

V2X 기반 협력 다중 로봇 SLAM

양윤모, 황재민, 윤창준, 고승우[†], 심인욱[†]

인하대학교

{yunmo.yang, gracio, juni0301}@inha.edu, {swko, iwshim}@inha.ac.kr

V2X-Based Cooperative Multi-Robot SLAM

Yunmo Yang, Jae-min Hwang, Chang-jun Yun, Seung-Woo Ko[†], and Inwook Shim[†]

Inha University

요약

다중로봇 환경에서의 SLAM은 로봇 간 센서 정보의 신뢰성 있는 교환에 크게 의존하지만, 실제 환경에서는 제한된 통신 대역폭과 불안정한 연결로 인해 센서 데이터 공유에 제약이 존재한다. 이러한 통신 제약은 로봇 간 지도 불일치와 누적 오차를 유발하며, 다중로봇 SLAM 시스템의 확장성과 신뢰성을 저하시킨다. 본 연구에서는 다중로봇 SLAM을 지원하기 위한 V2X 기반 센서 데이터 통신 아키텍처를 제안하고, 원시 LiDAR 및 IMU 데이터를 포함한 센서 수준 정보의 효율적인 전송을 위한 통신 구조를 설계한다. 제안한 아키텍처는 센서 데이터의 직렬화, 분할 전송, 수신 및 복원 과정을 포함하며, SLAM 알고리즘과 독립적으로 동작하도록 구성되어 다양한 다중로봇 시스템에 적용 가능하다. 실제 로봇 환경에서의 실험을 통해 V2X 통신에서 패킷 크기에 따른 전송률 특성을 제시하고, 제안한 통신 구조가 다중 로봇 SLAM 응용에서 지도 품질을 유지할 수 있음을 확인한다.

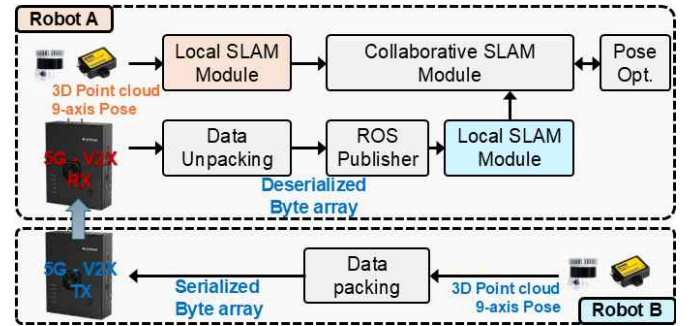
I. 서론

자율주행 로봇이 복잡한 실외 환경에서 안정적으로 동작하기 위해서는 정확한 위치 추정과 신뢰도 높은 지도 구축이 필수적이며, 이를 위해 SLAM은 핵심 기술로 활용되어 왔다. 특히 다중로봇 SLAM은 여러 로봇이 동일한 환경을 탐색하며 관측 정보를 공유함으로써 지도 일관성과 시스템 확장성을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러나 실제 환경에서는 통신 인프라의 제약으로 인해 로봇 간 관측 정보 공유가 원활하게 이루어지지 않는 경우가 많으며, 데이터 지연이나 손실은 로봇 간 상대 포즈 추정 불안정과 전역 좌표계 불일치를 초래할 수 있다. 이러한 통신 기반 제약은 협력적 지도 정합을 요구하는 다중로봇 SLAM의 안정성과 신뢰성을 저해하는 주요 요인으로 작용한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 V2X 통신을 기반으로 로봇 간 센서 관측 정보를 공유하는 다중로봇 SLAM 구조를 제안한다.

II. 본론

2.1 시스템 구성 개요

본 논문에서는 다중 로봇 환경에서 센서 데이터 공유를 지원하기 위한 V2X 기반 통신 중심 시스템 구조를 제안한다. 각 로봇은 독립적으로 로컬 SLAM을 수행하며, 로봇 간 협력은 센서 수준의 관측 정보를 통신을 통해 교환하는 방식으로 이루어진다. 본 시스템은 로봇에서 생성된 LiDAR 및 IMU 센서 메시지를 직렬화하여 V2X 통신으로 전송하고, 수신 로봇에서 이를 역직렬화하여 SLAM 모듈 입력으로 통합하는 파이프라인으로 구성된다. [Fig. 1]는 제안하는 시스템의 전체 데이터 흐름을 나타내며, 센서 데이터 생성부터 직렬화, V2X 전송, 수신 및 복원에 이르는 통신 기반 데이터 공유 과정을 시각적으로 보여준다. 이러한 구조를 통해 각 로봇은 물리적으로 분산된 환경에서도 동일한 센서 데이터를 공유할 수 있으며, 통



