

Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN
Unidad Tamaulipas
Protocolo de tesis

Título: Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Candidato: Luis Alberto Ballado Aradias

Asesor: Dr. José Gabriel Ramírez Torres

Co-Asesor: Dr. Eduardo Rodríguez Tello

10 de julio de 2023

Resumen

La importancia de la robótica de servicios en la actualidad es innegable. Estos avances están revolucionando la forma en que interactuamos con el mundo, ofreciendo un amplio abanico de aplicaciones en diversos sectores. Desde vehículos autónomos, robots móviles en logística, hasta la exploración espacial, la robótica de servicios ha demostrado ser útil en entornos donde los seres humanos pueden enfrentar riesgos o dificultades.

Dentro de la robótica móvil podemos encontrar robots aéreos, mejor conocidos como Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), estos robots móviles tienen la capacidad de volar y acceder a lugares de manera rápida y eficiente, convirtiéndolos en herramientas extremadamente versátiles. Vehículos así están siendo utilizados por empresas de comercio electrónico para entregar productos a los clientes de manera ágil, en la agricultura para monitorear cultivos e identificar problemas con plagas para aplicar pesticidas o fertilizantes de manera precisa. En el ámbito de la seguridad, pueden utilizarse para la vigilancia de áreas de difícil acceso o en situaciones de emergencia, proporcionando información valiosa en tiempo real a los equipos de rescate.

A pesar de los numerosos avances de la robótica de servicios, existen desafíos y problemáticas asociadas a la planificación de trayectorias en ambientes desconocidos y cambiantes.

La **exploración** implica una serie de tareas y desafíos. Estos pueden incluir la **planificación de rutas** para cubrir eficientemente el área a explorar, la **detección y evasión de obstáculos**, la **localización y mapeo simultáneo** (SLAM) y la toma de decisiones para maximizar la información.

La **coordinación** y el **trabajo en equipo** de múltiples-VANT(s) representa un desafío emocionante. La **colaboración** de varios VANT(s) puede ser útil en misiones de búsqueda y rescate, en donde pueden cubrir áreas más extensas y realizar tareas más complejas de manera simultánea. La coordinación entre los VANT(s) puede optimizar la eficiencia de las operaciones y aumentar las posibilidades de éxito.

El objetivo de este trabajo es la propuesta de una arquitectura de software tolerante a fallas, capaz de explorar ambientes desconocidos y cambiantes para la coordinación de Vehículos Aéreos No Tripulados.

El proyecto de investigación demostrará que es posible diseñar algoritmos inteligentes de poca memoria capaces de resolver tareas en colaboración multi-VANT.

Palabras claves: multi-VANT, coordinación multi-agente, Exploración 3D, 3D Path finding

1. Datos Generales

1.1. Título de proyecto

Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

1.2. Datos del alumno

Nombre: Luis Alberto Ballado Aradias
Dirección: Juan José de La Garza #909
Colonia: Guadalupe Mainero C.P. 87130
Teléfono (casa): 81 20706661
Teléfono (lugar de trabajo): (834) 107 0220 + Ext
Dirección electrónica: luis.ballado@cinvestav.mx
URL: <https://luis.madlab.mx>

1.3. Institución

Nombre: CINVESTAV-IPN
Departamento: Unidad Tamaulipas
Dirección: Km 5.5 carretera Cd. Victoria - Soto la Marina.
Parque Científico y Tecnológico TECNOTAM,
Ciudad Victoria, Tamaulipas, C.P. 87130
Teléfono: (+52) (834) 107 0220

1.4. Beca de tesis

Institución otorgante: CONAHCYT
Tipo de beca: Maestría Nacional
Vigencia: Septiembre 2022 - Agosto 2024

1.5. Datos del asesor

Nombre: Dr. José Gabriel Ramírez Torres
Dirección: Km. 5.5 carretera Cd. Victoria - Soto la Marina
Parque Científico y Tecnológico TECNOTAM
Ciudad Victoria, Tamaulipas, C.P. 87130
Teléfono (oficina): (+52) (834) 107 0220 Ext. 1014
Institución: CINVESTAV-IPN
Departamento adscripción: Unidad Tamaulipas
Grado académico: Doctorado

