

Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Luis Alberto Ballado Aradias

luis.ballado@cinvestav.mx

Cinvestav Unidad Tamaulipas

Victoria, Tamps, Mexico

Dr. José Gabriel Ramírez Torres

grtorres@cinvestav.mx

Cinvestav Tamaulipas

Victoria, Mexico

Dr. Eduardo A. Rodríguez Tello

ertello@cinvestav.mx

Cinvestav Tamaulipas

Victoria, Mexico

RESUMEN

Las estrategias de exploración son de suma importancia en esfuerzos como misiones de búsqueda y rescate, así como en el mapeo de zonas afectadas por desastres naturales. Los vehículos aéreos no tripulados (VANTS) han ganado una gran popularidad en estos escenarios debido a su movilidad, ya que cuentan con la capacidad de cubrir grandes áreas de interés. Con el avance de la electrónica a bordo de los VANTS, la investigación se ha desplazado hacia la toma de decisiones para misiones que involucran múltiples VANTS. No obstante, la navegación autónoma y la exploración de áreas extensas inexploradas siguen siendo un desafío, especialmente en ambientes cambiantes por obstáculos móviles.

Un enfoque colaborativo ofrece mejores resultados de exploración con una rápida obtención de información, logrando sus objetivos con un alto grado de consistencia y resiliencia a fallos en comparación con una implementación donde se emplea un único vehículo aéreo no tripulado (VANT). Sin embargo, la exploración multi-VANT plantea diversos desafíos que deben abordarse para su correcto funcionamiento, como la comunicación, la colaboración y la fusión de datos.

Este trabajo presenta la propuesta de una arquitectura descentralizada de software capaz de coordinar múltiples VANTS con habilidades para la exploración, generación de mapas y planificación de rutas para explorar eficientemente un área de interés, garantizando la adaptabilidad a cambios en su entorno. Este problema implica la toma de decisiones complejas, como asignar tareas de exploración a los VANTS, evitar colisiones y planificar rutas óptimas. Factores como la comunicación entre VANTS, la incertidumbre del entorno y las limitaciones de recursos de energía forman parte de los criterios considerados.

PALABRAS CLAVE

Estrategias multi-VANT, exploración multi-VANT, planificación de rutas multi-VANT

Citar como:

Luis Alberto Ballado Aradias, Dr. José Gabriel Ramírez Torres, and Dr. Eduardo A. Rodríguez Tello. 2023. Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT. En . Cinvestav Unidad Tamaulipas, Ciudad Victoria, Mexico, 7 páginas.



Esta obra está publicada bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

TopTamaulipas 2023, Noviembre, 2023, Ciudad Victoria, TAMPS

© 2023 Por los autores.

ISBN XXXXXXXXXXXXX.

1. INTRODUCCIÓN

Los robots de servicio ~~son~~son máquinas autónomas diseñadas con el objetivo de prestar servicio a los humanos fuera del ambiente industrial, convirtiéndose poco a poco en una parte esencial en nuestras vidas. Los podemos encontrar en diversos ámbitos, como en el entretenimiento, limpieza, logística, entre otras soluciones innovadoras ~~+~~[1].

Los vehículos aéreos no tripulados (~~VANT~~) han evolucionado rápidamente y se han convertido en sistemas versátiles capaces de una amplia gama de aplicaciones, desde vigilancia hasta misiones de búsqueda y rescate ~~2; 3; 4~~[2]. Entre ellas, las tareas de exploración en entornos complejos y dinámicos representan un área interesante y desafiante, donde la coordinación efectiva de múltiples VANT se vuelve primordial. Este tema es de creciente importancia a medida que los vehículos aéreos no tripulados continúan transformando ~~industrias distintas áreas~~, incluida la agricultura, el monitoreo ambiental, mantenimiento de infraestructuras (puentes, edificios, líneas eléctricas) y la respuesta a desastres naturales, reduciendo los riesgos y costos asociados con las inspecciones manuales.

Los VANTS capaces de realizar tareas con autonomía generalmente cuentan con mayores capacidades de carga y procesamiento computacional, así como sensores capaces de percibir grandes volúmenes de datos en un tiempo reducido. Estos VANTS se centran en realizar tareas sencillas y estáticas en áreas abiertas con rutas pre-determinadas, o bien, en contextos de operación por control remoto por un usuario. Sin embargo en donde los espacios son estrechos, se optan por el uso de VANTS reducidos, comúnmente llamados Micro-Vehículos Aéreos no tripulados (MAVs). Para aplicaciones complejas, donde se debe responder de manera autónoma con la mínima intervención humana, es decir, que solo se le ordene la tarea que deben realizar y no guiarlos en cada uno de sus movimientos.