[Fig. 1] Pipeline of our V2X-based multi-robot SLAM system

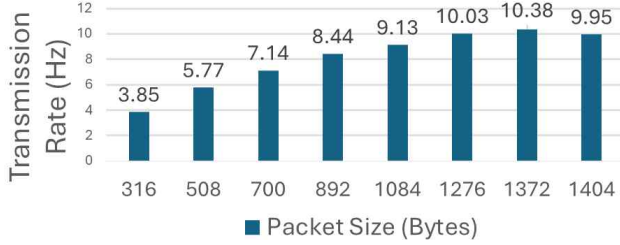
신 계층과 SLAM 계층을 분리함으로써 시스템의 확장성을 확보한다.

2.2 V2X 기반 센서 데이터 통신 구조

본 연구에서는 Ettifos 사의 SIRIUS V2X 장비를 사용하여 로봇 간 무선 데이터 송수신을 구현한다. 각 로봇에서 생성된 ROS 센서 메시지(PointCloud2, IMU)는 ROS 직렬화 기능을 통해 바이트 스트림 형태로 변환된 후, V2X 전송 규격에 맞게 패킷화된다. 패킷 헤더에는 메시지 타입, 데이터 길이, 타임스탬프 등의 정보가 포함되어 수신 측에서 정확한 메시지 복원이 가능하도록 설계된다. 전송된 패킷은 V2X 채널을 통해 다른 로봇으로 전달되며, 수신 로봇은 헤더 정보를 기반으로 패킷을 파싱한 뒤 역직렬화를 통해 원래의 ROS 메시지로 복원한다. 복원된 메시지는 로컬 센서 데이터와 동일한 형태로 ROS 토픽에 재게시된다.

2.3 다중 로봇 SLAM 적용

제안한 통신 구조의 유효성을 검증하기 위해 다중 로봇 SLAM 환경에 적용하였다. 각 로봇은 LiDAR와 IMU를 기반으로 로컬 SLAM을 수행하며,



[Fig. 2] Performance Comparison: Packet Size vs Transmission Rate.

Setting	Data	Distance (25m)			Distance (45m)		
		Transmissi on Rate (Hz)	Throughput (Mbps)	BLER (%)	Transmissi on Rate (Hz)	Throughput (Mbps)	BLER (%)
Indoor	1 MB	11.2	~94	0	11.2	~94	0
	4 MB	2.79	~94	0	2.79	~94	0
	7 MB	1.70	~94	0	1.70	~94	0
Outdoor	1 MB	10.5	~84	0	-	-	~90
	4 MB	2.56	~82	~0	-	-	~90
	7 MB	1.33	~76	3~4	-	-	~90

[Table. 1] V2X communication performance measured in indoor and outdoor under different transmission distances and data sizes

기본 odometry 추정을 위해 LIO-SAM^[1]을 사용한다. 로봇 간 공유된 원격 센서 데이터는 로컬 센서 데이터와 함께 SLAM 입력으로 사용되며, 다중 로봇 환경에서의 지도 정합 및 상대 위치 추정을 지원한다. 다중 로봇 SLAM 프레임워크로는 DiSCo-SLAM^[2]을 활용하여 로봇 간 관측 정보와 로컬 추정 결과를 통합 처리한다. 본 연구에서는 V2X 기반 센서 데이터 통신을 다중 로봇 SLAM에 적용하고, 실제 환경 실험을 통해 지도 품질 유지 여부와 V2X 통신에서 패킷 크기에 따른 전송률을 함께 제시한다.

