

# Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Luis Alberto Ballado Aradias

CINVESTAV UNIDAD TAMAULIPAS

Cd. Victoria, Tamaulipas - 21 de agosto de 2023

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Resumen



† Drone Inspections Based on Best Use Cases

<https://enterprise-insights.dji.com/blog/complete-guide-to-drone-inspections>

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto**
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Descripción del proyecto

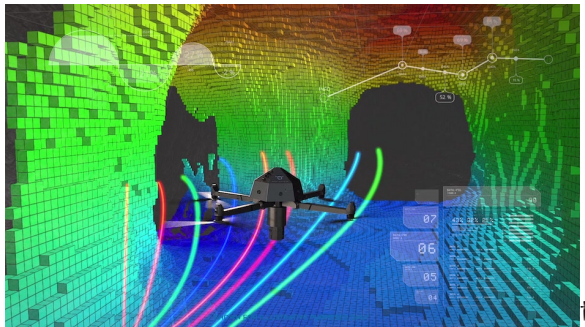
- Coordinación eficiente para la exploración multi-VANT



<sup>†</sup>Hardware in the loop framework proposal for a semi-autonomous car architecture in a closed route environment Curiel-Ramirez et al. (2019)

# Descripción del proyecto

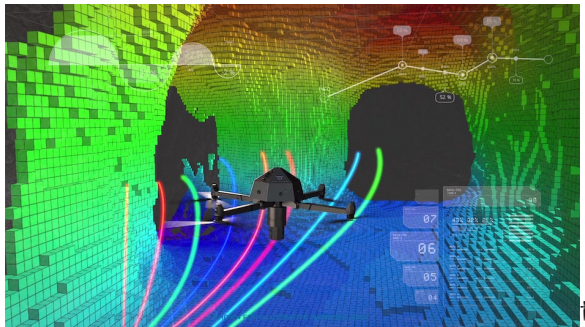
- Coordinación eficiente para la exploración multi-VANT
- Optimizar la cobertura en entornos complejos



<sup>†</sup>Hardware in the loop framework proposal for a semi-autonomous car architecture in a closed route environment Curiel-Ramirez et al. (2019)

# Descripción del proyecto

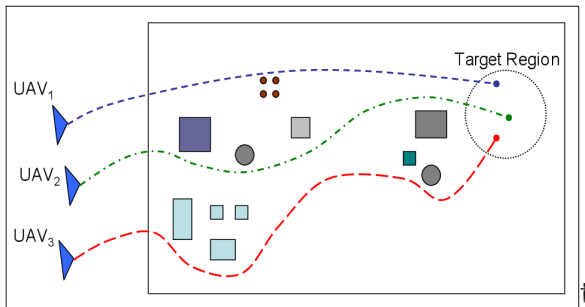
- Coordinación eficiente para la exploración multi-VANT
- Optimizar la cobertura en entornos complejos
- Toma de decisiones colaborativa y asignación de tareas



<sup>†</sup>Hardware in the loop framework proposal for a semi-autonomous car architecture in a closed route environment Curiel-Ramirez et al. (2019)

# Descripción del proyecto

- Coordinación eficiente para la exploración multi-VANT
- Optimizar la cobertura en entornos complejos
- Toma de decisiones colaborativa y asignación de tareas
- Evasión y coordinación de obstáculos en tiempo real



<sup>†</sup>Hardware in the loop framework proposal for a semi-autonomous car architecture in a closed route environment Curiel-Ramirez et al. (2019)



# Descripción del proyecto

- Coordinación eficiente para la exploración multi-VANT
- Optimizar la cobertura en entornos complejos
- Toma de decisiones colaborativa y asignación de tareas
- Evasión y coordinación de obstáculos en tiempo real
- Fusión de información (sensores y navegación)

