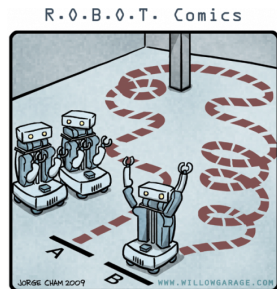
Un sistema de control para un robot móvil autónomo opera en un entorno donde las condiciones están cambiando rápidamente. (considerando el problema de control instantáneo en una formulación clásica de teoría de control) ¹

¹A robust layered control system for a mobile robot [Brooks (1986)]

Planificación de trayectoria - ¿Cómo llego hasta ahí?

El uso de heurísticas para encontrar soluciones óptimas, proporciona resultados computacionales eficientes.^a

- Planificador de trayectoria global
 - Búsqueda por grafos
- Planificador de trayectoria local
 - Campos de potencial artificial
 - Algoritmos Bug



"HIS PATH-PLANNING MAY BE
SUB-OPTIMAL, BUT IT'S GOT FLAIR."†

^aA Survey of Trajectory Planning Techniques for Autonomous Systems [Mir et al. (2022)]

Motivaciones

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).

- Búsqueda y rescate.
- Seguridad e Inspección



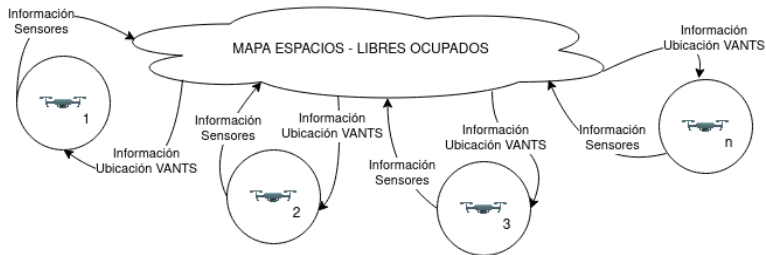
† Los bomberos de una unidad de drones observan los daños en el lugar del derrumbe.

<https://www.nydailynews.com/2019/08/27/bronx-building-collapse-kills-injures-victims/>

Contenido

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

Planteamiento del problema



El problema se basa en la propuesta de una estrategia que incluya las habilidades de autonomía para tareas de exploración de forma coordinada, dividiendo la carga de trabajo de exploración entre el grupo de VANTS.

Preguntas de investigación

- ¿Qué mecanismos de coordinación existen dentro de la literatura que podrían ayudar en resolver el problema de exploración multi-VANT?
- ¿Es posible que el uso de una estructura de datos como octree para representar la ocupación de un volumen, sea más eficiente que una representación usando una matriz cúbica?
- ¿Qué características de la dinámica del robot se deben considerar en el simulador, para que los resultados se aproximen a los del mundo real?

Contenido

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

Hipótesis

Una estrategia que coordine y asigne tareas de exploración para múltiples VANTS, en combinación con una arquitectura de software (que resuelva los problemas de localización, manejo de mapas y planificación de rutas) mejorará el desempeño en tareas de exploración con múltiples VANTS en entornos desconocidos en interiores.

Objetivos generales y específicos del proyecto

1 General

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

Objetivos generales y específicos del proyecto

1 General

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

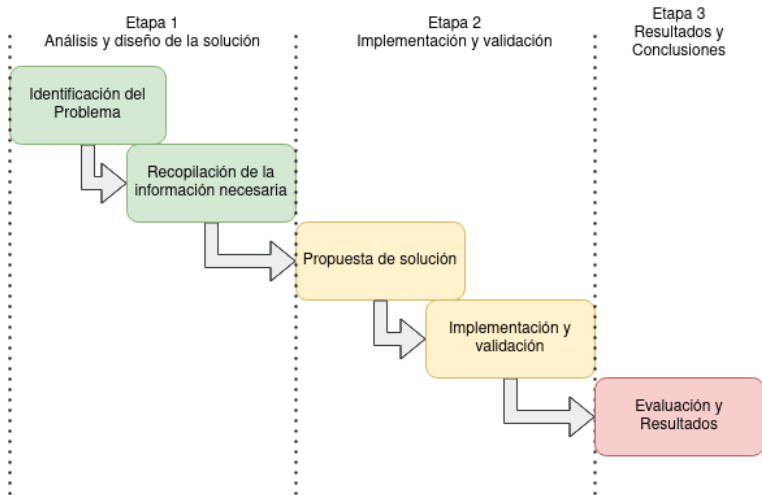
2 Particulares

- Desarrollar una arquitectura de software que resuelva los problemas de autonomía para un VANT (localización, manejo de mapas y navegación).
- Crear un mecanismo de coordinación que asigne trayectorias libres de colisiones para la tarea de exploración.
- Realizar pruebas y simulaciones de la solución propuesta en entornos complejos, analizando la relación tiempo de exploración y cobertura del área de interés.

