

Software-Defined Factory를 위한 복합형 연합 디지털 트윈 스케줄링 방법론 연구

권진우, 김원태*

한국기술교육대학교

qwedww@koreatech.ac.kr, *wtkim@koreatech.ac.kr

A Study on the Complex Federated Digital Twin Scheduling for Software-Defined Factories

Kwon Jin-Woo, Kim Won-Tae*

Koreatech University of Technology and Education

요약

미래 제조 환경은 대량 개인화 생산(mass personalization manufacturing)의 확산과 함께, 다양한 기능과 해상도를 갖는 디지털 트윈들이 계층적으로 연합되어 자율적으로 구성되는 방향으로 전화하고 있다. Software-Defined Factory(SDF)는 이러한 흐름의 핵심 구조로, 설비, 공정, 물류, 에너지, 정비 등 이기종 시스템 간 유기적 협업을 가능하게 한다. 특히 복합형 연합 디지털 트윈은 단독형, 다중형, 단일 트윈들이 통합된 구조로, 보다 정교하고 유연한 제조 제어를 가능하게 한다. 본 논문은 복합형 연합 디지털 트윈 구조의 복잡성에 대응하기 위한 스케줄링 프레임워크를 제안한다. 제안된 방법은 연합 트윈의 구성 가능성과 해상도 차이를 온톨로지 기반 지식으로 정의하고, 이를 Retrieval-Augmented Generation(RAG) 방식으로 활용하여 대규모 언어모델(LLM)이 필요 시 온톨로지 정보를 검색하고 참조함으로써 사용자 요구를 해석하고 실행 정책을 자동 생성하는 방식이다. 이를 통해 구조적·기능적으로 이질적인 트윈 간의 실행 순서, 자원 배분, 제약 조건을 통합적으로 고려한 정책 기반 스케줄링이 가능하며, 실시간 변화에도 유연하게 대응할 수 있는 자율 제어 체계를 실현할 수 있다.

I. 서론

미래 제조 패러다임은 소비자 맞춤형 대량 생산(mass personalization manufacturing)의 확산과 함께, 제조 공정이 점점 더 유연하고 자율적으로 변화하고 있다. 이에 따라 제조 시스템은 정적인 계획이 아닌, 실시간 데이터 기반의 동적 대응 능력을 요구받고 있으며, 이러한 흐름에서 디지털 트윈(Digital Twin)은 물리적 시스템의 상태를 실시간으로 반영하고 제어 가능한 핵심 기술로 자리잡고 있다. 디지털 트윈은 설비, 공정, 물류, 에너지 등 제조 자원을 가상공간에 구현하고 이를 통해 최적의 운영 전략을 수립할 수 있도록 지원하며, 미래형 제조의 기반으로 기능한다 [1].

그러나 고도화된 제조 환경에서는 단일 디지털 트윈만으로 복잡한 요구를 수용하기 어려우며, 다수의 디지털 트윈들이 목적에 따라 연합된 구조인 연합 디지털 트윈(Federated Digital Twin)이 요구된다. 연합 트윈은 이기종 디지털 트윈 간 협업을 통해 공정 셀, 라인, 물류, 유지보수 등 기능 단위 서비스를 제공하며, 동적으로 변화하는 생산 조건과 소비자 요구에 유연하게 대응할 수 있다. 더 나아가, 연합 트윈 간의 상호작용과 공유 자원을 포함하는 구조로 확장된 복합형 연합 디지털 트윈은 단독형, 다중형 트윈 간의 계층적 연결성과 기능적 이질성을 통합하여, 정교하고 자율적인 고차원 제조 서비스를 구현할 수 있는 상위 구조로 진화하고 있다.

이러한 복합형 연합 디지털 트윈 환경에서는 자원 공유, 연합 간 의존성, 및 해상도 차이, 사용자 요구의 실시간 변화 등을 고려하여 전체 제조 시스템의 실행 순서, 자원 할당, 실행 시간 등을 조율해야 하며, 이를 위해 정교한 스케줄링이 필요하다 [2, 3]. 그러나 기존의 스케줄링 기법은 정해진 작업 순서와 고정된 자원 조건을 기반으로 하여, 트윈 간 기능 이질성이나 동적 구조 재구성, 실시간 요구 변화 등 복합형 연합 트윈의 복잡한

특성을 반영하는 데 한계가 있다. 또한, 기존 방법론은 계층 구조를 갖는 연합 트윈 간의 메타 수준 제어를 수행하기 어려우며, 결과적으로 제조 시스템 전체의 최적화를 실현하는 데 제약이 따른다.