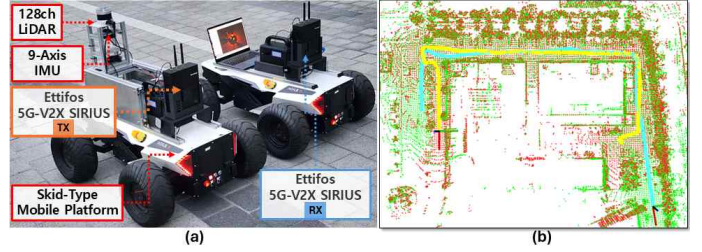
III. 실험 및 결과

3.1 V2X 통신 성능 분석

[Fig. 2]는 패킷 크기에 따른 전송률 변화를 나타낸다. 패킷 크기가 316 bytes에서 1372 bytes로 증가함에 따라 전송률은 3.85 Hz에서 10.38 Hz까지 증가하였으며, 1372 bytes 조건에서 최대 전송률을 기록하였다. 이후 1404 bytes 조건에서는 전송률이 9.95 Hz로 소폭 감소하였다. 이는 패킷 크기 증가에 따라 전송 효율이 향상되지만, 일정 크기 이상에서는 전송 부담으로 전송률이 제한될 수 있음을 보여준다. [Table 1]은 실내 및 실외 환경에서 전송 거리(25 m, 45 m)와 전송 데이터 크기(1 - 7 MB)에 따라 측정된 V2X 통신 성능을 정리한 것이다. 통신 성능은 메시지별 전송률(Hz), 처리량(Mbps), 블록 오류율(BLER)을 기준으로 평가하였다. 실내 환경에서는 25m 및 45m 조건에서 1MB, 4MB, 7MB 데이터 전송 실험을 수행하였으며, 전송률은 각각 11.2Hz, 2.79Hz, 1.70Hz로 설정되었다. 모든 조건에서 처리량은 약 94Mbps 수준으로 안정적으로 유지되었고, 거리 및 데이터 크기에 관계없이 BLER은 0으로 측정되었다. 실외 환경에서도 동일한 데이터 크기 조건으로 실험을 수행하였으며, 전송률은 각각 10.5Hz, 2.56Hz, 1.33Hz로 설정되었다. 처리량은 84Mbps, 82Mbps, 76Mbps로 실내 환경 대비 감소하였고, 25m 조건에서는 BLER이 약 3 - 4%, 45m 조건에서는 약 90%로 측정되었다. 이러한 결과는 실외 환경에서도 일정 거리 이내에서는 비교적 안정적인 데이터 전송이 가능함을 보여준다.

3.2 V2X 통신 기반 다중로봇 SLAM 결과

[Fig. 3(a)]는 실제 실외 환경에서 수행한 다중 로봇 실험 구성을 보여주며, 각 로봇에는 LiDAR 및 IMU 센서와 V2X 통신 장비가 탑재되어 있다.



[Fig. 3] (a) Real-world setup of the V2X multi-robot SLAM system, (b) V2X-based Multi-Robot SLAM Outdoor Experiments Result.

TX 로봇에서 취득한 원시 센서 데이터는 V2X 통신을 통해 다른 로봇으로 전달되며, 수신 로봇에서는 해당 데이터를 기반으로 SLAM 처리가 수행된다. 이를 통해 로봇 간 센서 데이터 교환이 이루어지는 환경에서도 안정적인 SLAM 추정 결과가 생성됨을 확인할 수 있다. [Fig. 3(b)]는 다중 로봇 SLAM 과정을 통해 각 로봇이 생성한 로컬 맵이 단일 좌표계 상에서 정합된 결과를 나타낸다. 로봇 간에 공유된 센서 데이터가 SLAM 과정에 반영됨에 따라, 서로 다른 로봇에서 생성된 지도 정보가 일관된 형태로 통합됨을 확인할 수 있다. 이는 제안한 V2X 기반 통신 구조가 실제 다중 로봇 시스템에 적용 가능함을 보여준다.

IV. 결론

본 논문에서는 다중 로봇 환경에서 센서 데이터 교환을 위한 V2X 기반 통신 구조를 제안하고, 원시 LiDAR 및 IMU 데이터를 대상으로 통신 성능을 실험적으로 분석하였다. 제안한 구조는 ROS 기반 센서 데이터를 V2X 통신을 통해 전달하고 수신 측에서 복원하는 방식으로, 기존 응용 모듈의 수정 없이 센서 데이터 공유가 가능하도록 설계되었다. 실내·실외 환경에서의 실험 결과, 다양한 전송 거리와 데이터 크기 조건에서도 안정적인 처리량과 낮은 블록 오류율을 유지함을 확인하였으며, V2X 기반 센서 데이터 공유 적용 전후의 SLAM 성능 비교에서도 위치 추정 정확도의 유의미한 저하는 관측되지 않았다. 이는 제안한 V2X 기반 통신 아키텍처가 다중 로봇 환경에서 센서 데이터 공유를 지원하면서도 성능 안정성을 유지할 수 있음을 보여준다. 또한 본 연구 결과는 다중 로봇 시스템에서 센서 수준 데이터 공유를 고려한 통신 구조 설계의 실현 가능성을 실험적으로 검증한 사례로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00342176 and RS-2025-02217000)

참고 문헌

- [1] T. Shan, B. Englot, D. Meyers, W. Wang, C. Ratti, and D. Rus, "LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020, pp. 5135 - 5142.
- [2] Y. Huang, T. Shan, F. Chen, and B. Englot, "DiSCo-slam: Distributed Scan Context-Enabled Multi-Robot LiDAR SLAM with Two-Stage Global-Local Graph Optimization," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 7, no. 2, pp. 1150 - 1157, 2022.