AI 기반 덕트 자율주행 로봇의 설계와 케이블 결함 탐지 성능 비교

고은찬[1], 손윤석[1], 윤한준[1], 김연재[1], 김정민[2], 도현락[†]
[1]서울과학기술대학교 전자공학과 학부생 [2]KT
[†]서울과학기술대학교 전자공학과 교수

20101461@seoultech.ac.kr. 20100315@seoultech.ac.kr, 20101531@seoultech.ac.kr, 20101482@seoultech.ac.kr,
cocowin@naver.com, hldo@seoultech.ac.kr

Design of an AI-based Autonomous Duct Inspection Robot and Comparative Evaluation of Cable Defect Detection

Eunchan Ko[1], Yoonseok Son[1], Hanjun Yun[1], Yeonjae Kim[1], Jung-Min Kim[2], Hyun-Lark Do[†]
[1]Dept. of Electronic Engineering, Seoul National University of Science and Technology [2]KT
[†]Dept. of Electronic Engineering, Seoul National University of Science and Technology

요 약

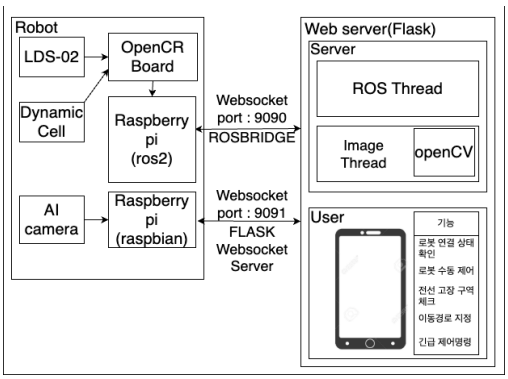
본 연구는 덕트 내부 유지보수 작업의 안전성과 효율성 확보를 위해 SLAM 기반 자율주행과 AI 결함 탐지 기능을 통합한 AI 덕트 관리 로봇을 개발하고, 협소한 덕트 환경에서의 주행 및 성능테스트를 실시하였고 결함 탐지 성능 최적화를 위해 YOLOv8n 과 YOLOv11n 을 비교 분석하였다.

1. 서론

4 차 산업혁명으로 인한 전력망 고도화는 덕트 내부 유지보수 및 점검 수요를 증가시켰다.[1] 그러나 덕트 내부는 협소하고 위험한 작업 환경으로 작업자의 안전사고 가능성이 높고 작업 효율도 저하된다. 이에 따라 작업자의 위험을 줄이고 유지보수의 신뢰성을 높일 수 있는 자동화·지능화 기술의 필요성이 커지고 있다. 최근 로보틱스와 인공지능 기술을 융합한 스마트 덕트 관리 로봇은 자율 주행과 환경 매핑, 시각 기반 결함 탐지 기능을 통해 이러한 문제를 해결할 잠재력을 보여주고 있다.[2] 특히 케이블 손상 탐지에는 객체 탐지 모델이 널리 활용되며, 그중 YOLO 계열은 성능과 실시간성의 균형으로 산업 표준으로 자리 잡고 있다. 본 연구는 AI 기반 덕트 관리 로봇을 설계하고, 실제 덕트 환경에서의 주행 및 결함 탐지 실험을 통해 그 가능성을 검증한다. 또한 로봇에 탑재할 최적의 객체 탐지 모델을 선정하기 위해 YOLOv8 과 최신 모델 YOLOv11 을 비교·평가하여, 실시간 요구 조건에서의 성능과 효율성을 분석한다.

2. 로봇 시스템 설계(Robot System Design)

본 연구에서 제안하는 시스템은 크게 로봇 플랫폼(하드웨어·로컬 제어), 서버(추론·제어) 및 사용자 인터페이스(대시보드)로 구성되며, 설계 목표는 협소한 덕트 내 안정적 주행, 정밀한 환경 지각과 실시간 결함 탐지이다. 전체적인 시스템 구상도는 그림 1 에서 확인 가능하다.



(그림 1) 시스템 구상도

2.1 로봇 플랫폼

설계된 하드웨어는 저프로파일의 트랙(캐터필러)형 이동부, LiDAR 및 Dynamic 센서 팩, Raspberry PI 와 같은 SBC(single-board computer)와 OpenCR(모터 제어용 MCU)를 포함한다.

그림 2 는 본 연구에서 사용한 로봇의 프로토타입의 외형을 보여준다.

(그림 2) AI 기반 덕트 자율주행 로봇

2.2 SLAM 및 Mapping

LDS-02 LiDAR를 주 센서로 사용한 Cartographer SLAM를 기반으로 실시간 Loop-Closure 제약을 통해 2D 실시간 맵을 구성하였다. 제작한 덕트 모의 환경에서의 여러 테스트 결과는 아래 표 1에서 확인할 수 있다.

