

3-Tier 복합 운행 상황에서의 안전성 확보를 위한 오작동 대응 모션 플래닝

박선엽, 황영서, 하성민, 이명수, 김봉섭, 윤경수*
지능형자동차부품진흥원

srad14@kiapi.or.kr, dudtj7476@kiapi.or.kr, ha4100@kiapi.or.kr, trust@kiapi.or.kr,
bskim@kiapi.or.kr, kadbonow@kiapi.or.kr*

Malfunction-Responsive Motion Planning for Safety in 3-Tier Cooperative Autonomous Driving

Park Sunyub, Ha Seongmin, Hwang Youngseo, Lee Myungsu, Kim Bongseob, Yun Kyungsu

Korea Intelligent Automotive Parts Promotion Institute.

요 약

차량(Tier-1), 도로 인프라(Tier-2), 클라우드(Tier-3)를 연계하는 3-Tier 자율주행 기술이 빠르게 고도화되고 있다. 그러나 실제 도심 환경에서는 인프라 커버리지 한계, 노변장치 통신 오류, 이기종 시스템 간 상호 운용성 문제 등으로 연계 의존형 안전 확보에 여전히 취약점이 존재한다. 본 연구는 이러한 한계를 보완하기 위해, Tier-2 고장 시에도 자차 단독(Tier-1)으로 위험에 대응하는 오작동 대응 모션 플래너를 제안한다. 제안 방식은 폐색을 유발하는 물체의 코너 방위각과 자차 FOV 기하를 이용해 시야가 완전히 개방되기까지 남은 시간을 계산하는 TTV(Time-to-Visibility)와, 보행자 횡단 위험 구역을 ‘충돌 구역(Conflict Zone)’으로 표현하고 가상 보행자 충돌 구역 진입 예상 시간(TTCZ, Time-to-Conflict Zone)을 추정하여, 가시성 정보를 활용한 충돌위험 대응형 속도 계획을 수행한다. 사례 연구 및 몬테카를로 시뮬레이션 결과, Tier-2 의 고장에도 폐색 영역에서 접근하는 보행자로 인한 위험을 자차 단독으로 안정적으로 관리함을 확인하였다. 또한, 상황 대응형 속도 상한 제약조건을 통해 선제 감속을 유도함으로써 승차감을 향상시키고, 불필요한 정지·재가속을 줄여 교통 흐름을 최적화한다.

I. 서론

자율주행은 최근 인지·판단·제어의 비약적 발전과 함께 실도로 적용이 확대됐다. 고성능 센서와 학습 기반 인식·예측·계획의 발전으로 고속도로와 일부 도심 구간에서는 안정적 주행 사례가 축적되고 있다[1]. 그럼에도 복잡한 도시의 엣지 케이스까지 신뢰성을 확보하는 과제는 여전히 남아 있다. 핵심 한계는 자차 센서 커버리지의 확장 난제이다. 카메라·레이더·라이다 융합을 고도화해도 구조적·동적 폐색으로 인해 탐지 취약 구역이 발생하고, 이로 인한 인지 불확실성은 위험도 추정 분산을 키워 불필요한 거동과 보수적 제동을 유발한다[2],[3]. 이를 보완하려는 V2X 는 자차 센서 커버리지 밖 정보를 제공해 안전·효율을 높일 잠재력이 있지만[3],[4], 실제 도심에서는 인프라 커버리지 공백·통신 지연·상호운용성 문제 등으로 일관된 신뢰성을 보장하기 어렵다[5]. 따라서, 본 연구는 Tier-2/3 오작동·가용성 저하에 자차 단독으로 위험을 선제 관리할 수 있는 가시성 중심의 속도 계획 플래너를 제안한다.

II. 본론

본연구에서 3-Tier 복합운행상황의 오작동은 Tier-2 의 오작동으로 RSU(Road Side Unit)를 통해 신호 정보와 신호등에 설치되어 있는 카메라 시스템의 주변 객체 인지 정보가 통신 오류와 같은 이유로 정상 작동하지 않음을 가정한다. Tier-3 의 역할은 본연구의 시간 지평과 공간 범위에 해당하지 않기 때문에 제외하였다. 자차(Tier-1)는 온보드 센서와 기하학적 가시성 모델만으로 위험을 선제 관리하도록 설계되며, 핵심은 TTV(Time-to-Visibility) 가시성 시간과 TTCZ 충돌 구역 진입 예상 시간을 동시에 활용하는 가시성

