

# 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

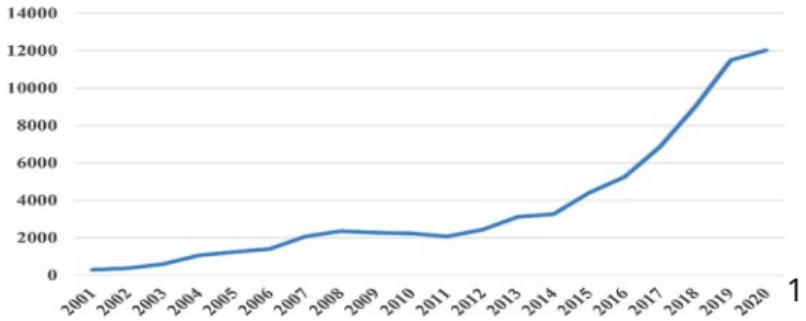
④ Coordinación multi-VANT

⑤ Simulación

# 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.

<sup>1</sup>UAV 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

# Robot Autónomo

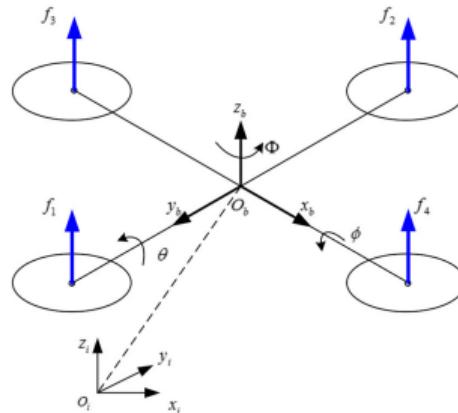


- **1.- Percepción** - Incluyen cámaras de profundidad, sensores tipo LiDAR, entre otros. Permiten al VANT recopilar información sobre su entorno.
- **2.- Control** - Computadora a bordo, contiene el poder computacional para la toma de decisiones autónomas basada en la información recopilada por los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

# Control de un VANT

UN blah blah ...

- item
- item
- item
- item



## Principales preguntas que un robot autónomo debe responder<sup>1</sup>

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

## Principales preguntas que un robot autónomo debe responder<sup>1</sup>

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

## Principales preguntas que un robot autónomo debe responder<sup>1</sup>

- ¿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 responder<sup>1</sup>

- ¿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)]

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

# Localización - ¿Dónde estoy?

## Problema de Localización y Mapeo Simultáneos<sup>1</sup>

- **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)<sup>2 3</sup>

---

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

<sup>2</sup>Uncertain geometry in robotics [Durrant-Whyte (1988)]

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

# Formulación del Problema de Localización y Mapeo Simultáneos

Dados:

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

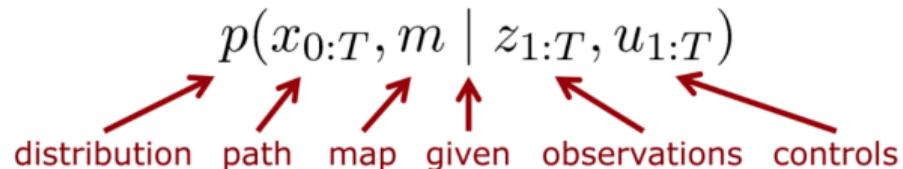
Requerimos:

