

오픈랜 환경을 위한 차량 간 통신 및 실시간 무선 제어 기술 연구 동향 조사

김재민, 이동현, 오준석, 송치현, 최성진, 이승찬, 김주영, 조성래

중앙대학교 컴퓨터공학과

{jmkim, dhlee, jsch, chsong, sjchoi, sclee, jykim}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

Recent Advances in Vehicle-to-Everything Communication and Real-Time Control for O-RAN

Jaemin Kim, Donghyun Lee, Junsuk Oh, Chihyun Song, Seongjin Choi, Seungchan Lee, Juyoung Kim, and Sungrae Cho

Dept. of Computer Science and Engineering

Chung-Ang University

요약

Open Radio Access Network(O-RAN)는 무선 접속망의 개방형 인터페이스와 기능 분해를 통해, 기존 RAN 구조가 제공하지 못했던 유연하고 지능적인 제어를 가능하게 하는 차세대 아키텍처로 주목받고 있다. 특히 RAN Intelligent Controller(RIC)를 중심으로 한 계층적 제어 구조는 수 ms - 초 단위의 실시간 제어 루프를 구현할 수 있어, 지연 민감 응용에 대한 새로운 가능성을 제시한다. 본 논문은 O-RAN을 실시간 무선 제어 플랫폼의 관점에서 조망하여 관련 기술 동향을 소개하고, 높은 이동성과 초저지연 요구사항을 동시에 갖는 V2X 통신을 대표적인 응용 사례로 활용하여, O-RAN 기반 실시간 제어의 도전 과제와 가능성을 분석한다.

I. 서론

Vehicle-to-Everything(V2X) 통신은 차량과 차량(V2V), 차량과 인프라(V2I), 차량과 네트워크(V2N) 간의 정보 교환을 통해 교통 안전성과 효율성을 향상시키는 핵심 기술로 자리 잡고 있다. 자율주행 및 지능형 교통 시스템(ITS)의 확산과 함께, V2X는 초저지연, 고신뢰성, 그리고 높은 이동성을 동시에 만족해야 하는 대표적인 지연 민감 무선 응용으로 인식되고 있다.

한편, 최근 이동통신 연구 전반에서는 강화학습(Reinforcement Learning)을 포함한 AI 기반 제어 기법이 무선 자원 관리 및 네트워크 제어 문제에 폭넓게 적용되고 있다 [1]. 특히 환경 변화에 적응적으로 대응할 수 있다는 특성으로 인해, RL 기반 접근은 동적 트래픽과 이동성이 높은 무선 네트워크 제어 문제에서 유력한 해법으로 주목받고 있다. 이러한 흐름은 기존의 정적이고 규칙 기반의 RAN 제어 방식이 갖는 한계를 더욱 부각시키고 있다 [2]. 이러한 접근은 고정된 규칙 기반 제어가 동적 트래픽 및 이동성 변화에 효과적으로 대응하기 어렵다는 한계를 드러낸다.

Open Radio Access Network(O-RAN)는 이러한 AI 기반 제어 기법을 실질적으로 수용할 수 있는 구조적 기반을 제공하는 차세대 RAN 아키텍처로 제안되었다. O-RAN은 RAN 기능의 분해(disaggregation)와 개방형 인터페이스를 통해, 소프트웨어 기반 제어 로직을 네트워크 외부에서 유연하게 구현할 수 있도록 한다. 특히 RAN Intelligent Controller(RIC)를 중심으로 한 계층적 제어 구조는 데이터 수집, 학습, 정책 생성, 그리고 실시간 제어 적용을 분리된 시간 스케일에서 수행할 수 있도록 설계되어 있다.

본 논문은 O-RAN을 중심으로 실시간 무선 제어 기술의 연구 동향을 정리하고, V2X 통신 환경에서의 적용 사례를 문헌 중심으로 분석한다. 서론에 이어, 본문에서는 먼저 O-RAN 기반 실시간 제어 자체를 다룬 연구들

을 살펴본 후, V2X 환경에 O-RAN을 적용한 연구들을 정리한다.

II. 본문

[3]은 O-RAN 환경에서 Near-Real-Time RIC과 xApp을 활용한 실시간 RAN 제어의 기본 구조를 제시하고, 실제 또는 준실환경에서의 동작 가능성을 평가하였다. 해당 연구는 E2 인터페이스를 통해 수집되는 RAN 상태 정보가 실시간 제어에 활용될 수 있음을 보이며, xApp 기반 제어 루프가 수십 ms 수준의 지연에서도 안정적으로 동작할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

[4]에서는 O-RAN 기반 실시간 제어를 보다 복잡한 무선 자원 관리 문제로 확장하였다. 이 연구에서는 트래픽 예측, 간섭 관리, 에너지 효율 개선과 같은 문제를 RIC 상의 애플리케이션으로 구현하고, 실제 네트워크 데이터에 기반한 제어 성능을 평가하였다. 특히 중앙 집중형 제어 구조가 기존 분산 제어 방식 대비 더 높은 제어 유연성을 제공함을 보였다.

[5]에서는 AI 기반 제어 기법과 O-RAN 실시간 제어 구조의 결합 가능성을 다루었다. 해당 연구는 학습 기반 제어 알고리즘을 Near-RT RIC에 배치할 때 발생하는 시간 스케일 제약과 안정성 문제를 분석하고, 실시간 제어와 학습 간의 트레이드오프를 논의하였다. 이는 O-RAN이 단순한 개방형 아키텍처를 넘어, 지능형 실시간 제어 플랫폼으로 확장될 수 있음을 보여주는 사례로 해석할 수 있다.

