

Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Luis Alberto Ballado Aradias

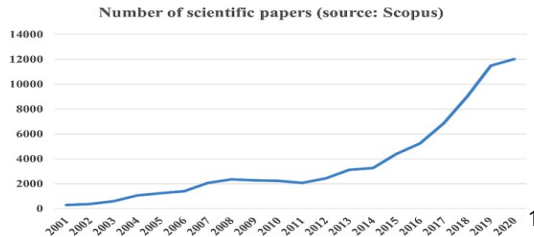
CINVESTAV UNIDAD TAMAULIPAS

Cd. Victoria, Tamaulipas - 16 de enero de 2024

Contenido

- 1 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación
- 4 Objetivos
- 5 Materiales y métodos

Antecedentes



- **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?

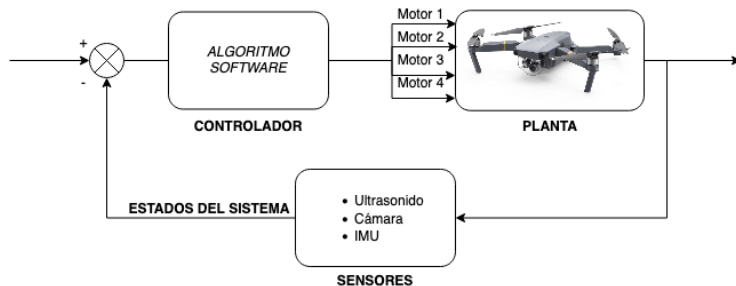


Figura: Diagrama control lazo cerrado VANT

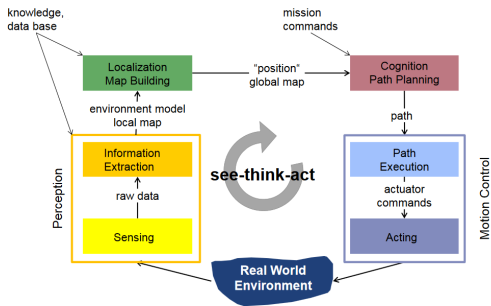
Un sistema de control para un robot móvil autónomo opera en un entorno donde las condiciones están cambiando rápidamente. (considerando el problema de control instantáneo en una formulación clásica de teoría de control) ¹

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

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.

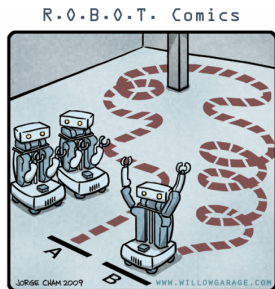


† Ciclo See-Think-Act
ETH - Note Class Autonomous mobile robot 2015

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)]

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

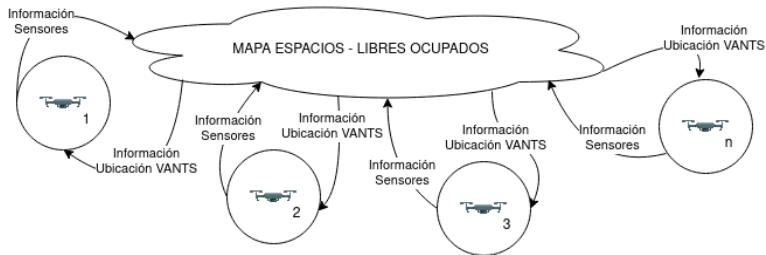


† Foldable drone could aid search and rescue missions.
<https://www.therobotreport.com/foldable-drone-could-aid-search-and-rescue-missions/>

Contenido

- 1 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema**
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación
- 4 Objetivos
- 5 Materiales y métodos

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.

Contenido

- 1 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación
- 4 Objetivos
- 5 Materiales y métodos

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.

