

AEKF 기반 타이어 마찰 계수 추정

이 승 용¹⁾ · 심 연 수¹⁾ · 이 두 현¹⁾ · 김 기 우^{*1)}

인하대학교 기계공학과¹⁾

Tire Friction Coefficient Estimation Based on Adaptive Extended Kalman Filter

Seung-Yong Lee¹⁾ · Yeon-Su Sim¹⁾ · Doo-Hyun Lee¹⁾ · Gi-Woo Kim^{*1)}

Inha University¹⁾

Key words : Tire friction coefficient(타이어 마찰 계수), Adaptive extended Kalman filter(Adaptive extended Kalman filter), Vehicle longitudinal velocity(차량 종방향 속도), Tire effective radius(타이어 유효 반지름), Tractive force(구동력), Wheel slip ratio(휠 슬립률)

김기우, E-mail: gwkim@inha.ac.kr

결빙되거나 적설이 있는 도로와 같이 마찰이 작은 노면에서는 일반 노면과 비교했을 때 제동거리가 크게 증가하기 때문에 심각한 교통사고로 이어질 수 있다. 이에 교통사고를 줄이거나 예방하는 기술을 개발하기 위한 많은 연구가 지금까지 지속적으로 이루어지고 있다. ABS(Antilock braking systems), ESC(Electronic stability control) 시스템, ACC(adaptive cruise control) 시스템과 같은 능동안전시스템(Active safety system)이 대표적이고, 이러한 시스템은 주행 안전성과 차량 안정성을 개선하는 데 중요한 역할을 한다. 능동안전시스템의 성능을 위해서는 정확한 타이어 마찰 계수(Tire friction coefficient) 추정을 통한 노면 분류가 중요하다. 최근의 노면 분류 기술은 카메라, LiDAR 등의 이미지 기반의 방법에 중점을 두고 연구가 진행되고 있다. 그러나 이러한 이미지 기반의 방법들은 정확도가 낮을 뿐만 아니라 높은 계산 복잡도의 문제를 가지고 있다. 이뿐만 아니라 높은 비용으로 인해 상용화 측면에서도 단점을 드러내고 있다.

본 연구에서는 센서 융합 기술을 활용하여 이미지 기반 방법의 문제점을 해결하고자 한다. 차량 종방향 동역학(Vehicle longitudinal dynamics) 모델을 선형화하여 칼만 필터(Kalman filter)를 적용한 타이어 마찰 계수 추정 알고리즘을 설계한다. 전기차 CAN 버스로부터 얻을 수 있는 모터 출력 토크(Motor output torque)와 차량 종방향 가속도(Vehicle longitudinal acceleration)를 측정값으로 하여 칼만 필터에 적용하여 차량 종방향 속도(Vehicle longitudinal velocity)와 타이어 유효 반지름(Tire effective radius)을 동시에 추정한다. 기존의 차량 종방향 동역학 기반 타이어 마찰 계수 추정 연구들은 차량 종방향 속도를 GPS와 같은 추가적인 센서의 부착을 통해 측정하거나, 타이어 유효 반지름을 상수로 가정하였다. 하지만 타이어 유효 반지름은 실제로는 상수가 아니며, 타이어 마모 등에 의해 변화한다. 본 연구에서는 차량 종방향 속도와 타이어 유효 반지름을 동시에 추정하여 이와 같은 문제를 해결하고, 차량 종방향 동역학만을 적용함으로써 모델을 단순화하여 시스템 행렬의 크기를 감소시켰다. 또한 전통적인 칼만 필터 대신 AEKF(Adaptive extended Kalman filter)를 적용한다. 이는 페이딩 계수(Fading factor)의 도입을 통해 알고리즘의 반응성 및 안정성을 향상시킨다. 모터 구동 토크와 추정된 차량 종방향 속도, 타이어 유효 반지름을 통해 구동력(Tractive force)과 휠 슬립률(Wheel slip ratio)을 계산하고 그 둘의 관계를 이용하여 최종적으로 타이어 마찰 계수를 추정한다. MATLAB/Simulink® SW 및 CarSim®을 사용하여 제안한 알고리즘의 성능을 검증하였으며, 본 연구의 결과는 능동안전시스템의 성능을 개선시켜 차량의 미끄러짐으로 인한 교통사고의 예방에 도움이 될 것으로 예상된다.

※ 이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00432265, 도로노면상태 판단을 위한 임베디드 AI 제어기 개발)