Un sistema autónomo de un Vehículo Aéreo no Tripulado (~~VANT~~), consta de tres algoritmos:

- Generación de una representación del entorno
- Evasión de obstáculos
- Planificación de trayectorias

La computadora embebida para un sistema de navegación ~~usados~~ usado en Micro-Vehículos Aéreos son de bajo rendimiento, pero su necesidad de autonomía sigue siendo la misma que un VANT de mayor tamaño. Es por ello que es necesario equiparlos con algoritmos de baja complejidad computacional para los sistemas de navegación.

La necesidad de coordinación entre múltiples VANTS en tareas de exploración, surge debido a las limitaciones individuales en cuanto a la extensión de terreno que pueden cubrir y su desempeño. La

exploración de áreas extensas o peligrosas a menudo exige un enfoque colaborativo, donde los VANTS trabajen juntos para optimizar la asignación de recursos, minimizar la redundancia y mejorar la recopilación y el análisis de datos.

Sin embargo, el camino hacia una coordinación entre múltiples vehículos aéreos no tripulados, presenta diversos ~~de~~ desafíos. Las complejidades de gestionar un grupo de vehículos aéreos no tripulados, navegar en entornos dinámicos y distribuir tareas de forma inteligente son sólo algunas de las cuestiones que exigen nuestra atención. El objetivo del documento es explorar y proponer estrategias para mejorar la coordinación de múltiples VANTS en el contexto de las tareas de exploración.

La exploración de áreas desconocidas, a través de la sinergia de sistemas multi-VANT promete ser una solución innovadora. Al comprender y perfeccionar las estrategias para la coordinación de múltiples vehículos aéreos no tripulados en tareas de exploración, esperamos descubrir nuevas posibilidades, replicar o romper los límites existentes, y en última instancia, avanzar en los campos de la robótica y la exploración.

El presente trabajo de investigación busca resolver las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuáles son los principales desafíos técnicos y operativos que ~~impiden~~ limitan la coordinación eficaz de múltiples vehículos aéreos no tripulados en tareas de exploración?
- ¿Cómo se pueden aprovechar las tecnologías de vanguardia, desde sensores avanzados hasta algoritmos de inteligencia artificial, para superar estos desafíos?
- ¿Cuáles son las implicaciones de una mejor coordinación de múltiples vehículos aéreos no tripulados para diversos sectores, incluida la exploración autónoma en interiores?

Si bien este artículo no presenta resultados en esta etapa, sirve como una exploración de un dominio de investigación en evolución y ~~guía~~ guía para esfuerzos futuros en este campo. Al abordar estos desafíos y ampliar los límites de la tecnología de los vehículos aéreos no tripulados, nos esforzamos por desbloquear nuevas posibilidades para el descubrimiento científico, la gestión ambiental y los esfuerzos humanitarios.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

El despliegue rápido de robots en situaciones de riesgo, búsqueda y rescate ha sido un área ampliamente estudiada en la robótica móvil. ~~Donde existen~~ Existen concursos como el DARPA CHALLENGE, donde los factores como la exploración, planeación y coordinación son clave para lograr los objetivos del reto [5]; ~~donde se han aplicado teorías de grafos para la obtención de la mejor ruta.~~

La dirección en que apunta el estado del arte, se puede atribuir a los avances en tecnología en la última década. Investigadores de diversas áreas, que incluyen las ciencias computacionales y la ingeniería, han contribuido al crecimiento de este campo.

Un enfoque ampliamente adoptado para estudiar regiones específicas implica la utilización de fronteras, que delinean los límites

entre espacios conocidos y desconocidos. Estas fronteras sirven para identificar áreas potencialmente informativas, guiando así eficientemente el proceso de exploración hasta que no se detecten más fronteras, lo que indica la conclusión de la exploración.

Sin embargo, si bien las metodologías basadas en fronteras han demostrado ser efectivas en términos de cobertura de área, a menudo dan como resultado movimientos subóptimos, particularmente cuando se aplican a vehículos aéreos no tripulados. La causa fundamental de esta ineficiencia puede atribuirse principalmente a las limitaciones de las tecnologías sensoriales utilizadas para construir mapas del medio ambiente con fines de exploración. Los sensores comunes equipados en vehículos aéreos no tripulados, como las cámaras RGB-D y estéreo, tienen rangos de detección limitados. En consecuencia, los vehículos aéreos no tripulados se ven obligados a adoptar patrones de vuelo cautelosos para garantizar la seguridad.

Para abordar esta limitación, Cieslewski et al. [6], proponen una estrategia de exploración que genera directivas de velocidad basadas en fronteras recientemente identificadas, con el objetivo de maximizar la velocidad del VANT. Este enfoque demuestra un rendimiento superior en comparación con los métodos tradicionales, pero se centra exclusivamente en las fronteras locales.

Por el contrario, Zhou et al. [7], introducen un enfoque de planificación jerárquica que produce rutas globales eficientes al tiempo que promueve maniobras locales seguras y ágiles para la exploración. Sin embargo, esta estrategia requiere el mantenimiento de un historial de fronteras activas.