Nombre: Dr. Eduardo Arturo Rodríguez Tello
Dirección: Km. 5.5 carretera Cd. Victoria - Soto la Marina
Parque Científico y Tecnológico TECNOTAM
Ciudad Victoria, Tamaulipas, C.P. 87130
Teléfono (oficina): (+52) (834) 107 0220 Ext. 1100
Institución: CINVESTAV-IPN
Departamento adscripción: Unidad Tamaulipas
Grado académico: Doctorado

2. Descripción del proyecto

El proyecto de estrategias para la exploración coordinada multi-VANT se centra en las ventajas de tener múltiples-VANT(s) trabajando en conjunto para mejorar la eficiencia y cobertura de la exploración proponiendo una arquitectura de software que con ayuda de algoritmos, permitan la coordinación eficiente de múltiples-VANT(s) para llevar a cabo tareas de exploración en entornos desconocidos y cambiantes.

2.1. Antecedentes y motivación para el proyecto

Millones de Vehículos Aéreos No Tripulados, o también conocidos como drones, han presentado una adopción masiva en diferentes aplicaciones, desde usos civiles (búsqueda y rescate, monitoreo industrial, vigilancia), hasta aplicaciones militares [1]. La popularidad de los VANT(s) es atribuida a su movilidad.

La idea de utilizar múltiples robots aéreos en un sistema coordinado se basa en el comportamiento de los enjambres de animales, como las abejas o los pájaros, que trabajan juntos de manera colaborativa para lograr objetivos comunes. Esta inspiración biológica ha llevado al desarrollo de algoritmos y técnicas para coordinar y controlar múltiples VANT(s) en diferentes aplicaciones.

El interés en la investigación e innovación de soluciones con Vehículos Aéreos No Tripulados ha crecido exponencialmente en años recientes [2,7,8,9,10].

En recientes años, dotar a los VANT de inteligencia para explotar la información recolectada de sensores a bordo, ha sido y es un área estudiada en robótica móvil área (construcción de mapas)[3]. Buscando probar diferentes teorías de control, convirtiendo los problemas típicos de control 2D (péndulo inverso fijo) a un ambiente 3D, teniendo más variables a controlar para mantener el equilibrio del péndulo y al mismo tiempo lograr el movimiento y las maniobras deseadas del dron en el espacio tridimensional[4].

El despliegue rápido de robots en situaciones de riesgo, búsqueda y rescate ha sido un área ampliamente estudiada en la robótica móvil. Donde se han aplicado teorías de grafos para la obtención de la mejor ruta. Los comportamientos reactivos son primordiales si pensamos en un agente autónomo. Esa percepción que podemos tener los seres humanos para reaccionar a ciertos retos. Buscar la manera de crear una arquitectura tolerante a fallas, capaz de coordinar múltiples vehículos aéreos no tripulados a medida que incrementa o disminuye la oferta de VANT(s) disponibles.

La coordinación de múltiples-VANT(s) ofrece numerosos beneficios y oportunidades en diversos campos y aplicaciones.

- Eficiencia y cobertura
- Redundancia y tolerancia a fallos
- Adaptabilidad a entornos dinámicos
- Distribución de carga de trabajo
- Aprendizaje colaborativo

3. Planteamiento del problema

La coordinación de múltiples-VANT (Vehículos Aéreos No Tripulados) es un desafío complejo en el campo de la robótica y la exploración de áreas desconocidas. A medida que la tecnología de los Vehículos Aéreos No Tripulados continúa avanzando y se vuelven más accesibles, se presenta la oportunidad de utilizar equipos de múltiples VANT(s) para realizar tareas de manera colaborativa y eficiente. Sin embargo, esta coordinación planea diversas problemáticas que deben abordarse.