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

En términos probabilísticos: Estimar la trayectoria del robot y el mapa

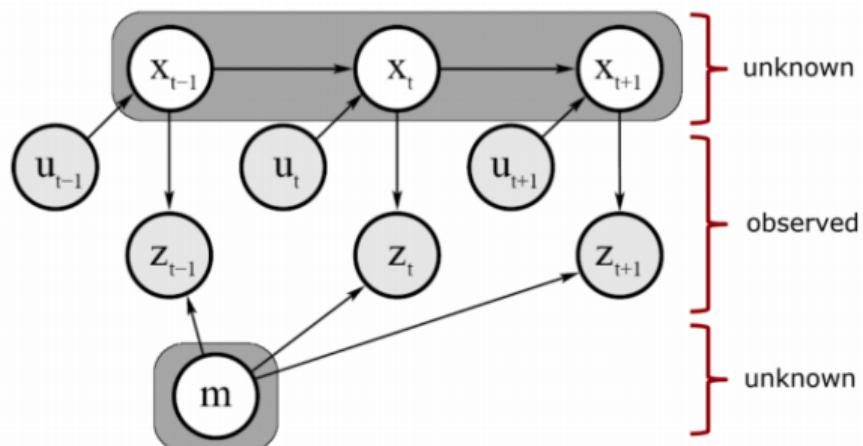
$$p(x_{0:T}, m \mid z_{1:T}, u_{1:T})$$

distribution   path   map   given   observations   controls



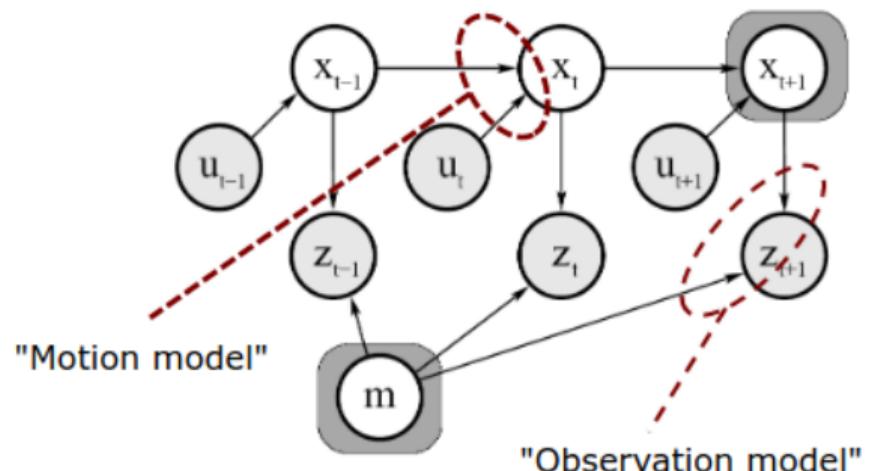
# Formulación del Problema de Localización y Mapeo Simultáneos

- 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

$$p(z_t | x_t)$$

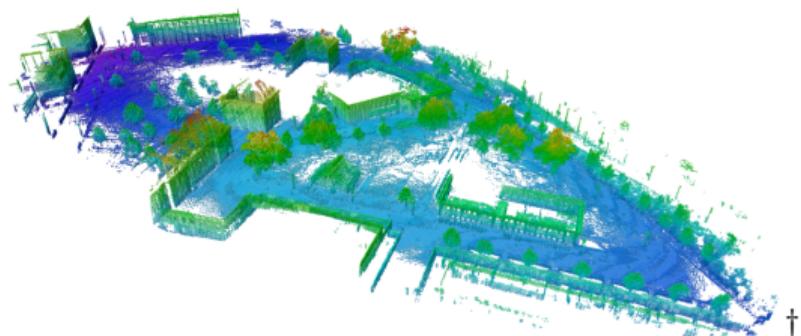
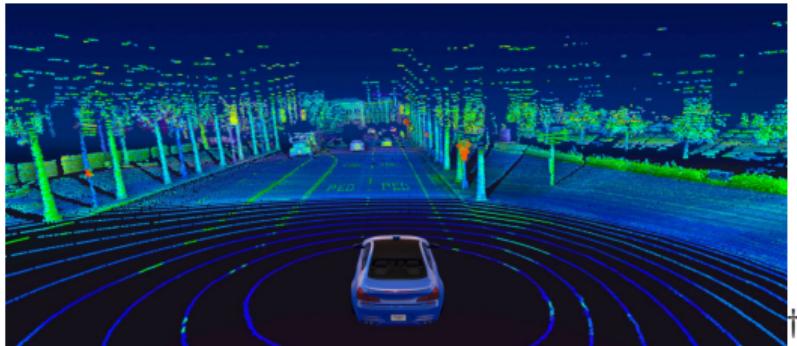
distribution observation given pose

