

1:15 준현실 테스트 베드를 활용한 차량-인프라 협력 교차로 관리 알고리즘 검증

이은재, 배현철, 한제협, 안희진*

한국과학기술원 전기및전자공학부

eunjae.lee@kaist.ac.kr, bhc2675@kaist.ac.kr, jehyeopan@kaist.ac.kr, *heejin.ahn@kaist.ac.kr

A 1:15-Scale Miniature Testbed for Validation of Vehicle - Infrastructure Cooperative Intersection Management Algorithms

EunJae Lee, HyunChul Bae, JeHyeop Han, HeeJin Ahn*

School of Electrical Engineering, KAIST

요약

본 논문은 1:15 준현실 테스트베드를 활용하여 차량-인프라 협력 교차로 관리 알고리즘 검증하였다. 차량과 인프라는 사전에 정의된 V2I 메시지를 공유한다. 인프라는 차량의 주행 정보(위치, 속도, 주행 경로)를 차량으로부터 수신받고, 차량은 인프라로부터 제어 명령을 수신 받는다. 또한, 인프라는 장착된 LiDAR 센서를 이용해 실시간으로 주변 환경 정보를 인지하고, 공유 메시지와 융합하여 주변 환경을 인식한다. 인프라는 차량들의 우선순위를 결정하고 미래 궤적을 점유하여 충돌을 방지하고 안전한 주행이 가능하도록 제어 명령을 생성한다. 실험을 통해 모든 차량이 통신 가능한 상황과 비통신 차량과 통신 차량이 혼재된 상황에서도 교차로 내 충돌 없이 차량을 관리할 수 있음을 검증하였다.

I. 서 론

교차로 관리 시스템은 교통 효율을 향상시키고 교통 사고를 예방하기 위한 기술로서, 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 차량과 인프라가 정보를 주고받을 수 있는 V2I(Vehicle-to-Infrastructure) 환경에서는 차량의 상태와 인프라 정보를 활용한 협력적 교차로 관리가 가능하다. 이를 통해 개별 차량이 아닌 시스템 전체 관점에서 안전성과 효율성을 동시에 고려한 제어가 가능해진다. 이러한 교차로 관리 시스템 연구에는 규칙 기반 방법론, 최적화 기법, 강화학습 기반 접근법 등이 활용되고 있다.

대부분의 교차로 관리 시스템은 Carla[1], SUMO[2]와 같은 시뮬레이션을 이용해 알고리즘을 검증한다. 그러나 시뮬레이션은 통신 지연, 센서 노이즈 등 실제 제약 조건을 반영하기 어렵다는 한계가 있다. K-city와 같은 현실 세계에서 알고리즘을 검증할 수 있지만 높은 비용과 사고의 위험성이 존재한다.

이에 본 연구는 1:15 준현실 미니어처 테스트베드를 활용해 교차로 관리 알고리즘을 검증하고, 교차로 관리 시스템의 적용 가능성을 확인하였다. V2I 통신 기반 규칙 기반 교차로 관리 시스템을 적용하였으며, 인프라는 차량의 진입 순서를 기반으로 차량들을 관리한다. 또한, 인프라에 장착된 LiDAR 센서를 활용하여 통신이 불가능한 비통신 차량을 인지하고, 이러한 차량이 혼재한 상황에서도 교차로 관리 시스템의 성능을 검증하였다.

II. 본론

본 연구에서는 차량-인프라 협력 교차로 관리 알고리즘을 구현하기 위해 차량과 인프라간 통신 메시지인 V2I 메시지를 정의하고, 우선순위 기반 교차로 관리 알고리즘을 적용하여 교차로 내 차량을 관리하였다. 또한, 통신 가능한 차량 뿐만 아니라 비통신 차량도 인지하기 위해 인프라에 LiDAR 센서를 장착하고 3D 객체 인지 알고리즘을 적용하여 교차로 내

교통 상황을 실시간으로 인지한다.

1. V2I 메시지

교차로 내부를 주행하는 통신 가능한 차량은 2D pose (x_t^n, y_t^n, ψ_t^n), 속도 (v_t^n), 주행 경로 (P^n), 차량 고유의 아이디 (id^n)를 포함하는 공유 메시지 (M_t^n)를 인프라에게 송신한다. 공유 메시지는 각 차량에서 10Hz 주기로 생성되고 공유된다. 그리고 인프라는 각 차량에게 제어 명령 (v_{ref}^n)을 송신한다.

