

Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Luis Alberto Ballado Aradias

Asesores:

Dr. José Gabriel Ramírez-Torres

Dr. Eduardo Rodriguez-Tello

CINVESTAV UNIDAD TAMAULIPAS

Cd. Victoria, Tamaulipas - 13 de febrero de 2024

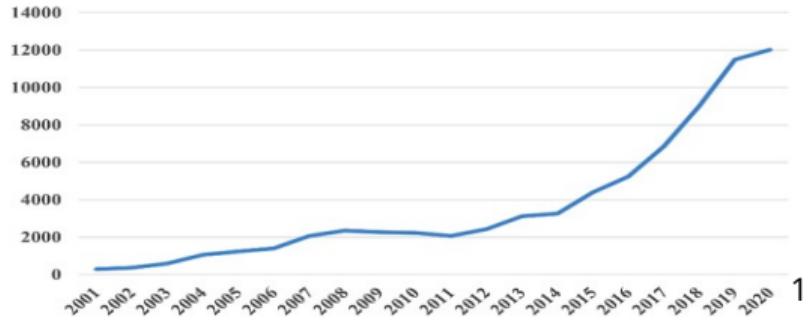
Contenido

- ① Resumen
- ② Robot Autónomo
- ③ Exploración
- ④ Coordinación multi-VANT
- ⑤ Simulación
- ⑥ Estrategia

Resumen



Number of scientific papers (source: Scopus)



- **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.
- **UAV** \Rightarrow **UAS**

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

Contenido

- ① Resumen
- ② Robot Autónomo
- ③ Exploración
- ④ Coordinación multi-VANT
- ⑤ Simulación
- ⑥ Estrategia

Robot Autónomo



- **1.- Percepción** - Incluyen cámaras de profundidad, sensores tipo LiDAR, entre otros. Permiten al VANT recopilar información sobre su entorno.
- **2.- Control** - Computadora a bordo, contiene el poder computacional para la toma de decisiones autónomas basada en la información recopilada por los sensores.
- **3.- Actuadores** - Motores y hélices que proporcionan la fuerza necesaria para el vuelo.

Control de un VANT

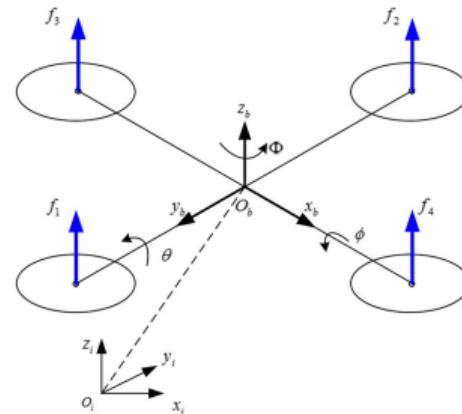
Un VANT de cuatro rotores cuenta con seis grados de libertad (DoF), tres coordenadas lineales x, y, z y tres coordenadas angulares y cuatro entradas (u_1, u_2, u_3, u_4) o variables de control.

Estados del VANT

$$(x, y, z, \phi, \theta, \psi, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T$$

Donde:

- $\xi = (x, y, z)^T$ representan la posición lineal
- $\eta = (\phi, \theta, \psi)^T$ ángulos de euler: roll, pitch, yaw
- $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T$ velocidades lineares y angulares



Principales preguntas que un robot autónomo debe responder¹

- ¿Dónde estoy? \Rightarrow Localización y representación del medio ambiente

Principales preguntas que un robot autónomo debe responder¹

- **¿Dónde estoy?** \Rightarrow Localización y representación del medio ambiente
- **¿A dónde voy?** \Rightarrow Toma de decisiones

Principales preguntas que un robot autónomo debe responder¹

- ¿Dónde estoy? \Rightarrow Localización y representación del medio ambiente
- ¿A dónde voy? \Rightarrow Toma de decisiones
- ¿Cómo llego hasta ahí? \Rightarrow Planificación de trayectoria

Principales preguntas que un robot autónomo debe responder¹

- ¿Dónde estoy? \Rightarrow Localización y representación del medio ambiente
- ¿A dónde voy? \Rightarrow Toma de decisiones
- ¿Cómo llego hasta ahí? \Rightarrow 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

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

[†] Indoor Autonomous UAV Exploration Planning.
<https://www.youtube.com/watch?v=oVOU8EDsWrM>

Localización - ¿Dónde estoy?

