

CACC 기반 동적 시나리오를 위한 Truck Platooning 시뮬레이션 시스템 개발

김진경, 안소연, 조하연, 김가람, 오승민

국립공주대학교

{202101750, 202101775, 202101809, 202101733}@smail.kongju.ac.kr, smoh@kongju.ac.kr

Development of a CACC-based Truck Platooning Simulation System for Dynamic Scenarios

Jingyeong Kim, Soyeon An, Hayeon Cho, Garam Kim, and Seungmin Oh

Kongju National University

요약

본 논문은 오픈소스 교통 시뮬레이터인 SUMO(Simulation of Urban MObility)를 활용하여 트럭 플레투닝(Truck Platooning) 시스템을 구현하고, 실제 도로에서 발생하는 다양한 동적 시나리오에 대한 안정성을 검증하였다. 기존 연구들이 정적인 대열 유지에 집중한 것과 달리, 본 연구에서는 CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control) 알고리즘을 기반으로 일반 차량의 끼어들기(Cut-in), 중간 합류 및 이탈, 급정지 상황을 실시간으로 처리할 수 있는 통합 제어 로직을 제안하였다. 실험 결과, 플레투닝 적용 시 공기저항 감소를 통해 이산화탄소 배출량이 약 1.06% 감소함을 확인하였으며, Tkinter 기반 UI를 통해 차량 상태를 직관적으로 모니터링할 수 있는 테스트베드를 구축하였다.

I. 서론

현재 글로벌 교역의 활성화로 인해 수출입 화물 물동량이 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 물류센터는 점차 거점화 및 대형화되는 추세에 있다. 그러나 이러한 물류 산업의 양적 성장을 뒷받침해야 할 운송 수단은 여전히 도로 위 화물차에 절대적으로 의존하고 있는 실정이다. 통계에 따르면 국내 화물 수송의 약 87.6%가 도로 수송에 집중되어 있으며, 이러한 과도한 의존도는 교통 체증 심화, 물류비용의 상승, 그리고 대형 화물차로 인한 교통사고 위험 증가라는 사회적 비용을 발생시키고 있다.

이러한 물류 산업의 한계를 극복하기 위한 혁신적인 대안으로 '트럭 플레투닝(Truck Platooning)' 기술이 주목받고 있다. 트럭 플레투닝은 선두 차량을 중심으로 후속 차량들이 무선 통신(V2V)을 통해 짧은 간격을 유지하며 군집 주행하는 기술로, 공기 저항 감소를 통해 연료 효율을 10~15% 개선하고 이산화탄소 배출을 줄이는 환경적 이점을 제공한다. 또한, 도로 용량을 최적화하고 운전자의 피로도를 낮추어 사고 예방에도 기여할 수 있다.

하지만 실제 도로 환경은 시뮬레이션상의 이상적인 조건과 달리 일반 차량의 빈번한 끼어들기(Cut-in), 예기치 못한 급정지, 대열의 합류 및 이탈 등 다양한 동적 시나리오가 끊임없이 발생한다. 따라서 플레투닝 시스템이 실용화되기 위해서는 이러한 돌발 상황에서도 대열의 안정성을 유지할 수 있는 정교한 제어 알고리즘의 검증이 필수적이다.

본 논문에서는 오픈소스 교통 시뮬레이터인 SUMO와 TraCI 인터페이스를 활용하여, CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control) 기반의 트럭 플레투닝 시뮬레이션 시스템을 구축하였다. 특히 실제 주행 시나리오에서 발생할 수 있는 일반 차량의 간섭과 급격한 속도 변화에 대응하는 제어 로직을 설계하였으며, 실시간 UI 대시보드를 통해 시스템의 동적 대응 능력을 시각적으로 검증하고 그에 따른 환경적 기대 효과를 분석하고자 한다.