- Posición

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

distribution new pose given old pose control

# Representación del Medio Ambiente - ¿Dónde estoy?



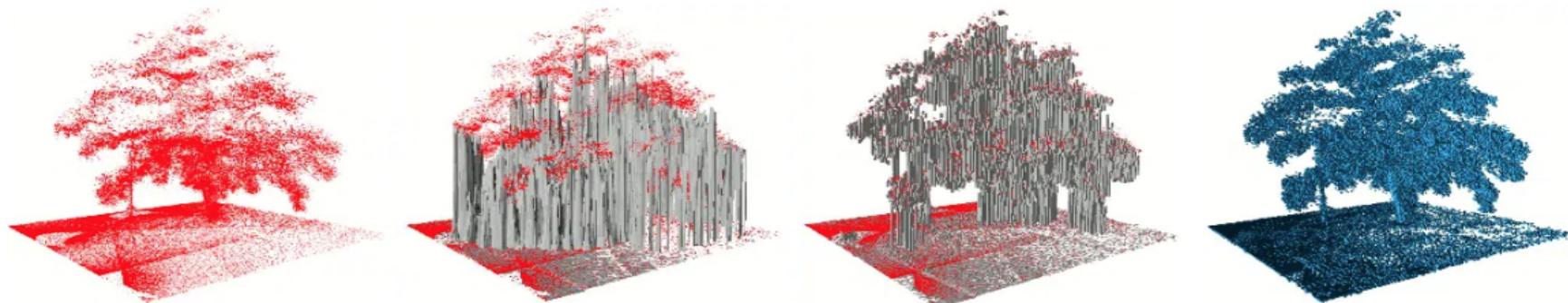
Es la construcción de un mapa del entorno, realizada por un robot, utilizando información espacial obtenida durante el paso del tiempo. [Wallgrün 2010]

Fuentes de información:

- Escáneres láser tipo LIDAR.
- Cámaras RGBD.

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

# Representación del Medio Ambiente - ¿Dónde estoy?



1

- Nube de puntos.
- Mapa de elevación.
- Superficies multi-nivel.
- Octomap (Octree).
- Hash Grid (HGrid).

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

# Representación del Medio Ambiente - ¿Dónde estoy?

- Hash Grid (HGrid)
  - Funciona bien para consultas de vecinos cercanos y búsquedas en un espacio tridimensional.
  - Puede ser adaptativa a la densidad de objetos en diferentes áreas del espacio.
  - Similar a la descomposición de un octree, pero su implementación con arrays, le permite una complejidad  $O(1)$
  - 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?