Problema de Localización y Mapeo Simultáneos¹

- **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 (Actualización de creencia)^{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)]

Formulación del Problema de Localización y Mapeo Simultáneos

Dados:

- Conjunto de observaciones $z(t) = \{z_1, z_2, \dots, z_t\}$
- Conjunto de comandos de control $u(t) = \{u_1, u_2, \dots, u_t\}$

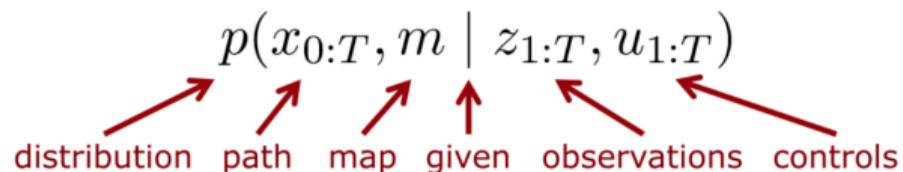
Requerimos:

- Mapa del ambiente m
- Trayectoria del robot $x(t) = \{x_1, x_2, \dots, x_t\}$

En términos probabilísticos, queremos estimar la trayectoria del robot y el mapa

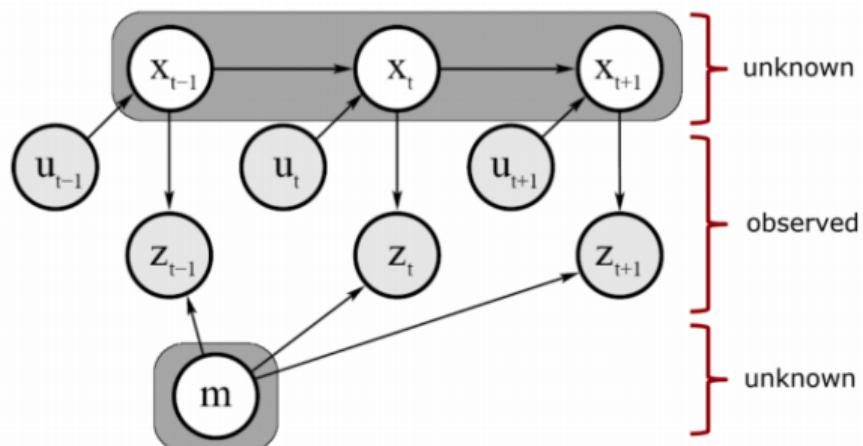
$$p(x_{0:T}, m \mid z_{1:T}, u_{1:T})$$

distribution path map given observations controls



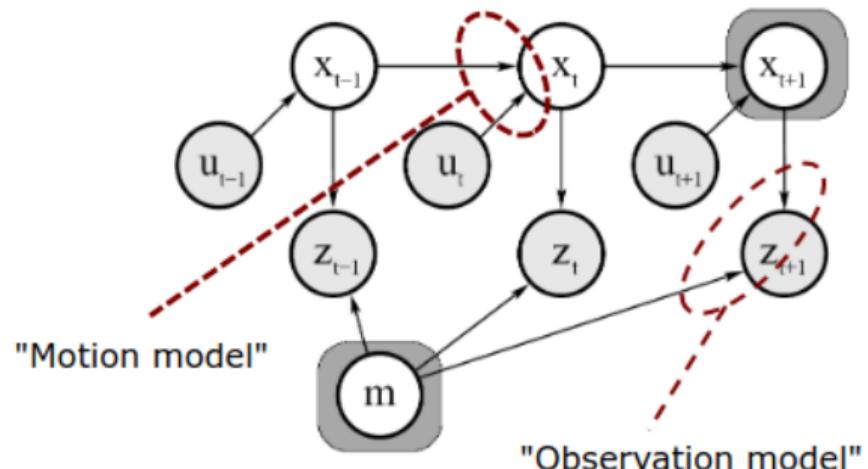
Formulación del Problema de Localización y Mapeo Simultáneos

- La trayectoria del robot y el mapa son desconocidos.
- Correlación entre el mapa y las posiciones del robot.