II. 알고리즘

본 연구에서는 차량 간 무선 통신(V2V)을 활용하여 전방 차량의 주행 정보를 공유받는 CACC 방식을 채택한다. 팔로워 차량은 실시간으로 수집된 데이터를 바탕으로 목표 가속도를 산출하며, 그 과정은 다음과 같다.

(1) CACC 기반 추종 제어 알고리즘

가. 기준 차간 거리(Target Gap) 설정

정지 상태의 최소 안전거리(d_0)와 차량의 현재 속도(v_F) 및 시간 간격(T_h)을 변수로 하는 Constant Time Gap 정책을 적용하여 동적 기준 거리(d_{ref})를 산출한다.

$$d_{ref} = d_0 + T_h \cdot v_F$$

나. PD 제어 기반 가속도 산출

목표 거리 오차와 선행차량(v_L) 및 추종 차량(v_F) 간의 상대 속도를 제어 입력으로 하는 PD(Proportional-Derivative) 제어를 수행한다.

$$a_{cmd} = a_L + K_p \cdot (d - d_{ref}) + K_D \cdot (v_L - v_F)$$

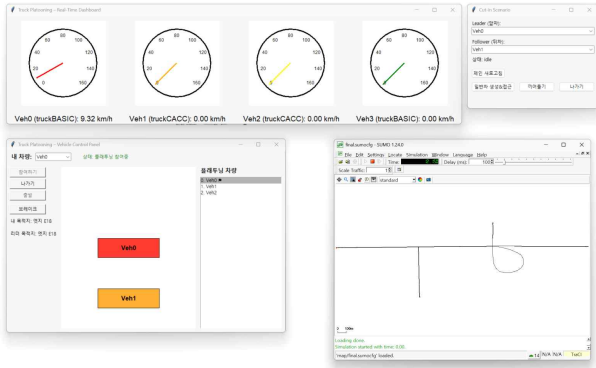
위 식에서 a_L 는 선행 차량의 가속도이며, K_p 와 K_D 는 각 오차 항에 대한 제어 게인이다. 도출된 목표 가속도(a_{cmd})는 매 타임 스텝(ΔT)마다 속도 명령(V_{cmd})으로 변환되어 하부 구동계로 전달된다.

(2) 리더/팔로워 구성 및 초기 제어 설정

본 시스템은 실행 시 SUMO를 실행하여 모든 차량에 대해 기본 안전 규칙을 설정한다. 이후 플레투닝 전용 트럭이 지정된 주차 구역에 모두 진입하여 정지하게 되면 사용자는 리더 1대와 팔로워를 선택한다. 선택된 차량들은 [Leader, F1, F2, ...] 형태로 정렬되며, 이를 기반으로 (F1, Leader), (F2, F1), ...의 FOLLOW_PAIRS가 생성되어 선행 추종 구조가 정의된다. 리더 차량은 truckBASIC 타입을 유지하고, 팔로워 차량은 truckCACC 타입으로 전환된다. truckCACC는 차선 변경 금지

(LCMode=0), 시간 헤드웨이(τ), 최소 간격(minGap), 안전 제동 파라미터를 일괄적으로 정렬하여 초기 추종 제어의 안정성을 확보한다.

III. 구현 결과



본 연구에서 제안한 트럭 플래투닝 시스템의 성능을 검증하기 위해 SUMO 시뮬레이션 환경에서 다양한 주행 시나리오를 수행하였다. 먼저 프로그램 실행 시 CACC 모드 전환을 통해 차량 간 간격이 약 15m 내외로 안정적으로 유지됨을 확인하였다. 특히 실시간 속도 대시보드와 사용자 UI를 통해 각 차량의 주행 모드(truckBASIC, truckCACC)와 실시간 간격(Gap) 정보가 정상적으로 출력됨을 검증하였다.