Contenido

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

Metodología



Contenido

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

Cronograma

	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												

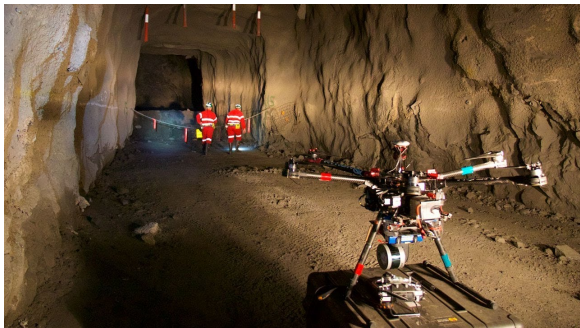
Algoritmos

- Probabilistic Road-Map (Método a base de muestreos) ^a
- RGB-D \implies Voxels \implies Octomap
- Exploración basada en fronteras ^b
- Estrategia basada en auto-ofertas (Método Húngaro) ^c

^aSurvey of UAV motion planning [Quan et al. (2020)]

^bA frontier-based approach for autonomous exploration [Yamauchi (1997)]

^cEstrategia descentralizada para la exploración multi-robot, incluyendo restricciones en rango de comunicación [Elizondo Leal (2013)]



† Ilustración Drone en Mina
<https://dronevideos.com/>

Estrategia ¹

Buscar que cada VANT se dirija hacia las fronteras más cercanas tratando de minimizar las distancias recorridas.

Explotación

Buscar la separación de los VANTS con la finalidad de minimizar el trabajo redundante y la interferencia entre ellos.

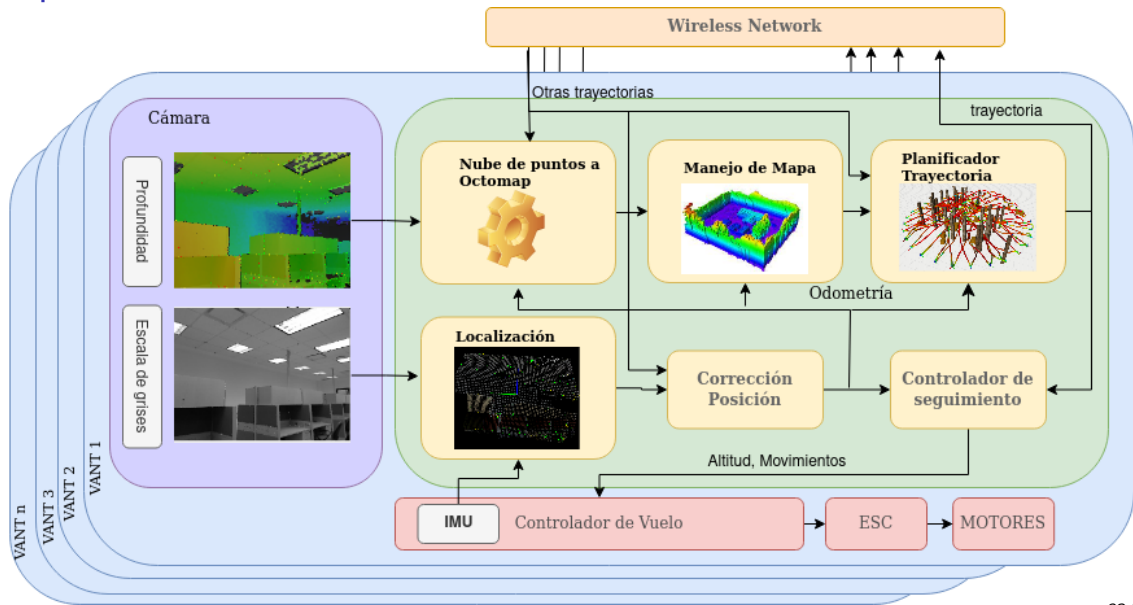
Exploración

Mantener los VANTS en comunicación con los demás miembros del equipo actualizados y en caso de falla de algún VANT evitar que se pierda la información.