기반 속도 계획이다. 자차의 시야(FOV)와 폐색을 유발하는 물체(주정차 차량) 코너의 기하를 이용해 시야가 완전히 열리기까지 남은 시간을 TTV로 계산한다. 구체적으로, 센서 원점에서 폐색 코너의 방위각을 추정하고, 자차 진행방향과 최대 시야각 한계로 정의된 FOV 경계선을 기준으로 코너 방위각과 FOV 경계선(최대 시야각 한계)이 일치하는 시점을 계산한다. 이때의 시간은 등속 운동을 가정하여 폐형식으로 근사 산출되며 이를 TTV 라 한다.

$$TTV \approx \frac{\tan\theta^*(x_c - x_s) - (y_c - y_s)}{v[\tan\theta^*\cos\phi - \sin\phi]} \quad (1)$$

x_s, y_s 는 센서 원점 위치, ϕ 는 자차 heading 앵글, x_c, y_c 는 폐색 코너 위치, θ^* 는 최대 시야각을 나타낸다. TTV 값이 양수면 아직 폐색이 풀리지 않았음을 뜻하며 가시성 확보 전 구간에서 속도 저하가 이루어져야 한다.

TTV 를 계산하는 동시에 보행자 위험에 대해 직접 인지 이전에도 보수적 시간 예측을 수행한다. 보행자 충돌 위험은 충돌점(Conflict Point)이 아닌 충돌 구역(Conflict Zone)으로 정의하고, 보행자의 속도는 최대 보행 속도 또는 달리기 속도 상한으로 이동한다고 가정하여 가상 보행자 충돌 구역 진입 예상 시간 TTCZ 를 추정한다[6]. 인지가 없을수록 더 빠른 접근을 가정해 보수성을 확보하며, 실제 인지가 개시되면 해당 시간 추정은 실측 속성으로 갱신된다.

최종적으로 속도 계획은 시간 여유 제어 원리를 따르며, 목표는 항상 다음과 같다.

$$TTCZ \geq TTV + \tau_{safe} \quad (2)$$

여기서 τ_{safe} 는 기본 시간 안전 여유이며, 제어 명령은 단순 P 제어로 구성하여 다음과 같다.

$$e = TTCZ - (TTV + \tau_{safe}) \\ A_x = k_p * e \quad (3)$$

RSU의 신호 상태가 “진행(녹색)”이라 하여도 본 플래너는 가시성 우선 규칙을 적용한다. TTV가 양수이거나 TTCZ가 더 작은 구간에서는 신호를 신뢰하더라도 선제 감속을 유지하여, 보행자 인지기연시에도 이미 속도가 충분히 낮아 폴브레이킹을 피하고 정지·재가속 펌핑을 줄여 승차감과 안정성을 향상시킨다.

III. 결과

제안 알고리즘은 (a), (b)와 같이 선제 감속을 통해 (d)의 TTV가 TTCZ보다 항상 크도록 유지했으며, 그 결과 (c)와 같이 폐색 영역에서 갑자기 출현한 보행자에 대해서도 안정적으로 인지·회피할 수 있었다. 반면 기존 알고리즘은 선제적 대응이 없어 보행자 인지가 지연되었고, 급박한 제어로 차량 안정성·승차감이 크게 저하되었으며, 최소 TTC가 약 0.38s까지 떨어져 사실상 충돌 수준의 결과를 보였다.

