

강화학습 기반 코일 정렬을 통한 전기차 무선충전 전력 효율 최적화 시스템 개발

임지민, 김건우, 텔가도 라이마리우스*
명지대학교 전자공학과

jimin0403@mju.ac.kr, kww642@mju.ac.kr, *raim.delgado@mju.ac.kr

Reinforcement Learning-based Coil Alignment for Power Transfer Efficiency Optimization in EV Wireless Charging

Ji Min Lim, Kim Keon Woo, Raimarius Delgado*
Dept. of Electronics Engineering, Myongji University

요 약

기존의 유선 충전 로봇과 고정형 무선 충전 패드는 높은 설치 비용과 전용 인프라 구축이 필요하다는 한계를 가진다. 본 논문에서는 ROS 2 기반 이동로봇이 충전 모듈을 탑재하여 차량 하부로 자율 주행하고, 송수신 코일을 자동으로 정렬하는 이동형 무선 충전 시스템을 제안한다. 고정형 패드 방식과 달리, 제안한 시스템은 주차면을 개조하지 않고도 하나의 로봇으로 여러 대의 차량을 충전할 수 있다. 차량 하부에서 발생하는 LIDAR 가림 문제를 해결하기 위해, 로봇의 Edge AI 는 온 보드 전력 센서로부터 측정된 실시간 전력 전달 효율을 강화학습의 보상으로 사용하여, 외부 인식 센서에 의존하지 않고 최적의 코일 정렬 위치를 탐색한다. 본 접근법은 기존 충전 방식 대비 유연성이 높고 인프라 의존도가 낮은 대안임을 보여준다.

I. 서 론

전기차(EV) 수요 급증에 따라 충전 인프라 확충이 시급한 과제로 대두되고 있다 [1]. 그러나 기존 유선 충전소는 사용자의 수동 조작 불편함, 충전 플러그 규격의 비표준성 등 다양한 운영 및 사용성 문제를 안고 있다 [2]. 이를 해결하기 위해 로봇 팔 [3] 또는 정밀 도킹 방식을 이용한 유선 자동 충전 시스템이 연구되었으나, 이는 높은 개발 비용, 충전 로봇 전용 공간 할당, 유지보수 부담 증가라는 한계가 존재한다.

이러한 유선 자동 충전 시스템의 한계를 극복하기 위해, 무선 전력 전송(WPT) 기술이 대안으로 주목받고 있다 [4]. 하지만 고정형 무선 충전 시스템은 송수신 코일 간의 정렬 상태 변화에 따라 전력 전송 효율이 크게 달라지며 [5], 특히 정렬이 어긋나면 효율이 급격히 저하되는 새로운 문제에 직면한다. 선도 연구 및 기업들은 차량 자체의 자율 주행 또는 정밀 주차 기능을 통해 효율 문제를 해결하고자 하였으나, 여전히 주차면 바닥에 송신 패드를 매설해야 하므로 충전 전용 공간을 할당해야 하는 공간적 제약은 해결하지 못했다.

이에 따라 본 논문은 고정형 충전 시스템 공간-정렬 문제를 해결하기 위해, 자율주행 이동로봇 (AMR)을 활용하여 무선충전 송/수신 코일의 간격을 최소화하며 전력 전달의 효율을 최적화하는 시스템을 제안한다. 특히 차량 하부 센서 오염 환경에서는 내부 전력 센서 피드백을 강화학습 보상으로 활용하는 정렬 알고리즘을 통해 정밀 정렬을 달성한다. 제안 시스템은 AMR이 자율적으로 차량 하부로 진입하고 정렬을 수행하므로 사용자 편의성을 높인다.