$$p(x_{0:T}, m \mid z_{1:T}, u_{1:T})$$

Modelos de observación y posición



Modelos

- Observación

$$p(z_t | x_t)$$

distribution observation given pose

- Posición

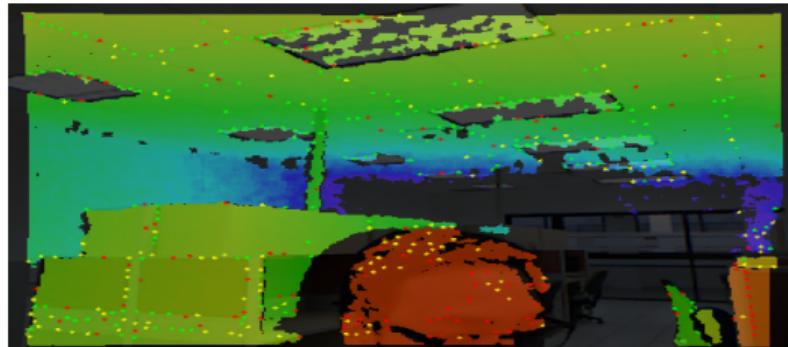
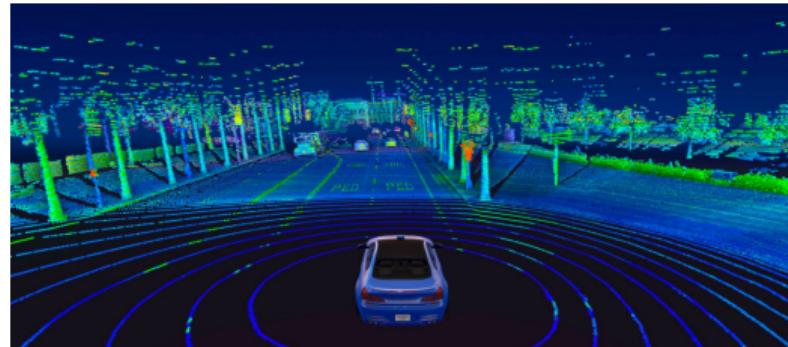
$$p(x_t | x_{t-1}, u_t)$$

distribution new pose given old pose control

Existen diversos paradigmas para resolver el problema

- Filtro de Kalman
- Filtro de Particulas
- Basado en Grafos

Representación del Medio Ambiente - ¿Dónde estoy?



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:

- Escáneres láser tipo LIDAR.
- Cámaras RGB-D.

La precisión del mapa debe corresponder con la precisión con la cual el robot necesita cumplir sus tareas.

Representación del Medio Ambiente - ¿Dónde estoy?

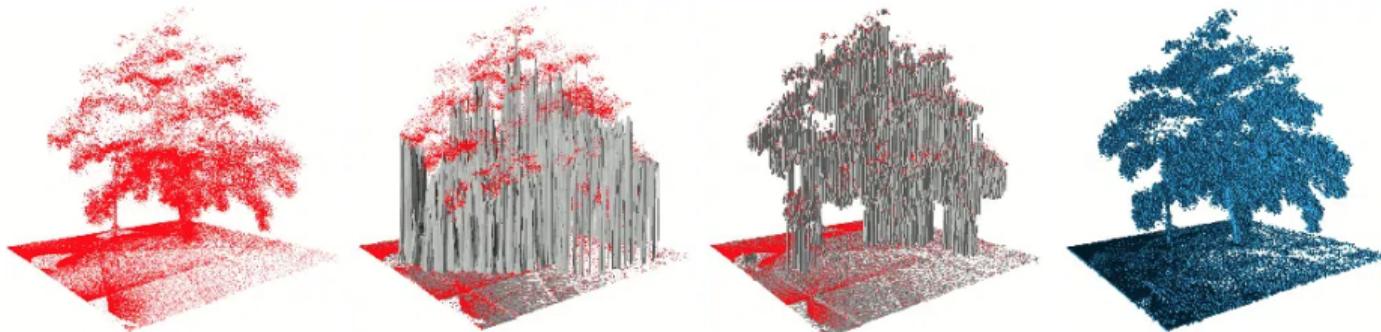


Figura: Nube de puntos, Mapa de elevación, Superficies multi-nivel, Octomap

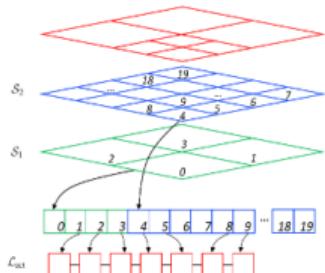


Figura: Hash Grid

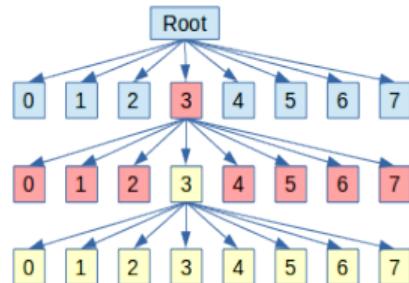
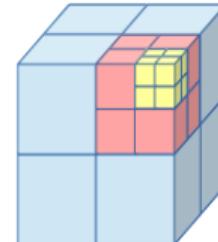


Figura: Octree

Representación del Medio Ambiente - ¿Dónde estoy?

- Hash Grid (HGrid)
 - Funciona bien para consultas de vecinos cercanos y búsquedas en un espacio tridimensional.
 - Similar a la descomposición de un octree, pero su implementación con arrays le permite una complejidad $O(1)$ para consultas.
 - Puede requerir más memoria dependiendo de la resolución de la cuadrícula y la complejidad de la función hash.
- Octomap (Octree).
 - Tiende a ser más compacto en términos de almacenamiento de datos que algunas cuadrículas hash.
 - Utiliza una estructura de árbol octree para representar la ocupación del espacio de manera eficiente.
 - La actualización dinámica puede ser más desafiante y requerir técnicas adicionales.