이에 본 논문에서는 복합형 연합 디지털 트윈의 구조와 기능, 해상도 차이를 온톨로지로 표현하고, 이를 기반으로 대규모 언어모델(LLM)이 Retrieval-Augmented Generation(RAG) 방식으로 온톨로지 데이터를 동적으로 검색하고 활용하여 사용자 요구를 해석하고 실행 정책을 자동 생성하는 스케줄링 프레임워크를 제안한다. 제안된 방법은 각 연합 트윈 계층 간의 구조, 기능, 자원 관계 등을 명시적으로 해석하고, 복잡한 제조 요구를 자연어 형태로 입력받아 실행 명세를 생성함으로써, 실시간 변화에도 유연하게 대응하는 자율적 제어를 실현할 수 있다.

II. 본론

SDF 환경에서 복합형 연합 디지털 트윈은 단일 디지털 트윈(DT), 단독형 연합 트윈, 다중형 연합 트윈, 복합형 연합 트윈으로 구성되는 계층적 구조를 기반으로 설명된다. 단일 디지털 트윈은 개별 로봇, 센서, 설비 등 개별 객체의 상태 및 기능을 반영하며, 단독형 연합 트윈은 단일 기능을 수행하기 위해 복수의 디지털 트윈이 연합된 구조이다. 예를 들어, 하나의 공정 셀 내부에서 다수의 설비 트윈이 상호작용하며 제품을 가공하거나 조립하는 구조는 단독형 연합 트윈에 해당한다. 다중형 연합 트윈은 여러 단독형 연합 트윈들이 AMR, 전력 설비 등 공통 자원을 공유하며 상호작용하는 구조이며, 복합형 연합 트윈은 이러한 계층들을 통합하여 공장 수준에서 전략적으로 자율 제어를 수행할 수 있는 상위 연합체를 의미한다. 복합형 연합 트윈 구조에서는 연합 간 기능 이질성, 구조적 차이, 해상도

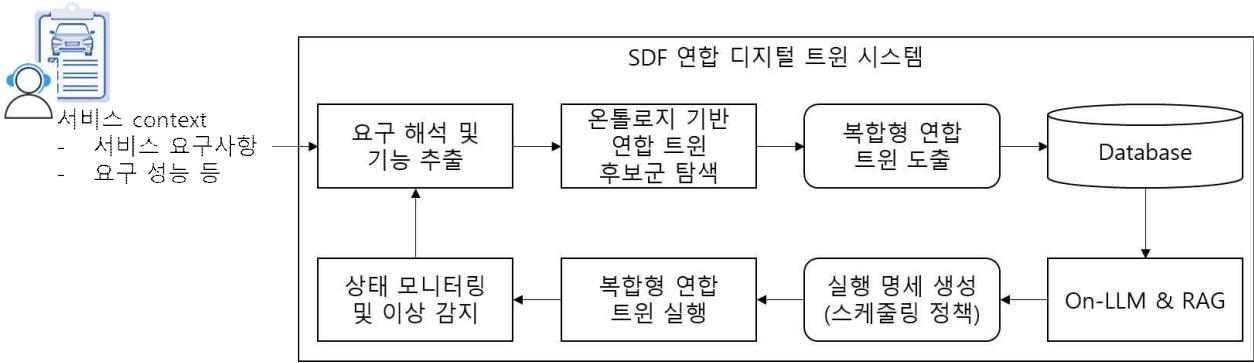


그림 1. 서비스 요구사항 만족을 위한 스케줄링 LLM을 포함하는 SDF 연합 디지털 트윈 시스템

(제어 주기, 기능 범위, 표현 수준 등) 차이, 자원 공유, 실행 우선순위 등 다양한 요소들이 존재하며, 이를 통합적으로 고려하지 않으면 생산 최적화가 어렵다. 이러한 스케줄링 문제는 단순한 작업 순서 조정이 아니라, 연합 트윈 간 기능적/구조적/자원적 맥락을 고려한 실행 계획 수립 문제로 확장된다. 이를 위해 본 논문은 연합 트윈의 구성 가능성과 상태 정보를 온톨로지로 정형화하고, 대규모 언어모델(LLM)이 Retrieval-Augmented Generation(RAG) 방식으로 온톨로지 정보를 실시간으로 검색하여 스케줄링에 필요한 실행 정책을 동적으로 생성하는 프레임워크를 제안한다.

