

엣지 컴퓨팅 기반 자율협업 IoT 통합관리 플랫폼 구조 설계

최진철, 박찬원

한국전자통신연구원

{spiders22v, cwp}@etri.re.kr

Design of an Integrated Management Platform Architecture for Autonomous Collaborative IoT Based on Edge Computing

Jinchul Choi, Chanwon Park

Electronics Telecommunications and Research Institute

요 약

본 논문에서는 온디바이스 AI 기반 지능사물들이 엣지 컴퓨팅 환경에서 자율적으로 협력할 수 있도록 지원하는 자율협업 IoT 통합관리 플랫폼을 제안한다. 제안하는 플랫폼은 사물 데이터 수집·처리, 협업 관리, 온디바이스 AI 모델 학습, 엣지 네트워크 및 장치 관리 등 4가지 핵심 모듈로 구성된다. 본 플랫폼을 통해 지능사물은 주변의 다른 사물과의 협업을 자율적으로 수행할 뿐만 아니라, 협력 과정에서 획득된 데이터를 활용하여 자체 AI 모델을 지속적으로 학습하고 최적화할 수 있다. 이는 분산된 지능 사물 간의 상호작용을 증진시키고, 실시간 협업에 기반한 지능 IoT 서비스 제공을 가능하게 한다.

I. 서 론

사물인터넷(IoT, Internet of Things) 기술이 발전함에 따라 지능사물이 자율적으로 주변 환경을 인식하고 상황을 판단하여 행동하는 기술이 현실화되고 있다. 특히, 온디바이스 AI 기술의 고도화는 개별 사물이 로컬 환경에서 실시간 데이터 처리 및 의사결정을 수행하는 능력을 부여함으로써, 중앙 서버 의존도와 데이터 집중 현상을 완화하고 지연 시간 및 통신 비용을 절감하는 효과를 가져와 주목받고 있다[1-3]. 이러한 기술적 진보를 배경으로, 개별 사물의 독립적인 기능 수행을 넘어 주변 사물과 협력하여 상황을 인지하고, 자율적으로 연동해 공동의 목표를 달성하는 자율협업 IoT(Autonomous Collaborative IoT)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-7].

자율협업 IoT는 스마트시티, 스마트 팩토리, 에너지 관리, 재난 대응 등 다양한 분야에서 높은 응용 잠재력을 가지고 있다. 하지만 현재까지의 연구는 주로 사물 협력을 통한 AI 모델 학습이나 제한적인 시나리오 내 협업에 머물러 있어, 서로 다른 종류의 사물들이 역동적으로 협력하는 상황을 효과적으로 인지하고 제어하는 데 필요한 통합 관리 프레임워크 연구는 아직 부족하다[6-7]. 특히, 다수의 지능사물이 분산된 공간에서 독립적으로 또는 서로 협력하며 작동하는 복잡한 네트워크 환경에서는 협력 상황 감지, 자율적인 역할 분담, 자원 최적화 등을 위한 통합관리 기술 개

발이 중요하다.

이에 본 논문에서는 지능사물들의 자율협업 IoT를 실현하기 위한 핵심 인프라로서, 협력 상황 감지, 자율 서비스 연동, 자원 관리 및 정책 적용 등을 종합적으로 지원할 수 있는 엣지 컴퓨팅 기반 자율협업 IoT 통합관리 플랫폼의 구조와 설계 방안을 제시한다.

II. 본론

(1) 자율협업 IoT 통합관리 플랫폼의 구성

자율협업 IoT 통합관리 플랫폼은 온디바이스 AI를 탑재한 지능 사물들이 엣지 컴퓨팅 환경 내에서 자율적으로 협력할 수 있도록 지원한다. 본 플랫폼은 그림 1과 같이 총 4개의 핵심 기능 모듈로 구성되며, 각 모듈은 상호 유기적으로 연동되어 자율협업 IoT 서비스의 인지, 판단, 학습, 실행의 전 주기를 통합적으로 지원한다. , 복잡한 협업 서비스가 가능한 지능형 분산 시스템을 구현하는 기반이 된다.

