

멀티에이전트 혼재 도로 환경에서 자율주행 차량의 안전성 검증을 위한 시뮬레이션 환경 구축 연구

황영서, 박선엽, 양현덕, 윤윤기, 김봉섭, 윤경수*

지능형자동차부품진흥원

dudtj7476@kiapi.or.kr, srad14@kiapi.or.kr, yhd0427@kiapi.or.kr, ykyoon@kiapi.or.kr, bskim@kiapi.or.kr, kadbonow@kiapi.or.kr

Study on Simulation Environment for Validating Autonomous Vehicle Safety in Mixed Multi-Agent Traffic

Youngseo Hwang · Sunyub Park · Hyeyondeok Yang · Yungi Yoon · Bongseob Kim, · Kungsu Yun*

Korea Intelligent Automotive Parts Promotion Institute (KIAPI)

요약

본 논문은 자율주행차 안전성 검증에서 가장 시뮬레이션의 비선형 동역학 모사 한계와 현장 시험의 비용 부담을 동시에 해소하기 위해 CARLA 기반 Vehicle-in-the-Loop(VIL) 시스템을 제안한다. 제안 시스템은 실제 차량을 가상 주행 환경과 연동하여 전방충돌방지, Cut-in/Out, 차선변경 시나리오를 재현하고 해당 시나리오의 결과를 Time Headway, PICUD, DRAC, TTC로 정량 검증한다. 검증 결과 전방충돌방지와 Cut-in/Out에서 지표가 임계값을 초과해 제어·예측 모듈의 취약 구간을 식별할 수 있었으며, 이를 통해 제안된 VIL 시스템이 기존 시뮬레이션보다 시나리오의 현실성을 높이는 동시에, 도로 실차 시험에 비해 시간과 비용을 크게 절감하면서도 개선 방향을 효과적으로 도출할 수 있음을 확인하였다.

I. 서 론

4단계 이상 자율주행차는 운용설계범위 내에서 복합적인 주행 환경과 교통상황에서도 안전성을 입증해야 한다. 이를 위해서는 다양한 요소와 차량 간 상호작용을 포함한 종합적 검증이 필수적이다. 그러나 실제 도로에서 반복 재현 시험으로 신뢰성을 확보하려면 막대한 시간·비용·인력이 소요되므로, 효율적인 검증 방법이 요구된다 [1][2]. 기존에는 완전 가상 시뮬레이션을 통해 시험 과정을 단순화하려는 노력이 있었지만, 차량의 비선형 특성을 충분히 모사하기 어렵다는 한계가 있었다. 이러한 한계를 일부 보완하기 위해 Hardware-in-the-Loop(HILS)가 활용되었으나, HILS는 ECU·센서 단위의 하드웨어 응답만 검증할 뿐 실제 차량 동역학 및 주행 환경을 통합적으로 재현하기에는 여전히 제한적이다. 따라서 실제 차량의 특성을 반영하면서도 안전하게 반복 시험할 수 있는 새로운 접근이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 가상 환경과 실제 차량을 실시간으로 연동하는 Vehicle-in-the-Loop(VIL) 시스템을 구축하였다. VIL은 실제 센서·액추에이터·자연·차체 비선형 거동, 도로 마찰 조건 등을 그대로 반영하면서도 위험 시나리오를 안전하게 반복 재현할 수 있어, 순수 시뮬레이션 대비 높은 현실성과 신뢰성을 확보할 수 있다. 본 연구에서는 CARLA 시뮬레이터를 활용해 전역 경로와 주변 교통 환경을 생성하고, 실제 자율주행 차량이 이를 추종하면서 지역 경로 계획 및 제어 알고리즘을 수행하도록 설계함으로써 현실적인 시나리오를 구현하였다. 또한 차량 주행 안전성 지표를 활용해 자율주행 차량의 위험 상황을 식별하고, 이를 토대로 시스템 개선점을 도출함으로써 제안된 VIL 기반 검증 환경의 유효성을 입증한다.

II. 본론

시나리오 기반 자율주행 안전성 검증을 위해 구성된 VIL 시스템의 전체 구조는 그림 1에 나타나 있다. 본 시스템은 ROS(Robot Operating System)를 기반으로 자율주행 시스템이 탑재된 PC와 CARLA 시뮬레이터가 구동되는 PC를 연동하여 구현하였다. 차량의 정밀한 거동 정보 수집을