Toma de decisiones - ¿A dónde voy?

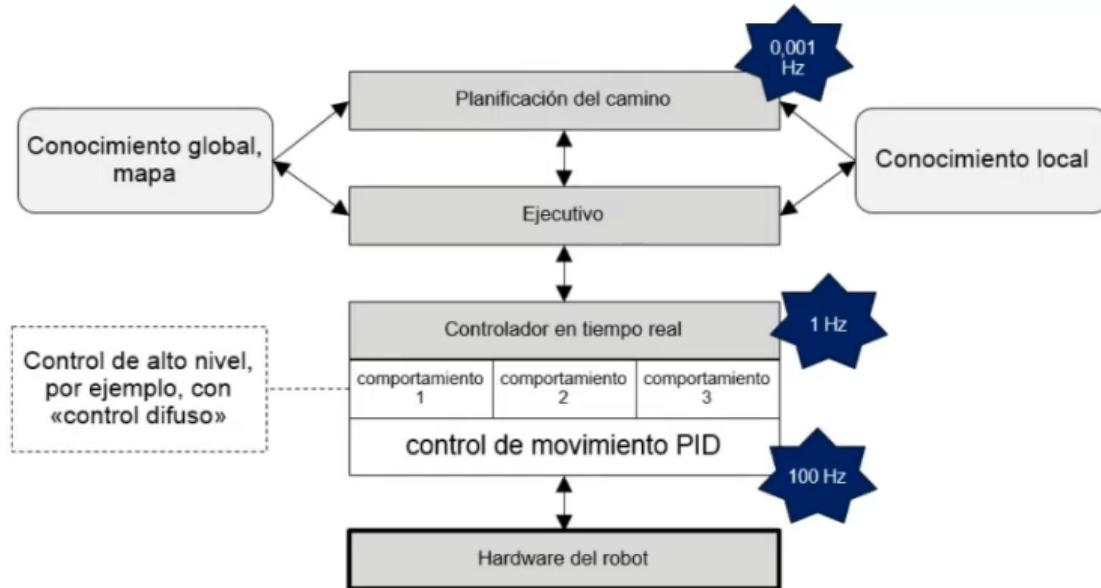


Figura: Arquitectura básica de un robot móvil

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)

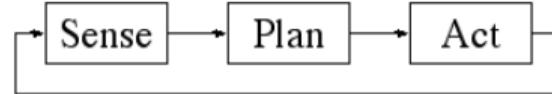
1

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

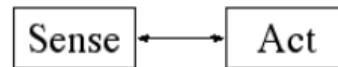
Arquitectura híbrida

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.

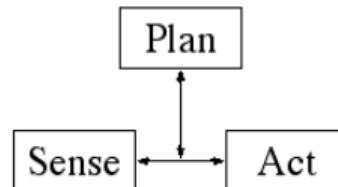
- Adaptable al lidiar con situaciones predecibles como imprevistas.
- Permite una respuesta rápida a estímulos del entorno.
- Optimiza el rendimiento del robot al gestionar las tareas simples y repetitivas, liberando recursos para tareas deliberativas más complejas.
- Es escalable.



Hierarchical



Reactive



Hybrid

† Ciclo Sense-Plan-Act
Murphy (2000)

†

Planificación de trayectoria - ¿Cómo llego hasta ahí?

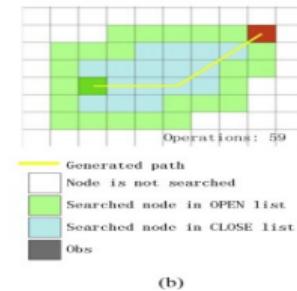
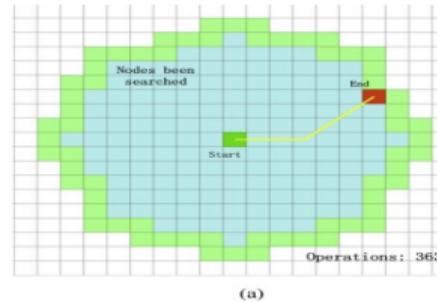
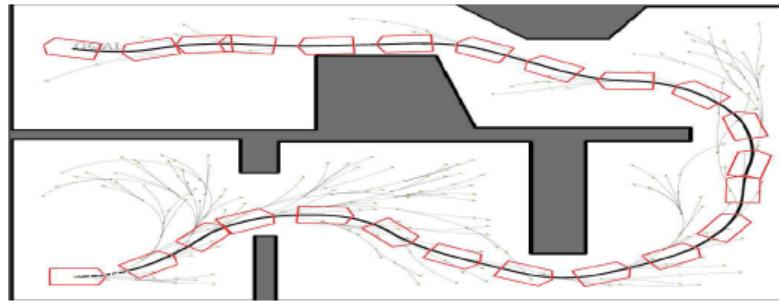
El uso de heurísticas para encontrar soluciones óptimas, proporciona resultados computacionales eficientes.^a

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

†Aerial Navigation Development Environment.
<https://www.youtube.com/watch?v=YrtLbCC49kg>

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

Planificación de trayectoria - ¿Cómo llego hasta ahí?