En el ámbito de la mejora de la eficiencia de la exploración, se han introducido en la literatura científica varios métodos que implican la cooperación entre múltiples robots, presentados tanto en forma centralizada como descentralizada. Los métodos centralizados suelen incorporar una estación terrestre central responsable de calcular inicialmente un plan integral para múltiples robots, que luego se difunde a los agentes, suponiendo una comunicación fluida. En este sentido, Burgard et al. [8], se esfuerzan por reducir la superposición en áreas exploradas disminuyendo la ganancia de información de una frontera potencial si se asigna otro robot a una frontera separada en su proximidad. Por el contrario, Tian et al. [9], abordan el desafío de la asignación utilizando un problema de vendedores ambulantes múltiples (mTSP por sus siglas en inglés) para asignar a cada agente a una frontera candidata. Mientras tanto, el enfoque propuesto por Morilla-Cabello et al. [10], sobresale en generar caminos eficientes para la reconstrucción 3D. Sin embargo, es importante señalar que este método requiere un sobrevuelo previo del área de interés, lo que la hace inadecuada para la exploración donde no se tiene conocimiento previo del área de interés. Por otro lado, el método descrito por Tian et al. [9], pone un mayor énfasis en la navegación a través de bosques, con un enfoque particular en la estimación y el mapeo colaborativos del estado, en lugar de la planificación de rutas.

No obstante, los sistemas centralizados, por diseño, operan bajo el supuesto de una comunicación confiable a larga distancia. Además, enfrentan desafíos relacionados con la escalabilidad, ya que

la carga de trabajo de la unidad central de procesamiento aumenta con el creciente número de agentes. Por otro lado, los enfoques descentralizados son intrínsecamente más sólidos debido a que no tienen dependencia de comunicación directa. En estos métodos, cada robot puede funcionar independientemente de los demás, lo que ofrece una mayor resiliencia. Sin embargo, esta ventaja tiene el costo de una mayor complejidad en la coordinación de las acciones de los agentes, ya que se limitan a utilizar información local exclusivamente.

Yamauchi [11] presenta una estrategia en la que los robots se mueven hacia la frontera más cercana e intercambian datos de mapas con otros agentes. Sin embargo, este enfoque resulta ineficiente porque puede dar lugar a que varios robots converjan en la misma frontera. Kabir and Lee [12], abordan esta limitación basando su enfoque en la teoría del transporte óptimo, mientras que Yu et al. [13], emplean un campo potencial de múltiples objetivos y múltiples robots para la asignación a diferentes fronteras. Mientras que Corah and Michael [14], asignan robots a grupos de fronteras. Sin embargo, estos métodos se basan en el supuesto de una comunicación estable entre agentes.

El enfoque introducido por Zhou et al. [15], conocido como RACER, tiene como objetivo mitigar estos problemas dividiendo el área de exploración en una cuadrícula y garantizando que los agentes exploren distintas regiones mientras siguen rutas de cobertura. RACER es resistente ante rangos de comunicación limitados, ya que depende de la interacción directa por pares entre robots. Sin embargo, enfrenta desafíos en términos de coordinación subóptima en entornos muy concurridos, ya que supone una distribución uniforme de los obstáculos.

Motivados por estas limitaciones, nuestra investigación introduce una estrategia descentralizada para sistemas de múltiples VANTS, que englobe los componentes necesarios para realizar tareas de exploración en interiores.

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

Desarrollar Uno de los desafíos fundamentales que enfrentamos reside en la capacidad de coordinar múltiples VANT en tareas de exploración y mapeo.

En este contexto, el objetivo general es abordar y resolver este desafío, desarrollando una arquitectura de software descentralizada capaz de resolver los problemas de localización, mapeo, navegación y coordinación multi-VANT en ambientes desconocidos y dinámicos para tareas de exploración en interiores.

Objetivos Particulares

En el marco de esta investigación, establecemos metas concretas que dirigen nuestro trabajo hacia el desarrollo de una estrategia destinada a optimizar la exploración coordinada de un grupo de vehículos aéreos no tripulados.

- Evaluar y comparar diferentes algoritmos de coordinación y planificación de vuelo para la exploración coordinada multi-VANT.
- Elegir la representación del ambiente con menor complejidad computacional.
- Realizar pruebas y simulaciones de la solución propuesta en entornos complejos, analizando métricas como tiempo de exploración, cobertura del área de interés y calidad de los datos recopilados.

Hipótesis

La implementación de una estrategia de exploración coordinada utilizando múltiples vehículos aéreos no tripulados (multi-VANT) en entornos complejos, permitirá obtener mejores resultados en comparación con la exploración individual (mono-VANT). Esta coordinación eficiente se traducirá en una reducción del tiempo y los recursos necesarios para completar la exploración, así como en una mayor cobertura del área de interés. Además, se espera que la exploración coordinada multi-VANT mejore la calidad de los datos recopilados, lo que permitirá tomar decisiones más informadas y eficaces en diversos campos, como la cartografía, la vigilancia, el monitoreo y la respuesta a desastres naturales.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dada un área de interés desconocida en un espacio cerrado que se desea explorar denotada como \mathcal{A} , tal que $\mathcal{A} \subset \mathbb{R}^3$.