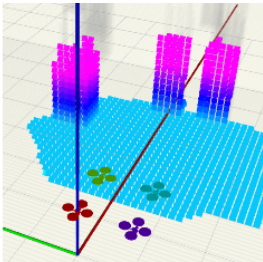
Cohesión

¹Estrategia descentralizada para la exploración multi-robot, incluyendo restricciones en rango de comunicación [Elizondo Leal (2013)]

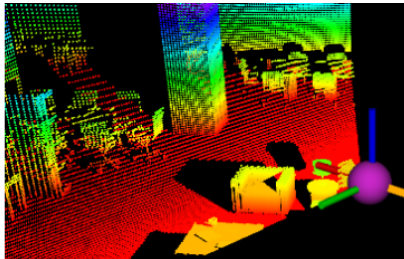
Arquitectura



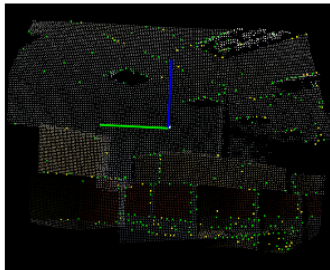
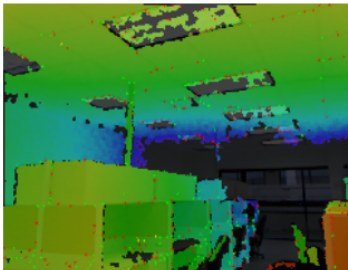
Simulador



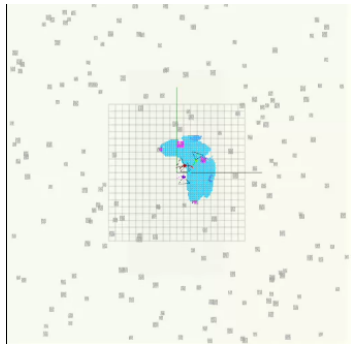
Zhou et. al (2022) ; Bartolomei et. al (2023)



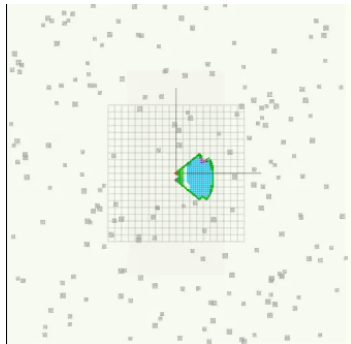
Zhang et. al (2020)



Visualización Cámara Kinect 360



Zhou et al. (2023)

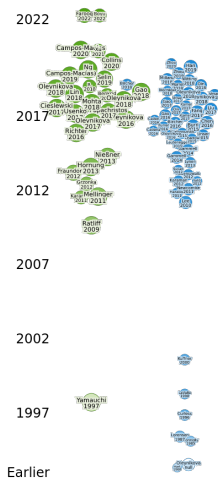


Bartolomei et al. (2023)

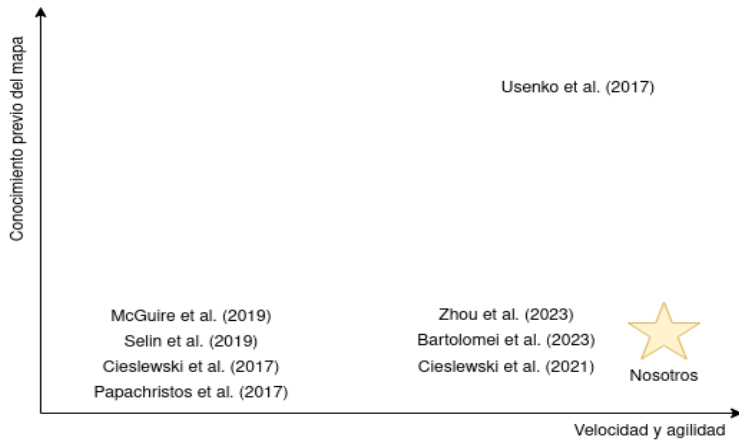
Contenido

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

<https://researchrabbitapp.com/> en base a artículos de drones autónomos



REFERENCIA	APLICACIÓN	GENERACION MAPA	PLANIFICACION DE RUTA	GENERACION TRAYECTORIA	SENSOR RGB-D	DINAMICA VANT
Cieslewski et al. (2017)[6]	Exploración	Octomap	Basado en fronteras	Control directo de velocidad	✓	✗
Usenko et al. (2017)[23]	Punto Objetivo	Cuadrícula egocéntrica	Offline RRT*	Curvas de Bezier	✗	✓
Mohta et al. (2017)[16]	Punto Objetivo	mapa 3D-Local y 2D-Global	A*	Programación cuadrática	✗	✓
Lin et al. (2017)[13]	Punto Objetivo	3D voxel array TSDF	A*	Optimización cuadrática	✗	✗
Papachristos et al. (2017)[19]	Exploración	Octomap	Next Best View Planner (NBVP)	Control directo de velocidad	✗	✗
Oleynikova et al. (2018)[18]	Punto Objetivo	Voxel Hashing TSDF	Next Best View Planner (NBVP)	Optimización cuadrática	✓	✓
Gao et al. (2018)[12]	Punto Objetivo	Mapa de cuadrícula	Método de marcha rápida	Optimización cuadrática	✗	✓
Florence et al. (2018)[11]	Punto Objetivo	Busqueda basada en visibilidad	2D A*	Control predictivo por modelo (MPC)	✓	✓
Selin et al. (2019)[21]	Exploración	Octomap	Next Best View Planner (NBVP)	Control directo de velocidad	✗	✗
McGuire et al. (2019)[14]	Exploración	NA	Swarm Gradient Bug Algorithm (SGBA)	Control directo de velocidad	✗	✗
Collins and Michael (2020)[7]	Punto Objetivo	KD Tree + Mapa en Voxel	Búsqueda en Grafo	Movimientos suaves	✓	✓
Campos-Macías et al. (2020)[4]	Punto Objetivo	Octree	Rapidly Exploring Random Trees (RRT)	Basado en contornos	✓	✓
Cieslewski (2021)[5]	Exploración	Octomap	Basado en fronteras	Control directo de velocidad	✓	✗
Zhou et al. (2023)[25]	Exploración	Octomap HGrid	Next Best View Planner (NBVP)	Control directo de velocidad	✓	✓
Bartolomei et al. (2023)[1]	Exploración	Octomap	Basado en fronteras	Control directo de velocidad	✓	✓



