

IMU-LiDAR 융합 및 다중 센서를 활용한 화재 예방 자율주행 Rocker-bogie 로봇에 대한 연구

김민송¹, 박선우¹, 안상훈¹, 정제유¹, 김정민²
¹서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
²KT

minsong0206@seoultech.ac.kr, sw123789@seoultech.ac.kr, tkgdgs0800@seoultech.ac.kr,
 21100188@seoultech.ac.kr, cocowin@naver.com

Autonomous Rocker - bogie Robot for Fire Prevention with IMU - LiDAR Fusion and Multi-Sensor Integration

Minsong Kim¹, Sunwoo Park¹, Sanghun An¹, Jeyu Chung¹, Jeongmin Kim²
¹Dept. of Mechanical and System Design Engineering, Seoul National
 University of Science and Technology
²KT

요 약

본 논문에서는 Rocker-bogie 자율주행 로봇을 대상으로 IMU-LiDAR 융합 오도메트리와 다중 센서를 통합한 조기 화재 감지 및 안전 모니터링 임베디드 시스템 설계·구현을 수행한다. 또한, 범용 임베디드 환경에서 자율주행과 안전 관리 기능을 효과적으로 수행할 수 있음을 실험을 통해 확인한다.

1. 서론

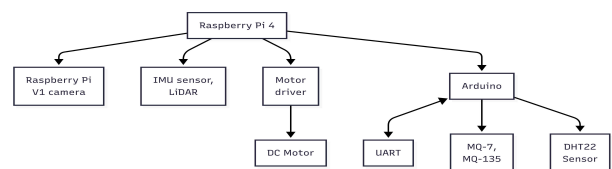
산업 현장과 밀폐 공간에서, 자율주행 로봇을 활용한 안전 관리의 필요성이 점차 증가하고 있다. 기존 화재 감지기는 연기 기반 탐지 방식을 사용하나, 플라스틱 연소와 같이 연기보다 가스가 먼저 방출되는 혼소 화재의 경우에는 조기 대응이 어렵다.[1] 또한 협로 환경에서의 안정적인 자율주행을 위해서는 플랫폼의 구조적 안정성과 정밀한 위치 추정이 필수적이다. 본 연구는 이러한 요구에 대응하기 위해 로봇 플랫폼의 구조 위상 최적화, IMU-LiDAR 오도메트리, 가스 센서 기반 조기 감지, 카메라 기반 화재 모니터링을 통합 구현하였다.

2. 연구 방법

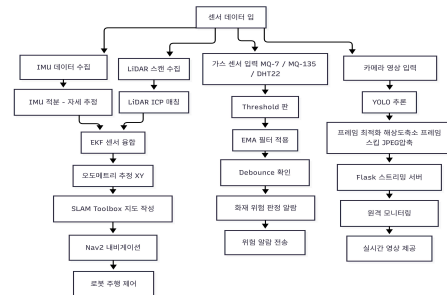
2.1 시스템 구성

하드웨어: Raspberry Pi 4B, RPLiDAR C1, MPU-6050, MQ-7, MQ-135, DHT22, Raspberry Pi V1 Camera, DC Geared Motor, L298N

소프트웨어: Ubuntu 22.04, ROS 2 Humble, SLAM Toolbox, Nav2, YOLOv5n/v8n, Flask 서버



(그림 1) 하드웨어 구성도



(그림 2) 소프트웨어 구성도

2.2 플랫폼 구조 위상 최적화

현가 구조로 Rocker - bogie 방식을 채택하여 협로 주행 안정성을 확보하였다. 구조해석 결과 각 프레임의 von Mises 응력은 소재의 항복강도 대비 충분히 낮음을 확인하였다. 이에 따라 Compliance 최소화 목적함수로 설정하고, 목표 부피 비율과 변형

량을 제약조건으로 두어 위상 최적화를 수행하였다.

2.3 오도메트리 및 SLAM

로봇의 위치 추정에는 IMU와 LiDAR 융합 방식을 사용하였다. IMU 데이터를 적분하여 단기 자세를 추정하고, IMU 적분과 LiDAR ICP 매칭을 EKF로 융합하여 오도메트리를 추정하였으며, ROS 2 Humble 환경에서 SLAM Toolbox와 Nav2를 통해서도 작성 및 자율주행을 구현하였다.