2. 3D 객체 인지

본 연구에서는 1:15 준현실 미니어처 테스트베드에서 객체 인지를 수행하기 위해 자체 데이터셋을 구축하였다. 데이터셋은 5대의 차량이 주행하는 시나리오에서 수집되었으며, 3,888 프레임을 학습용으로, 1,120 프레임을 검증용으로 사용하였다. 학습은 PointPillars[3] 모델을 이용하여 수행하였으며, 본 연구 환경에서 AP@0.5 기준 0.97의 높은 인지 성능을 확인하였다. 인지된 객체 중 공유 메시지에 포함되어 있지 않은 차량을 통신 불가능한 차량이라고 판단하였다.

3. 우선순위 기반 교차로 관리

교차로에 진입한 통신 가능한 차량은 공유 메시지 (M_t^n)를 인프라에게 송신하고, 인프라는 교차로 내 차량들을 제어하기 위해 FIFS(First-In-First-Serve) 규칙을 적용한다. 교차로 내 진입 순서를 기반으로 차량의 우선순위가 결정된다. 이를 기반으로 사전에 정의된 N 스텝만큼 차량이 주행할 미래 주행 궤적을 생성하고, 미래 주행 궤적을 우선순위가 높은 순으로 점유한다. 차량이 예측 궤적과 다르게 주행하는 경

우에도 안전하게 차량을 제어하기 위해 우리는 주행 궤적을 점유할 때, 안전 범위 (B_{safe})를 설정했다. 우선순위가 가장 높은 차량은 주행 궤적을 우선적으로 점유하고, 인프라는 최대 속도 (v_{max})로 주행하도록 결정한다. 후순위 차량은 선순위 차량과 미래 주행 공간이 충돌하는지 판단하고, 충돌이 없는 주행 궤적이 얻어질 때까지 Δv_{step} 씩 속도를 감소시킨다. 최종적으로 결정된 속도로 주행하도록 인프라는 차량에 제어 명령 v_{ref}^n 을 송신하여 교차로 내 안전하고 효율적으로 주행하도록 관리한다.

비통신 차량이 교차로 내 진입한 것으로 인식되면, 인프라는 비통신 차량을 최우선 순위로 결정한다. 비통신 차량은 주행 경로 정보를 알 수 없기 때문에 교차로에 진입한 차선 정보를 바탕으로 주행 가능한 궤적을 모두 점유한다. 후순위인 통신 가능한 차량은 비통신 차량이 점유한 주행 궤적과 충돌하지 않는 속도로 감속하여 주행한다.

III. 실험

본 연구에서 교차로 내 차량 5대가 주행하는 시나리오에서 실험을 진행 했다. 1) 모든 차량이 통신이 가능한 상황, 2) 비통신 차량과 통신 차량이 혼재된 상황 이렇게 두 가지 경우를 고려하여 실험을 진행하였으며, $N = 30$, $B_{safe} = 30cm$, $v_{max} = 0.5m/s$, $\Delta v_{step} = 0.1m/s$

로 설정하였다.

모든 차량이 통신 가능한 상황에서는 교차로 내 진입한 순서를 기반으로 차량의 우선순위를 결정하고, 인프라가 제어 명령을 생성한다. 그림 1의 $t = 1.6s$ 에서, 흰색 차량이 Priority 1, 보라색 차량이 Priority 2를 부여 받았다. 두 차량의 미래 주행 궤적이 충돌이 없다고 판단되어 두 차량 모두 최고 속도로 주행한다. 반면, Priority 3(주황)은 Priority 1과 주행 경로가 겹침으로 충돌이 발생하지 않도록 감속하여 주행하였다. Priority 5(초록) 차량은 Priority 1, 3, 4번과 주행 경로가 겹치기 때문에 정지하였다가 선행 차량이 교차로를 통과한 후에 가속하여 교차로를 통과하는 것을 확인했다.

