

회생 제동 승차감 개선을 위한 모방 학습 적용 가능성 연구

양 현 준¹⁾ · 성 동 환¹⁾ · 이 광 언¹⁾ · 차 현 준¹⁾ · 차 석 원^{*1)}

서울대학교 기계공학부¹⁾

Feasibility Study of Imitation Learning for Ride Comfort Improvement in Regenerative Braking

Hyunjun Yang¹⁾ · Donghwan Sung¹⁾ · Gwangeon Lee¹⁾ · Hyun Joon Cha¹⁾ · Suk Won Cha^{*1)}

Dept. of Mechanical Engineering, Seoul National University¹⁾

Key words : Imitation Learning(모방 학습), Behavior Cloning(행동 복제), Generative Adversarial Imitation Learning(생성적 적대 모방 학습), Regenerative Braking(회생제동), Ride Comfort(승차감)

차석원, E-mail: swcha@snu.ac.kr

친환경 차량의 핵심은 제동 시 에너지를 회수하는 회생제동에 있다. 달리는 동안 형성된 운동에너지 및 경사에 의한 위치 에너지를 전기적 에너지로 저장하는 회생제동 시스템은 기존 차량에서 마찰열로 손실되었던 에너지를 재사용할 수 있게 해준다. 이렇듯 회생제동은 친환경 차량의 효율 · 주행거리 향상에 필수지만, 기존 기계식 제동과의 이질감이 실사용 불만을 야기한다. SoC · 온도 · 안전 제약에 따른 가용도 변동, 마찰-회생 블렌딩 경계, 정지 직전 컷오프로 감속 일관성이 깨지고 저크가 증가한다. 에너지 회수와 함께 운전자의 편의성을 보장하기 위해서는 회생 제동의 승차감 개선이 필요하다.

본 연구는 BEV의 회생제동 승차감 개선을 위해 모방학습을 적용, 기계식 제동을 전문가로 상정하고 주행 궤적으로부터 보상 함수를 학습하여 감속 구간 안전 · 주행 성능을 유지하는 제어를 제안한다. 운전자가 느끼는 회생 제동의 이질감은 전통적인 기계식 제동과의 차이에서 발생하지만 이를 보상 함수로 정의하는 것은 어렵다. 그렇기에 전문가의 행동을 표방하는 모방 학습을 통해 기계식 제동과 유사하게 작동하는 회생 제동 전략을 수립하여 운전자의 이질감을 최소화하고자 한다. 지도 학습을 기반으로 하는 모방 학습에서 기계적 제동을 표방하는 문제는 경로 추적 문제로 치환할 수 있으나 회생 제동력의 한계와 기계적 제동력의 한계를 보완하는 보상 함수가 필요하다. 이러한 문제는 모방학습 보다 고도화된 역강화학습 기법인 생성적 적대 모방 학습을 사용하여 해결한다.

FMU 기반 동역학 시뮬레이션과 계층형(RL 에이전트→운전자 모델→차량) 구조, 상태 직렬화를 도입해 다양한 초기조건에서 학습 · 평가하며, 적용 가능성을 보인다. 향후 GAIL과 같은 고도화된 역강화학습 기법 적용 가능성을 확인하기 위해 연산 속도가 빠른 모방 학습을 토대로 강화 학습 프레임워크를 개발하고 개선 사항과 한계점을 분석한다.

최종적으로 개발된 제어 시스템과 기계적 제동 사이의 유사도를 분석하고 제어 적용에 따른 충전량 감소를 분석해 모방 학습의 당위성을 설명한다. 승차감과 충전량 사이의 트레이드 오프에 의해 약간의 전비 저하가 있으나 운전자가 적극적으로 사용할 수 있는 회생제동 제어 전략 수립을 통해 실질적인 개선을 도모한다.

후기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2024-00438007)