La coordinación de múltiples VANT(s) implica la necesidad de establecer una comunicación efectiva entre ellos. Los VANT(s) deben intercambiar información relevante sobre su posición, estado, objetivos y otros datos importantes. La comunicación debe ser confiable, de baja latencia y capaz de manejar múltiples enlaces de manera simultánea. Además, los protocolos de comunicación deben ser seguros para proteger la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos.

Otro desafío es la planificación de rutas y la toma de decisiones distribuida. Los VANT(s) deben coordinar sus movimientos para evitar colisiones y lograr una cobertura eficiente del área objetivo. Esto implica la necesidad de desarrollar algoritmos y estrategias que permitan la planificación de rutas dinámicas, considerando los obstáculos y las restricciones del entorno. Además, los VANT(s) deben tomar decisiones colaborativas para adaptarse a situaciones imprevistas o cambios en el entorno.

La asignación de tareas también es un aspecto crítico en la coordinación de múltiples VANT(s). Cada VANT puede tener diferentes capacidades y sensores especializados, por lo que es importante asignar tareas de acuerdo con las fortalezas individuales de cada robot. Además, los VANT(s) deben colaborar en la recolección y procesamiento de datos, evitando la duplicación de esfuerzos optimizando el uso de los recursos disponibles.

Dada un área de interés A desconocida que se desea explorar,

- Un conjunto de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) denotados como $V = V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$, donde n es el número total de VANT's disponibles
- Un conjunto de tareas de exploración denotados como $T = T_1, T_2, T_3, T_m$, donde m es el número total de tareas a realizar.

restricciones y requisitos específicos del problema, como límites de tiempo, obstáculos a evitar, etc.

Para cada tarea de exploración T_m , se definen las siguientes variables:

- Posición inicial: $p_i(x, y, z)$, representa la posición inicial del VANT o los múltiples-VANTs asignados a la tarea T_m
- Trayectoria: α_i , describe la trayectoria seguida por el/los VANT(s) asignado(s) a la tarea T_m en función del tiempo t
- Información recolectada: C_i , representa la información recolectada por el/los VANT(s) asignado(s) durante la exploración

La función objetivo variará según los objetivos específicos del problema.

- Maximizar la cobertura del área de interés A
- Minimizar el tiempo total requerido para cubrir el área de interés A
- Maximizar la cantidad de información recolectada

4. Objetivos generales y específicos del proyecto

General

Desarrollo e implementación de una arquitectura de software tolerante a fallas para la coordinación de múltiples VANT(s) aplicados a una simulación de búsqueda y rescate.

Particulares

- Generación del modelado de la dinámica de un Vehículo Aéreo No Tripulado.
- Garantizar que los VANT(s) eviten colisiones entre sí y con objetos en su entorno.
- Eficiencia y rendimiento del sistema en su conjunto. Asignar tareas de manera óptima entre los múltiples-VANT(s), minimizando los tiempos de espera y de respuesta.
- Garantizar que cada VANT contribuya de manera efectiva al logro de los objetivos generales, sin redundancia ni superposición de tareas.
- Comunicación efectiva entre los múltiples-VANT(s) para intercambiar información y sincronizar sus acciones. El objetivo es establecer una comunicación confiable y eficiente que permita la transmisión de datos relevantes y las instrucciones necesarias para la coordinación.
- Adaptabilidad y flexibilidad: Los objetivos de la coordinación pueden cambiar en función de las circunstancias y las necesidades. La coordinación de múltiples-VANT(s) debe ser adaptable y flexible para ajustarse a cambios en el entorno, nuevos objetivos o la incorporación o salida de VANT(s) del sistema.

5. Metodología

La metodología propuesta para esta tesis se divide en tres etapas, iniciando en septiembre del 2023. A continuación se detallan cada una de las actividades que se plantean realizar en cada una.

1. Revisión de literatura

- Realizar una revisión de la literatura científica y técnica relacionada con la coordinación de múltiples VANT(s).
- Identificar los enfoques existentes, algoritmos y tecnologías utilizadas en la coordinación de múltiples VANT(s).

