

실시간 컨테이너 모니터링을 위한 엣지 AI 및 블록체인 기반 디지털 트윈 물류 프레임워크

양희경¹, 이재민², 김동성*

금오공과대학교 IT융복합공학과^{1,2,*}

{tnseo1945¹, ljmpaul², dskim^{*}}@kumoh.ac.kr

A Digital Twin Logistics Framework Based on Edge AI and Blockchain for Real-Time Container Monitoring

Heui-Kyeong Yang¹, Jae-Min Lee², and Dong-Seong Kim*

Kumoh National Institute of Technology Dept. of IT Convergence Eng.^{1,2,*}

요약

본 논문은 Physical Internet(PI) 기반 물류 환경에서 실시간 컨테이너 상태 모니터링과 데이터 신뢰성 확보를 위한 Edge AI - Digital Twin - Blockchain 통합 프레임워크를 제안한다. 기존의 중앙 집중형 물류 관리 방식은 네트워크 지연, 통신 단절, 데이터 위·변조 위험으로 인해 군 물류와 같은 임무 중심 환경에서 즉각적인 대응에 한계를 가진다. 제안하는 시스템은 지능형 엣지 디바이스를 활용해 컨테이너 내부 환경 데이터를 실시간으로 수집·처리하고, Digital Twin 플랫폼을 통해 물리적 컨테이너 상태를 가상 공간에서 동기화한다. 또한 블록체인 기반 무결성을 통해 센서 데이터의 위·변조를 방지하고 이력 추적성을 확보함으로써, PI 기반 물류 시스템의 운영 신뢰성을 향상시키고 군수 및 스마트 물류 환경에서의 활용 가능성을 제시한다.

I. 서 론

전 세계적으로 물류 시스템은 점차 복잡·고도화되고 있으며, 특히 군 물류와 같은 임무 중심 환경에서는 물류 자산의 상태를 실시간으로 파악하고 신속히 대응하는 능력이 핵심 요구사항으로 부각되고 있다. 이러한 요구에 대응하기 위해 제안된 Physical Internet(PI) 개념은 물류 자원을 표준화된 모듈 단위로 관리하고, 디지털 네트워크를 통해 물류 흐름과 상태 정보를 공유함으로써 물류 효율성과 투명성을 향상시키는 새로운 물류 패러다임으로 주목받고 있다[1]. 그러나 실제 운용 환경에서 PI 기반 물류 관리 시스템은 중앙 집중형 구조에 의존하고 있어, 네트워크 지연이나 통신 단절 시 현장 데이터의 실시간 처리와 즉각적인 대응에 한계를 가진다. 또한 센서 데이터가 단순 저장·모니터링에 그치는 경우, 컨테이너 상태 변화를 직관적으로 파악하기 어렵고 데이터의 변경 이력과 신뢰성 검증에도 제약이 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 논문은 PI 기반 물류 환경에서 Edge AI, Digital Twin, Blockchain을 통합한 실시간 컨테이너 모니터링 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 엣지 단에서의 실시간 데이터 처리와 Digital Twin 기반 상태 동기화, 블록체인 기반 데이터 무결성을 통해 PI 기반 물류 시스템의 실시간성과 운영 신뢰성을 향상시키며, 군수 및 스마트 물류 환경에서의 활용 가능성을 제시한다[2].

II. 기존 시스템에 대한 분석

PI 기반 물류 시스템은 물류 자원을 표준화된 단위로 관리하고 네트워크로 연계하여 물류 효율성과 투명성을 향상시키는 것을 목표로 한다. 기존 연구 [3]은 Digital Twin과 중앙 서버 기반의 관리 구조를 통해 물리 시스템의 상태를 가상 공간에서 통합적으로 시각화하고, 엣지와 클라우드 간 연산 협력을 활용한 자원 관리를 제안한다. 그러나 상태 분석과 의사결정이 중앙 시스템에 집중되어 있어 네트워크 지연이나 통신 장애 시 현장 대응에는 한계가 존재한다. 기존 연구 [4]는 중앙 집중형 구조를 개선하기