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 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación
- 4 Objetivos**
- 5 Materiales y métodos

Objetivos generales y particulares 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 particulares 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 Antecedentes y motivación del proyecto
- 2 Planteamiento del problema
- 3 Hipótesis y preguntas de investigación
- 4 Objetivos
- 5 Materiales y métodos

Materiales

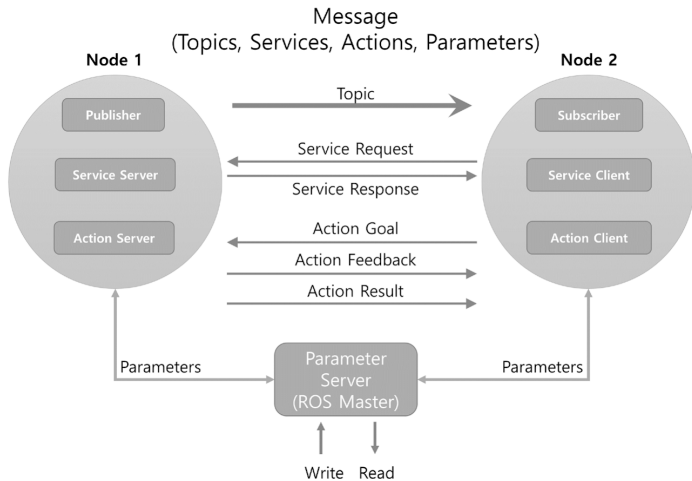


- **1.- Percepción** - Incluyen cámaras de profundidad, sensores tipo LiDAR, entre otros. Permiten al VANT recopilar información sobre su entorno.
- **2.- Control** - Computadora a bordo, contiene el poder computacional para la toma de decisiones autónomas basada en la información recopilada por los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

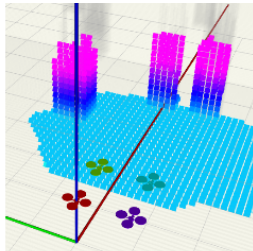
Robot Operating System (ROS)

- 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.

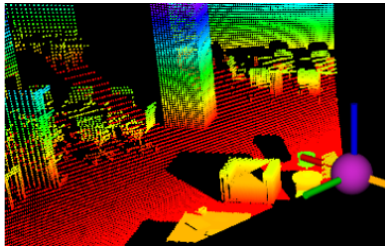
En resumen ROS ayuda en descomponer software complejos en pequeñas piezas más manejables.



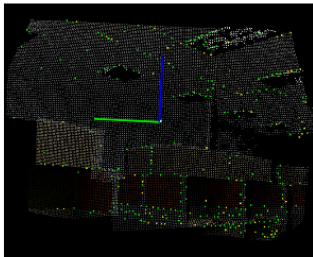
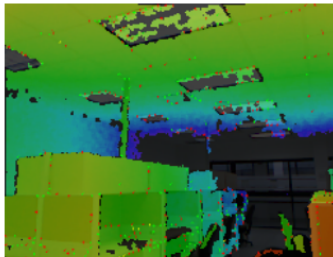
Simulador - ROS Visualization (RVIZ)



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



Zhang et. al (2020)

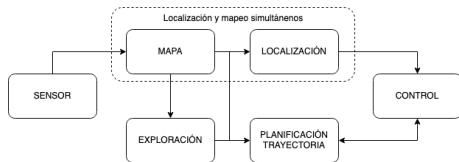


Visualización Cámara Kinect 360

Método

Exploración

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

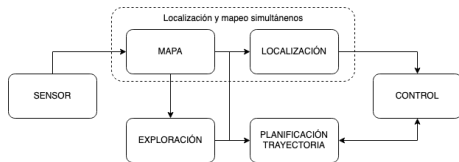


- **Sensar**
- **Creación Mapa**
- **Localización en Mapa**
- **Exploración** Aumentar la base de conocimiento del Mapa
- **Planificación trayectoria** Trayectorias hacia nuevas fronteras
- **Control** Ejecución de toma de decisiones y ejecución de trayectorias

Método

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

Estrategia

- Probabilistic Road-Map (Método a base de muestreos) ^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/>

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.