첫 번째 모듈인 사물 데이터 수집/처리 모듈은 지능사물 간 협력 기반 AI 처리를 위한 핵심 데이터를 실시간으로 수집하고, 이를 정제 및 구조화하여 상위 분석 및 학습 단계에 활용할 수 있는 형식으로 변환한다. 해당 모듈은 사물의 위치나 동작 상태와 같은 동적 정보뿐 아니라 사물의 메타



그림 1. 자율협업 IoT 통합관리 플랫폼 구조와 지능사물 협력 메커니즘

데이터나 기능 설정 등의 정적 정보도 함께 수집한다. 그리고, 기존 AI 모델의 추론/인식 결과와 예측값 같은 2차 데이터를 통합함으로써 다양한 종류의 입력 정보를 확보한다. 또한 개별 지능사물이 협업을 위해 요구하는 요청 사항을 상위 모듈에 전달함으로써 시스템의 능동적 반응을 유도하며, 텍스트, 영상, 센서 측정값 등의 이기종 데이터를 통합하는 멀티모달 처리 기능을 통해 전체 플랫폼에 다양한 유형의 정보를 제공한다.

두 번째 모듈인 자율사물 협업 관리 모듈은 지능사물 간의 협력 상황을 실시간으로 감지하고, 협력 구조를 동적으로 생성·조정하여 자율 협업의 효율성을 높인다. 본 모듈은 사물의 상태와 주변 환경의 변화를 기반으로 콘텍스트를 지속적으로 추적하며, 정책 기반 의사결정 모델 또는 인공지능 모델을 통해 협력이 필요한 상황을 신속하게 인지한다. 협력 필요 상황이 발생하면, 사물 간 동기화, 역할 분담, 상태 제어, 데이터 교환 등이 이루어지며, 협력 품질을 개선 위한 모델 업데이트 및 상황 분석도 함께 수행된다.

세 번째 모듈인 온디바이스 AI 모델학습 모듈은 지능사물이 독립적인 학습 또는 협력적 학습을 통해 지능을 향상시키도록 설계되었다. 개별 디바이스는 자체적으로 수집한 로컬 데이터를 기반으로 연합학습을 수행하며, 학습된 결과의 공유 및 집약을 통해 공통 모델 생성이 가능하다. 특히, 전체 모델 학습 방식과 더불어 부분 학습 방식을 적용함으로써, 자원 효율성과 실시간 대응성을 동시에 확보할 수 있다. 또한, 사물 간 협력 과정에서 생성된 결과 또는 사용자 피드백을 기반으로 모델 성능을 개선할 수 있는 피드백 기반 자가 학습 기능을 포함한다. 또한, 연산 자원이 제한적인 엣지 환경을 고려하여, AI 모델 경량화 및 기능 단위 분할 배포 기술이 적용되었다. 이러한 전 과정은 MLOps 기반 학습 파이프라인과 연계되어 모델의 학습, 배포, 모니터링, 버전 관리 등을 자동화함으로써 플랫폼 전반의 운영 효율성과 모델 품질을 동시에 확보한다.

마지막으로, 엣지 네트워크 및 장치 관리 모듈은 지능사물과 엣지 서버 간 통신 및 물리적 구성을 총괄하며, 시스템 전반의 운영 및 연동성을 관리하는 핵심적인 역할을 수행한다. 해당 모듈은 각 사물의 등록 및 통신 구조 설정, 네트워크 상태 모니터링, 장애 탐지 등의 기능을 포함하며, 지능사물의 메타 정보, 위치, 역할 등 다양한 정보를 통합하여 효율적인 서비스 구성을 지원한다. 또한, 사물 간 협력 관계를 실시간으로 시각화하여 운영자에게 직관적인 모니터링 환경을 제공하고, 각 사물에 탑재된 AI 모델과의 연계를 통해 자율적인 상황 인식, 판단, 실행 제어가 가능하도록 한다. 나아가, 환경 변화에 따라 적절한 추론 모델을 자동으로 선택 및 배포하는 기능을 통해 적응형 AI 실행을 실현하며, 외부 시스템 및 사용자 애플리케이션과의 연계를 위한 인터페이스 및 API를 제공함으로써 플랫폼의 확장성과 활용성을 제고한다.

(2) 지능사물의 내재 구조 및 플랫폼 상호작용 메커니즘

자율협업 IoT 환경에서 지능사물은 단순한 데이터 수집 기능을 넘어, 상황 인지, 판단, 협업 실행 능력을 내재한 복합 구조를 갖는다. 각 지능사물은 정적 속성(사양, 내장 기능 등)과 더불어, 센서 기반 실시간 데이터, 추론 결과, 의사결정 논리, 온디바이스 AI 모델, 그리고 협업 서비스 계층으로 구성되어, 자율협업 IoT 통합 관리 플랫폼과의 양방향 상호작용을 통해 지속적으로 성능이 강화된다.