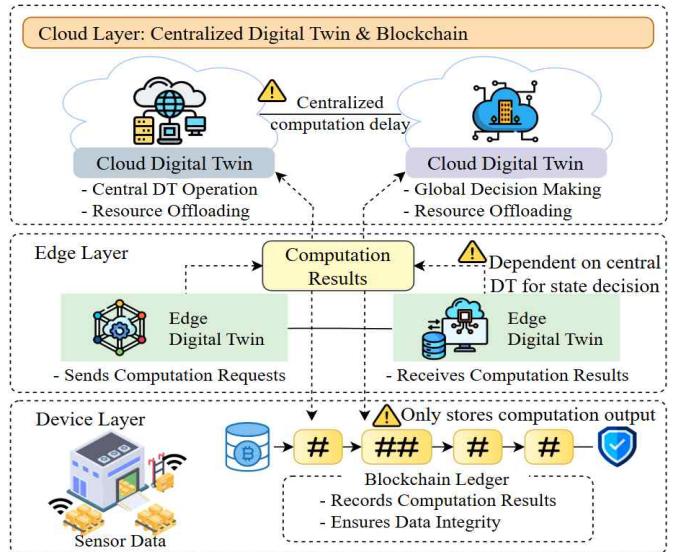


그림 1. 기존 중앙 집중형 물류 관리 시스템 구조

위해, Digital Twin 기반 연산 요청과 처리 결과를 블록체인에 기록·검증하는 엣지와 클라우드 간 협력 구조를 제안한다. 그림 1은 센서로부터 수집된 데이터가 Edge Digital Twin을 거쳐 Cloud Digital Twin으로 전달되고, 연산 및 의사결정 결과가 블록체인 원장에 기록되는 흐름을 보여준다. 그러나 해당 구조에서는 블록체인이 연산 과정의 신뢰성만을 보장할 뿐, 센서 데이터에 대한 상태 해석과 의사결정은 여전히 Cloud Digital Twin에 집중되어 있다. 결과적으로, 기존 PI 기반 물류 관리 구조는 연산 중심의 중앙·클라우드 의존성이 높아 현장의 실시간 판단과 자율적 대응을 충분히 지원하지 못하고 있다. 특히 통신 환경이 불안정한 군 물류와 같은 임무 중심 환경에서는 이러한 구조적 제약이 운영 안정성을 저해할 수 있다. 이에 따라 엣지 단에서의 실시간 이상 판단과 Digital Twin 연동, 데이터 무결성을 함께 고려한 통합적인 시스템 구조가 요구된다.

III. 제안하는 실시간 컨테이너 모니터링 프레임워크

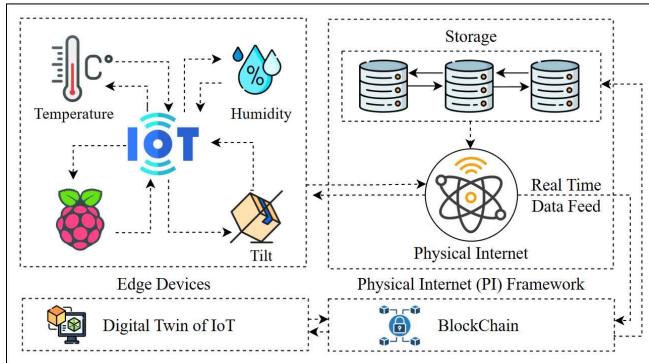


그림 2. PI 기반 실시간 컨테이너 모니터링 프레임워크

본 장에서는 군수 및 스마트 물류 환경에서 요구되는 실시간성과 운영 신뢰성을 동시에 확보하기 위한 Edge AI - Digital Twin - Blockchain 기반 통합 컨테이너 모니터링 프레임워크를 제안한다. 제안하는 시스템은 엣지 단의 이상 감지, 물리 - 가상 환경 간 실시간 동기화, 그리고 데이터 무결성 보장을 위한 블록체인 저장 구조를 유기적으로 결합한 구조를 가진다. 전체 시스템 아키텍처는 그림 2에 나타낸다. 제안 시스템의 핵심 구성 요소는 엣지 디바이스에서 수행되는 실시간 이상 감지 기능이다. 수집한 뒤, Three-Sigma 기준 이상 탐지 알고리즘을 이용해 현장에서 지능적으로 상태를 분석하고 이상 여부를 판단하는 Edge AI 노드로 동작한다. 해당 기법은 저전력·저성능 환경에서도 안정적으로 동작할 수 있어 현장 중심 물류 시스템에 적합하다. 구체적으로, 시간 t 에서 수집된 센서 데이터 x_t 에 대해, 최근 N 개의 관측값을 기준으로 이동 평균 μ_t 는 수식 1과 같이 정의된다.

$$\mu_t = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t x_i \quad (1)$$

다음으로, 동일한 구간에 대한 표준편차 σ_t 는 수식 2를 통해 산출된다.

