

LIO-SAM과 LI-SLAM-ROS2의 성능 비교

강대근, 한동석*

경북대학교 전자전기공학부

kangdg@knu.ac.kr, *dshan@knu.ac.kr

Comparison of LIO-SAM and LI-SLAM-ROS2 Performance

Dae Geun Kang, Dong Seog Han*

Kyungpook National Univ.

요약

자율주행 차량의 정확한 위치 추정이 안전한 주행을 위해 필수적이며, 이를 위해 LiDAR-IMU SLAM과 같은 고정밀 로컬라이제이션 기술이 활용된다. 본 연구에서는 대표적인 LiDAR-관성 기반 SLAM 기법인 LIO-SAM과 ROS2 기반 구현체인 LI-SLAM-ROS2를 실제 차량 주행 데이터에 적용하여 로컬라이제이션 성능을 비교 분석한다. 두 알고리즘의 구조적 차이, 처리 방식, 도로 주행 환경에서의 위치 정확도 및 계산 효율을 정성적으로 평가한다. 실험 결과, LIO-SAM과 LI-SLAM-ROS2 모두 실시간으로 안정적인 궤적 추정을 수행했으며, 수십 센티미터 이내의 위치 정확도를 달성하였다. LIO-SAM은 팩터 그래프 기반의 최적화와 IMU의 결합을 통해 높은 정확도와 빠른 연산 성능을 보였고, LI-SLAM-ROS2는 ROS2 환경에서 NDT 기반 매칭과 IMU 데이터를 활용하여 유사한 수준의 정확도를 제공하였다. 본 논문은 두 기법의 장단점을 분석하고, 지도 생성 및 궤적 비교 등의 시각화 결과를 제시한다. 결론적으로, 실제 차량 환경에서 두 SLAM 알고리즘 모두 효과적인 로컬라이제이션을 구현할 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

자율주행 차량에서 로컬라이제이션(Localization), 즉 자기 위치 추정은 핵심 기술 중 하나이다. 일반적인 GNSS 기반 위치 추정은 고층 건물이 밀집된 도심 환경에서 신호 감쇠 및 다중 경로 현상으로 인해 정확도가 저하될 수 있으며, 특히 실내 공간에서는 사용이 불가능하다. 이러한 한계를 극복하기 위해 LiDAR SLAM 기술이 주목받고 있다. LiDAR 센서의 고해상도 거리 정보와 관성측정장치(IMU)의 연속적인 가속도·각속도 데이터를 결합하면, GPS가 부재한 환경에서도 자세 및 위치를 안정적으로 추정할 수 있다.

2020년에 발표된 LIO-SAM(LiDAR Inertial Odometry via Smoothing And Mapping)은 이러한 LiDAR-IMU SLAM 기법의 대표적인 사례로, 팩터 그래프 기반의 최적화를 통해 실시간으로 고정밀 3차원 지도 작성 및 궤적 추정이 가능하다 [1][2]. 반면, LI-SLAM-ROS2는 ROS1 기반의 LIO-SAM 알고리즘에서 IMU 처리 모듈을 계승하면서, LiDAR 정합에 NDT(Normal Distributions Transform)와 같은 확률적 매칭 기법을 사용하는 ROS2 기반 SLAM 패키지이다 [2][3][4]. 두 알고리즘 모두 LiDAR와 IMU의 장점을 활용하고자 하나, 구현 방식과 정합 전략에서 차이를 가지므로 실제 차량 데이터에 적용했을 때의 성능 비교가 필요하다.

본 논문은 실제 도로 주행 환경에서 LIO-SAM과 LI-SLAM-ROS2의 로컬라이제이션 성능을 정량적으로 평가하고, 두 알고리즘의 구조적 차이 및 처리 방식이 성능에 미치는 영향을 분석한다. 이를 위해 차량에 부착된 LiDAR와 IMU 센서로 데이터를 수집하고, 동일한 데이터셋에 두 SLAM 알고리즘을 적용하여 생성된 궤적 및 지도를 비교·분석하였다.