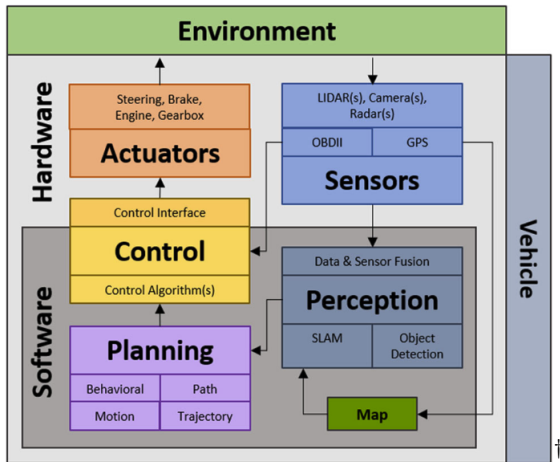


<sup>†</sup>Hardware in the loop framework proposal for a semi-autonomous car architecture in a closed route environment Curiel-Ramirez et al. (2019)

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto**
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Arquitectura híbrida



† Hardware in the loop framework proposal for a semi-autonomous car architecture in a closed route environment  
Curiel-Ramirez et al. (2019)

# Multi-robots

## Beneficios coordinación multi-VANT

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



† Hardware in the loop framework proposal for a semi-autonomous car architecture in a closed route environment Curiel-Ramirez et al. (2019)

# Panorama Planificación de trayectorias

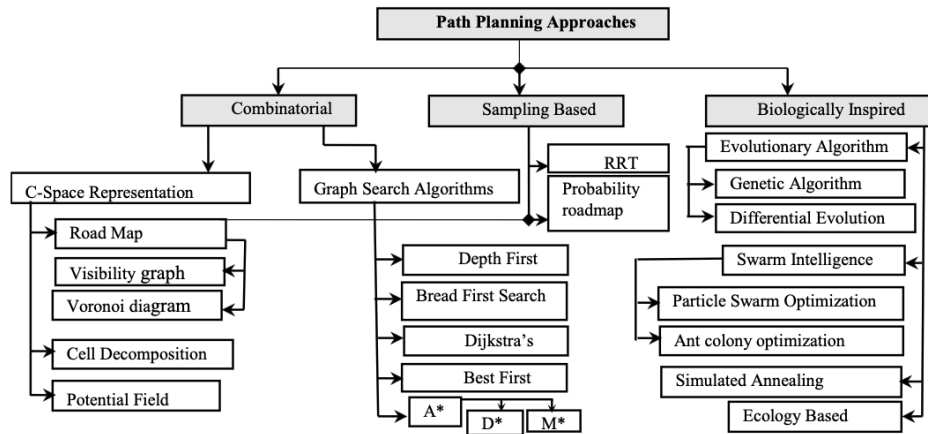


Figura: Clasificación del enfoque de planificación de rutas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Different Cell Decomposition Path Planning Methods for Unmanned Air Vehicles - A Review Debnath et al. (2020)

# Representación del ambiente 3D

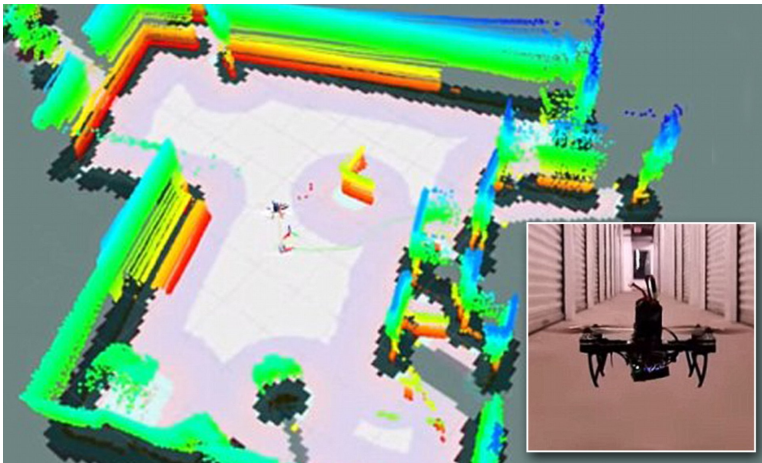


Figura: Mapa probabilístico 3D<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Cooperación en robots heterogeneos

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema**
- 5 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Planteamiento del problema

Desarrollar una estrategia de exploración multi-VANT que reduzca el tiempo total de exploración dado un conjunto de  $\mathcal{V}$  vehículos aéreos no tripulados. Las capacidades limitadas de energía y sensores abordo de los VANTS les permiten navegar de forma autónoma. Teniendo en cuenta sus limitaciones de energía y la necesidad de una exploración eficiente, el objetivo es determinar la trayectoria, las rutas y la asignación de tareas óptimas ó sub-óptimas.