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t (x_i - \mu_t)^2} \quad (2)$$

마지막으로, 현재 시점에서 측정된 센서값 x_t 가 수식 3의 조건을 만족할 경우 해당 상태를 이상 상황으로 판단한다.

$$|x_t - \mu_t| > 3\sigma_t \quad (3)$$

이와 같은 방식은 센서 데이터의 급격한 변화나 비정상 패턴을 조기에 식별할 수 있으며, 네트워크 지연이나 통신 단절 상황에서도 엣지 단에서 독립적인 판단이 가능하다는 장점을 가진다. 이를 통해 시스템은 중앙 서버의 준도를 낮추고, 물류 환경에서 요구되는 실시간성과 자율성을 동시에 확보할 수 있다. 엣지 디바이스에서 판단된 이상 감지 결과는 Digital Twin 플랫폼으로 전달되어, 물리적 컨테이너 상태를 가상 공간에 실시간으로 반영한다. 본 연구에서는 FlexSim 환경을 활용하여 컨테이너 단위 Digital Twin을 구성하였으며, MQTT(Message Queuing Telemetry Transport) 프로토콜 기반의 양방향 통신 구조를 적용하였다. 이를 통해 엣지에서 발생한 이상 감지 이벤트가 즉시 가상 모델에 동기화되며, 기존의 사전 정의된 시나리오 기반 시뮬레이션 중심 Digital Twin과 달리 실제 현장 상황을 실시간으로 반영하는 동적 의사결정 지원 환경을 구현한다. 한편, 수집된 센서 데이터와 이상 감지 결과는 블록체인 네트워크를 통해 무결성과 이력 추적이 보장된다. 제안하는 시스템은 프라이빗 블록체인 구조를 기반으로 하며, 이상 상태가 감지된 경우 해당 시점의 센서값, 통계 정보, 타임스탬프, 컨테이너 식별 정보를 하나의 트랜잭션으로 구

성한다. 생성된 트랜잭션은 암호학적 해시 함수를 통해 요약된 후 블록에 포함되며, 네트워크 참여 노드 간 검증과 합의 과정을 거쳐 원장에 기록된다. 이러한 기록 구조는 센서 데이터의 위변조를 방지하고, 상태 변화의 이력과 판단 근거를 투명하게 추적할 수 있도록 한다. 특히 군 물류와 같이 책임성과 추적성이 중요한 환경에서, 블록체인 기반 기록은 운영 투명성과 사후 분석을 효과적으로 지원한다. 결과적으로, 제안하는 프레임워크는 엣지 단의 실시간 이상 판단, Digital Twin 기반 상태 동기화, 블록체인 기반 데이터 무결성 기록을 통합함으로써 기존 중앙 집중형 물류 관리 시스템의 실시간성과 운영 신뢰성 한계를 효과적으로 극복한다. 이를 통해 PI 기반 물류 환경에서 요구되는 현장 대응력과 안정적인 운영 기반을 동시에 확보할 수 있다.

IV. 결론 및 기대효과

본 논문에서는 PI 기반 물류 환경에서 실시간 컨테이너 상태 모니터링과 데이터 신뢰성 확보를 위한 Edge AI - Digital Twin - Blockchain 통합 프레임워크를 제안하였다. 제안하는 시스템은 엣지 단의 이상 감지, Digital Twin 기반의 상태 동기화, 블록체인 기반의 데이터 무결성을 결합함으로써 기존 중앙 집중형 구조의 지연성과 신뢰성 한계를 효과적으로 보완한다. 이를 통해 통신이 불안정한 환경에서도 자율적이고 실시간적인 대응이 가능하며, 군수 및 스마트 물류 시스템의 운영 효율성과 신뢰성을 한층 높일 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-학술사업 제ICT핵심인재양성 지원을 받아 수행된 연구(IITP-2025-RS-2022-00156394, 25%)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역인력화혁신인재양성사업(IITP-2025-RS-2020-II201612, 25%)과 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2018R1A6A1A03024003, 25%)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2025-RS-2024-00438430, 25%)

참 고 문 헌

- [1] H. Tran-Dang, N. Krommenacker, P. Charpentier and D.-S. Kim, "Toward the Internet of Things for Physical Internet: Perspectives and Challenges", IEEE Internet of Things Journal, Vol. 7, pp. 4711 - 4726, Jun. 2020.
- [2] D.-S. Kim, E. A. Tuli, I. I. Saviour, M. M. H. Somrat and X.-Q. Pham, "Blockchain-as-a-Service: A Pure Chain Approach", Blockchain: Research and Applications, Vol. 100397, pp. 1 - 32, Oct. 2025.
- [3] C. Zhuansun, P. Li, Y. Liu and Z. Tian, "Generative AI-Assisted Mobile-Edge Computation Offloading in Digital-Twin-Enabled IIoT", IEEE Internet of Things Journal, Vol. 12, no. 10, pp. 13248 - 13258, May 2025.
- [4] T. Li, X. Wang, R. Zeng, L. Zhao, A. Hawbani, Y. Zhang and M. Huang, "Enhancing Edge-Cloud Collaboration With Blockchain-Assisted Digital Twin Intelligence Offloading Scheme", IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 24, no. 10, pp. 9619 - 9633, Oct. 2025.