2. Análisis y diseño de la solución propuesta

- Identificar los requisitos clave para una coordinación eficiente de VANT(s), considerando factores como la seguridad, la eficiencia energética y la capacidad de adaptación a diferentes entornos.
- Establecer métricas y criterios de evaluación para medir el desempeño de la coordinación de múltiples VANTS.
- Diseñar algoritmos y protocolos de comunicación que permitan la coordinación de manera eficiente.
- Proponer estrategias para la asignación de tareas y la gestión de recursos en función de los requisitos identificados.

3. Implementación y validación

- Implementar la metodología propuesta utilizando lenguajes de programación adecuados y herramientas de simulación.
- Realizar simulaciones para evaluar el desempeño de la coordinación de múltiples VANT(s) bajo diferentes escenarios.

4. Evaluación, resultados y conclusiones

- Analizar y comparar los resultados obtenidos con otros enfoques existentes.
- Extraer conclusiones sobre la efectividad propuesta en términos de coordinación eficiente de Vehículos Aéreos No Tripulados.
- Identificar posibles mejoras y áreas de investigación futuras en el campo de la coordinación de múltiples VANT(s).

6. Cronograma de actividades (plan de trabajo)

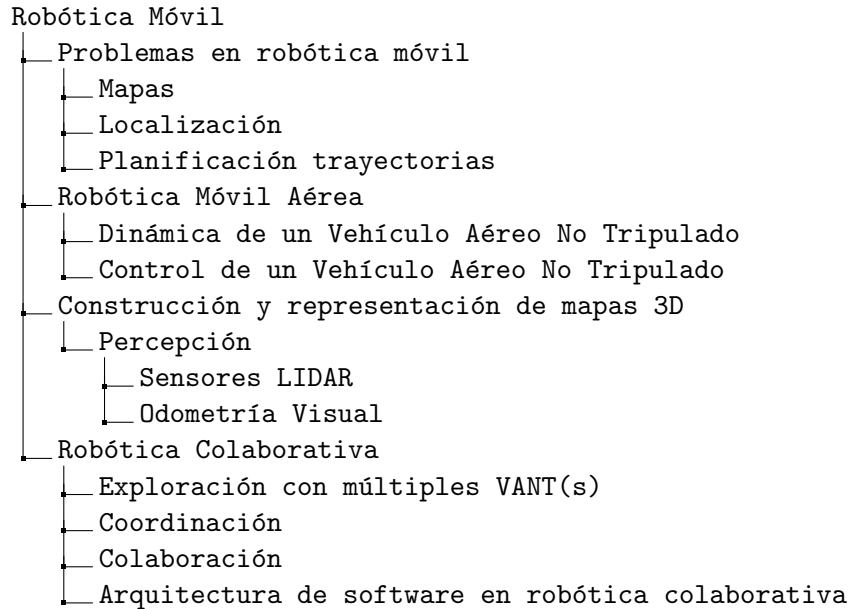
Cuatrimestre	Q1				Q2				Q3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Actividad 1												
Actividad 2												
Actividad 3												
Actividad 4												
Actividad 5												
Actividad 6												
Actividad 7												

7. Infraestructura

Para el desarrollo de este proyecto de investigación, se hará uso de un equipo de cómputo con las siguientes características:

- iMac (21.5-inch, Late 2015)
- Procesador 2.8 GHz Quad-Core Intel Core i5
- Memoria Ram 8 GB 1867 MHz DDR3
- Graphics Intel Iris Pro Graphics 6200 1536 MB
- Almacenamiento 1 TB
- Tarjeta Raspberry Pi para Nodos ROS

8. Estado del arte



Las aplicaciones de la robótica se han centrado en realizar tareas simples y repetitivas. La necesidad de robots con capacidad de identificar cambios en su entorno y reaccionar sin la intervención humana, da origen a los robots inteligentes. Aunado a ello si deseamos que el robot se mueva libremente, los cambios en su entorno pueden aumentar rápidamente y complicar el problema de un comportamiento inteligente. Dentro de la robótica móvil inteligente se han propuesto estrategias de comportamiento reactivas, algoritmos que imitan el comportamiento de insectos y el cómo se desplanzan en un entorno.