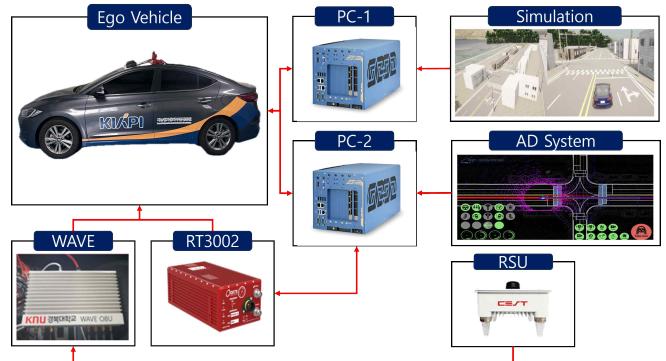


그림 1. Vehicle In the Loop 시스템 구성

위해 RT3002를 장착하였으며, 주행시험장 내 교통 신호 정보를 실시간으로 수신하기 위해 차량에 OBU(On-Board Unit)를 탑재하여 WAVE(Wireless Access in Vehicular Environments) 통신을 통해 교차로의 신호 정보를 수신할 수 있게 하였다. 또한, 시나리오 기반 자율주행 검증을 위한 시뮬레이션과 자율주행 시스템 간 연동 정보에는 가상 차량과 실제 차량 간의 거동 정보, 시뮬레이션 환경 내 가상 객체 정보, 그리고 시뮬레이션 차량의 전역 경로 정보 등이 포함된다.

구현한 VIL 시스템을 기반으로, 자율주행 차량 안전성 검증의 기본 시나리오인 전방충돌방지와 목표 차량의 Cut-in/Cut-out, 그리고 대상 차량의 차선변경 시나리오를 구성하고 검증을 수행하였다. 검증에 활용된 지표로는 Time Headway, Predicted Impact Corridor Under Distance, Deceleration Rate to Avoid Collision, Time to Collision 네 가지를 사용하였으며, 지표별 안전지표는 Mahmud et al. [3]를 참고하여 표 1과 같이 정의하였다.