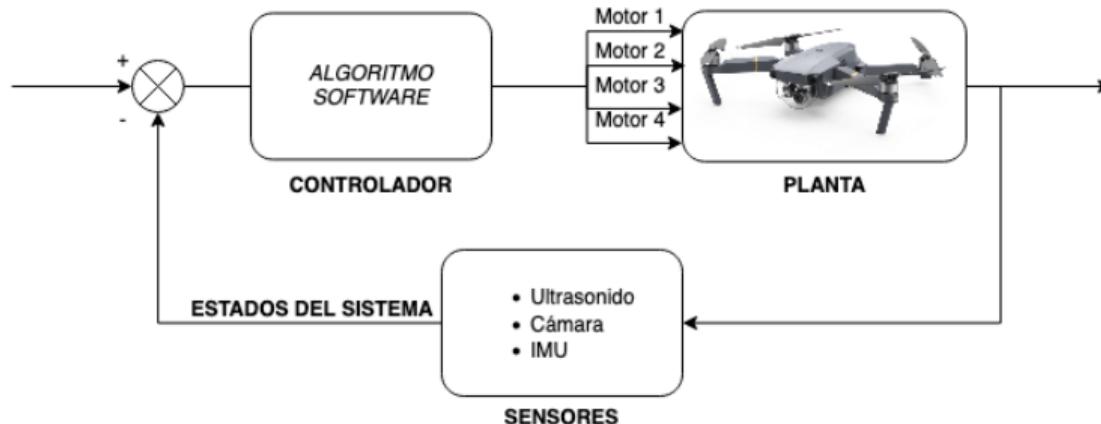


Figura: Diagrama control lazo cerrado VANT

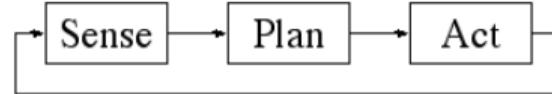
Un sistema de control para un robot móvil autónomo opera en un entorno donde las condiciones están cambiando rápidamente. (considerando el problema de control instantáneo en una formulación clásica de teoría de control)<sup>1</sup>

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

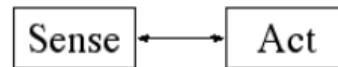
# Arquitectura híbrida

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.

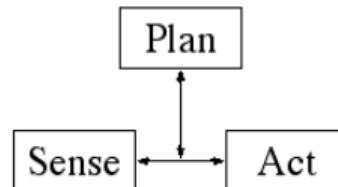
- Adaptable al lidiar con situaciones predecibles como imprevistas.
- Permite una respuesta rápida a estímulos del entorno.
- Optimiza el rendimiento del robot al gestionar las tareas simples y repetitivas, liberando recursos para tareas deliberativas más complejas.
- Es escalable.



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.<sup>a</sup>

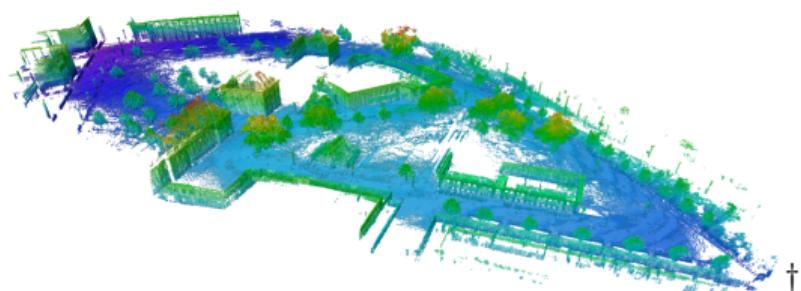
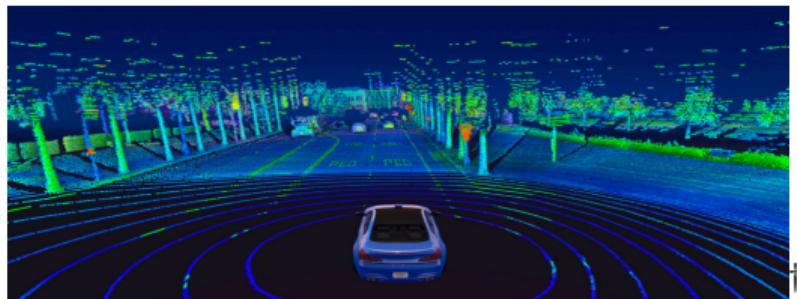
- Planificador de trayectoria global
  - Búsqueda por grafos
- Planificador de trayectoria local
  - Campos de potencial artifical
  - Algoritmos Bug

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

---

<sup>a</sup>A Survey of Trajectory Planning Techniques for Autonomous Systems [Mir et al. (2022)]

