

자율비행 드론의 실시간 3D SLAM 알고리즘별 연산 효율 및 시스템 적합성 비교 연구

이동현*, 태현철*, 원홍인*, 유영준*, 이창기*, 김종현*
한국생산기술연구원 지능화 뿌리기술연구소*

A Comparative Study on Computational Efficiency and System Suitability of Real-Time 3D SLAM Algorithms for Autonomous Flying Drone

Dong Hyun Lee*, Hyeon Cheol Tae*, Hong In Won*, Yeong Jun Yu*, Changgi Lee*, Jonghyeon Kim*
Korea Institute of Industrial Technology*

Abstract - 본 논문은 자율비행 드론의 실내 탐사를 위한 9가지 SLAM-Planner 조합을 공장 창고 및 병원 시뮬레이션 환경 (Gazebo, WSL2, ROS Humble)에서 연산 효율 및 시스템 적합성 관점으로 비교·분석하였다. 재계획 빈도 (plans/run), 탐사 커버리지, 이동 거리 효율, 실제 충돌률을 평가 지표로 활용하였다. 분석 결과, 플래너 유형이 연산 부하를 결정하는 핵심 요소임이 확인되었다. UAV-Frontier 계열 (C4,C5)은 18~23회/run의 최저 재계획 빈도를 나타내어 FALCON 기반 조합 (최대 13,967회/run) 대비 약 760배 낮은 연산 부하를 보였다. LiDAR 기반 조합 중 FAST-LIO +UAV-Frontier(C5)가 공장 환경에서 96.3%이 탐사율을 27.6m의 이동 거리로 달성하여 탐사 효율이 가장 우수하였다. 해당 결과는 연산 자원이 제한된 드론 시스템 설계 시 SLAM과 플래너를 통합적으로 고려해야 함을 시사한다.

(UAV-Frontier; C4,C5), 그래프 기반(GBPlanner/RRG: C9) 세 가지 계열로 구성된다.

<표 1> 9가지 SLAM+Planner 조합 구성

조합	SLAM	Planner	알고리즘 유형	센서
C1	RTAB-MAP	FALCON	Grad(A*)	Camera
C2	RKO-LIO	EPIC	Grad(MINCO)	LiDAR
C3	ORB-SLAM3	FALCON	Grad(A*)	Camera
C4	RTAB-MAP	UAV-Frontier	PD Goal Chase	Camera
C5	FAST-LIO	UAV-Frontier	PD Goal Chase	LiDAR
C6	FAST-LIO	EPIC	Grad(MINCO)	LiDAR
C7	Point-LIO	EPIC	Grad(MINCO)	LiDAR
C8	FAST-LIVO2	EPIC	Grad(MINCO)	LiDAR+Cam
C9	RTAB-MAP	GBPlanner	Graph(RRG)	Camera

1. 서 론

자율비행 드론은 스마트 공장, 물류 창고, 의료 시설 등 다양한 실내 환경에서 자율 탐사 및 지도 작성 임무를 수행하는 핵심 플랫폼으로 주목받고 있다. 드론의 자율 탐사 성능은 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 알고리즘과 경로 계획 플래너의 조합에 의해 결정되며, 이 두 요소는 실시간 연산 자원을 공유하기 때문에 시스템 적합성 분석이 필수적이다. 기존 연구들은 SLAM 알고리즘의 위치 추정 정확도나 탐사 범위에 초점을 맞추는 경우가 많았으나, Planner의 재계획 빈도와 같은 연산 부하 특성이 전체 시스템 적합성에 미치는 영향에 대한 체계적 비교 연구는 부족하다. 또한 단일 환경이 아닌 복수의 실내 환경에 걸쳐 다양한 SLAM-Planner 조합을 정량적으로 비교한 사례도 드물다. 본 연구에서는 Camera RGB-D 기반 3종, LiDAR + Camera 융합 1종, LiDAR 단일 4종, 그래프 기반 플래너 1종 등 총 9가지 SLAM-Planner 조합을 동일 조건의 Gazebo 시뮬레이션 환경 (공장, 창고, 병원)에서 비교하였다. 주요 평가 지표로 재계획 빈도 (연산 부하 대리 지표), 탐사 커버리지 효율, 이동 효율, 안전성을 사용하며, 실용적인 드론 시스템 설계를 위한 조합별 적합성 기준을 제시한다.