II. 본론

두 SLAM 알고리즘의 성능 비교를 위해 실제 차량 주행 데이터를 기록한 후, 동일한 데이터셋을 각각의 알고리즘에 적용하였다. 시험 차량에는 Ouster OS1-128 3D LiDAR와 MicroStrain 3DM-GX5-AHRS 9축 IMU가 장착되었으며, 센서들은 ROS2 환경에서 시간 동기화된 데이터로 수집되었다. 그림 1은 실험에 사용된 센서 탑재 차량을 보여준다.

시험 주행은 경북대학교 캠퍼스 내에서 이루어졌으며, 차량은 출발 지점으로 되돌아오는 루프 형태의 경로를 따라 주행하였다. 주행 중 최대 속도는 약 20 km/h로 설정되었으며, 급가속 또는 급회전 등 과도한 동적 운동은 의도적으로 제한하여 안정적인 센서 데이터 수집이 가능하도록 하였다. 주행 시 수집된 ROS2 Topic들은 .bag 파일 형태로 저장되었으며, LIO-SAM과 LI-SLAM-ROS2 모두 해당 bag 파일을 재생하여 동일 조건하에 실험을 수행하였다.



그림 1. 실험에 사용된 센서 탑재 시험 차량

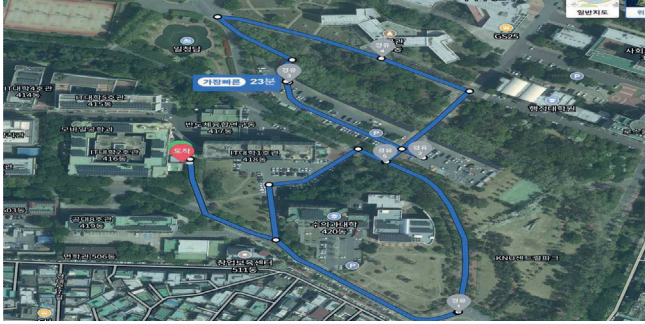


그림 2. 주행 실험 경로 및 데이터 수집 경로

LIO-SAM 알고리즘은 공개된 ROS2 패키지를 기반으로 사용하였다. ROS 2 Humble 환경에서 소스를 빌드하여 실험에 적용하였으며, 기본 제공되는 설정 파일을 바탕으로 주요 파라미터를 조정하였다. 예를 들어, LiDAR 포인트 클라우드에서 특징점을 추출하기 위한 Voxel 필터 해상도는 0.2 m로 설정하여 계산 부하를 줄이면서도 지도 해상도를 유지할 수 있도록 하였다. 공정한 비교를 위하여 GPS 팩터는 비활성화하고, LiDAR와 IMU만을 입력 센서로 사용하였다.

LI-SLAM-ROS2는 GitHub에서 공개된 소스를 ROS 2 Humble 환경에서 빌드하여 사용하였다. 실험 환경 설정 및 파라미터 구성은 기본 예제를 기반으로 수행하였으며, 동일한 bag 파일을 입력으로 활용하여 LIO-SAM과 동등한 조건에서 비교가 가능하도록 하였다.

주행 실험을 통해 총 57.5 GB 규모의 센서 데이터를 기록하였으며, 이는 모든 SLAM 연산에 사용되었다. 그림 2는 데이터 생성을 위해 주행한 실제 경로를 시각화한 것이다.

III. 결론

실험을 통해 얻어진 LIO-SAM과 LI-SLAM-ROS2의 정성적 지도 품질을 살펴본 결과, 두 알고리즘 모두 3차원 포인트 클라우드 지도를 통해 도로 및 주변 환경을 효과적으로 재현하였다. 그러나 세부 영역에서는 일부 차이가 관찰되었다. LIO-SAM은 팩터 그래프 내에서 IMU 바이어스까지 추정하며 최적화를 수행하는 반면, LI-SLAM-ROS2는 IMU를 프런트엔드에서 초기 위치 추정과 왜곡 보정에만 활용하고, 후처리 최적화는 주로 LiDAR 측정 기반으로 이루어진다. 이러한 구조적 차이로 인해 이론적으로는 LIO-SAM이 관성 센서의 오차까지 보정할 수 있어 상대적으로 더 정밀한 지도 작성이 가능하다.