플랫폼은 엣지 네트워크 및 장치 관리를 통해 각 지능사물의 상태와 네트워크 연결을 통제하며, 수집된 데이터는 온디바이스 AI 모델 학습 모듈로 전달되어 상황인식 및 추론 성능 향상에 기여한다. 지능사물은 플랫폼을 매개로 실시간 데이터를 공유하며 협력 상황을 감지하고, 플랫폼은 이를 기반으로 협력 구조 생성 및 조정, 경량화된 AI 추론 모델 배포, 협업 지침 전달 등을 수행한다. 또한, 플랫폼은 MLOps 기반으로 각 사물의 AI

모델 성능을 추적 및 평가하여, 개별 모델의 동적 최적화 또는 재학습을 유도한다. 이러한 실시간 정보 흐름과 피드백 루프는 개별 사물의 자율성 뿐만 아니라, 시스템 전체의 협력 효율성과 적응성을 지속적으로 향상시키는 핵심 메커니즘으로 작용한다.

(3) 자율협업 IoT 플랫폼의 MLOps 기반 운영 및 관리자 역할

자율 협업 IoT 통합 관리 플랫폼의 운영은 시스템 관리자에 의해 수행되며, 플랫폼 전반의 안정성 및 협력 효율성 유지에 핵심적인 역할을 담당한다. 시스템 관리자는 통합 대시보드를 통해 각 기능 모듈의 상태, 장치 동작 현황, 협력 상황 및 학습 진행 상태를 실시간으로 모니터링하고, 사물 간 협력 관계, 데이터 흐름, AI 모델 성능 변화 추이 등을 시각적으로 분석하여 이상 징후 또는 성능 저하 발생 시 즉각적인 조치를 수행할 수 있다. 특히, 본 플랫폼은 단순한 자동화 시스템을 넘어 휴먼-인더-루프(Human-in-the-Loop)[8] 기반 운영 체계를 채택하여, 시스템 관리자가 필요에 따라 개별 지능사물의 AI 학습 주기 조정, 경량화된 모델 재배포, 협력 정책 수정 등 능동적인 개입을 수행함으로써 전체 협업 시스템의 유연성 및 적응성을 향상시킨다.

본 플랫폼은 MLOps 기반 통합 운영 체계를 통해 모든 AI 모델의 버전 이력, 학습 상태, 배포 내역 등을 중앙에서 일괄적으로 관리한다. 이를 바탕으로 환경 변화나 성능 저하 감지 시, 자동 재학습 트리거링, 최적화된 모델의 재배포, 모델 전환 및 롤백 등의 자동화된 대응이 가능하다. 이처럼 시스템 관리자와 플랫폼 간의 협력은 지속적 품질 유지, 서비스 신뢰성 확보, AI 협업 최적화의 기반이 되며, 자율협업 IoT 시스템의 실질적인 운영지능을 구현하는 데 핵심적인 역할을 한다.

III. 결론

본 연구에서는 온디바이스 AI를 탑재한 지능사물들이 엣지 환경에서 자율적으로 협력할 수 있도록 지원하는 자율협업 IoT 통합관리 플랫폼을 제안하였다. 향후에는 각 기능 모듈을 구현하고 통합한 후, 실증 서비스를 통해 플랫폼의 기능성과 성능을 종합적으로 검증할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-02217801, 대규모 온디바이스AI 사물·네트워크 통합관리 핵심기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] V. U et al., "AI-Powered IoT: A Survey on Integrating Artificial Intelligence With IoT for Enhanced Security, Efficiency, and Smart Applications," in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 50296-50339, 2025.
- [2] X. Wang, et al. "Empowering Edge Intelligence: A Comprehensive Survey on On-Device AI Models," in *ACM Computing Surveys*, vol. 57, Iss. 9, pp. 1-39, 2025.
- [3] Q. Ashraf, et al. "Toward Autonomic Internet of Things: Recent Advances, Evaluation Criteria, and Future Research Directions," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 16, pp. 14725-14748, 15 Aug.15, 2023.
- [4] A. Abdelmoniem et al., "Towards a Decentralized Collaborative Framework for Scalable Edge AI," in *Future Internet*, vol. 16, Iss. 11 pp. 421, 2024.
- [5] I. Khawaja, et al, "Empowering Collaborative Application Development: A Robust Framework for Ad-Hoc Distributed Systems," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 62296-62316, 2024.
- [6] G. Ortiz, et al, "Atmosphere: Context and situational-aware collaborative IoT architecture for edge-fog-cloud computing," in *Computer Standards & Interfaces*, vol. 79, 2022.
- [7] W. Ni, et al. "Semi-Federated Learning for Collaborative Intelligence in Massive IoT Networks," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 13, pp. 11942-11943, 1 July1, 2023.
- [8] S. Kumar, et al. "Applications, Challenges, and Future Directions of Human-in-the-Loop Learning," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 75735-75760, 2024.