El objetivo principal de los algoritmos de navegación es el de guiar al robot desde el punto de inicio al punto destino. Los trabajos por V. Lumelsky y A. Stephanov, et al. [11], dieron respuesta a problemáticas de navegación eficiente y de poca memoria (Algoritmos tipo bug).

Se considera a P. Hart, N. Nilsson et al. como los creadores del algoritmo A* en 1968 [12], al mejorar el algoritmo de Dijkstra para el robot Shakey, que debía navegar en una habitación que contenía obstáculos fijos. El objetivo principal del algoritmo A* es la eficiencia en la planificación de rutas. Otros algoritmos propuestos por A. Stentzz[13] han demostrado operar de manera eficiente ante obstáculos dinámicos, a comparación del algoritmo A* que vuelve a ejecutarse al encontrarse con un obstáculo, el algoritmo D* usa la información previa para buscar una ruta hacia el objetivo.

La colaboración de múltiples VANTs (vehículos aéreos no tripulados), también conocidos como VANTs, ha surgido como una área de investigación prometedora en los últimos años [1,2,3,5]. La capacidad de coordinar y colaborar entre sí permite a los VANTs realizar tareas complejas de manera eficiente, abriendo nuevas posibilidades en una amplia gama de aplicaciones, desde la vigilancia y la logística hasta la exploración y la respuesta a desastres [1,2].

Uno de los desafíos clave en la colaboración de múltiples VANTs es la planificación de rutas. Se han desarrollado diversos algoritmos para optimizar la planificación de rutas dentro de la robótica móvil, minimizando la colisión y mejorando la eficiencia de sus misiones[5,6]. Estos algoritmos tienen en cuenta varios factores, como las restricciones de vuelo, la energía restante de los VANTs y las ubicaciones objetivo, para generar trayectorias seguras y eficientes.

Además de la planificación de rutas, la coordinación de los VANTs requiere una comunicación efectiva. Se han investigado diferentes protocolos de comunicación y estrategias de intercambio de información para permitir la colaboración entre los VANTs. Algunos enfoques utilizan comunicación

directa entre los VANTs, mientras que otros emplean una arquitectura de red donde los VANTs se comunican a través de una infraestructura centralizada[6]. La elección del enfoque depende de las características de la aplicación y las restricciones del sistema.

La colaboración de múltiples VANTs también puede implicar la formación de formaciones o la realización de tareas coordinadas. Para ello, se han desarrollado algoritmos de control distribuido que permiten a los VANTs mantener posiciones relativas estables y realizar movimientos coordinados. Estos algoritmos[14] pueden basarse en técnicas de seguimiento y control de formaciones, y se han aplicado en diferentes contextos, desde la inspección de infraestructuras hasta la búsqueda y rescate.

En términos de validación y evaluación, se utilizan simulaciones y pruebas reales para verificar el rendimiento y la eficacia de los sistemas de colaboración de múltiples VANTs. Las simulaciones permiten evaluar diferentes escenarios y ajustar los parámetros del sistema antes de las pruebas reales. Los casos de prueba reales proporcionan información sobre la implementación y la eficiencia en situaciones del mundo real, y pueden ayudar a identificar desafíos adicionales que deben abordarse.

La adquisición de datos es el primer paso en la representación de mapas 3D con VANTs. Los VANTs pueden llevar a cabo vuelos sobre un área de interés, capturando imágenes desde diferentes ángulos y alturas[15]. Estas técnicas aprovechan la información de correspondencia entre las imágenes para calcular la posición y orientación relativa de las cámaras y reconstruir la estructura tridimensional del entorno.