그럼에도 불구하고, 두 알고리즘 모두 주요 구조물이 사람 눈으로 구분 가능할 정도로 명확히 재현되었으며, 지도 정확도는 전반적으로 우수하였다. 그림 3과 그림 4는 각 알고리즘으로 생성된 포인트 클라우드 지도 및 추정 궤적을 시각화한 것으로, 지도 품질과 궤적의 루프 정합 정도를 비교할 수 있다.

본 논문에서는 실제 차량 주행 환경에서 LiDAR-IMU 기반 SLAM 알고리즘인 LIO-SAM과 LI-SLAM-ROS2의 성능을 비교하였다. 두 알고리즘은 서로 다른 구현 방식과 정합 기법을 사용함에도 불구하고, 전반적으로 유사한 수준의 위치 정확도와 지도 품질을 나타냈다. LIO-SAM은 팩터 그래프 기반 최적화와 IMU의 긴밀한 결합을 통해 견고한 궤적 추정 및 고해상도 지도를 생성하였으며, LI-SLAM-ROS2 역시 NDT 기반 매칭과 IMU 정보 활용을 통해 LIO-SAM에 필적하는 결과를 보였다.

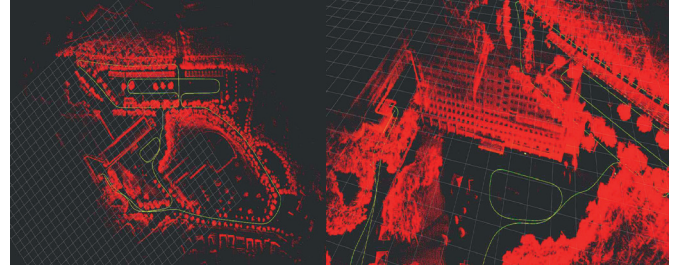


그림 3. LI-SLAM-ROS2를 활용한 지도 생성

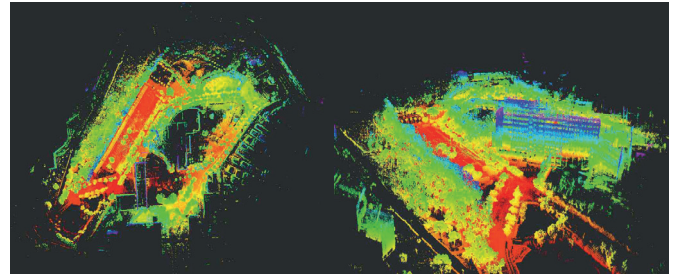


그림 4. LIO-SAM을 활용한 지도 생성

특히 루프 클로저 적용 후에는 두 알고리즘 모두 누적 드리프트를 효과적으로 보정하는 성능을 확인하였다.

향후 연구에서는 다양한 주행 환경에서의 성능 평가를 진행할 예정이다. 본 연구는 교내 포장도로에서 제한된 조건으로 수행되었으나, 추후 비포장도로, 기복이 심한 오프로드, 야간, 우천 시 등 더 복잡한 조건에서의 비교 실험을 통해 알고리즘의 강인성을 평가할 계획이다. 또한 두 알고리즘 모두 GNSS 데이터와의 융합이 가능한 구조를 갖고 있으므로, RTK-GNSS를 보조 팩터로 사용할 경우의 성능 향상 여부, 또는 일반 GNSS의 오차 유입 가능성 등에 대해서도 분석할 예정이다.

이러한 후속 연구를 통해 SLAM 기반 로컬라이제이션 알고리즘의 실용성과 정확도를 더욱 향상시켜, 자율주행 차량 알고리즘에의 적용 가능성을 높일 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 교육부 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (RS-2021-NR060127)

참 고 문 헌

- [1] Shan, T., and Englot, B. "LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 2020.
- [2] Zhang, J., and Singh, S. "LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time," Robotics: Science and Systems (RSS), 2014.
- [3] Koide, K., and Menegatti, E. "HDL Graph SLAM for High Definition 3D Lidar Mapping," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018.
- [4] Liu, X., et al. "FAST-LIO2: Fast Direct LiDAR-Inertial Odometry," IEEE Transactions on Robotics, vol. 39, no. 2, pp. 753 - 770, 2023.