# Planteamiento del problema

Desarrollar una estrategia de exploración multi-VANT que reduzca el tiempo total de exploración dado un conjunto de  $\mathcal{V}$  vehículos aéreos no tripulados. Las capacidades limitadas de energía y sensores abordo de los VANTS les permiten navegar de forma autónoma. Teniendo en cuenta sus limitaciones de energía y la necesidad de una exploración eficiente, el objetivo es determinar la trayectoria, las rutas y la asignación de tareas óptimas ó sub-óptimas.

## Retos multi-VANT

- Coordinación - Establecer comunicación efectiva entre los múltiples VANTS. Intercambiar información relevante. Tener baja latencia en su comunicación.
- Planificación - Los VANTS deben coordinar sus movimientos para evitar colisiones y lograr una cobertura eficiente del área objetivo.
- Asignación de tareas - Se busca evitar la duplicación de esfuerzos optimizando el uso de recursos disponibles.

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Objetivos generales y específicos del proyecto**
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Objetivos generales y específicos del proyecto

## ① General

Diseñar una arquitectura de software descentralizada para implementar una estrategia multi-VANT capaz de resolver los problemas de localización y coordinación en ambientes desconocidos y dinámicos para tareas de exploración en interiores.

# Objetivos generales y específicos del proyecto

## ① General

Diseñar una arquitectura de software descentralizada para implementar una estrategia multi-VANT capaz de resolver los problemas de localización y coordinación en ambientes desconocidos y dinámicos para tareas de exploración en interiores.

## ② Particulares

- Diseño de solución en base a los algoritmos reportados en la literatura.

# Objetivos generales y específicos del proyecto

## ① General

Diseñar una arquitectura de software descentralizada para implementar una estrategia multi-VANT capaz de resolver los problemas de localización y coordinación en ambientes desconocidos y dinámicos para tareas de exploración en interiores.

## ② Particulares

- Diseño de solución en base a los algoritmos reportados en la literatura.
- Valoración propuesta (simulación de propuesta).

# Objetivos generales y específicos del proyecto

## ① General

Diseñar una arquitectura de software descentralizada para implementar una estrategia multi-VANT capaz de resolver los problemas de localización y coordinación en ambientes desconocidos y dinámicos para tareas de exploración en interiores.

## ② Particulares

- Diseño de solución en base a los algoritmos reportados en la literatura.
- Valoración propuesta (simulación de propuesta).
- Comparación y análisis (escalabilidad, robustez y recursos computacionales).

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 6 Metodología**
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Metodología/Cronograma

|   | Cuatrimestre 1 <sup>a</sup> |   |   |   | Cuatrimestre 2 <sup>b</sup> |   |   |   | Cuatrimestre 3 <sup>c</sup> |   |   |   |
|---|-----------------------------|---|---|---|-----------------------------|---|---|---|-----------------------------|---|---|---|
|   | 1                           | 2 | 3 | 4 | 1                           | 2 | 3 | 4 | 1                           | 2 | 3 | 4 |
| <b>Etapas</b>   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E1.A1. Revisión literatura relevante<sup>d</sup></b> |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E1.A2. Selección de algoritmos</b>                   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E1.A3. Diseño de la arquitectura de software</b>     |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E1.A4. Documentación Etapa 1</b>                     |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E1.A5. Revisión de tesis Etapa 1</b>                 |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>Etapas</b>   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E2.A1. Selección Simulador</b>                       |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E2.A2. Visualización de datos<sup>e</sup></b>        |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E2.A3. Control de desplazamientos<sup>f</sup></b>    |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E2.A4. Desarrollo de algoritmo de exploración</b>    |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E2.A5. Implementación y simulación<sup>g</sup></b>   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E2.A6. Desarrollo de coordinación</b>                |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E2.A7. Implementación y simulación<sup>h</sup></b>   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E2.A8. Documentación Etapa 2</b>                     |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E2.A9. Revisión de tesis Etapa 2</b>                 |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>Etapas</b>   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E3.A1. Experimentación de solución</b>               |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E3.A2. Recopilación resultados</b>                   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E3.A3. Documentación Etapa 3</b>                     |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E3.A4. Revisión de tesis</b>                         |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E3.A5. Divulgación<sup>i</sup></b>                   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |
| <b>E3.A6. Proceso de titulación</b>                     |                             |   |   |   |                             |   |   |   |                             |   |   |   |