구분	실험 환경/조건	결과 및 성능 지표
주행 안정성	1 m × 0.3 m 사다리형 덕트, 건조·수평 조건, 10회 반복 주행	전복 미발생, 주행 성공률 100%(10/10 완주)
응답 지연	웹 대시보드를 통한 로봇 수동 조작	평균 20ms의 실시간 제어 가능
SLAM 성능	ROS2 Cartographer	전구간 mapping 가능
탐지 성능	Ultralytics YOLOv11	Precision:0.881 / mAP50-95:0.7

<표 1> 로봇 테스트 결과 요약표

3. 케이블 결함 탐지 AI 모델 및 실험 환경

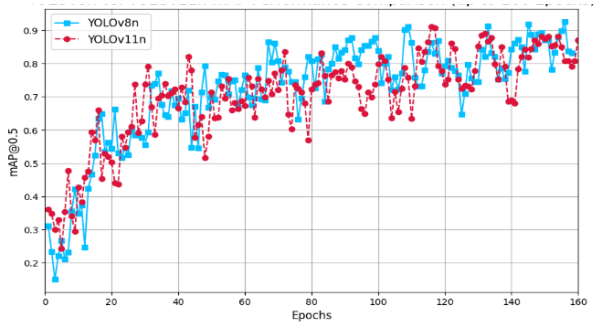
3.1 비교 모델

본 연구는 산업 현장의 실시간 결함 탐지에 적합한 YOLOv8과, 그 성능을 한 단계 발전시킨 YOLOv11의 비교 분석을 통해 최적 모델을 도출하고자 한다.

3.2 데이터셋 및 실험 환경

데이터 증강을 활용하여 총 388장의 이미지 데이터셋을 사용하였으며, 전체 데이터는 Train(70%), Valid(20%), Test(10%)용도로 분할하였다. 실험은 동일한 하이퍼파라미터(Epochs:300, Batch size:9, Image size:640)을 적용하여 진행하였다.

3.3 정량적 성능 평가



(그림 3) YOLOv8n과 YOLOv11n의 Epoch별 mAP50 성능 비교

그림 3을 통해 YOLOv8 모델은 YOLOv11보다 더 적은 Epoch 반복만으로도 높은 정확도에 도달하는 경향을 보여, 빠른 수렴 특성을 확인할 수 있다.

모델	mAP50	mAP50-95	정밀도	추론시간
YOLOv8	0.72	0.58	0.66	13.2ms
YOLOv11	0.76	0.66	0.85	14.3ms

<표 2> 모델별 정량 성능 비교

10개의 Test 데이터셋에 대해 각 모델을 비교 분석한 결과, 평균 정밀도(mAP50) 지표는 YOLOv11n 모델이 YOLOv8n 모델보다 약 6% 높은 수치를 기록했고 가장 두드러진 차이는 정밀도(Precision)지표에서 나타났으며, YOLOv11n은 0.85를 기록하여 YOLOv8n의 값(0.66)에 비해 약 19%p 높게 나타났다. 이는 YOLOv11 모델이 더 복잡한 특징을 효과적으로 포착하는 C3k2 블록과 자가-주의(self-attention) 메커니즘 기반의 C2PSA 블록을 도입하여 YOLOv8 대비 특징 추출 능력을 강화했기 때문에 YOLOv8 모델에 비해 더 높은 정확도를 보였다.[3]

반면, 실시간성을 평가하는 추론 속도에서는 YOLOv8n이 YOLOv11n보다 약 8.3% 더 빠른 성능을 나타났다. YOLOv8은 YOLOv11에 추가된 자가-주의(self-attention) 메커니즘 기반의 복잡한 C2PSA 블록이 없는 상대적으로 단순한 아키텍처를 가지고 있어 추론 속도가 더 빠르다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 개발된 로봇은 캐터필러형 구동부와 Cartographer SLAM 알고리즘을 통해 사다리형 덕트와 같은 비정형 환경에서도 안정적인 주행 및 맵핑 능력을 입증하였다. 또한 핵심 기능인 케이블 결함 탐지 모듈에 대해 비교분석한 결과, YOLOv11n은 더 높은 정밀도와 신뢰도를 기록하였고 YOLOv8n은 더 빠른 추론 속도와 실시간성을 가짐을 확인하였다. 이러한 정량적 분석 결과는 단순히 특정 모델의 우위를 논하는 것을 넘어, 산업 현장의 구체적인 목표(정확도 vs. 실시간성)와 시스템 제약 조건에 따라 최적의 AI 모델을 선택해야 한다는 실증적 근거를 마련하였다.

향후 연구에서는 데이터셋 확장·현장 대규모 실증, 다중 환경 센서 통합을 통해 안전성·신뢰성·독립성이 더욱 강화될 것으로 기대된다.

사사

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

참고문헌

[1] S. Miyake, K. Yoshida, S. Sugano, and M. Kamezaki, "Preliminary design and evaluation of a ducted-fan type pipeline robot," *ROBOMECH Journal*, vol. 11, no. 17, pp. 1-10, 2024.

[2] Priyanto Hidayatullah et al., "YOLOv8 to YOLO11: A Comprehensive Architecture In-depth Comparative Review", arXiv preprint, 2025.