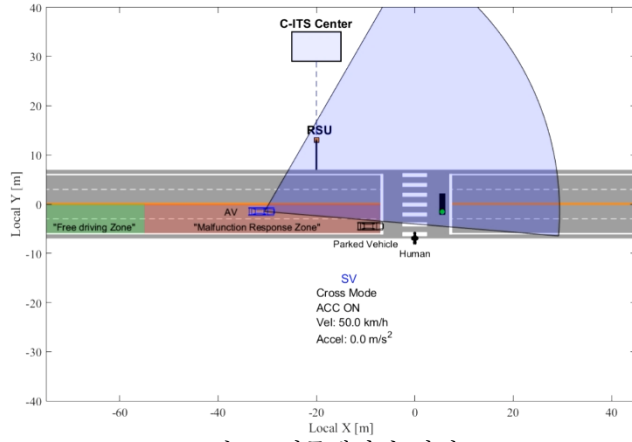
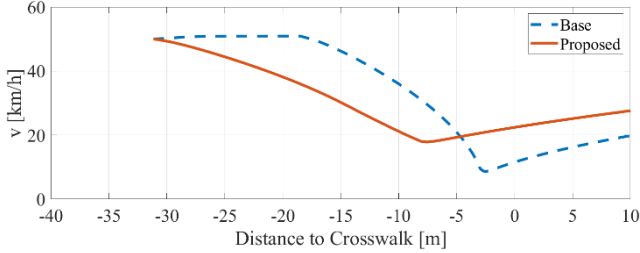
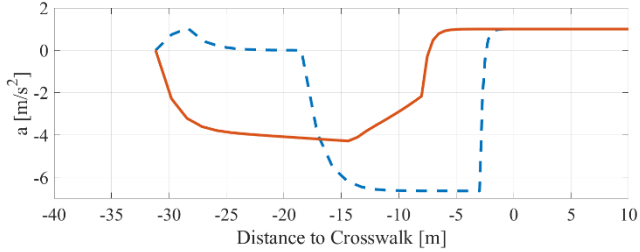


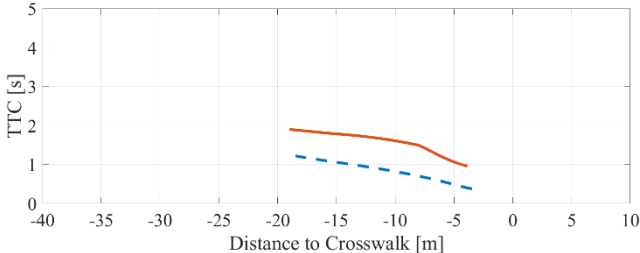
그림 1. 시뮬레이션 장면



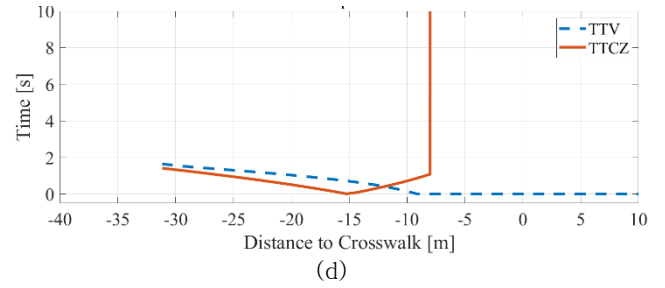
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2. 시뮬레이션 결과. (a) 종방향 속도, (b) 종방향 가속도, (c) TTC, (d) TTV and TTCZ

IV. 결론

본 연구는 가시성 회복 시간(TTV)과 가상 보행자 충돌 구역 진입 예상 시간(TTCZ)을 동일 프레임에서 비교·제어하는 방식을 제안하였다. 제안 알고리즘은 V2I 인지 부재와 폐색이 공존하는 도심 엣지 상황에서도 자차 단독으로 일관된 선제 감속을 수행하도록 설계되었다. 시뮬레이션 평가 결과, 실제 보행자 인지 시점에는 이미 위험도가 충분히 저감되어 극단적 제동의 빈도와 강도가 감소하였고, 그에 따라 위험 구간 통과 안전성과 교통 흐름의 연속성을 동시에 확보함을 확인하였다.

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] IRS Global, “Commercialization and Progress of Major U.S. Automakers in Autonomous Vehicles,” IRS Global, Jan. 25, 2024.
- [2] 최다희, 정규현, 이현우, 유상진, 박현진, 마수연, 정태웅, 고장혁, “자율주행자동차의 개발 동향 및 향후 전망 (Part 1: 기술 및 시스템).” 반도체디스플레이기술학회지, 24(2), 21–26. 2025.
- [3] He, Yuankai, et al. “Towards C-V2X enabled collaborative autonomous driving.” IEEE Transactions on Vehicular Technology 72.12 (2023): 15450–15462.
- [4] M. Demler. “C-V2X Drives Intelligent Transportation,” The Linley Group, Jul. 2020.
- [5] 백세룡, 유태현, 김형규, 함영진, 김천호. “실제 교통사고 사례 분석을 통한 V2X 적용 효과와 한계 분석에 관한 연구,” 한국기계기술학회지, 26(6), 1167–1174. 2024.
- [6] 홍기만, 하정아, 김종훈. “고령자/비고령자의 무단횡단 특성에 관한 연구,” 한국재난정보학회 논문집, 17(3), 543–555. 2021.