Un voxel v que representa el espacio contenido en \mathcal{A} que es obtenido dividiendo recursivamente el área de interés \mathcal{A} en ocho partes de igual tamaño, el voxel puede tomar los valores de libre v_{libre} , ~~ocupado~~, ocupado y desconocido o no explorado de notados como v_{libre} , ~~v_{occ}~~ v_{ocup} , v_{desc} . La región ocupada son obtenidas mediante un sensor basado en un modelo de ocupación probabilístico.

Un conjunto de VANTS denotado como $\mathcal{V} = \{\mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2, \mathcal{V}_3, \dots, \mathcal{V}_n\}$ siendo n el número total de VANTS disponibles y una configuración inicial q cuya cardinalidad es el número de VANTS disponibles denotado como $q = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\}$.

~~Determinar el conjunto de tareas para cada VANT, así como el conjunto de rutas que maximice el área explorada minimizando el tiempo y la energía consumida.~~

La estrategia propuesta debe tomar en cuenta las limitaciones de comunicación, sensores y energía, para distribuir las tareas de exploración entre todos los miembros del equipo de VANTS, así como establecer trayectorias seguras y libres de obstáculos para cada uno de los VANTS.

Para lograr una exploración eficiente y completa con un tiempo y recursos mínimos, el problema requiere la creación de algoritmos y técnicas de optimización.

La función objetivo tomará en cuenta distintos objetivos específicos del problema:

- Maximizar la cobertura del área explorada

- Minimizar el tiempo total requerido para cubrir el área de interés
- Asegurar la consistencia de la información recolectada y fusionada en un único mapa, compartido entre todos los VANTS

5. METODOLOGÍA

Siguiendo los objetivos anteriores, la metodología propuesta se divide en tres etapas, que ~~comenzaron~~ comenzaron en septiembre del 2023 y terminarán en agosto de 2024. A continuación se detallan cada una de las actividades que se plantean realizar en cada etapa.

Etapas 1. Análisis y diseño de la solución propuesta

Esta etapa comprende la revisión de la literatura de manera más completa, que permita contar con la información necesaria para la elección de los mejores algoritmos para abordar cada una de las problemáticas asociadas con la coordinación de múltiples robots en tareas de exploración, detectando áreas de oportunidad para el desarrollo de una estrategia descentralizada de coordinación.

Etapas 2. Implementación y validación

Esta etapa se centra en el desarrollo e implementación del diseño de la arquitectura de software para la coordinación multi-VANT, utilizando una herramienta de simulación de robots de libre acceso, cumpliendo estándares de modularidad de diseño.

Etapas 3. Evaluación experimental, resultados y conclusiones

Partiendo del prototipo y las simulaciones desarrolladas en la etapa anterior, en esta etapa se realizan todas las actividades relacionadas con la evaluación, compilación y análisis de los resultados.

6. ALGORITMOS

Desarrollar una arquitectura para múltiples robots implica establecer un plan de toma de decisiones y definir un marco de interacción entre los distintos robots, lo cual ~~afecta~~ afecta la configuración de cada robot individual, en donde las interacciones entre robots pueden tener lugar en diferentes niveles.

Planificación de trayectorias

La planificación de trayectorias para múltiples VANTS implica diseñar algoritmos y estrategias que permitan a cada VANT determinar la ruta óptima para cumplir con los objetivos de la misión, maximizando la eficiencia en términos de tiempo y recursos. Existen diferentes tipos de planificadores de trayectorias que se utilizan en el contexto de múltiples VANTS.

- Planificadores basados en algoritmos de búsqueda: Estos planificadores utilizan algoritmos de búsqueda clásicos, como A* ~~RRT~~ RRT [16], RRT [17] o RRT* [18], para generar trayectorias seguras y óptimas para cada VANT.
- Planificadores basados en optimización [19]: Estos planificadores plantean la generación de trayectorias como un problema de optimización, donde se busca encontrar la mejor

trayectoria según criterios como minimizar el tiempo de vuelo, reducir el consumo de energía o maximizar la cobertura del área de interés.

- Planificadores basados en aprendizaje por refuerzo [20]: En este enfoque, se utilizan algoritmos de aprendizaje por refuerzo para enseñar a los VANTS a seleccionar las acciones adecuadas para alcanzar los objetivos de la misión. A través de la interacción con el entorno y la retroalimentación de recompensas, los VANTS mejoran su capacidad de planificación de trayectorias de forma autónoma.
- Planificadores basados en enjambres [21,22,23]: Estos planificadores se inspiran en los comportamientos observados en la naturaleza, como el vuelo en formación de las aves o el comportamiento de enjambre de las abejas. Mediante la coordinación y el seguimiento de patrones de vuelo predefinidos, los VANTS evitan colisiones y logran un rendimiento colectivo eficiente.