# 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 Grafos

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

## Algoritmos

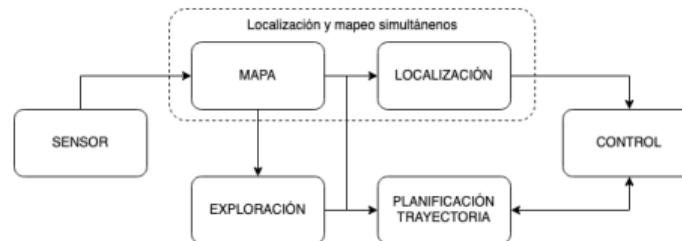
- BFS, DFS
- A\*, D\*
- Dijkstra

# Contenido

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

# Exploración

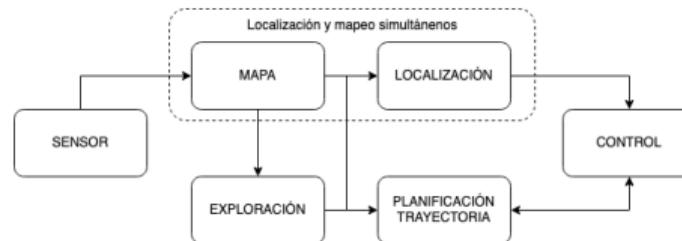
Exploración es una tarea fundamental en robots autónomos. El objetivo es crear un mapa de un ambiente desconocido.



- **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

## Enfoques de Exploración Por fronteras y NBVP

Fronteras

## Estrategia

- Probabilistic Road-Map (Método a base de muestreros)<sup>a</sup>
- RGB-D  $\Rightarrow$  Voxels  $\Rightarrow$  Octomap
