

6G-V2X의 MARL 기반 지능형 교통 신호 제어 모델

김건민[°]

김경백^{°°}

전남대학교 소프트웨어공학과[°]

전남대학교 인공지능융합학과^{°°}

6G-V2X MARL-Based Intelligent Traffic Signal Control Model

Geon-Min Kim[°]

Kyung-Baek Kim^{°°}

Dept. of Software Engineering[°]

Dept. of AI Convergence^{°°}

Chonnam National University

Chonnam National University

204869@jnu.ac.kr

kyungbaekkim@jnu.ac.kr

요 약

본 연구는 6G-V2X 통신 기술을 활용한 지능형 교통 신호 제어 모델을 제안하며, 다중 에이전트 강화학습(MARL) 기법을 적용하여 대규모 도심 교차로에서 효율적인 신호 제어를 수행하는 방안을 제시한다. 기존의 5G-V2X 기반 모델이 V2V, V2I 통신에 초점을 맞춘 반면, 본 연구에서는 PM, 자전거 등 다양한 교통 주체를 고려한 초정밀 측위 및 초저지연 기반 신호 제어 모델을 제안한다.

1. 서론

최근 들어 V2X(Vehicle-to-Everything) 통신은 ITSs(Intelligent Transportation Systems)[1]의 핵심 기술로 산업, 학문적으로 많은 관심을 받고 있다. 기존의 5G-V2X[2]는 V2I(Vehicle-to-Infrastructure), V2V(Vehicle-to-Vehicle), V2P(Vehicle-to-Pedestrian) 등의 통신을 가능하게 하여 교통 혼잡을 줄이고 안전을 높이기 위한 핵심 기술로 주목받아왔다. 그러나 5G-V2X 기반 교통 신호 제어는 차량과 보행자만을 중심으로 모델링하여 다양한 교통 주체를 고려하지 못하거나, 단일 교차로에서 신호 제어에 국한되는 경우가 많다. 실제 교통 상황은 다양한 속도와 방향성을 가진 PM(Personal Mobility), 이륜차, 자전거 등 세분화된 교통 주체들의 동시 진입으로 매우 복잡하다.

차세대 6G-V2X[3] 통신은 THz(테라헤르츠) 대역을 중심으로 초정밀 측위와 초저지연 특성을 제공하므로, 교차로 내 실시간 교통 신호 제어에 활용되기에 적합하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 6G 환경의 특성을 지능형 교통 신호 시스템에 적용하여 다양한 교통주체를 고려한 대규모 도심 환경에서 효과적인 교통 신호 제어 모델을 제안한다.

2. 관련 연구

2.1 지능형 교통 신호 제어

과거에는 고정식 신호 제어 방식으로 미리 설정된 신호 주기를 기반으로 교통량 변화에는 유연하게 대응하지 못하는 방식을 사용하였으나, 차량 검지기(Loop Detector, 카메라 등)[4]를 활용한 적응형 신호 제어 방식과 함께, 인공지능(AI), 특히 강화학

습(RL) 기반의 신호 제어가 제안되어 교통량 예측 및 최적화에 높은 성능을 보이는 연구가 다수 보고되고 있다.

2.2 5G-V2X와 6G-V2X 비교

5G-V2X는 차량과 주변 인프라 간 빠른 데이터 통신이 가능하지만, 대규모 차량 군집 구분(Vehicle Platooning)이나 정밀 측위와 같은 차세대 요구사항을 완벽히 충족하지 못한다. 반면 6G는 수백 Gbps 이상의 전송 속도, 극단적으로 낮은 지연 시간(1ms 이하) 그리고 정밀한 위치 측정을 제공한다. 이에 따라 차량군과 이륜차, PM 그리고 보행자 등을 포함하여 다양한 주체를 구분할 수 있는 초정밀 측위 기반 실시간 교통 신호 제어가 가능해진다.

3. 제안 모델

본 연구에서는 5G-V2X 기반 신호 제어의 한계를 극복하고, 대규모 도심 교차로에서의 교통 흐름을 최적화하기 위한 6G-V2X 기반 지능형 교통 신호 제어 모델을 제안한다. 이를 위해 (1) 초정밀 측위 기반 실시간 교통 데이터 수집, (2) 다중 에이전트 강화학습(MARL)기반 지능형 신호 제어를 핵심 요소로 모델을 설계하였다.

3.1 초정밀 측위 기반 데이터 수집

6G 통신 환경은 THz 대역을 이용하여 센티미터 이하의 정밀도를 제공할 수 있으며, 이를 통해 교통 주체들의 위치, 속도, 방향 정보를 실시간으로 수집할 수 있다. 이를 통해 교통 주체들의 이동 정보를 높은 정확도로 획득한다.