2. 본 론

2.1 실험 시스템 구성 및 실험 환경

실험은 WSL2 환경 (Intel Core Ultra 7 265KF, NVIDIA RTX 5080, ROS Humble, Gazebo)에서 수행되었다. 탐사 환경으로 공장, 창고와 병원 환경 (지붕 있음, 유효 실험수: 공장 150회, 병원 100회)을 사용하였다. 모든 조합에 동일한 외벽 안전 마진과 동일 제외 기준 (속도 = 0. 거리 > 5000m)을 적용하였다. 표 1에 제시된 9가지 조합은 센서 유형에 따라 Camera RGB-D(C1,C3,C4,C9), LiDAR(C2,C5,C6,C7), LiDAR, + Camera 융합(C8)으로 분류된다. Planner 유형은 Gradient 기반(FALCON:C1, C3; EPIC/MINCO: C2,C6,C7,C8), PD 목표 추종

2.2 실험 결과 및 분석

2.2.1 플래너 연산 부하 분석

표 2는 공장 환경에서 9개 조합의 핵심 성능 지표를 보여준다. 재계획 빈도 (plans/run)는 Planner 유형에 따라 극적인 차이를 보였다. UAV-Frontier 계열 (C4:23회/run, C5:18회/run)은 FALCON 계열(C1: 8,335회/run, C3 13,967회/run) 대비 380~760배 낮은 재계획 빈도를 나타냈다. EPIC 계열 (C2, C6~C8)은 중간 수준 (208~657/run)을 보였으며, 그래프 기반 C9(GBPlanner)는 1,282회/run을 기록하였다. 특히 동일한 RTAB-MAP RGB-D SLAM을 사용하는 C1(8335회)과 C4(23회)의 재계획 빈도 차이는 362배에 달해, SLAM이 동일하더라도 플래너의 선택이 연산 부하를 결정하는 핵심 요인임을 확인할 수 있다.

<표 2> 공장 환경 핵심 성능 지표

조합	재계획 (회/run)	탐사율 (공장)	이동거리 (공장)	공정점수 (공장)	공정점수 (병원)
C1	8335	7.4%	241.8m	35.5	15.3
C2	208	20.8%	32.5m	32.7	38.3
C3	13967	9.8%	164.3m	25.8	15.8
C4	23	40.6%	46.6m	34.8	66.2
C5	18	96.3%	27.6m	56.5	58.6
C6	369	29.7%	29.8m	37.6	40.9
C7	465	35.9%	44.8m	43.2	43.6
C8	657	10.3%	24.3m	15.0	35.7

C9	1282	(Vox①)	275.6m	70.6	71.6
----	------	--------	--------	------	------

2.2.2 탐사 성능 및 시스템 적합성 분석

공정 탐사 점수를 기준으로 종합 평가하자면, 그래프 기반 탐사인 C9가 공장 70.6점, 병원 71.6점으로 두 환경 모두에서 1위를 기록하였다. C9는 Frontier 정보를 별도로 발행하지 않는 Volumetric 탐사 방식으로, 공장 환경에서 $2484m^3$ 의 매핑 부피를 달성하였으며 이는 frontier 기반 조합 대비 압도적으로 우수한 공간 커버리지를 의미한다. Frontier 기반 조합 (C1~C8) 중에는 C5가 공장환경에서 96.3%의 탐사율을 달성하며 공정 점수 56.5점으로 1위를 기록하였다. 다만 병원 환경에서는 C4가 66.2점으로 Frontier 기반 조합 중 1위를 기록하여, 환경 특성에 따라 적합 조합이 달라짐을 확인할 수 있다. 탐사율과 이동 거리의 관계를 살펴보면, C5는 27.6m의 이동 거리로 96.3%의 탐사율을 달성한 반면, Camera RGB-D 기반 FALCON 조합인 C1(241.8m)과 C3(164.3m)은 훨씬 긴 이동 거리에도 각각 7.4%, 9.8%의 낮은 탐사율을 보였다. 이는 RGB-D 카메라의 좁은 수직 FOV(약 47°)와 단 방향 시야로 인해 frontier 탐사 목표가 반복적으로 같은 구역을 지향하기 때문으로 분석된다.