- Exploración basada en fronteras<sup>b</sup>
- Estrategia basada en auto-ofertas (Método Húngaro)<sup>c</sup>

---

<sup>a</sup>Survey of UAV motion planning [Quan et al. (2020)]

<sup>b</sup>A frontier-based approach for autonomous exploration [Yamauchi (1997)]

<sup>c</sup>Estrategia descentralizada para la exploración multi-robot, incluyendo restricciones en rango de comunicación [Elizondo Leal (2013)]



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

## Estrategia <sup>1</sup>

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

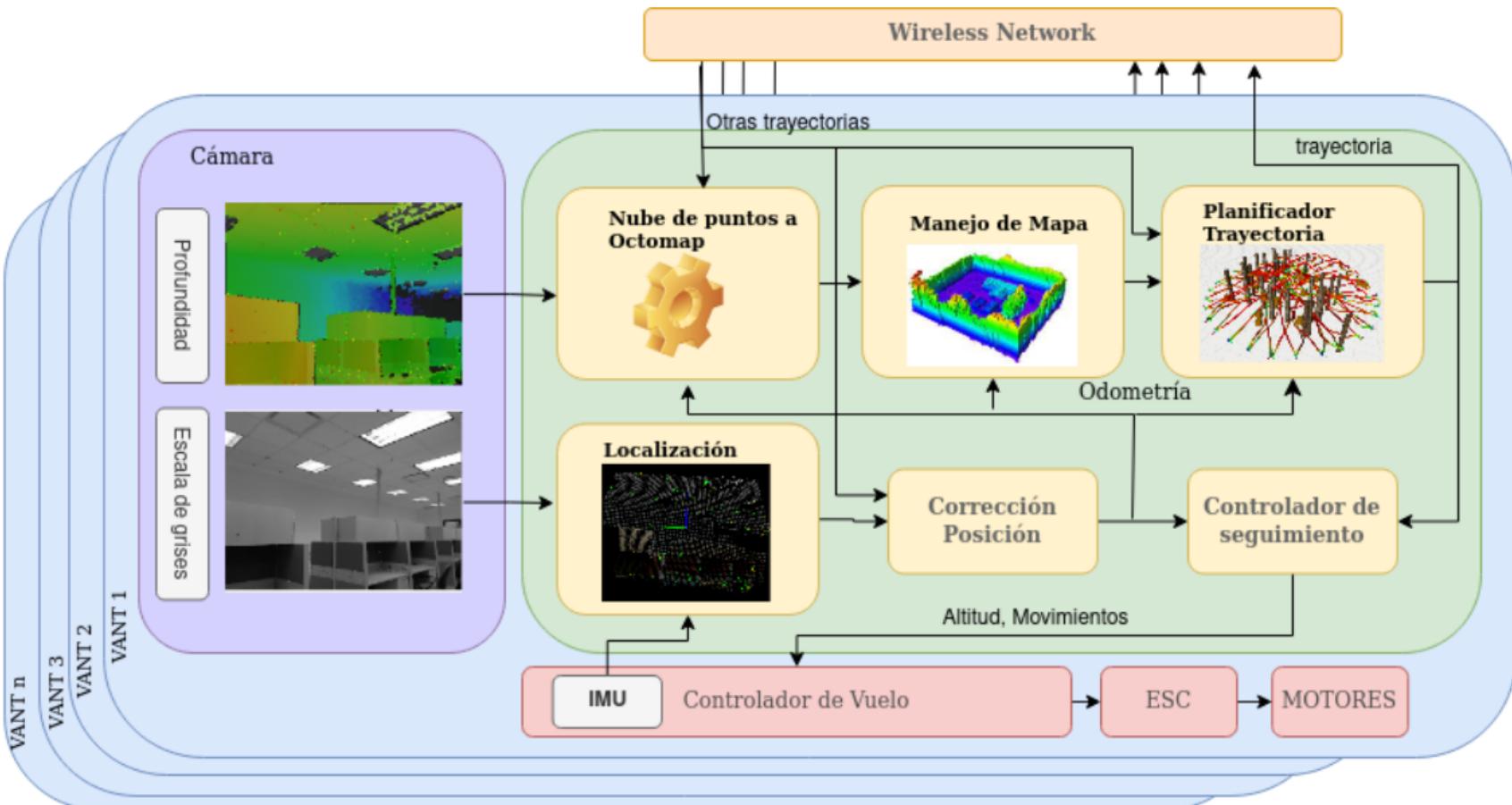
Mantener los VANTS en comunicación con los demás miembros del equipo actualizados y en caso de falla de algún VANT evitar que se pierda la información.