<sup>a</sup>Correspondiente a los meses de Septiembre, Octubre, Noviembre, Diciembre del 2023

<sup>b</sup>Correspondiente a los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril del 2024

<sup>c</sup>Correspondiente a los meses de Mayo, Junio, Julio, Agosto del 2024

<sup>d</sup>Revisión de alertas de trabajos relacionados sobre la exploración y colaboración multi-VANT, evaluación de aptitudes en trabajos recientes

<sup>e</sup>Visualización Octomap en Simulador

<sup>f</sup>Un VANT

<sup>g</sup>Se considera un solo agente que resuelva la tarea de exploración autónoma con evasión de obstáculos

<sup>h</sup>Se consideran los múltiples-VANT que resuelva la tarea de exploración autónoma con evasión de obstáculos

<sup>i</sup>Abierto a espacios de divulgación de acuerdo con las actividades de retribución social



# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte**
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Estado del Arte

| REFERENCIA                     | REPRESENTACION            | BUSQUEDA                | Control de trayectoria       |
|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Cieslewski et al. (2017)[2]    | Octomap                   | Basado en fronteras     | Control directo de velocidad |
| Usenko et al. (2017)[14]       | Cuadrícula egocéntrica    | Offline RRT*            | Curvas de Bezier             |
| Mohta et al. (2017)[10]        | mapa 3D-Local y 2D-Global | A*                      | Progración cuadrática        |
| Lin et al. (2017)[8]           | 3D voxel array TSDF       | A*                      | Optimización cuadrática      |
| Papachristos et al. (2017)[12] | Octomap                   | NBVP                    | Control directo de velocidad |
| Oleynikova et al. (2018)[11]   | Voxel Hashing TSDF        | NBVP                    | Optimización cuadrática      |
| Gao et al. (2018)[7]           | Mapa de cuadrícula        | Método de marcha rápida | Optimización cuadrática      |

| REFERENCIA                     | MAPA                           | Planificador de rutas | Control trayectoria          |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Florence et al. (2018)[6]      | Busqueda basada en visibilidad | 2D A*                 | Control MPC                  |
| Selin et al. (2019)[13]        | Octomap                        | NBVP                  | Control directo de velocidad |
| McGuire et al. (2019)[9]       | NA                             | SGBA                  | Control directo de velocidad |
| Collins and Michael (2020)[3]  | KD Tree + Mapa en Voxel        | Búsqueda en Grafo     | Movimientos suaves           |
| Campos-Macías et al. (2020)[1] | Octree                         | RRT                   | Basado en contornos          |
| Zhou et al. (2023)[15]         | Octomap HGrid                  | NBVP                  | Control directo de velocidad |

# Contenido

- 1 Resumen
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Antecedentes y motivación para el proyecto
- 4 Planteamiento del problema
- 5 Objetivos generales y específicos del proyecto
- 6 Metodología
- 7 Estado del Arte
- 8 Contribuciones o resultados esperados

# Contribuciones o resultados esperados

## ① Documentación y códigos liberados

- Algoritmo para la exploración multi-VANT
- Algoritmo para la planificación de rutas multi-VANT
- Protocolo de comunicación y coordinación descentralizados multi-VANT que formaran parte de la arquitectura de software

# Contribuciones o resultados esperados

- 1 Documentación y códigos liberados
  - Algoritmo para la exploración multi-VANT
  - Algoritmo para la planificación de rutas multi-VANT
  - Protocolo de comunicación y coordinación descentralizados multi-VANT que formaran parte de la arquitectura de software
- 2 Validación de la solución en un simulador