Por Grafos¹

- Grafos de visibilidad.
- Diagramas de Voronoi.
- Descomposición por celdas.
- Arboles de exploración rápida (RRT).
- Consulta múltiple (PRM)

Algoritmos

- BFS (a) , DFS
- A* (b), D*
- Dijkstra

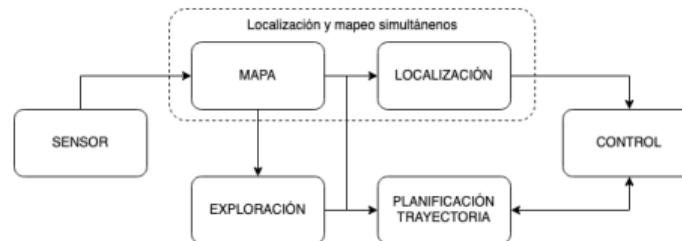
¹Different Cell Decomposition Path Planning Methods for Unmanned Air Vehicles A Review [Debnath et al. (2020)]

Contenido

- ① Resumen
- ② Robot Autónomo
- ③ Exploración
- ④ Coordinación multi-VANT
- ⑤ Simulación
- ⑥ Estrategia

Exploración

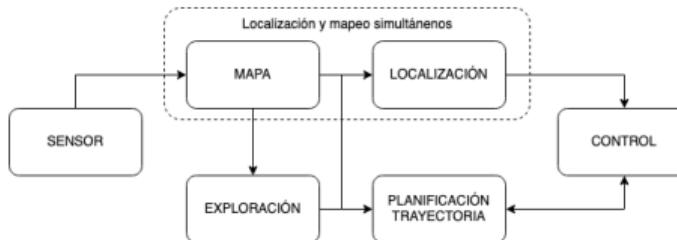
Exploración es una tarea fundamental en robots autónomos. El objetivo es crear un mapa de un ambiente desconocido.



- **Sensar**
- **Creación Mapa**
- **Localización en Mapa**
- **Exploración** Aumentar la base de conocimiento del Mapa
- **Planificación trayectoria** Trayectorias hacia nuevas fronteras
- **Control** Ejecución de toma de decisiones y ejecución de trayectorias

Exploración

Exploración es una tarea fundamental en robots autónomos. El objetivo es crear un mapa de un ambiente desconocido.

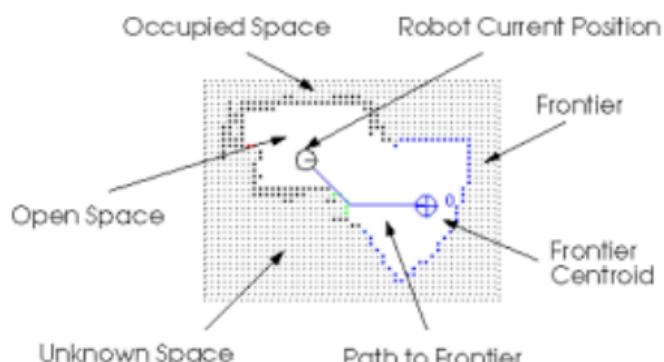


- **Sensar**
- **Creación Mapa**
- **Localización en Mapa**
- **Exploración** Aumentar la base de conocimiento del Mapa
- **Planificación trayectoria** Trayectorias hacia nuevas fronteras
- **Control** Ejecución de toma de decisiones y ejecución de trayectorias

El ciclo se repite hasta completar la exploración

Exploración basada en fronteras

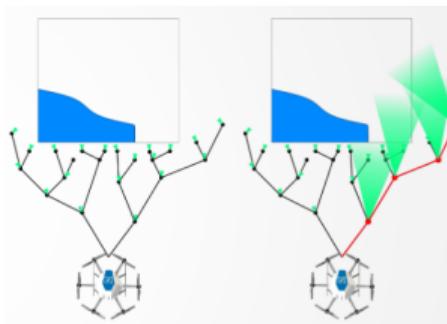
- **Idea:** Mover al robot hacia las regiones desconocidas
- **Frontera:** Línea que divide las regiones conocidas y desconocidas
- Prioriza las fronteras en base a una función de utilidad. (Considerando valores como distancia de robot hacia la frontera)



Yamauchi (1997)

