

데이터 분석 기반 3-Tier 연계형 자율주행 운행 안전성 검증을 위한 기초연구

문준형, 이현미, 장정아

아주대학교

mtj0621@gmail.com, hm0625@ajou.ac.kr, azang@ajou.ac.kr

A Foundational Study on Data-Driven 3-Tier Integrated Framework for Autonomous Driving Safety Verification

Moon Junhyeong, Lee Hyunmi, Jang Jeongah

Ajou Univ.

요약

본 연구는 3-Tier 연계형 데이터 기반 자율주행차의 안전성 검증을 위해 안전성 지표와 위험 요인 분석 프레임워크를 제안하였다. 기존 문헌을 통해 25개 간접적 지표를 도출하고, LSTM Attention Autoencoder 및 DTW 기법을 활용하는 프레임워크를 제시하였다. Waymo perception Dataset을 활용한 초기 검증 결과, 제안된 프레임워크의 적용 가능성을 확인하였으며, 향후 국내 3-Tier 데이터로 확장하여 실도로 기반의 안전성 검증 체계를 구축할 예정이다.

1. 서론

자율주행차의 상용화를 위해서 차량 자체의 센서·알고리즘 성능과 더불어 운행 환경에서 발생하는 다양한 위험 요인을 평가할 수 있는 정량적 지표의 필요성이 강조되고 있다. 이러한 배경 속에서 제시된 테슬라의 End-to-End(E2E) 자율주행 시스템 이후 빠른 발전을 거듭하며 통합적 데이터 활용의 가능성을 확대하였다. 기존 모듈 기반 자율주행 시스템은 인지-판단-제어 단계를 독립적으로 처리하였으나, E2E 구조의 자율주행 시스템에서는 큰 규모의 주행 로그 데이터와 다양한 센서 데이터를 직접 학습하여 통합적인 의사결정을 수행한다. 이러한 발전은 자율주행 시스템의 내부 알고리즘 성능 고도화뿐만 아니라 외부 교통환경 및 인프라 데이터와의 연계를 통해 안전성 검증 체계를 보완할 수 있는 가능성이 존재한다. 따라서 자율주행차의 안전성 검증 단계에서 단일 수집원을 통해 수집된 데이터나 지표에 의존하기보다는, 다수의 수집원에서 수집된 데이터들 간의 연계를 통한 다차원적인 분석이 필요하다. 본 논문에서는 데이터 분석 기반의 3-Tier 연계형 안전성 검증 프레임워크 구축을 위한 기초 단계로서, 안전성 평가지표 후보군 도출과 이상 주행 상황 탐지 및 위험 요인 분석 프레임워크를 제안한다. 이를 위해 Waymo Perception Dataset을 활용하여 지표 적용 가능성과 프레임워크의 초기 성능을 검토하였다.

II-1. 자율주행 안전성 지표 설계

자율주행 안전성 평가를 위해서는 주행 과정에서 발생할 수 있는 위험 요인을 정량적으로 측정할 수 있는 지표 체계가 필요하다. 도로 인프라 관점에서 이러한 지표는 크게 직접적 지표(Direct Measures)와 간접적 지표(Indirect Measures)로 구분할 수 있다. 직접적 지표는 특정 도로 구간에서 과거 실제로 발생한 사고 데이터를 기반으로 사고의 빈도와 심각도를 평가하는 방식이다. 반면, 간접적 지표는 사고 이외의 다양한 데이터(차량 통행량, 평균 속도, 차량 간 상호작용, 주행 궤적 등)를 활용하여 사고 발생 이전의 위험 상황을 포착할 수 있다는 특징이 있다. 본 논문에서 도출한 총 25개 지표는 모두 간접적 지표에 해당하며, 이는 선제적 안전성 분석에 유용하게 활용될 수 있다. 25개 지표는 성격에 따라 시간 기반, 거리 기반, 감속 기반, 기타 지표의 네 가지 범주로 분류하고 각 지표는 정의와

산출식, 그리고 산출에 필요한 변수들을 체계적으로 정리하였다. 일부 지표는 차량 궤적과 속도 정보만으로 산출이 가능하였으나, 차로 편차나 주행 안정성 관련 지표는 정밀도로지도나 인프라 센서 데이터가 필요하여 현 단계에서는 적용이 제한적인 것으로 나타났다.