# Contribuciones o resultados esperados

- ① Documentación y códigos liberados
  - Algoritmo para la exploración multi-VANT
  - Algoritmo para la planificación de rutas multi-VANT
  - Protocolo de comunicación y coordinación descentralizados multi-VANT que formaran parte de la arquitectura de software
- ② Validación de la solución en un simulador
- ③ Tesis impresa

# Bibliografía I

- L. Campos-Macías, R. Aldana-López, R. Guardia, J. I. Parra-Vilchis, and D. Gómez-Gutiérrez. Autonomous navigation of MAVs in unknown cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 38(2):307–326, may 2020. doi: 10.1002/rob.21959. URL <https://doi.org/10.1002/rob.21959>.
- T. Cieslewski, E. Kaufmann, and D. 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.
- M. Collins and N. Michael. Efficient planning for high-speed mav flight in unknown environments using online sparse topological graphs. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 11450–11456, 2020. doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9197167.
- L. A. Curiel-Ramirez, R. A. Ramirez-Mendoza, J. Izquierdo-Reyes, M. R. Bustamante-Bello, and S. A. Navarro-Tuch. Hardware in the loop framework proposal for a semi-autonomous car architecture in a closed route environment. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJDeM)*, 13(4): 1647–1658, Oct. 2019. doi: 10.1007/s12008-019-00619-x. URL <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00619-x>.
- 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).
- P. R. Florence, J. Carter, J. Ware, and R. Tedrake. Nanomap: Fast, uncertainty-aware proximity queries with lazy search over local 3d data, 2018.
- F. Gao, W. Wu, Y. Lin, and S. Shen. Online safe trajectory generation for quadrotors using fast marching method and bernstein basis polynomial. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 344–351, 2018. doi: 10.1109/ICRA.2018.8462878.
- Y. Lin, F. Gao, T. Qin, W. Gao, T. Liu, W. Wu, Z. Yang, and S. Shen. Autonomous aerial navigation using monocular visual-inertial fusion. *Journal of Field Robotics*, 35(1):23–51, July 2017. doi: 10.1002/rob.21732. URL <https://doi.org/10.1002/rob.21732>.
- K. N. McGuire, C. D. Wagter, K. Tuyls, H. J. Kappen, and G. C. H. E. de Croon. Minimal navigation solution for a swarm of tiny flying robots to explore an unknown environment. *Science Robotics*, 4(35):eaaw9710, 2019. doi: 10.1126/scirobotics.aaw9710. URL <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/scirobotics.aaw9710>.
- K. Mohta, M. Watterson, Y. Mulgaonkar, S. Liu, C. Qu, A. Makineni, K. Saulnier, K. Sun, A. Zhu, J. Delmerico, K. Karydis, N. Atanasov, G. Loianno, D. Scaramuzza, K. Daniilidis, C. J. Taylor, and V. Kumar. Fast, autonomous flight in GPS-denied and cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 35(1):101–120, Dec. 2017. doi: 10.1002/rob.21774. URL <https://doi.org/10.1002/rob.21774>.
- H. Oleynikova, Z. Taylor, R. Siegwart, and J. Nieto. Safe local exploration for replanning in cluttered unknown environments for microaerial vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3):1474–1481, jul 2018. doi: 10.1109/lra.2018.2800109. URL <https://doi.org/10.1109/lra.2018.2800109>.



# Bibliografía II

- C. Papachristos, S. Khattak, and K. Alexis. Uncertainty-aware receding horizon exploration and mapping using aerial robots. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4568–4575, 2017. doi: 10.1109/ICRA.2017.7989531.
- M. Selin, M. Tiger, D. Duberg, F. Heintz, and P. Jensfelt. Efficient autonomous exploration planning of large-scale 3-d environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2):1699–1706, 2019. doi: 10.1109/LRA.2019.2897343.
- V. Usenko, L. von Stumberg, A. Pangercic, and D. Cremers. Real-time trajectory replanning for MAVs using uniform b-splines and a 3d circular buffer. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, sep 2017. doi: 10.1109/iros.2017.8202160. URL <https://doi.org/10.1109/iros.2017.8202160>.
- 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.