본 프레임워크에서 온톨로지는 연합 트윈의 계층 구조, 기능 분류, 해상도 수준, 자원 연결 관계 등 메타정보를 정의하며, 이는 LLM이 스케줄링 문맥에 따라 질의할 수 있는 지식 베이스로 작동한다. 사용자는 자연어 형태로 제조 요구사항을 입력하고, 시스템은 이를 기반으로 온톨로지에서 관련 트윈 구성 정보를 검색한 후, 가능한 실행 조합과 우선순위 조건을 추론하여 실행 명세를 생성한다.

예를 들어, 단일 디지털 트윈은 센싱 주기, 제어 응답 시간, 설비 가용성 등 세부 속성에 기반하여 최소 실행 단위로 구성되고, 단독형 연합 트윈은 공정 목적과 구성 트윈 간 의존성 분석을 통해 실행 가능한 단위로 구성된다. 다중형 연합 트윈은 공유 자원 사용과 병목 예측을 바탕으로 병렬성 및 공유 자원 경쟁 해소 전략이 적용되며, 복합형 연합 트윈은 전반적인 제조 전략과 상호작용 조건을 통합 분석하여 상위 실행 계획을 도출한다.

LLM은 온톨로지로부터 검색된 정보를 바탕으로 time window, 자원 할당 우선순위, 병렬 실행 가능성, 기능 간 제약 등을 포함하는 실행 명세를 구성하며, 해당 명세는 정책 기반 스케줄링 실행기(.Scheduling Rule Engine 또는 DRL 기반 스케줄링 제어기)를 통해 시스템에 반영된다. 또한 본 프레임워크는 설비 고장, 긴급 수주, 공유 자원 병목 등 다양한 환경 변화에 대응하기 위한 실시간 재-스케줄링 기능을 포함한다. 예를 들어 특정 AMR 경로에 병목이 발생하면, 시스템은 우선순위를 조정하거나 대체 경로를 선택하고, 실행 명세를 재구성하여 전체 생산 흐름을 유지한다.

이러한 방식은 복합형 연합 트윈의 다양한 구조와 해상도를 고려한 유연한 정책 기반 제어를 가능하게 하며, 사전 학습이 아닌 RAG 기반 온톨로지 참조 방식을 통해 확장성과 유지보수성을 동시에 확보할 수 있다. 제안된 프레임워크는 복합 제조 환경에서 실시간 사용자 요구와 구조적 제약을 동시에 만족시킬 수 있는 실용적이고 지능적인 스케줄링 기반으로 작동할 수 있다.

III. 결론

본 논문은 SDF 환경에서 복합형 연합 디지털 트윈의 구조적·기능적 복잡성과 해상도 차이에 대응하기 위한 LLM 기반 스케줄링 프레임워크를

제안하였다. 특히 연합 트윈의 구성 가능성을 온톨로지로 정의하고, 이를 LLM이 RAG(Retrieval-Augmented Generation) 방식으로 검색하여 사용자 요구와 연결하는 접근은 기존의 고정형 또는 사전 학습 기반 스케줄링 방식의 한계를 극복할 수 있는 새로운 해결책이다. 제안된 방법은 단일 트윈부터 복합형 연합 트윈에 이르는 다양한 계층을 고려하고, 자원 공유, 실행 우선순위, 시간 창, 병렬성 등 다양한 요소를 통합하여 실행 정책을 생성한다. 또한 설비 이상이나 수요 변화에도 구조를 재조정할 수 있어 자율성과 유연성을 동시에 확보할 수 있다. 향후 연구에서는 온톨로지 기반 RAG 구조의 확장성과 다양한 제조 시나리오에서의 적용 가능성을 정량적으로 검증하고, 실행 안정성과 정책의 정밀도를 개선하기 위한 후속 연구를 수행하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2021-II211816)

참 고 문 헌

- [1] Vergara, C. R., Theodoropoulos, G., Bahsoon, R., Yanez, W., & Tziritas, N. "Federated Digital Twins as an Enabling Technology for Collaborative Decision-Making," In Proceedings of the 38th ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation (pp. 67-68), 2024.
- [2] Ahn, J., Yun, S., Kwon, J. W., & Kim, W. T. "Literacy Deep Reinforcement Learning-Based Federated Digital Twin Scheduling for the Software-Defined Factory," Electronics (2079-9292), 13(22), 2024.
- [3] Kim, Y. J., Kim, H., Ha, B., & Kim, W. T. "Federated Digital Twins: A scheduling approach based on Temporal Graph Neural Network and Deep Reinforcement Learning," IEEE Access, 2025.