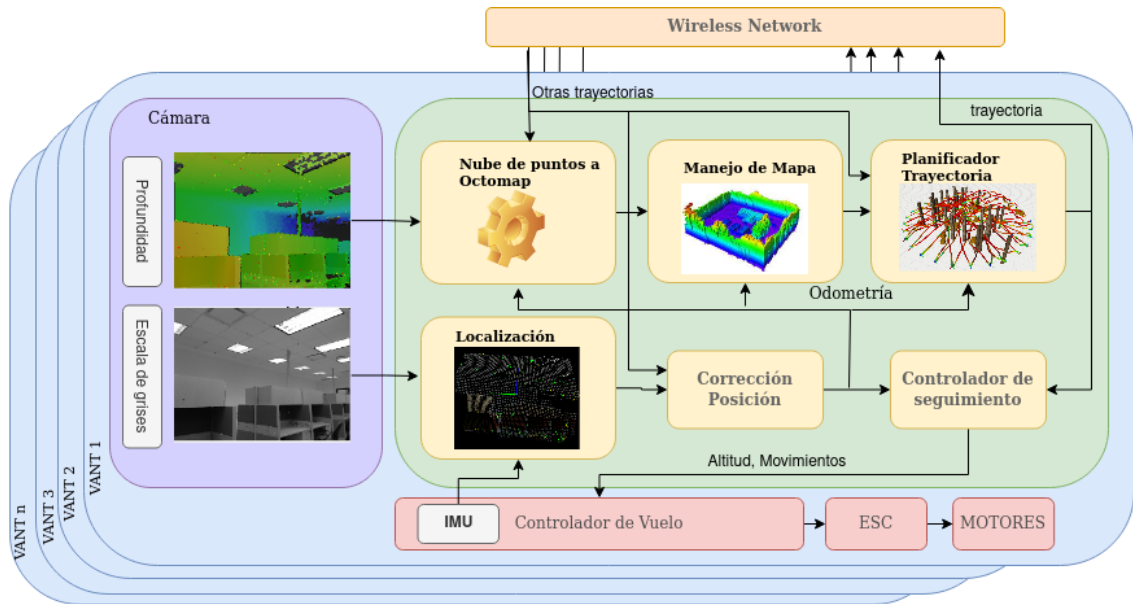
Exploración

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



Marco experimental

El problema a considerar en el trabajo, es el reducir el tiempo de exploración en un ambiente desconocido con ayuda de múltiples VANTS.

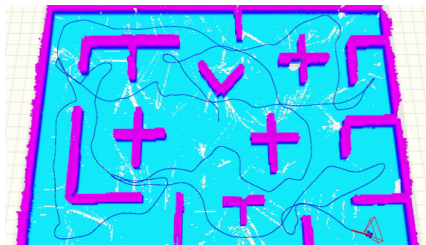
Edificios

- Oficina1
- Oficina2
- Oficina3
- Pilares

Bosques ($50m^2$)

- Bosque disperso ($0.1 \text{ árboles}/m^2$)
- Bosque densidad media ($0.15 \text{ árboles}/m^2$)
- Bosque denso ($0.2 \text{ árboles}/m^2$)
- Bosque con múltiples densidades (4 densidades diferentes)

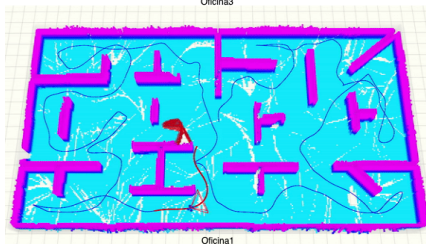
Superficies a explorar



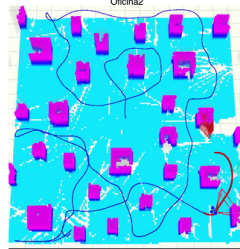
Oficina3



Oficina2



Oficina1



Pilares

Validación de enfoque

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

Técnicas a comparar resultados

- RACER: Rapid Collaborative Exploration With a Decentralized Multi-UAV System, ¹
- FAST: Fast Multi-UAV Decentralized Exploration of Forests ²

¹Zhou et al. (2023)

²Bartolomei et al. (2023)

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.
- 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>.
- 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>.
- 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.