[6]은 V2X 통신 환경의 특성과 기존 RAN 구조의 한계를 분석하고, O-RAN이 이러한 환경에 적합한 아키텍처적 특성을 지닌다는 점을 논의하였다. 해당 연구는 V2X 환경에서 요구되는 실시간 데이터 수집과 동적 제어가 기존 RAN에서는 구조적으로 어렵다는 점을 지적하며, RIC 기반 중앙 제어의 필요성을 제시하였다.

[7]과 [8]은 O-RAN 기반 아키텍처를 활용한 구체적인 V2X 제어 기법을

제안하였다. 특히 차량 간 mmWave 통신 환경에서 발생하는 링크 차단 문제를 해결하기 위해, Near-RT RIC 상의 xApp을 통해 실시간 릴레이 선택 및 자원 제어를 수행하는 구조를 설계하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 O-RAN 기반 제어 방식은 기존 분산 VANET 방식 대비 신뢰성과 지연 성능을 개선함을 보였다.

[9]는 AI 및 학습 기반 제어 기법을 O-RAN 구조에 결합하여, V2X 환경에서의 자원 할당과 네트워크 슬라이싱 문제를 다루었다. 해당 연구는 강화학습 기반 접근이 동적 V2X 환경에서 효과적으로 동작할 수 있음을 보이는 동시에, 실시간 제어 루프 내에서의 학습 안정성 문제가 여전히 중요한 연구 과제로 남아 있음을 지적하였다. 이러한 연구들을 통해 O-RAN 기반 실시간 제어가 고이동성 V2X 환경에서도 실질적인 성능 개선을 제공할 수 있음을 보여준다.

III. 결론

본 논문에서는 O-RAN을 중심으로 실시간 무선 제어 기술의 연구 동향을 정리하고, V2X 통신 환경에서의 적용 사례를 문헌 중심으로 분석하였다. O-RAN은 개방형 인터페이스와 RIC 기반 제어 구조를 통해 기존 RAN 아키텍처가 제공하지 못했던 실시간 지능 제어를 가능하게 한다. V2X 응용을 다룬 기존 연구들은 O-RAN 기반 실시간 제어가 고이동성, 지연 민감 환경에서도 유효하게 동작할 수 있음을 보여주며, 동시에 표준화, 제어 안정성, 확장성 측면에서의 추가적인 연구 필요성을 제기한다. 향후 연구는 더 짧은 시간 스케일에서의 제어 안정성 확보, AI 기반 제어의 신뢰성 검증, 그리고 대규모 V2X 환경에서의 실증을 중심으로 진행될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2026-RS-2022-00156353, 50%)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-오픈랜인력양성프로그램의 지원(IITP-2026-RS-2024-00434743)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] W. J. Yun, S. Park, J. Kim, M. Shin, S. Jung, D. A. Mohaisen, and J.-H. Kim, "Cooperative Multiagent Deep Reinforcement Learning for Reliable Surveillance via Autonomous Multi-UAV Control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 10, pp. 7086-7096, Oct. 2022.
- [2] S. Park, J. P. Kim, C. Park, S. Jung and J. Kim, "Quantum Multi-Agent Reinforcement Learning for Autonomous Mobility Cooperation," *IEEE Communications Magazine*, vol. 62, no. 6, pp. 106-112, June 2024.
- [3] M. Kallitsis, G. Iosifidis, and F. A. Kuipers, "Adaptive resource allocation for virtualized base stations in O-RAN with online learning," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 72, no. 3, pp. 1814 - 1828, Mar. 2024.
- [4] A. Lacava, M. Polese, L. Bonati, S. D'Oro, F. Restuccia, A. Capone, and T. Melodia, "dApps: Enabling real-time AI-based Open RAN

- control," *Computer Networks*, vol. 246, Art. no. 111342, Jan. 2025.
- [5] L. Baldesi, F. Restuccia, and T. Melodia, "ChARM: NextG spectrum sharing through data-driven real-time O-RAN dynamic control," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, New York, NY, USA, May 2022, pp. 240 - 249.
- [6] F. Linsalata, E. Moro, M. Magarini, U. Spagnolini, and A. Capone, "Open RAN-empowered V2X architecture: Challenges, opportunities, and research directions," in *Proceedings of the IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Istanbul, Türkiye, Jun. 2024, pp. 1 - 8.
- [7] Y. Ergu, Y. A. Abera, M. Bagaa, T. Taleb, and H. Flinck, "Efficient adversarial attacks against DRL-based resource allocation in intelligent O-RAN for V2X," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 2, pp. 2541 - 2554, Feb. 2024.
- [8] F. Linsalata, E. Moro, M. Magarini, U. Spagnolini, and A. Capone, "Addressing control challenges in vehicular networks through o-ran: a novel architecture and simulation framework," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 7, pp. 9344 - 9355, Jul. 2024.
- [9] B. Hazarika, L. Bonati, M. Polese, S. D'Oro, A. Capone, and T. Melodia, "Enhancing vehicular networks with hierarchical O-RAN slicing and federated DRL," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 8, no. 3, pp. 1099 - 1117, Sep. 2024.