표 1. 자율주행 안전성 지표 분류

구분	대표지표
시간 기반	· 충돌까지 시간(TTC, Time to Collision) · 차간 시간간격(H, Time Headway)
거리 기반	· 충돌까지의 거리 여유(MTC, · Margin-To-Collision) · 차로 편차(Lane Keeping Deviation)
감속 기반	· 충돌 회피에 필요한 감속률 (DRAC, Deceleration Rate to Avoid Crash)
기타	· 가가속도(Jerk) · 상대속도 변화량(CRS, Change in Relative Speeds)

II-2. 위험요인 분석 프레임워크

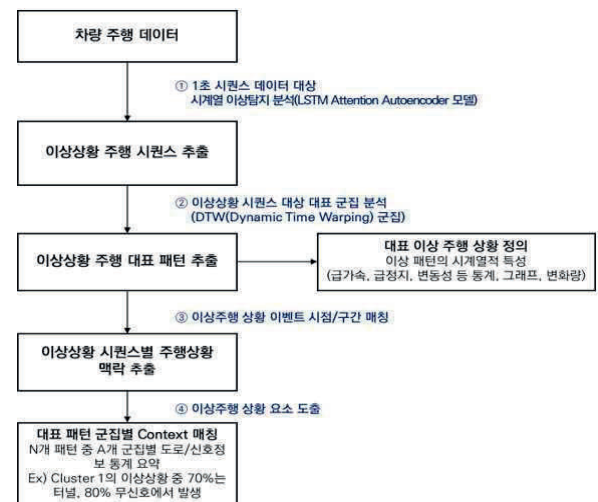


그림 1. 위험요인 분석 프레임워크

<그림 1>에서는 이상 주행 상황을 탐지하고 이를 실제 교통 이벤트와 연계하여 위험 요인을 도출하는 분석 프레임워크를 제안하였다. 우선 차량 주행 데이터를 1초 단위로 분할하여 LSTM Attention Autoencoder 모델을 적용함으로써 비정상적 주행 상황을 탐지한다. 이후 탐지된 이상 주행 시퀀스를 DTW(Dynamic Time Warping) 기법을 활용하여 군집화하고, 대표적인 패턴을 도출한다. 이러한 대표 패턴은 급가속, 급감속, 차로 변경, 정지와 같은 주행 이벤트의 시계열적 특성을 통해 정의한다. 도출된 대표 패턴은 영상 기반의 실제 도로 상황과 매칭되어 위험 요인을 식별한다. 예를 들어, 신호등 고장, 도로 공사, 보행자 돌발 진입 등 외부 요인이 특정 이상 주행 패턴과 결합하는 과정을 통해 잠재적 위험 상황의 맥락(Context)을 해석할 수 있다. 이 과정에서 특정 클러스터의 이상 상황 발생 비율이나 반복 빈도 등을 산출하여, 운행 환경에서 나타나는 주요 위험 요인을 정량적으로 도출할 수 있다.

II-3. 실험데이터 적용

제안된 안전성 지표와 위험 요인 분석 프레임워크의 초기 적용 가능성을 검토하기 위하여 Waymo Perception Dataset을 활용하였다. Waymo 데이터셋은 약 20초 단위의 주행 segment와 0.1초 간격으로 기록된 frame 단위로 구성되며, 각 frame에는 차량 위치, 속도, 가속도, 객체 인식 정보 등이 포함되어 있고 이를 통해 차량 간 상호작용과 주행 상황을 세밀하게 재현할 수 있다. 해당 데이터 셋을 설계한 안전성 지표와 위험요인 분석 프레임워크에 적용하였다. 우선, 기존 문헌에서 도출한 25개 지표 중 차량 궤적과 속도 정보만으로 산출 가능한 9개 지표를 선정하여 Ego 차량과 주변 객체 간의 위험 상황을 정량적으로 평가하였다. 그리고 LSTM Attention Autoencoder 모델을 적용하여 비정상 주행 상황을 탐지하였다. 총 18,832개 시퀀스를 분석한 결과, 421개(2.2%)가 이상 상황으로 분류되었으며, 모델의 예측 정확도는 78%로 나타났다. 실제 발생한 이상 상황 중 모델이 적절히 탐지한 비율은 43%로, 모델이 예상한 이상상황 중 실제로 이상상황이었던 비율이 35%로 도출되었다. 아래 <그림 2>는 대표적으로 식별된 이상상황을 제시하였다.