Mapeo

La generación de mapas en 3D juega un papel fundamental en la navegación autónoma, permitiendo su desplazamiento seguro y eficiente en entornos complejos. Mediante el uso de sensores como lidar y cámaras, los VANTS capturan datos detallados del entorno, lo que les permite realizar una reconstrucción tridimensional precisa. Estos datos tridimensionales son utilizados para crear mapas que representan la estructura y los obstáculos del entorno en tiempo real. La construcción de mapas 3D para la navegación autónoma de VANTS implica técnicas avanzadas de procesamiento de datos y algoritmos sofisticados que fusionan y clasifican la información capturada por los sensores, generando una representación confiable y precisa del entorno tridimensional. Existen diversas técnicas empleadas en la generación de mapas en el ámbito de la robótica y la navegación autónoma.

- Mapeo basado en cuadrículas (grid-based mapping) [24]: Esta aproximación divide el espacio del entorno en cuadrículas y asigna a cada celda un valor, indicando si está ocupada o libre. Los algoritmos de mapeo basado en cuadrículas, como Occupancy Grid Mapping, actualizan y mantienen un mapa de ocupación en tiempo real utilizando mediciones de los sensores para determinar la ocupación de las celdas.
- Mapeo basado en características (feature-based mapping) [25]: Esta estrategia se basa en la detección y seguimiento de características distintivas (landmarks) del entorno, como esquinas o características visuales. Los algoritmos de mapeo basado en características emplean técnicas de extracción y emparejamiento de características para construir y actualizar un mapa basado en la ubicación y descripción de estas características.
- Diagrama de Voronoi [26]: El diagrama de Voronoi es una estructura matemática que divide el espacio en regiones basadas en la proximidad a un conjunto de puntos de referencia. Los algoritmos de mapeo basados en el diagrama de Voronoi utilizan esta estructura para representar el entorno y facilitar la navegación a través de la información sobre la geometría del diagrama.

- Mapeo basado en octree [27]: Esta técnica divide el espacio del entorno en una estructura jerárquica de octantes tridimensionales. Cada octante puede ser etiquetado como ocupado o libre, permitiendo así una representación eficiente y detallada.

Evación de obstáculos

La capacidad de esquivar obstáculos desempeña un papel fundamental en la navegación autónoma, ya que les permite evitar colisiones y mantener un vuelo seguro. Al contar con un VANT equipado con una variedad de sensores como lidar y cámaras, que les permiten detectar y comprender el entorno en tiempo real. Mediante el uso de algoritmos de detección y seguimiento de objetos, los VANTS pueden identificar diferentes obstáculos, desde edificios hasta árboles o personas. Utilizando esta información, los algoritmos de evasión de obstáculos analizan y determinan rutas seguras y viables para evitar los obstáculos detectados. Estos algoritmos emplean técnicas avanzadas de planificación de movimientos y toman decisiones rápidas y precisas para modificar la trayectoria del VANT y asegurar una navegación fluida. Existen diversos algoritmos empleados para evitar obstáculos en VANTS.

- Algoritmos de respuesta reactiva [28]: Estos algoritmos se basan en la detección en tiempo real de obstáculos y generan maniobras de evasión de manera reactiva. Utilizan sensores y técnicas de percepción del entorno para identificar obstáculos y calcular trayectorias alternativas que eviten cualquier colisión.
- Algoritmos de planificación de ruta [29]: Estos algoritmos planifican trayectorias de vuelo que evitan áreas con obstáculos conocidos o detectados. Utilizan técnicas de planificación de caminos y buscan rutas seguras y eficientes basándose en los datos del entorno y los objetivos de navegación.
- Algoritmos de aprendizaje automático [30]: Estos algoritmos utilizan técnicas de aprendizaje automático para mejorar la capacidad de evasión de obstáculos de los VANTS. Pueden ser entrenados con datos recopilados en situaciones de evasión y aprender patrones y estrategias para evitar colisiones.

Cabe destacar que ~~estos son solo~~ éstos son sólo algunos ejemplos de los algoritmos utilizados para la evasión de obstáculos en VANTS y la elección del algoritmo depende de factores como el entorno ~~de~~ vuelo, los sensores disponibles y los objetivos específicos.

Coordinación

La armonización y eficiencia en un sistema multi-VANT es fundamental para lograr el funcionamiento óptimo de múltiples VANTS en una misión conjunta. Dentro de este tipo de sistemas, los VANTS deben establecer comunicación y colaboración mutua para realizar tareas complejas de manera coordinada. Esto implica intercambiar datos como la ubicación y el estado de cada VANT, y tomar decisiones conjuntas basadas en objetivos compartidos. Los algoritmos de coordinación proveen un marco de trabajo que permite a los VANTS planificar y distribuir sus tareas de forma eficiente, evitando colisiones y optimizando el aprovechamiento de los recursos disponibles.