본 시스템은 신속한 실험 수행을 위해 끼어드는 일반 차량을 임의로 생성하는 기능을 포함한다. 생성된 일반 차량은 사용자 제어에 따라 플래투닝 대열이 형성된 차선으로 진입하며, 대열은 해당 차량의 끼어들기 동작을 인지하여 안전한 차간 거리 유지를 위해 감속한다. 끼어들기 완료 후에는 해당 일반 차량을 임시 선행 차량으로 간주하고, 대열은 약 15m의 차간 거리를 유지하며 안정적인 추종 상태로 전환된다. 또한, 시스템이 인접 차선에서 접근하는 차량을 실시간으로 인식하여 후방 차량의 간격을 유연하게 확장하는 양보 브레이크 로직이 성공적으로 작동하였음을 확인하였다.

리더 차량의 급정지 시나리오에서는 후속 차량들이 V2V 통신을 통해 감속 정보를 즉각적으로 공유받아 최소 안전거리인 5m 이상을 유지하며 충돌 없이 정지하였다.

중간 합류 상황에서는 차량과의 거리가 300m 이내로 진입할 경우 합류 가능 상태로 전환된다. 현재 위치와 주행 상태를 고려하여 가장 적합한 선행 차량을 결정한다. 합류 위치가 결정되면 주변 차량이 사전에 정의된 안전거리를 지속적으로 계산하여 안정적으로 대열에 합류하는 모습을 확인하였다.

이탈 상황에서는 해당 차량의 플래투닝 내 위치를 분석하고, 주변 차량을 식별하여 FOLLOW_PAIRS에서 이탈 차량을 제거한 후, 추가적인 안전 거리 보완 로직을 구현해 논리적인 체인 재구성이 매끄럽게 이루어짐을 확인하였다.

IV. 결론

본 연구에서는 SUMO와 TraCI 인터페이스를 활용하여 실제 도로의 복잡한 동적 시나리오에 유연하게 대응할 수 있는 트럭 플래투닝 통합 제어 시스템을 개발하였다. 연구의 핵심은 단순히 대열을 유지하는 수준을 넘어, 일반 차량의 끼어들기나 대열의 중간 합류 및 이탈과 같이 실제 주행 환경에서 빈번히 발생하는 변수들을 CACC 기반의 상태 제어 로직으로 해결했다는 점에 있다. 특히 시스템이 인접 차선의 차량을 실시간으로 인

식하여 안전 거리를 선제적으로 확보하는 양보 브레이크 로직과 V2V 통신을 통한 급정지 대응 능력은 군집 주행의 안전성을 입증하는 핵심적인 결과였다.

또한, 본 연구는 주행 중 실시간으로 대열 구성을 변경할 수 있는 논리적 체인 재구성 기능을 통해 물류 현장에서의 실용성을 확보하였으며, 이를 직관적인 UI 대시보드로 시각화하여 제어 상태를 명확히 모니터링할 수 있는 테스트베드를 구축하였다. 플래투닝 활성화에 따른 환경 영향 분석 결과, 4대의 트럭이 군집 주행을 수행할 때 비활성화 상태 대비 이산화탄소 배출량과 연료 소비량이 각각 약 1.06% 감소하는 정량적 효과를 도출하였다. 이는 플래투닝 기술이 물류 산업의 경제적 효율성 제고뿐만 아니라 탄소 중립 실현을 위한 친환경적 대안이 될 수 있음을 시사한다.

향후 연구에서는 실제 도로의 경사도나 기상 상황, 통신 지연 등 현실적인 물리 변수들을 알고리즘에 적용하고, 보다 정밀한 시뮬레이션 모델을 구축함으로써 시스템의 강건성을 보완할 계획이다. 이러한 연구의 발전은 향후 완전 무인화된 미래 물류 운송 시스템의 핵심 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2026년 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업 지원을 받아 수행되었음(2024-0-00073)

참고 문헌

- [1] 김수경, 권소연 “2025 Korea Logistics Market Repoort”, 2025
- [2] 한국교통연구원 화물운송시장정보센터, “2024 화물운송시장 동향 연간보고서” 2025
- [3] <https://sumo.dlr.de/docs/index.html>
- [4] <https://treesparrow.tistory.com/8?category=1411341>