II. 시스템 구성

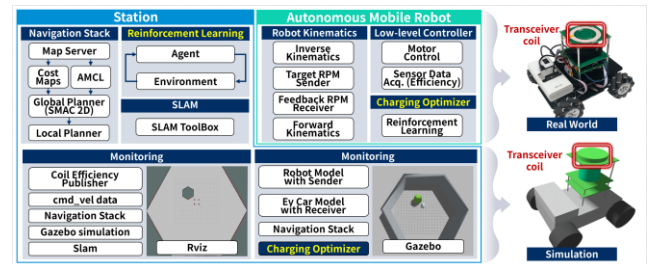


그림 1. 시스템 구조

본 논문에서 제안한 시스템은 하나의 관제탑 (Station)과 AMR로 구성된다. 관제탑에서 AMR에게 충전하고자 하는 차량의 위치를 전달하여 이에 따라 AMR은 전기차 근처까지 자율적으로 이동한다. 근처에 도착하면 AMR이 자동으로 탑재된 강화학습 모델을 이용해 최적 전력 전달 지점으로 정밀히 이동한다.

그림 1에서는 전체 시스템 구조를 보여준다. 실시간성과 안정성이 강화된 로봇 미들웨어 프레임워크인 ROS 2의 최신 LTS 버전인 Jazzy Jalisco를 기반으로 구축되었다. 관제탑 PC의 자율주행 기능을 담당하는 ROS 2의 NAV 2, LiDAR 센서를 활용해 지도를 구성한 SLAM과 AMR의 Raspberry Pi5에 올라가는 기구 학 모델, 코일 정렬을 위한 강화학습 모델로 구성된다. 연구에 사용한 AMR은 하위 제어 단 PCB와 상위 제어 단 Raspberry Pi5와 메카 넘 휠 바퀴로 구성하였다.

III. 강화학습

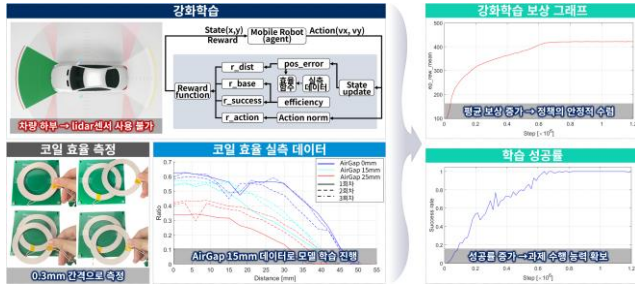


그림 2. 강화학습 모델 및 실측 데이터

강화학습은 Proximal Policy Optimization (PPO) 알고리즘을 사용하여 실험에 사용한 송수신 코일의 실측 데이터를 이용해 총 120만 스텝으로 모델을 학습시켰다. 그림 2에서는 강화학습 모델 및 성공률을 나타낸다. 좌측에서는 송수신 코일 실측 그래프와 모델 구조를 보여준다. 모델은 현재 위치 x, y 값을 받고 현재 전력 효율을 계산하여 반영된 보상 값으로 다음 스텝의 속도 명령을 출력으로 내보낸다. 우측 그래프는 해당 모델의 성공률을 보여준다. 이 모델을 Gazebo와 실제 AMR에 적용하여 AMR이 ROS2로 주차된 차량까지 자율주행으로 이동 완료되면 강화학습 모델로 전환하여 최적화된 위치를 탐색하기 시작한다.