- Comunicación e intercambio de información [31]: Los VANTS pueden establecer canales de comunicación para compartir

información relevante entre sí. Esta información incluye la posición, velocidad, estado de la batería y objetivos asignados. La comunicación bidireccional permite que los VANTS se mantengan informados y coordinen sus acciones en tiempo real.

- Planificación y asignación de tareas [32]: Los VANTS pueden hacer uso de algoritmos de planificación para asignar y distribuir tareas entre ellos. Estos algoritmos consideran los recursos disponibles, los objetivos individuales y colectivos, así como las restricciones y prioridades. La planificación colaborativa y la asignación eficiente de tareas garantizan una distribución equitativa del trabajo y una óptima utilización de los recursos.
- Sincronización del comportamiento [33]: Los VANTS pueden adoptar estrategias para sincronizar sus acciones y movimientos. Esto se logra mediante algoritmos que ajustan la velocidad, altitud, rumbo y otros parámetros de vuelo para mantener formaciones apropiadas y evitar colisiones. La sincronización del comportamiento asegura un vuelo coordinado y fluido.
- Control centralizado o distribuido [34]: Según la aplicación y el nivel de autonomía deseado, se puede optar por un control centralizado o distribuido. En el control centralizado, un VANT líder toma decisiones y coordina las acciones de los demás VANTS. En el control distribuido, los VANTS toman decisiones de manera autónoma, pero se comunican y colaboran para mantener la coordinación.

7. RESULTADOS ESPERADOS Y ANÁLISIS

Se espera que los algoritmos de coordinación en tareas de exploración de múltiples VANTS produzcan mejoras significativas en la eficiencia, cobertura y adaptabilidad de la exploración. El siguiente análisis proporciona una visión general de los resultados esperados y sus implicaciones.

Porcentaje de cobertura de exploración

Una de las principales métricas de desempeño es el porcentaje de cobertura de exploración, que representa la proporción del área de exploración cubierta con éxito por el sistema multi-VANTS. Se prevé que la aplicación de algoritmos de coordinación avanzados, conducirá a un aumento notable en el porcentaje de cobertura.

- Análisis comparativo de la cobertura alcanzada por los algoritmos de coordinación propuestos frente a los enfoques en el estado del arte.
- Prueba de la adaptabilidad a terrenos variables y dinámicos.
- Identificación de áreas con mejor cobertura debido a los mecanismos de priorización.

Utilización y eficiencia de recursos

La utilización eficiente de los recursos es crucial en las tareas de exploración de múltiples VANTS para extender la duración de la misión y optimizar la recopilación de datos. Los resultados esperados se centrarán en la utilización de recursos, incluida la energía, el tiempo de los sensores y el almacenamiento de datos.

- Evaluación comparativa del consumo de recursos entre algoritmos de coordinación avanzados y métodos tradicionales.

- Evaluación de la adaptabilidad de algoritmos a diferentes limitaciones de recursos y objetivos de misión.
- Identificación de la estrategia eficiente en el uso de recursos que prolonguen la duración de la misión y la calidad de los datos al mismo tiempo que conservan la energía y el almacenamiento.

Toma de decisiones en tiempo real y evasión de obstáculos

Los sistemas multi-VANT a menudo enfrentan desafíos a la hora de tomar decisiones en tiempo real, como evitar obstáculos y planificar rutas. Se espera que las solución propuesta muestre capacidades de toma de decisiones.

- Análisis comparativo de la velocidad y eficiencia en la toma de decisiones entre algoritmos avanzados y enfoques tradicionales.
- Evaluación de mecanismos de evasión de obstáculos en tiempo real, especialmente en entornos no estructurados e impredecibles.

El examen de los resultados esperados permitirá evaluar la efectividad y la viabilidad práctica de los algoritmos de coordinación propuestos en las tareas de exploración de múltiples VANTS. Los descubrimientos proporcionarán fundamentos para mejoras y usos adicionales en contextos de exploración con múltiples VANTS.

8. CONCLUSIONES

En conclusión, la incesante expansión de la tecnología de los vehículos aéreos no tripulados (VANTS) está brindando a la humanidad oportunidades incomparables para utilizarlos en tareas de exploración y descubrimiento de vigilancia. Nuestro artículo busca ampliar el creciente cuerpo de conocimientos mediante la investigación de estrategias para la coordinación de múltiples VANTS en tareas de exploración. A través de marcos teóricos, diseño de algoritmos y metodologías propuestas, aspiramos a allanar el camino para avances innovadores en este campo. Al fomentar la innovación en la coordinación de múltiples VANTS, esperamos contribuir a la transformación de las industrias y el avance de la comprensión científica.

Los resultados y análisis esperados indican las perspectivas prometedoras de esta estrategia, incluyendo mayores niveles de cobertura y una utilización eficiente de los recursos. Aunque existen desafíos y limitaciones inherentes a las complejidades de las tareas reales de exploración, abordar estos desafíos es una tarea continua para la comunidad investigadora, brindando una dirección clara para futuras mejoras y adaptaciones.

