

모델 불확실성 보상 전략 기반

적응형 경로 추종 및 토크 벡터링 통합제어 연구

박 시 영¹⁾ · 오 태 영¹⁾ · 이 준 행¹⁾ · 유 진 우^{*2)}

국민대학교 자동차모빌리티대학원 ¹⁾, 국민대 자동차IT융합학과 ²⁾

A Study on Integrated Control of Adaptive Path Following and Torque Vectoring to Compensate for Model Uncertainties

Siyeong Park¹⁾ · Taeyoung Oh¹⁾ · Junhaeng Lee¹⁾ · Jinwoo Yoo^{*2)}

Graduate school of Automobile and Mobility, Kookmin University, Seoul 02707, Korea¹⁾

Department of Automobile and IT Convergence, Kookmin University, Seoul 02707, Korea²⁾

Key words : Path Tracking(경로 추종), Torque Vectoring (토크 벡터링), Adaptive Control (적응 제어), Autonomous Vehicle (자율주행 차량)

교신저자, E-mail: 유진우(jwyoo@kookmin.ac.kr)

본 연구는 자율주행 차량의 극한 주행 상황에서 경로 추종 성능을 향상하기 위한 적응형 제어 시스템을 개발하는 것을 목적으로 한다. 자율주행 기술의 안전성과 신뢰성 확보를 위해서는 다양한 주행 환경에서 정확한 경로 추종 능력이 필수적이다. 특히 고속 코너링, 긴급 회피와 같은 극한 상황에서 차량이 조향만을 사용하여 경로 추종을 수행할 경우, 모델 불확실성과 환경적 변수로 인해 주어진 경로로부터 실제 주행 경로가 이탈하는 문제가 발생한다. 이러한 문제는 차량의 구조적 특성과 실제 환경의 불확실성으로 인하여 경로 추종 오차를 증가시킨다.

최근 연구에서 인휠 모터를 활용한 토크 벡터링 기술을 통해 경로 추종 성능을 향상하기 위한 연구들이 진행되고 있다. 토크 벡터링은 각 바퀴의 구동력을 개별적으로 제어하여 차량에 추가적인 Yaw Moment를 발생시키는 기술로, 주행 상황에서 추가적인 선회력 확보로 차량 경로 추종 성능을 개선할 수 있음을 여러 연구를 통해 확인되었다. 경로 추종과 토크 벡터링 제어 사이의 통합제어는 자율주행 제어기의 조향각을 기준으로 주행속도를 통해 선회하고자 하는 Yaw rate를 추종하기 위한 Yaw Moment를 제어하는 Direct Yaw Moment Control(DYC)을 수행한다. 이를 토대로 각 인휠 모터에 구동력을 분배하여 Yaw rate를 추종하는 제어를 수행하게 된다. 하지만, 자율주행 차량의 경로 추종 제어와 토크 벡터링 시스템의 성능은 차량 동역학적 모델 파라미터의 정확성에 의존한다. 타이어의 코너링 강성이나 노면 마찰계수는 주행 환경과 차량 상태에 따라 실시간으로 변동될 수 있다. 또한 제어기에 사용된 차량 동역학 모델이 정확하지 못하면, 실제 차량과 동역학 모델 사이의 불일치가 발생하여 제어 파라미터 보상능력 저하 문제가 발생한다. 토크 벡터링을 통한 추가적인 선회력을 확보하더라도, 이러한 불확실성으로 인해 예상한 만큼의 Yaw Moment를 확보하지 못하거나 과도한 제어 입력이 유발되어 차량 제어 성능이 저하된다. 결과적으로 이러한 문제는 다양한 주행 조건에서 제어기의 강건성이 중요함을 시사한다.

본 논문에서는 상기 문제점들을 해결하기 위해 모델 참조 적응 제어(Model Reference Adaptive Control, MRAC)를 통해 자율주행 제어기와 토크 벡터링 사이에서 발생하는 모델 불일치와 코너링 강성의 변화에 적응하여 경로 추종 성능을 향상시키는 방법을 제시한다. 제안하는 제어구조는 자율주행 경로 추종 제어기에서 MPC(Model Predictive Control) 제어기를 통해 경로 추종을 위한 조향각을 생성한다. 토크 벡터링을 수행하기 위해 MPC 제어기에서 만들어진 조향각과 현재 속도를 기준으로 Neutral steer(중립조향)에 대한 Yaw rate을 계산하는 Yaw rate Planner를 통해 실제 차량이 추종해야 하는 Desired Yaw rate을 계산한다. 토크 벡터링의 상위 제어기에서 Desired Yaw rate을 추종하기 위한 Yaw Moment를 제어입력으로 만든 뒤, 하위 제어기에서 각 휠에 토크 할당을 위한 최적화 기반 구동 분배를 수행한다. 모델 참조 적응 제어(MRAC)는 이상적인 참조모델을 구성하고, 실제 시스템이 이상적인 모델을 추종하도록 하는 제어 기법으로 코너링 강성처럼 시스템 내부에 있는 불확실성이나 설

계해 둔 제어기의 고정 파라미터들을 차량 실제 출력과 참조모델 출력사이의 오차를 통해 추가적인 제어입력을 생성한다. 이를 통하여 목표 Yaw rate을 추종하기 위한 추가 Yaw Moment를 만들어 코너링 강성과 사전에 설계된 제어기의 성능을 보상하는 역할을 수행한다.

제안한 MRAC 기반 적응형 통합제어 시스템을 통해 차량 동역학 모델의 불확실성과 코너링 강성의 실시간 변화에도 대응하여, 기존의 조향만 활용한 제어 방식 대비 극한 주행 조건에서의 경로 추종 정확성이 향상될 것으로 기대된다. 특히, 토크 벡터링을 통한 추가적인 Yaw Moment의 확보로 인해 경로 이탈의 가능성이 감소하고, 긴급 회피 및 고속 코너링과 같은 주행 상황에서도 차량의 제어 신뢰성이 크게 증대될 것으로 예상된다. 이를 통해 본 연구에서 제안하는 제어 방법은 Lv.4 이상의 고도화된 자율주행 차량의 안정적이고 신뢰성 높은 운행에 크게 기여할 것으로 기대된다.

Acknowledgment

※ 이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (과제번호 : 20024814, 과제명 : 허브연계형 Lv.4 상용차 자율주행 예측구동제어 및 최적운행 기술 개발)

본 연구는 부분적으로 대한민국 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 4단계 BK21사업(2120240815267)의 지원을 받았음