IV. 결 과

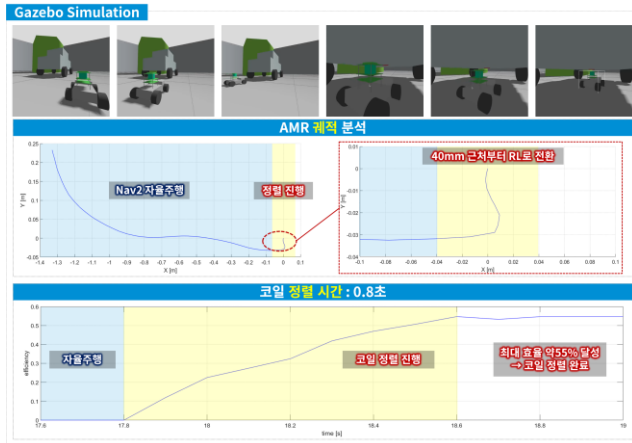


그림 3. Gazebo 시뮬레이션 상 실험 결과

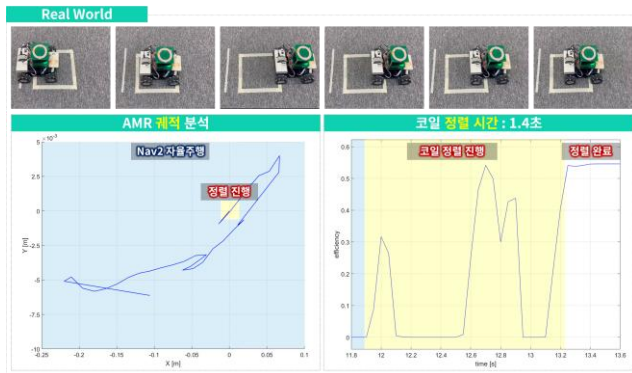


그림 4. 실제 환경 상 실험 결과

그림 3과 그림 4에서는 시뮬레이션 환경과 실제 환경에서 실험을 진행하여 제안한 시스템의 타당성을 궤적 분석과 정렬 시간을 기준으로 검증하였다.

그림 3에서는 시뮬레이션 환경 상 실험 결과인 AMR의 궤적 그래프와 전력 효율 그래프를 보여준다. 이를 위하여 Gazebo에서 관제탑과 AMR 3차원 모델을 설계하고 개발한 강화학습 모델을 적용하였다. 차량 위치를 AMR에게 전달 후 AMR은 약 17.8초 동안 ROS 2의 자율주행 기능을 담당하는 NAV2 패키지로 충전하고자 하는 차량의 하부까지 이동하였다. 수신코일로부터 약 40mm 근처에 도달 시 강화학습 모델로 전환되어 정렬을 시도해 0.8초만에 송수신 코일의 최대 전력 효율인 55%에 도달하고 AMR이 도착하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 4에서는 실제 AMR를 활용하여 동일한 실험을 진행하였다. 관제탑 역할을 하는 PC에서 AMR에게 목표 지점을 전달 후 약 11.9초 동안 수신부 40mm 근처까지 자율주행으로 이동하였다. 이후 강화학습 모델로 전환되어 정렬을 시도해 1.4초만에 최대 전력 효율인 55%에 도달하는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 시뮬레이션 환경인 Gazebo와 실제 환경 상 실험으로 본 논문의 목표였던 이동로봇이 자율주행과 강화학습을 통해 충전 모듈을 최적 효율 위치로 이동·정렬하는 시스템 개발을 달성할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문은 기존 전기충전소의 전력 효율 문제와 공간 할당 문제를 해결하기 위해 Nav2와 강화학습을 적용하여 무선충전 모듈을 옮기는 이동로봇의 타당성 분석을 검증하는데 목표로 하였다. 이를 위해 거리 기반 효율표의 강화학습 모델과 ROS2, Nav2, Lidar, Slam 기반 기술을 이용하였다. Gazebo 시뮬레이션과 실제 이동로봇 구동을 통해 의도한 자율주행을 잘 시행함을 확인할 수 있었다.

다만 본 연구는 작은 코일 사용으로 거리 기반 전력 효율표가 강화학습에 사용되어 전력 효율만으로 강화학습을 시키기 어려운 한계가 있었다. 따라서 향후 연구에서는 전력효율 기반 강화학습을 통해 전력 효율 표 없이 동작하는 방향으로 발전시킬 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 경기도의 재원으로 경기RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다. (20YY-RISE-09-A15)

참 고 문 헌

- [1] 국토교통부, "월간 자동차 등록 현황", 보도자료, 2025.09.
- [2] A. Michael, et al., "A Comprehensive State-of-the-Art Review of Wired/Wireless Charging Technologies for Battery Electric Vehicles", IEEE Access, 2021.
- [3] 권준, 외, "자율주행 모바일 로봇을 활용한 전기차 자동충전 시스템", ICROS, 2022.
- [4] 이영달, "전기차 무선충전 기술과 상용화 방향", 대한전기학회지, 72(8), 2023.
- [5] S. H. Kim, J. H. Lee, and J. C. Kim, "Design of DD Coil With High Misalignment Tolerance and Low EMF Emissions for Wireless Electric Vehicle Charging Systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 9, pp. 9779-9791, Sep. 2020.