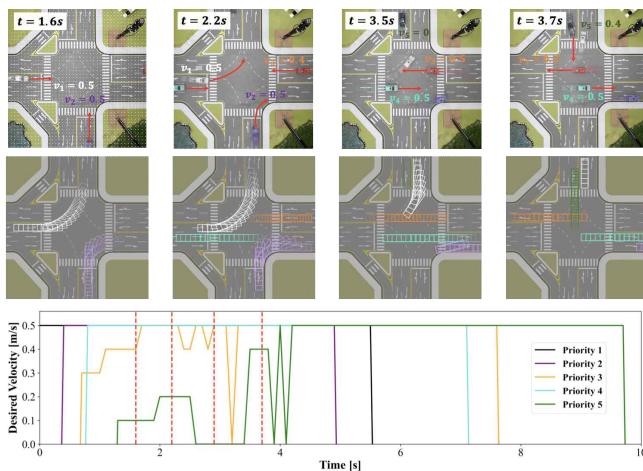


그림 1. 모든 차량이 통신이 가능한 상황에서 예측 주행 궤적, 주행 결과 및 v_{ref}^n 속도 그래프

그림 2는 비통신 차량과 통신 차량이 혼재된 상황에서 교차로 관리 시스템을 검증한 결과이다. 먼저 인프라에 설치된 LiDAR와 3D 객체 인지 알고리즘을 통해 비통신 차량의 교차로 내부 진입 여부를 판별하였다. 본 실험에서는 보라색 차량을 비통신 차량으로 인식하고, 인프라는 비통신 차량을 최우선순위 Priority 1으로 결정하였다. $t = 1.3s$ 일 때, 비통신 차

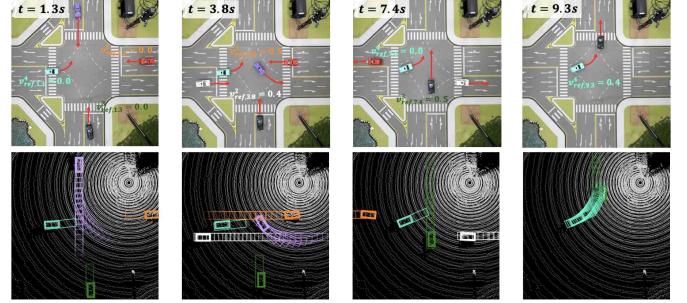


그림 2. 비통신 차량과 통신 차량이 혼재된 상황에서 주행 결과 및 LiDAR 인지 결과

량(보라색)의 진입 차선 정보를 바탕으로 직진, 좌회전 경로 모두 미래 주행 궤적으로 점유하였고, 후순위인 통신 차량들은 정지하였다. 비통신 차량이 교차로를 통과한 후에 통신 차량들은 우선순위를 기반으로 재가속한다. 그림 2에서 Priority 1 (주황), Priority 2 (흰색), Priority 3 (녹색), Priority 4 (민트) 순으로 교차로를 통과하는 것을 확인할 수 있다.

본 실험을 통해 1:15 준현실 미니어처 테스트베드에서 제안한 차량-인프라 협력 교차로 관리 알고리즘을 성공적으로 검증하였으며, 제안 시스템의 실제 교차로 환경 적용 가능성을 확인하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 준현실 미니어처 테스트 베드를 활용하여 V2I 통신 기반 차량-인프라 협력 교차로 관리 알고리즘을 검증하였다. 또한, 인프라에 장착된 센서를 기반으로 비통신 차량과 통신 차량이 혼재한 상황에서도 안전하게 차량들을 관리할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 준현실 테스트 베드에서 실험적 검증을 수행함으로써, 제안한 교차로 제어 알고리즘이 실제 도로 환경으로 확장될 수 있음을 보여주었다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 정보통신기획평가원 -대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2023-00259991)

참 고 문 현

- [1] Dosovitskiy, Alexey, et al. "CARLA: An open urban driving simulator." Conference on robot learning. PMLR, 2017.
- [2] Lopez, Pablo Alvarez, et al. "Microscopic traffic simulation using sumo." 2018 21st international conference on intelligent transportation systems (ITSC). Ieee, 2018.
- [3] Lang, Alex H., et al. "Pointpillars: Fast encoders for object detection from point clouds." Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2019.