안전지표	TH	PICUD	DRAC	TTC
기준	⟨ 1.8 s	⟨ 0 m	⟩ 3.40 m/s ²	⟨ 3.0 s

표 1. 안전지표별 검증 기준

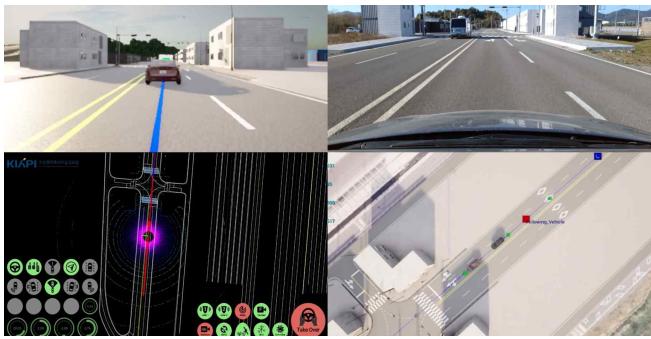


그림 2. VII 시스템 기반 자율주행 시나리오 검증

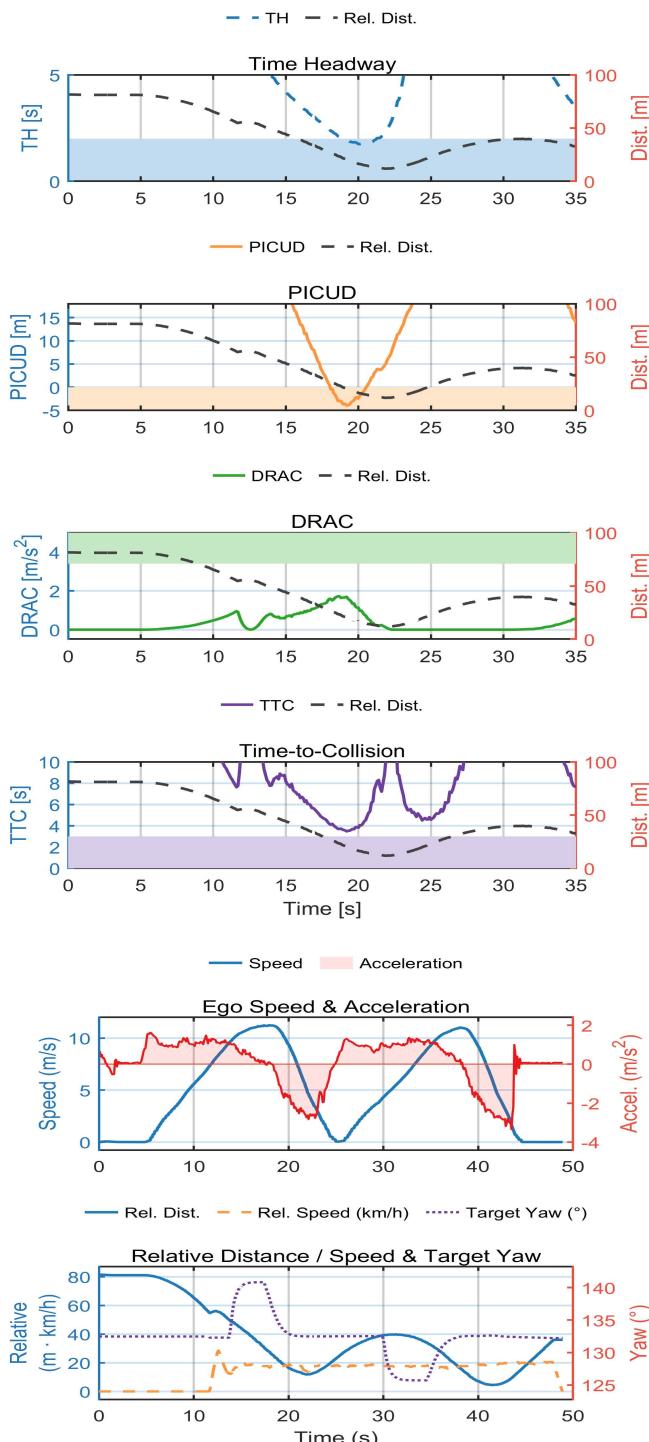


그림 3. Cut-in & Cut-out 시나리오 검증 결과

항목	THW	PICUD	DRAC	TTC	결과
Cut-In/Out	1.76 s	-3.95 m	$1.65 m/s^2$	3.55 s	Fail
전방충돌방지	1.6 s	-1.22 m	$3.7 m/s^2$	1.28 s	Fail
차선변경	3.43 s	12.76	$1.91 m/s^2$	3.97 s	Pass

표 2. 안전지표에 대한 자율주행 검증 시나리오 수행 결과

각 시나리오의 검증 결과는 표 2와 같다. Cut-In/Out 시나리오 그림 4에서는 THW(1.76 s)와 PICUD(-3.95 m)가 각각 최소 시간 간격 및 정지거리 여유 기준을 하회하여, 추종 거리 확보 측면에서 구조적 한계를 나타냈다. DRAC($1.65 m/s^2$)와 TTC(3.55 s)는 기준을 만족하였으나, 이는 상대 속도 차가 작아 충돌 회피가 가능했던 조건으로 해석된다. 목표 차량의 횡방향 진입에 대한 공간 확보가 미흡하여 FAIL로 평가되었으며, 이에 따라 간격 유지 조작과 예측 기반 제어 전략의 필요성이 제기된다. 전방충돌방지 시나리오에서는 네 지표 모두(THW: 1.6 s, PICUD: -1.22 m, DRAC: $3.7 m/s^2$, TTC: 1.28 s)가 기준을 위반하였다. 이는 전방 차량의 급감속 상황에서 제동 개입이 지연되어 일시적으로 충돌 회피가 불가능한 상태에 진입했음을 의미한다. 특히 요구된 감속도가 일반적인 승차 편의 기준을 초과한 점은, 위험 감지부터 제동까지의 응답 시간 단축 및 상호작용 예측 정밀도 제고의 필요성을 시사한다. 반면, 차선변경 시나리오는 모든 지표가 안전기준을 만족하여 PASS로 판정되었으며, 이는 계획된 횡방향 이동 조건에서 현행 제어 로직이 안정적인 간격 유지 성능을 보유하고 있음을 나타낸다.

III. 결론

본 논문에서는 실제 차량과 시뮬레이션을 실시간으로 연동하는 VII 시스템을 구축하고, 이를 통해 시나리오 기반의 안전성 검증을 수행하였다. 검증 과정에서 안전지표 기준을 만족하지 못하는 잠재적 위험 상황들을 식별할 수 있었으며, 이는 본 연구에서 구현한 검증 환경이 자율주행 차량의 안전성 검증 및 개선점 도출에 유용하게 활용될 수 있음을 시사한다. 향후 연구에서는 본 시스템을 더욱 고도화하여 V2X 통신 기능을 포함한 보다 다양한 복합 시나리오에서 안전성을 검증할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021-0-01415, 엣지연계 도심형 자율주행 서비스 검증을 위한 테스트 시나리오 생성 및 멀티에이전트기반 시뮬레이션SW 기술개발)

참 고 문 헌

- [1] S. Riedmaier et al., "Survey on Scenario-Based Safety Assessment of Automated Vehicles," in IEEE Access, vol. 8, 2020, pp. 87456 - 87477.
- [2] T. Zhang et al., "Virtual Tools for Testing Autonomous Driving: A Survey and Benchmark of Simulators, Datasets, and Competitions," in Electronics, vol. 13, 2024, Art. no. 3486.
- [3] Mahmud S. M et al, "Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs," IATSS Research, vol. 41, no. 4, pp. 153 - 163, 2017.