Cohesión

---

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

# Arquitectura



# Motivación 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).

- Búsqueda y rescate.
- Seguridad e Inspección



† Foldable drone could aid search and rescue missions.  
[https://www.therobotreport.com/  
foldable-drone-could-aid-search-and-rescue-missions/](https://www.therobotreport.com/foldable-drone-could-aid-search-and-rescue-missions/)

# Contenido

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

# Coordinación multi-VANT

Centralizada - Descentralizada

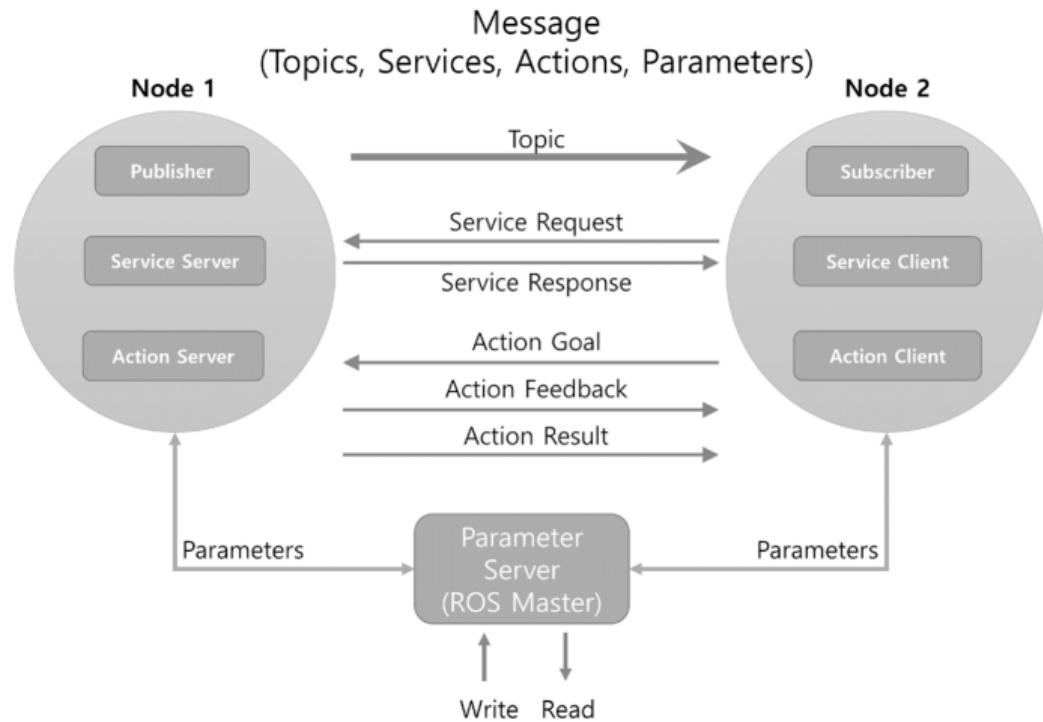
# Contenido

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

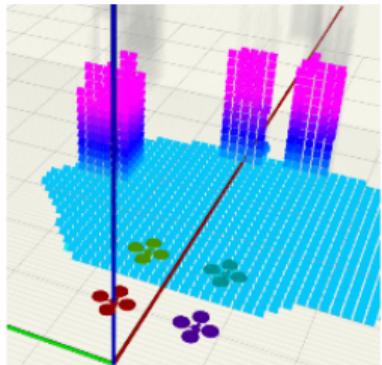
## **Robot Operating System (ROS)**

- 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.

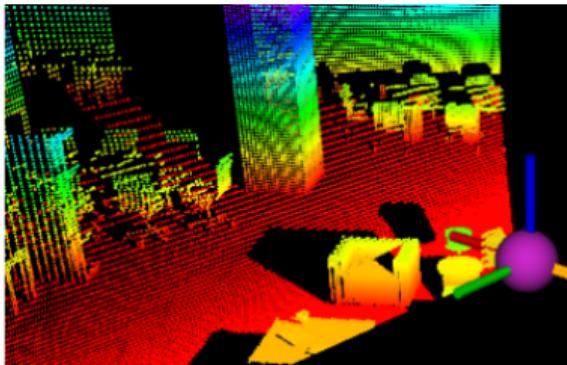
En resumen ROS ayuda en descomponer software complejos en pequeñas piezas más manejables.



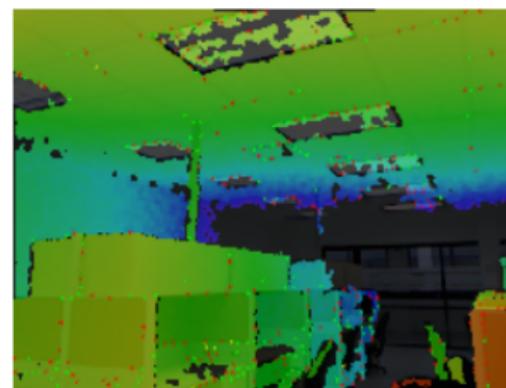
# Simulador - ROS Visualization (RVIZ)



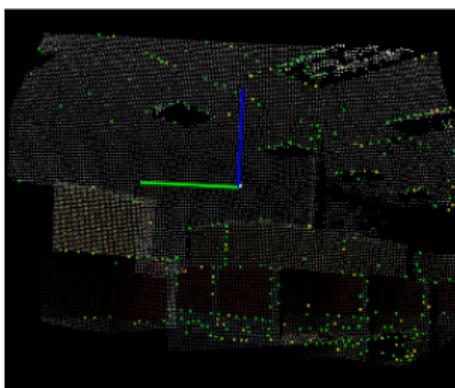
Zhou et. al (2022) ; Bartolomei et. al (2023)



Zhang et. al (2020)



Visualización Cámara Kinect 360



El simulador dinámico Zhou et al. (2023)<sup>1</sup> 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)<sup>2</sup> 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.

---

<sup>1</sup>Rapid Collaborative Exploration With a Decentralized Multi-UAV System

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

# Bibliografía I

- 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](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>.
- 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>.
- 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>.
- 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>.
- 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>.

## Bibliografía II

- 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.