Contenido

- 1 Descripción del proyecto
- 2 Planteamiento del problema
- 3 Hipótesis y Objetivos
- 4 Metodología
- 5 Cronograma
- 6 Estado del Arte
- 7 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 y cobertura en la exploración.

1 Documentación y códigos liberados

- Estrategia coordinada para tareas de exploración multi-VANT.
- Arquitectura de software que resuelva los problemas de autonomía para un vehículo aéreo no tripulado.
- Protocolo de comunicación 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 y cobertura en la exploración.

1 Documentación y códigos liberados

- Estrategia coordinada para tareas de exploración multi-VANT.
- Arquitectura de software que resuelva los problemas de autonomía para un vehículo aéreo no tripulado.
- Protocolo de comunicación 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 la estrategia propuesta con los reportados en el estado del arte.
- Evaluación de mecanismos de evasión de obstáculos.

Contribuciones o resultados esperados

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

1 Documentación y códigos liberados

- Estrategia coordinada para tareas de exploración multi-VANT.
- Arquitectura de software que resuelva los problemas de autonomía para un vehículo aéreo no tripulado.
- Protocolo de comunicación 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 la estrategia propuesta con los reportados en el estado del arte.
- Evaluación de mecanismos de evasión de obstáculos.

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.
- R. Brooks. Visual map making for a mobile robot. In *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 824–829, 1985. doi: 10.1109/ROBOT.1985.1087348.
- R. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(1):14–23, 1986. doi: 10.1109/JRA.1986.1087032.
- 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.
- H. Durrant-Whyte. Uncertain geometry in robotics. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 4(1):23–31, 1988. doi: 10.1109/56.768.
- H. Durrant-Whyte and T. Bailey. Simultaneous localization and mapping: part i. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13(2):99–110, 2006. doi: 10.1109/MRA.2006.1638022.
- J. C. Elizondo Leal. *Estrategia descentralizada para la exploración multi-robot, incluyendo restricciones en rango de comunicación*. PhD thesis, CINVESTAV Unidad Tamaulipas, Junio 2013. URL <https://repositorio.cinvestav.mx/handle/cinvestav/69?locale-attribute=en>.
- 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>.

Bibliografía II

- 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>.
- I. Mir, F. Gul, S. Mir, M. A. Khan, N. Saeed, L. Abualigal, B. Abuhaija, and A. H. Gandomi. A survey of trajectory planning techniques for autonomous systems. *Electronics*, 11(18):2801, Sept. 2022. ISSN 2079-9292. doi: 10.3390/electronics11182801. URL <http://dx.doi.org/10.3390/electronics11182801>.
- 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>.
- 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>.
- 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.
- L. Quan, L. Han, B. Zhou, S. Shen, and F. Gao. Survey of uav motion planning. *IET Cyber-Systems and Robotics*, 2(1):14–21, Mar. 2020. ISSN 2631-6315. doi: 10.1049/iet-csr.2020.0004. URL <http://dx.doi.org/10.1049/iet-csr.2020.0004>.
- 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.
- R. Smith, M. Self, and P. Cheeseman. *Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics*, page 435–461. Elsevier, 1988. doi: 10.1016/b978-0-444-70396-5.50042-x. URL <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-70396-5.50042-x>.
- 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/iro.2017.8202160. URL <https://doi.org/10.1109/iro.2017.8202160>.
- B. Yamauchi. A frontier-based approach for autonomous exploration. In *Proceedings 1997 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation CIRA'97. Towards New Computational Principles for Robotics and Automation*, pages 146–151, 1997. doi: 10.1109/CIRA.1997.613851.
- 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.