Exploración basada en muestreros

- Define la secuencia de vistas, basado en los vértices de la generación de un árbol de exploración rápida (RRT)
- Selecciona el camino con la mejor secuencia de mejores vistas
- El proceso de generar un árbol de exploración se repite hasta completar la exploración
- Computacionalmente costoso debido al muestreo de evasión de obstáculos



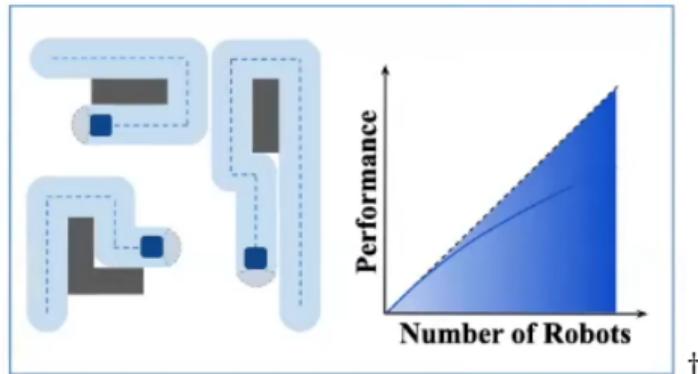
Bircher et al. (2016)

Contenido

- ① Resumen
- ② Robot Autónomo
- ③ Exploración
- ④ Coordinación multi-VANT
- ⑤ Simulación
- ⑥ Estrategia

Coordinación multi-VANT

- Centralizada: Una entidad planea para todos los robots. (El problema crece conforme aumentan los robots)
- Decentralizada: Cada robot es completamente independiente y planea sus propios trayectos



† Prorok et al. (2021)

Coordinación multi-VANT

- El método húngaro, también conocido como algoritmo húngaro o algoritmo de asignación, es un algoritmo utilizado para resolver problemas de asignación, como la asignación óptima de tareas a recursos, minimizando o maximizando algún criterio.
- En el contexto de la robótica, este método puede utilizarse para asignar tareas específicas a robots de manera que se minimice el costo total de ejecución.

$$O(n!) \Rightarrow O(n^3)$$

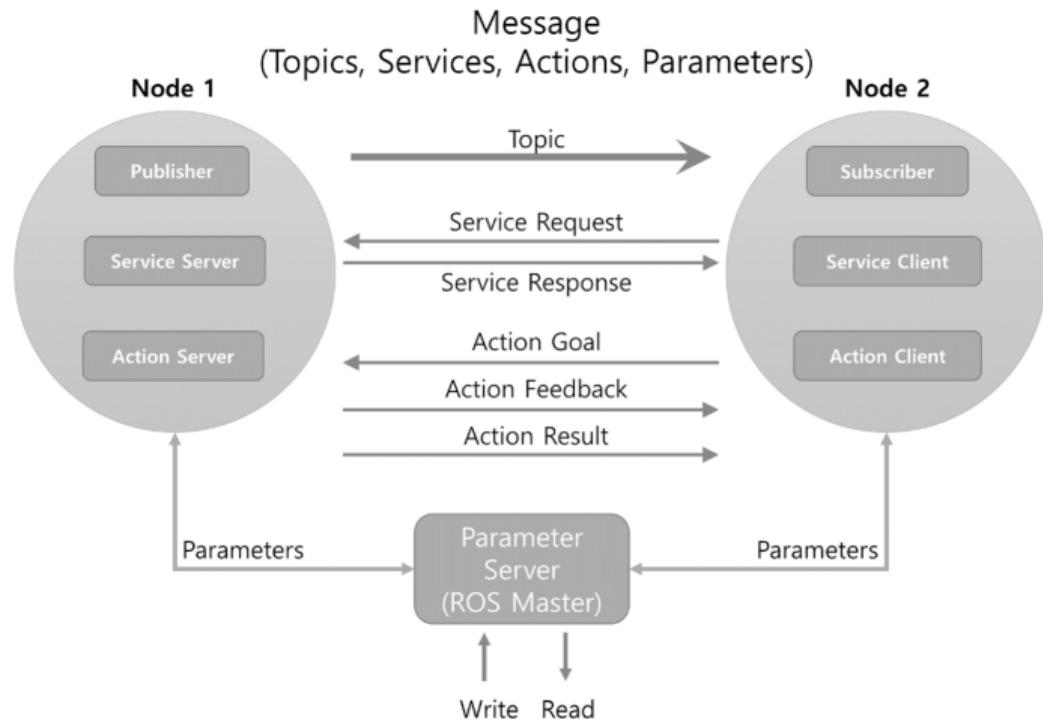
Contenido

- ① Resumen
- ② Robot Autónomo
- ③ Exploración
- ④ Coordinación multi-VANT
- ⑤ Simulación
- ⑥ Estrategia

Robot Operating System (ROS)

- Provee un conjunto de herramientas usadas por un robot (Sensores, actuadores, implementación diversos algoritmos)
- Framework de comunicación que permite interconectar las diferentes piezas del cerebro para hablar con otras lecturas de sensores.

