

디지털 트윈 기반 네트워크 최적화 연구 동향

김주영, 김재민, 김가현, 최성진, 조성래
중앙대학교 컴퓨터공학과

{jykim, jmkim, ghkim, sjchoi}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

Recent advances in the Digital Twin Based Network Optimization Research

Juyoung Kim, Jaemin Kim, Gahyun Kim, Seongjin Choi, and Sungrae Cho

Dept. of Computer Science and Engineering
Chung-Ang Univ.

요약

디지털 트윈은 물리 세계를 가상으로 복제한 모델이다. 이는 물리 세계에 영향을 끼치지 않아 안전하게 시뮬레이션과 최적화를 할 수 있게 한다. 디지털 트윈을 통해 수집된 데이터는 인공지능을 통해 네트워크를 최적화하는 데에 사용될 수 있다. 본 논문은 네트워크의 자원 할당 최적화, 오프로딩, 경로 최적화 등의 연구 동향을 조사한다.

I. 서론

디지털 트윈(Digital Twin)은 물리적 시스템의 가상 복제본을 만들어 현실 세계와 가상 세계를 실시간으로 연결하여 다양한 시뮬레이션과 최적화를 안전하게 할 수 있도록 한다. 특히 실제 통신 망에 영향을 주지 않고도 네트워크 성능을 분석하고 최적의 방법을 찾을 수 있다. 따라서 디지털 트윈은 차세대 통신망, 사물인터넷, 자율주행 통신 등의 통신 분야에서 주목받는 기술이다.

특히 인공지능 기반 최적화 기법을 다룬 논문 [1], [2]는 디지털 트윈 환경과 결합되어 더 좋은 성능을 발휘할 수 있다. 본 논문에서는 디지털 트윈을 통해 실제 통신망을 가상으로 생성하고 가상 세계에서 인공지능을 통해 네트워크를 최적화하는 연구, 특히 네트워크 성능 향상, 자원 할당 최적화, 오프로딩, 경로 최적화 등의 연구 동향을 조사한다.

II. 본론

본 논문에서는 네트워크 성능, 자원 할당, 오프로딩, 경로 최적화하는 데에 디지털 트윈을 활용하는 사례와 사용된 인공지능 기법을 조사한다.

1. 차세대 6G 통신망

6G 통신망에는 초저지연, 초고속, 초연결 등의 요구사항이 있다. 이러한 요구사항을 만족시키고 더 나은 성능을 제공하기 위해 최적화 과정이 필요하다. 이때 디지털 트윈은 실제 네트워크 가상 공간에 복제하여

다양한 AI 기반 최적화 기법을 안전하게 실험할 수 있는 환경을 제공한다.

[3]의 저자는 5G/B5G 전송망에 네트워크 디지털 트윈(NDT) 기반 경로 최적화 플랫폼을 개발하였다. 이 플랫폼은 그래프 신경망(GNN) 모델로 네트워크 트래픽을 학습하여 경로 변경 시 지연을 예측하고 초저지연 (URLLC), 초고속 (eMBB) 트래픽의 지연 예측 오차 (MAPE)를 낮춰 최적화 결정의 정확도를 보여주었다.

[4]의 저자는 대규모 5G 셀룰러 망에서 기지국 커버리지 최적화를 위해 다중 에이전트 강화학습(MARL)과 디지털 트윈을 결합하였다. 이 연구에서는 DT-SimNet 이라는 디지털 트윈 기반 시뮬레이터를 구축하여 수백 개의 기지국의 빔포밍 각도와 대역폭 등을 조정하면서 사용자 커버리지를 최적화하였고, Proximal Policy Optimization(PPO) 알고리즘을 다중 에이전트로 확장한 OMAPPO-SSP 기법을 제안하였다.

2. 엣지 컴퓨팅/IoT

디지털 트윈은 엣지 컴퓨팅과 IoT 환경에도 적용되어 최적화할 수 있다. 산업용 IoT (IIoT)와 같이 이기종 디바이스와 실시간 처리 요구를 가진 환경에서는 디지털 트윈으로 네트워크와 디바이스 상태를 정밀 모니터링하고 오프로딩 결정을 최적화할 수 있다.