표 2. 위험요인 분석 프레임워크 기반 대표 이상상황

이상상황			
Lstm 결과	영상 분석	상황설명	
이상	이상	신호고장, 경찰 수신호	

III. 결론

본 논문에서는 3-Tier 연계형 데이터 기반 자율주행차의 안전성 검증을 위한 기초 단계로서 안전성 지표 설계와 위험 요인 분석 프레임워크를 제안하고, Waymo Perception Dataset을 활용하여 초기 적용 가능성을 검토하였다. 첫째, 기존 문헌 검토를 통해 총 25개의 간접적 안전성 지표를 도출하고 이를 네 가지 범주(시간 기반, 거리 기반, 감속 기반, 기타 지표)로 분류하였다. 이를 통해 다양한 주행 위험 요인을 정량적으로 평가할 수 있는 체계를 제시하였다. 둘째, 이상 주행 상황을 탐지하기 위해 LSTM Attention Autoencoder 기반의 위험 요인 분석 프레임워크를 구축하였다. 차량 궤적 데이터를 활용하여 이상 상황을 자동 탐지하고, Dynamic Time

Warping(DTW)을 통해 대표 패턴을 도출함으로써 외부 교통 이벤트와의 연계를 통한 맥락적 위험 요인 분석이 가능함을 확인하였다. 셋째, Waymo 데이터셋을 적용한 실험을 통해 제안된 프레임워크가 이상 상황 탐지 및 위험 요인 분류에 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였으며, 향후 데이터 확대와 모델 고도화를 통해 실용성이 강화될 수 있다. 또한 신호등 고장, 도로 공사, 보행자 난입 등 다양한 실제 주행 위험 요인을 정량적 지표와 결합하여 효과적으로 식별할 수 있을 것으로 예상된다. 향후 연구에서는 본 연구에서 제안한 프레임워크를 국내 실도로 기반 3-Tier 데이터(차량-인프라-클라우드 연계 데이터)에 적용하여, 보다 포괄적이고 신뢰성 있는 자율주행 안전성 검증 체계를 구축하고자한다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation(IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. RS-2025-02221243, Development of a Cloud-Based Evaluation Model and Process for Integrated Validation of 3-Tier Connected Autonomous Driving Software and Data).

참 고 문 헌

- [1] A. Sohail et al., "Data-driven approaches for road safety: A comprehensive systematic literature review," *Safety Science*, vol. 158, p. 105949, 2023.
- [2] M. Bäuml, F. Linke, and G. Prokop, "Categorizing data-driven methods for test scenario generation to assess automated driving systems," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 52030-52050, 2024.
- [3] X. Yan et al., "Safety metrics assessment using logged vehicle trajectory data," in *Proc. 27th Int. Tech. Conf. Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Nat. Highway Traffic Safety Admin., Paper No. 23-0224, 2023.
- [4] L. Westhofen et al., "Criticality metrics for automated driving: A review and suitability analysis of the state of the art," *arXiv preprint, arXiv:2108.02403*, 2021.
- [5] X. Yan, S. Feng, D. J. LeBlanc, C. Flannagan, and H. X. Liu, "Evaluation of automated driving system safety metrics with logged vehicle trajectory data," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, no. 8, pp. 8913-8925, Aug. 2024.
- [6] E. De Gelder et al., "Risk quantification for automated driving systems in real-world driving scenarios," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 168953-168970, 2021.
- [7] X. Gu et al., "Autonomous driving hazard scenario extraction and safety assessment based on crash reports and carla simulation," in *Proc. Int. Conf. Smart Transportation and City Engineering (STCE 2023)*, SPIE, vol. 13018, pp. 162-171, Feb. 2024.