En resumen ROS ayuda en descomponer software complejos en pequeñas piezas más manejables.



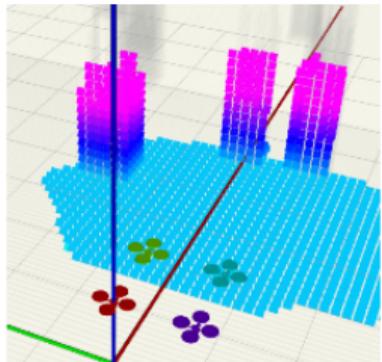
El simulador dinámico Zhou et al. (2023)¹ utiliza la odometría de referencia de los VANTS, suponiendo que cada agente está equipado con una cámara de profundidad que mira hacia adelante cuya resolución es 640x480px y un campo de visión de 80°x60°. Las imágenes de profundidad se generan utilizando el proceso presentado en Xu et al. (2022)² con un rango máximo de detección de 4.5 m.

- En tiempo necesario para completar la exploración del ambiente dado y la velocidad promedio de los VANTS durante cada experimento.
- Tasas de exploración para diferentes cantidades de VANTS en diversos ambientes.

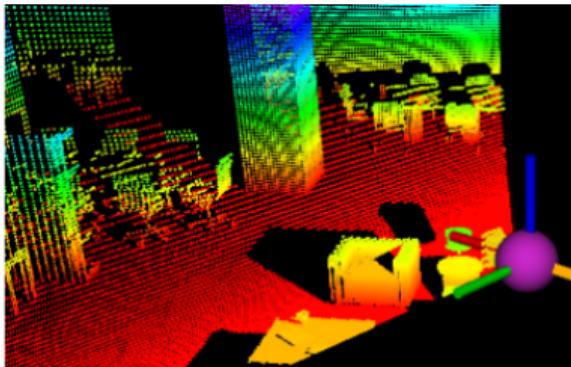
¹Rapid Collaborative Exploration With a Decentralized Multi-UAV System

²Omni-Swarm: A Decentralized Omnidirectional Visual–Inertial–UWB State Estimation System for Aerial Swarms

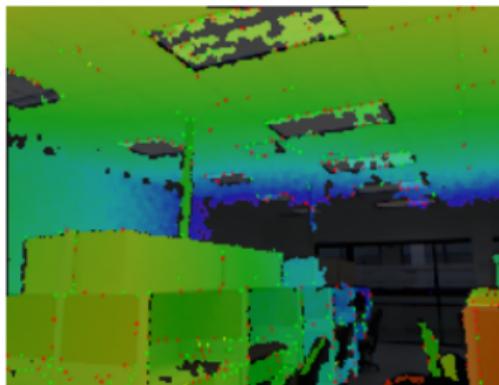
Simulador - ROS Visualization (RVIZ)



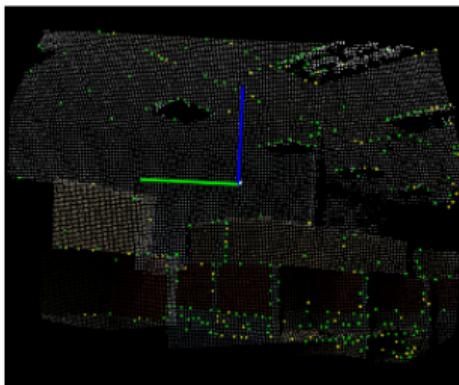
Zhou et. al (2022) ; Bartolomei et. al (2023)



Zhang et. al (2020)



Visualización Cámara Kinect 360



Contenido

- ① Resumen
- ② Robot Autónomo
- ③ Exploración
- ④ Coordinación multi-VANT
- ⑤ Simulación
- ⑥ Estrategia

Estrategia

- Probabilistic Road-Map (Método a base de muestreros)^a
- RGB-D \Rightarrow Voxels \Rightarrow 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/>

Estrategia¹

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.