Los VANTs pueden utilizar sensores LiDAR (Light Detection and Ranging) para capturar datos 3D. Los sensores LiDAR emiten pulsos de luz láser y miden el tiempo que tarda en reflejarse en los objetos circundantes. Esto permite obtener información precisa sobre la distancia y la posición tridimensional de los objetos en el entorno. Los datos LiDAR pueden combinarse con las imágenes capturadas para generar mapas 3D completos y detallados.

9. Contribuciones o resultados esperados

1. Códigos a disposición de la comunidad
 - Algoritmo para la planificación de rutas
 - Protocolos de comunicación y coordinación
 - Coordinación en entornos dinámicos
2. Simulación de solución
 - Simulaciones detalladas y pruebas en entornos controlados
 - Métricas como tiempo de respuesta, consumo de energía y la capacidad de adaptación a diferentes escenarios.
3. Tesis impresa.

10. Referencias

1. H. Shakhathreh et al., 'Unmanned Aerial Vehicles: A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges', arXiv:1805.00881, 2018
2. P. Daponte et al., 'Metrology for drone and drone for metrology: Measurement systems on small civilian drones', in Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), 2015 IEEE, 2015, pp. 306-311: IEEE.
3. A. Shukla and H. Karki, 'Application of robotics in onshore oil and gas industry A review Part I', Robotics and Autonomous Systems, vol. 75, pp. 490-507, 2016
4. M. Hehn and R. D'Andrea, 'A flying inverted pendulum', 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, 2011, pp. 763-770, doi: 10.1109/ICRA.2011.5980244.
5. Z. Fu, Y. Mao, D. He, J. Yu and G. Xie, 'Secure Multi-UAV Collaborative Task Allocation,' in IEEE Access, vol. 7, pp. 35579-35587, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2902221.
6. B. Zhou, H. Xu and S. Shen, 'RACER: Rapid Collaborative Exploration With a Decentralized Multi-UAV System,' in IEEE Transactions on Robotics, vol. 39, no. 3, pp. 1816-1835, June 2023, doi: 10.1109/TRO.2023.3236945.
7. 'Hovering over the drone patent landscape, ifi claims patent services, Nov 2014 online
8. L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, 'Survey of important issues in UAV communication networks', IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152, 2016.
9. J. Senthilnath, M. Kandukuri, A. Dokania, and K. Ramesh, 'Application of UAV imaging platform for vegetation analysis based on spectral-spatial methods', Computers and Electronics in Agriculture, vol. 140, pp. 8-24, 2017.
10. H. Zhou, H. Kong, L. Wei, D. Creighton, and S. Nahavandi, 'On detecting road regions in a single UAV image,' IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 18, no. 7, pp. 1713-1722, 2017.
11. V. Lumelsky y A. Stephanov, Path-Planning Strategies for a Point Mobile Automaton Moving Amidst Unknown Obstacles of Arbitrary Shapes, Algorithmica, vol. 2, pp. 403-430, 1987.
12. Peter E. Hart, Nils J. Nilsson, Bertram Raphael, A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, vol. 4, pág 100-107, 1968
13. A. Stentz, Optimal and efficient path planning for partially-known environments, Proc. of IEEE Conference on Robotic Automation, pág 1058-1068, 1994
14. L. Barnes, W. Alvis, M. Fields, K. Valavanis, and W. Moreno, 'Swarm formation control with potential fields formed by bivariate normal functions,' in Control and Automation, 2006. MED'06. 14th Mediterranean Conference on, 2006, pp. 1-7: IEEE.
15. T. Cieslewski, E. Kaufmann and D. Scaramuzza, Rapid exploration with multi-rotors: A frontier selection method for high speed flight," 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, BC, Canada, 2017, pp. 2135-2142, doi: 10.1109/IROS.2017.8206030.

Fecha de inicio

Fecha de terminación

Septiembre de 2023

Agosto de 2024

Firma del alumno: _____

Comité de aprobación del tema de tesis

Dr. José Gabriel Ramírez Torres

Dr. Eduardo Arturo Rodríguez Tello

Dr. 3

Dr. 4