Como investigadores, ingenieros y exploradores, nos encontramos en el umbral de una nueva era en las tareas de exploración. Estas estrategias son herramientas en nuestras manos, listas para moldear el futuro de la exploración. A través de la investigación, la experimentación y el compromiso constante para superar los desafíos, podemos garantizar que la coordinación de múltiples VANTS juegue un papel fundamental en abordar los problemas más urgentes del mundo.

REFERENCIAS

- [1] Intel Ed. What are service robots?, Ago 2023. URL <https://www.intel.la/content/www/xl/es/robotics/service-robot.html>.
- [2] Frank E. Schneider and Dennis Wildermuth. Assessing the search and rescue domain as an applied and realistic benchmark for robotic systems. In *2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC)*. IEEE, May 2016. doi: 10.1109/carpathiancc.2016.7501177. URL <https://doi.org/10.1109/carpathiancc.2016.7501177>.
- [3] Michael Jones, Soufiene Djahel, and Kristopher Welsh. Path-planning for unmanned aerial vehicles with environment complexity considerations: A survey. *ACM Comput. Surv.*, 55(11), feb 2023. ISSN 0360-0300. doi: 10.1145/3570723. URL <https://doi.org/10.1145/3570723>.
- [4] Sujata Sharma and Ritu Tiwari. A survey on multi robots area exploration techniques and algorithms. In *2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT)*. IEEE, March 2016. doi: 10.1109/icctict.2016.7514570. URL <https://doi.org/10.1109/icctict.2016.7514570>.
- [5] Tomáš Rouček, Martin Pecka, Petr Čížek, Tomáš Petříček, Jan Bayer, Vojtěch Šalanský, Teymur Azayev, Daniel Heřt, Matěj Petrlik, Tomáš Báča, Vojtěch Spurný, Vít Krátký, Pavel Petráček, Dominic Baril, Maxime Vaidis, Vladimír Kubelka, François Pomerleau, Jan Faigl, Karel Zimmermann, Martin Saska, Tomáš Svoboda, and Tomáš Krajník. System for multi-robotic exploration of underground environments CTU-CRAS-NORLAB in the DARPA subterranean challenge. *Field Robotics*, 2(1):1779–1818, March 2022. doi: 10.55417/fr.2022055. URL <https://doi.org/10.55417/fr.2022055>.
- [6] Titus Cieslewski, Elia Kaufmann, and Davide 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.
- [7] Boyu Zhou, Yichen Zhang, Xinyi Chen, and Shaojie Shen. Fuel: Fast uav exploration using incremental frontier structure and hierarchical planning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2):779–786, 2021. doi: 10.1109/LRA.2021.3051563.
- [8] W. Burgard, M. Moors, C. Stachniss, and F.E. Schneider. Coordinated multi-robot exploration. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(3):376–386, 2005. doi: 10.1109/TRO.2004.839232.
- [9] Yulun Tian, Katherine Liu, Kyel Ok, Loc Tran, Danette Allen, Nicholas Roy, and Jonathan P. How. Search and rescue under the forest canopy using multiple uavs. *The International Journal of Robotics Research*, 39(10-11):1201–1221, 2020. doi: 10.1177/0278364920929398. URL <https://doi.org/10.1177/0278364920929398>.
- [10] David Morilla-Cabello, Luca Bartolomei, Lucas Teixeira, Eduardo Montijano, and Margarita Chli. Sweep-your-map: Efficient coverage planning for aerial teams in large-scale environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(4):10810–10817, 2022. doi: 10.1109/LRA.2022.3194686.
- [11] 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.
- [12] Rabiul Hasan Kabir and Kooktae Lee. Efficient, decentralized, and collaborative multi-robot exploration using optimal transport theory. In *2021 American Control Conference (ACC)*, pages 4203–4208, 2021. doi: 10.23919/ACC50511.2021.9483227.
- [13] Jincheng Yu, Jianming Tong, Yuanfan Xu, Zhilin Xu, Haolin Dong, Tianxiang Yang, and Yu Wang. Smmr-explore: Submap-based multi-robot exploration system with multi-robot multi-target potential field exploration method. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 8779–8785, 2021. doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561328.
- [14] Micah Corah and Nathan Michael. Volumetric objectives for multi-robot exploration of three-dimensional environments. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 9043–9050, 2021. doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561226.
- [15] Boyu Zhou, Hao Xu, and Shaojie 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.
- [16] Peter E. Hart, Nils J. Nilsson, and Bertram Raphael. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2):100–107, 1968. doi: 10.1109/TSSC.1968.300136.
- [17] Yucong Lin and Srikanth Saripalli. Sampling-based path planning for uav collision avoidance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(11):3179–3192, 2017. doi: 10.1109/TITS.2017.2673778.
- [18] Jun Guo, Wei Xia, Xiaoxuan Hu, and Huawei Ma. Feedback rrt* algorithm for uav path planning in a hostile environment. *Computers and Industrial Engineering*, 174:108771, December 2022. doi: 10.1016/j.cie.2022.108771. URL <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108771>.
- [19] Amylia Ait Saadi, Assia Soukane, Yassine Meraihi, Asma Benmessaoud Gabis, Seyedali Mirjalili, and Amar Ramdane-Cherif. UAV path planning using optimization approaches: A survey. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(6):4233–4284, April 2022. doi: 10.1007/s11831-022-09742-7. URL <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09742-7>.