3.2 다중 에이전트 강화학습 기반 신호 제어

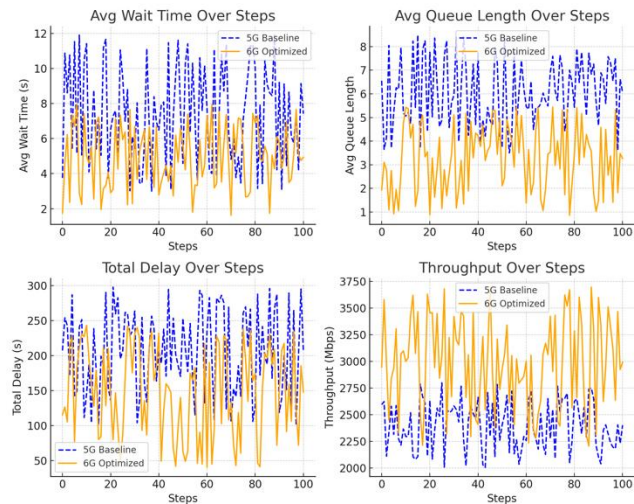
기존 단일 에이전트 기반 신호 제어 방식은 각 교차로를 독립적인 개체로 간주하여 학습을 수행하거나, 모든 교차로 신호를 단일 정책으로 통합하는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 각 교차로가 개별적인 학습 에이전트로 작동하면서도, 주변 교차로와의 협력을 통해 최적의 신호 정책을 학습하는 다중 에이전트 강화학습 기법을 도입하였다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험 환경 설정

본 연구에서는 SUMO(Simulation of Urban Mobility) 교통 시뮬레이터와 ns-3 통신 시뮬레이터를 연동한다. ns-3 통신 시뮬레이터에 mmWave 설정을 도입하여 6G 환경을 모사하고, 제안 모델의 성능을 평가한다. 실험 환경은 10 x 10 개의 교차로가 연결된 도심 지역으로 각 교차로에는 다양한 교통 주체가 혼재되어 있으며, 시간당 차량 3,000 - 5,000 대, 보행자 3,000 명, PM 500 대, 자전거 1,000 대가 이동하는 대규모 시나리오를 설정하였다. 또한, 100 개의 교차로에 대하여 각 1 개씩 총 100 개의 에이전트가 설치하고, 각 신호등에 id 를 부여하여 연결 후, 강화학습을 통한 신호 제어를 진행하였다.

4.2 실험 결과



	5G-V2X	6G-V2X	변화
평균 대기 시간(s)	7.41	4.94	- 33.33%
대기열 길이	6.05	3.26	- 46.11%
총 지연 시간(s)	206.32	148.24	- 28.15%
처리량	2400.34	2990.45	+ 24.58%

[표 1] 일반적인 5G-V2X 와 제안 모델 비교

실험 결과 5G-V2X 에 대비하여 6G-V2X 에서 총 교통 처리량이 24.58% 증가하였다. 구체적으로, 대기 시간이 33.33%, 강화학습 기반 신호 최적화를 통한 가변적인 신호 운영으로 신호 대기열 길이 46.11% , 총 지연 시간 28.15% 감소하는 결과를 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 차세대 6G 통신의 초정밀 측위 및 초저지연 특성과 MARL 을 결합한 대규모 도심 교차로 환경에서의 지능형 교통 신호 제어 모델을 제안하였다. 실험 결과 제안 모델은 5G-V2X 모델 대비 평균 대기 시간, 대기열 길이, 총 지연 시간이 모두 감소하여 24.58%의 교통 처리량 증가를 보였으며, 이를 통해 기존의 5G-V2X 기반 교통 신호 제어의 한계를 극복하고 초정밀 측위 기술과 MARL 로 실시간으로 변화하는 교통 상황에 최적화된 신호 제어가 가능함을 검증하였다.

향후 보다 실제적인 도심 환경을 반영하여 6G 통신 환경에서의 측위 오차, 통신 간섭, 외부 기상 조건 등에 따른 시스템 성능 변화에 대한 심층적인 검증이 필요하다. 또한, 인프라 구축 비용과 운영 효율성을 고려한 경제성 분석을 통해 실제 스마트 시티 적용 가능성을 높이는 연구도 요구된다. 본 연구를 통해 차세대 6G 기반 지능형 교통 신호 제어 기술의 가능성을 확인할 수 있었으며, 향후 스마트 시티 구축 및 차세대 교통 관리 시스템 발전에 기여할 것으로 기대된다.

6. 사사

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2022-00156287, 50%). 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 인공지능융합혁신인재양성사업 연구 결과로 수행되었음(IITP-2023-RS-2023-00256629, 50%)

7. 참고 문헌

- [1] N. Varga, L. Bokor, A. Takács, J. Kovács and L. Virág, "An architecture proposal for V2X communication-centric traffic light controller systems," 2017 15th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Warsaw, Poland, 2017, pp. 1-7
- [2] W. Zheng, A. Ali, N. González-Prelcic, R. W. Heath, A. Klautau and E. M. Pari, "5G V2X communication at millimeter wave: rate maps and use cases," 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), Antwerp, Belgium, 2020, pp. 1-5
- [3] H. Ouamna, Z. Madini and Y. Zouine, "6G and V2X. Communications: Applications, Features, and Challenges," 2022 8th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), Genoa, Italy, 2022, pp. 1-6
- [4] B. Liu, X. Yan, Q. Li and S. Huang, "An improved method for traffic control relying on close-loop control theory," 2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR 2010), Wuhan, China, 2010, pp. 48-50
- [5] H. Shen, H. Zhao, Z. Zhang, X. Yang, Y. Song and X. Liu, "Network-Wide Traffic Signal Control Based on MARL With Hierarchical Nash-Stackelberg Game Model," in IEEE Access, vol. 11, pp. 145085-145100, 2023