본 연구의 한계로는 재계획 빈도를 연산 부하의 대리 지표로 활용하였을 뿐 실제 CPU/메모리 사용률을 직접 측정하지 않은 점, 그리고 C9를 제외한 나머지 조합이 모두 Gradient 기반 또는 PD 추종방식의 Planner로 구성되어 샘플링 기반 Planner와의 비교가 제한적인 점을 들 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 자율비행 드론의 실내 탐사를 위한 9가지 SLAM-Planner 조합을 공장 및 병원 시뮬레이션 환경에서 연산 효율 및 시스템 적합성 관점으로 비교하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 플래너 유형이 연산 부하를 결정하는 핵심 요소로, UAV-Frontier 계열(C4,C5)은 FALCON 대비 최대 760배 낮은 재계획 빈도를 보여 연산 자원 제약 환경에서 유리하다.

둘째, 공정 탐사 점수 기준 종합 1위는 그래프 기반 플래너를 사용한 C9(GBPlanner/RRG)로, 공장과 병원 두 환경 모두에서 우위를 보였다. Frontier 기반 조합 중에서는 공장 환경에서 C5(Fast-LIO+UAV-Frontier), 병원 환경에서 C4(RTAB-Map+UAV-Frontier)가 각각 높은 성능을 기록하였다.

셋째, Camera RGB-D 기반 FALCON 조합 (C1,C3)은 넓은 이동 거리에도 낮은 탐사율을 보여 frontier 탐사 적합성이 낮으며, LiDAR 기반 조합이 전반적으로 우수한 탐사 효율을 나타냈다.

이상의 결과는 드론 자율 탐사 시스템 설계 시 SLAM과 플래너를 통합적으로 고려해야 함을 시사하며, 연산 자원이 제한된 환경에서는 LiDAR+ UAV-Frontier 조합이 체적 탐사 정밀도를 우선할 때는 그래프 기반 플래너 조합이 적합함을 제안한다.

감사의 글

본 연구는 2026년도 한국 생산기술연구원 제조 AI연구센터의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] Xu, W. & Zhang, F., "FAST-LIO: A Fast, Robust LiDAR-Inertial Odometry Package by Tightly-Coupled Iterated Kalman Filter", IEEE Robotics and Automation

Letters, vol.6, no.2, pp.3317 - 3324, 2021.

[2] Labbé, M. & Michaud, F., "RTAB-Map as an Open-Source Lidar and Visual SLAM Library for Large-Scale and Long-Term Online Operation", Journal of Field Robotics, vol.36, no.2, pp.416 - 446, 2019.

[3] Zhou, B. et al., "EGO-Planner: An ESDF-free Gradient-Based Local Planner for Quadrotors", IEEE Robotics and Automation Letters, vol.6, no.2, pp.478 - 485, 2021.

[4] Dang, T. et al., "Graph-based Subterranean Exploration Path Planning using Aerial and Legged Robots", Journal of Field Robotics, vol.37, no.8, pp.1363 - 1388, 2020.

[5] Vizzo, I. et al., "KISS-ICP: In Defense of Point-to-Point ICP - Simple, Accurate, and Robust Registration If Done the Right Way", IEEE Robotics and Automation Letters, vol.8, no.2, pp.1029 - 1036, 2023.

[6]