[5]의 저자는 디지털 트윈 네트워크 아키텍처와 지연 모델을 구축한 뒤, 태스크 지연 최소화과 자원 할당을 목표로 오프로딩 문제를 공식화하였다. 복잡한 조합

최적화 문제를 풀기 위해 심층 강화학습(DRL) 기법 중 하나인 DDPG(Deep Deterministic Policy Gradient) 알고리즘을 활용했고, 마르코프 결정 프로세스 (MDP)로 모델링하여 실시간 동적 의사결정을 구현한다.

[6]의 저자는 다수의 이동 로봇이 공장 내 WiFi/D2D 통신을 통해 데이터를 교환하는 상황을 고려하여 물리망과 가상망을 매핑하는 엣지 컴퓨팅 기반 DTN 아키텍처를 설계하였다. 이를 통해 전체 데이터 전송률을 극대화하는 것을 목표로 하였다. MDP 기반 최적화 문제를 수립하고 마르코프 결정 프로세스를 통해 다수 이동 노드의 최적 중계 노드 선택과 전송 전략을 도출한다.

IoT 환경에서 이동체의 자율 제어도 중요한 연구 분야이다. [7]은 학습 기반 협력 이동성 제어를 통해 자율 드론 배송 네트워크의 효율성을 높였으며, 이는 디지털 트윈 기반의 네트워크 최적화 연구에도 응용될 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 디지털 트윈을 활용하여 네트워크 성능 최적화, 자원 할당, 오프로딩, 경로 최적화 등을 수행한 연구 동향을 조사하였다. 디지털 트윈은 물리적 시스템을 가상 공간에 복제하여 다양한 인공지능 기술을 실험하고 검증할 수 있는 환경을 제공한다. 특히 차세대 6G 통신망에서는 그래프 신경망, 다중 에이전트 강화학습과 같은 기술을 결합하여 지연 예측 및 기지국 커버리지 최적화하는 연구를 조사하였고, 엣지 컴퓨팅, 산업용 IoT 환경에서는 심층 강화학습을 통해 오프로딩과 자원 관리 문제를 효과적으로 해결하는 연구를 조사하였다.

앞으로 디지털 트윈과 인공지능의 결합은 더 다양한 통신 시나리오에서 활용될 것으로 전망되며 앞으로 향후 연구에서는 표준화, 실시간성 확보 등이 주요 과제가 될 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by the IITP (Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation) - ITRC (Information Technology Research Center) (IITP-2025-RS-2022-00156353, 50%) grant funded by the Korea government (Ministry of Science and ICT) and in part by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2023-00209125).

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," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 10, pp. 7086-7096, Oct. 2022.
- [2] M. C. Ho, A.-T. Tran, D. Lee, J. Paek, W. Noh, and S. Cho, "A DDPG-based Energy Efficient Federated

Learning Algorithm with SWIPT and MC-NOMA," *ICT Express*, vol. 10, no. 3, pp. 600-607, Jun. 2024.

- [3] R. Aben-Athar, H. Anglada, L. Costa, J. Albuquerque, A. Ferreira, C. B. Both, K. Cardoso, S. Lins, A. Silva, G. Gonçalves, I. Correa, and A. Klautau, "Network Digital Twin for Route Optimization in 5G/B5G Transport Slicing with What-If Analysis", arXiv preprint arXiv:2505.04879, May 2025.
- [4] H. Liu, T. Li, F. Jiang, W. Su, and Z. Wang, "Coverage Optimization for Large-Scale Mobile Networks With Digital Twin and Multi-Agent Reinforcement Learning," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 23, no. 12, pp. 18316-18330, Dec. 2024.
- [5] J. Wu and R. Zuo, "Intelligent Computation Offloading Based on Digital Twin-Enabled 6G Industrial IoT," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 3, p. 1035, Feb. 2024.
- [6] S. Lee and S. Park, "Mobility-Assisted Digital Twin Network Optimization over Industrial Internet of Things," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 19, p. 9090, Oct. 2024.
- [7] S. Park, C. Park, and J. Kim, "Learning-Based Cooperative Mobility Control for Autonomous Drone-Delivery," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 4, pp. 4870-4885, April 2024.