2.4 가스 센서 기반 화재 조기 감지

MQ-7, MQ-135 센서를 활용하여 불완전 연소 및 합성수지 분해 중 발생하는 가스를 검출하였다. 임계값 기반 판정, 지수이동평균, 디바운스 로직을 적용하여 센서값의 노이즈를 억제하였다. 이를 통해 조기 화재 신호를 보다 빠르게 검출할 수 있었다.

2.5 카메라 기반 화재·안전 감지

Raspberry Pi V1 카메라와 YOLOv5n/v8n 모델을 적용해 화재를 실시간으로 인식하였으며[2], Flask 스트리밍 서버와 ngrok 환경을 통해 평균 25~30 FPS, 지연 0.5초 이내의 성능을 확보하였다. 연산 지연을 줄이기 위해 경량 모델 사용, 입력 해상도 축소, 프레임 스킵, 영상 캡처와 추론의 멀티스레드 분리를 통해 실시간성을 보장하였다.



(그림 3) YOLO 기반 객체 인식·화재 탐지

3. 실험 및 결과 (Experiments and Results)

3.1 가스 센서 검출 실험

알코올 및 연기 자극을 통해 가스 센서의 반응을 확인하였다. 판정 로직 적용 이전에는 이상치가 높은 빈도로 발생하였으나, 적용 후 빈도가 감소하여 데이터 변동성이 약 51% 개선됨을 확인하였다.

3.2 오도메트리 성능 비교

IMU 단독 방식은 드리프트 누적으로 데이터의 신뢰도가 낮았고, LiDAR 단독 방식은 반복 패턴으로 인해 누적 오차가 발생하였다. 반면, IMU-LiDAR 융합 방식은 IMU의 고주파 응답과 LiDAR 매칭의 저주파 안정성을 보완하여 단일 방식 대비 우수한 성능을 나타냈다. 특히 루프 폐합 오차가 LiDAR 단독 대비 55% 개선되었으며, 내비게이션 목표 도달률도 90%로 향상되었다.



(그림 4) 3D 모델 및 실험 환경, LiDAR 기반 Map

3.3 구조 위상 최적화 결과

위상 최적화를 통해 초기 설계 대비 약 31%의 질량 절감을 달성하면서도 충분한 강도·강성을 유지하였다. 또한, 실제 주행 실험에서 구동 모터의 과부하 현상이 줄어들음을 확인하였다.

3.4 카메라 성능 최적화 결과

최적화 결과, 프레임 속도는 7~8 FPS에서 25~30 FPS로 약 3.6배 향상되었고, 지연 시간은 1.5~2.0초에서 0.3~0.5초로 약 77% 단축되었다.

4. 결론 (Conclusion)

본 연구에서는 Rocker-bogie 자율주행 로봇에 대하여 가스 센서를 활용한 화재 조기 감지, IMU-LiDAR 융합 오도메트리 기반 자율주행, 위상 최적화를 통한 경량 플랫폼, YOLO 기반 화재 감지 및 지연 최적화를 통합 구현하였다. 실험을 통해 시스템의 성능을 검증하였으며, 범용 임베디드 환경에서도 자율주행과 화재 모니터링이 가능함을 확인하였다. 향후 연구에서는 다중 센서 확장, 실제 화재 환경 검증, 그리고 IMU-LiDAR-Vision 융합을 통해 고신뢰 자율주행 화재 예방 로봇으로 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 논문은 과학기술정보통신부 대학디지털교육역량강화사업의 지원을 통해 수행한 한이음 드림업 프로젝트 결과물입니다.

참고문헌

- [1] A. Solórzano, et al., "Early fire detection based on gas sensor arrays: Multivariate calibration and validation", *Sensors and Actuators: B. Chemical*, Vol. 352, pp.130961, 2022.
- [2] 유시영, 노승환, "비디오 기반 딥러닝 융합 알고리즘에 의한 화재 감지 시스템에 관한 연구", *한국통신학회논문지*, Vol. 46, No. 9, pp. 1487-1496, 2021.