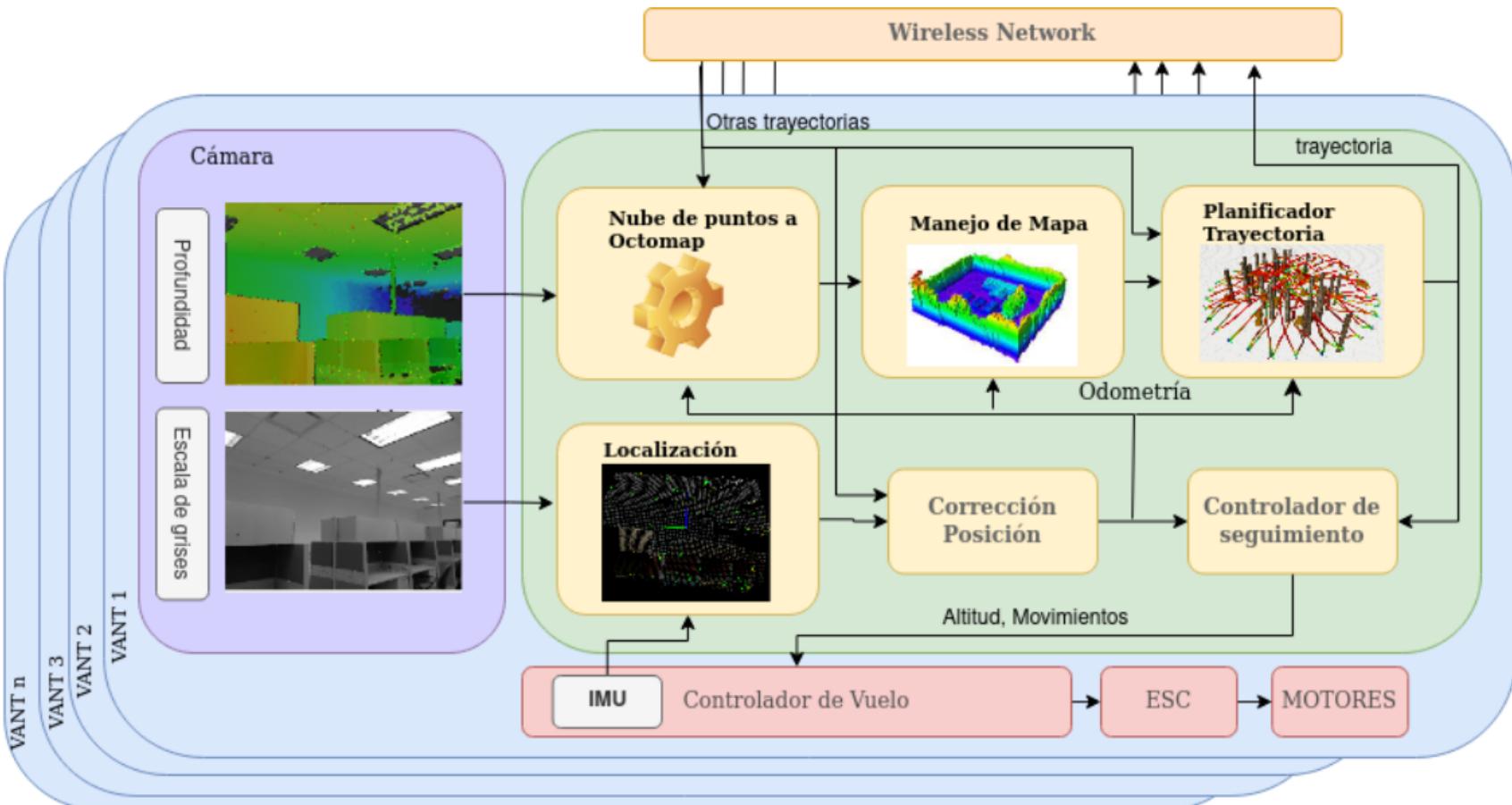
Exploración

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



Bibliografía I

- A. Bircher, M. Kamel, K. Alexis, H. Oleynikova, and R. Siegwart. Receding horizon "next-best-view" planner for 3d exploration. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1462–1468, 2016. doi: 10.1109/ICRA.2016.7487281.
- 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.
- S. K. Debnath, R. Omar, S. Bagchi, E. N. Sabudin, M. H. A. S. Kandar, K. Foysol, 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.
- 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>.
- I. Mir, F. Gul, S. Mir, M. A. Khan, N. Saeed, L. Abualigah, 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>.
- R. R. Murphy. *Introduction to AI Robotics*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1st edition, 2000. ISBN 0262133830.
- 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>.
- A. Prorok, M. Malencia, L. Carbone, G. S. Sukhatme, B. M. Sadler, and V. Kumar. Beyond robustness: A taxonomy of approaches towards resilient multi-robot systems, 2021. URL <https://arxiv.org/abs/2109.12343>.
- 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>.
- 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>.

Bibliografía II

- 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>.
- H. Xu, Y. Zhang, B. Zhou, L. Wang, X. Yao, G. Meng, and S. Shen. Omni-swarm: A decentralized omnidirectional visual–inertial–uwb state estimation system for aerial swarms. *IEEE Transactions on Robotics*, 38(6):3374–3394, 2022. doi: 10.1109/TRO.2022.3182503.
- 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.