- [20] Julius Rücker, Liren Jin, and Marija Popović. Adaptive informative path planning using deep reinforcement learning for uav-based active sensing, 2021. URL <https://arxiv.org/abs/2109.13570>.
- [21] Vincent Roberge, Mohammed Tarbouchi, and Gilles Labonte. Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time uav path planning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1):132–141, 2013. doi: 10.1109/TII.2012.2198665.
- [22] Xue Yu, Wei-Neng Chen, Tianlong Gu, Huaqiang Yuan, Huaxiang Zhang, and Jun Zhang. Aco-a*: Ant colony optimization plus a* for 3-d traveling in environments with dense obstacles. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 23(4):617–631, 2019. doi: 10.1109/TEVC.2018.2878221.
- [23] J. Karimi and Seid H. Pourtakdoust. Optimal maneuver-based motion planning over terrain and threats using a dynamic hybrid pso algorithm. *Aerospace Science and Technology*, 26(1):60–71, 2013. ISSN 1270-9638. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2012.02.014>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963812000466>.
- [24] Bing Han, Tengqiang Qu, Xiaochong Tong, Jie Jiang, Sisi Zlatanova, Haipeng Wang, and Chengqi Cheng. Grid-optimized UAV indoor path planning algorithms in a complex environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 111:102857, July 2022. doi: 10.1016/j.jag.2022.102857. URL <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102857>.
- [25] Shreya Singh and P.B. Sujit. Landmarks based path planning for UAVs in GPS-denied areas. *IFAC-PapersOnLine*, 49(1):396–400, 2016. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.03.086. URL <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.03.086>.
- [26] Y. Volkan Pehlivanoglu. A new vibrational genetic algorithm enhanced with a voronoi diagram for path planning of autonomous UAV. *Aerospace Science and Technology*, 16(1):47–55, January 2012. doi: 10.1016/j.ast.2011.02.006. URL <https://doi.org/10.1016/j.ast.2011.02.006>.
- [27] Meng shun Yuan, Tong le Zhou, and Mou Chen. Improved lazy theta* algorithm based on octree map for path planning of UAV. *Defence Technology*, 23:8–18, May 2023. doi: 10.1016/j.dt.2022.01.006. URL <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.01.006>.
- [28] Amit K. Tripathi, Ramsingh G. Raja, and Radhakant Padhi. Reactive collision avoidance of UAVs with stereovision camera sensors using UKF. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(1):1119–1125, 2014. doi: 10.3182/20140313-3-in-3024.00171. URL <https://doi.org/10.3182/20140313-3-in-3024.00171>.
- [29] Jawad N. Yasin, Sherif A. S. Mohamed, Mohammad-Hashem Haghbayan, Jukka Heikkonen, Hannu Tenhunen, and Juha Plosila. Unmanned aerial vehicles (uavs): Collision avoidance systems and approaches. *IEEE Access*, 8:105139–105155, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000064.
- [30] Subhranil Das and Sudhansu Kumar Mishra. A machine learning approach for collision avoidance and path planning of mobile robot under dense and cluttered environments. *Computers and Electrical Engineering*, 103:108376, October 2022. doi: 10.1016/j.compeleceng.2022.108376. URL <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108376>.
- [31] Qiannan Cui, Peizhi Liu, Jinhua Wang, and Jing Yu. Brief analysis of drone swarms communication. In *2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*, pages 463–466, 2017. doi: 10.1109/ICUS.2017.8278390.
- [32] Sabitri Poudel and Sangman Moh. Task assignment algorithms for unmanned aerial vehicle networks: A comprehensive survey. *Vehicular Communications*, 35: 100469, June 2022. doi: 10.1016/j.vehcom.2022.100469. URL <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2022.100469>.
- [33] Alexandros Giagkos, Elio Tuci, Myra S. Wilson, and Philip B. Charlesworth. UAV flight coordination for communication networks: genetic algorithms versus game theory. *Soft Computing*, 25(14):9483–9503, May 2021. doi: 10.1007/s00500-021-05863-6. URL <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05863-6>.
- [34] Denis Fabricio Sousa De Sá and João Viana Da Fonseca Neto. Multi-agent collision avoidance system based on centralization and decentralization control for uav applications. *IEEE Access*, 11:7031–7042, 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3235595.