유연 포장 자동화 공정을 위한 디지털 트윈 모듈 설계 및 구현

백민영, 김병준, 정성환, 서지환, 조세운*

*한국전자기술연구원

bmy514@keti.re.kr, jun0420@keti.re.kr, shjeong@keti.re.kr, seojh410@keti.re.kr *swcho@keti.re.kr

A Modular Digital Twin Design and Implementation for Flexible Packaging Automation

Baek Min Young, Kim Byoung Jun, Jeong Sung Whan, Seo Ji Hwan, Cho Se Woon*

*Korea Electronics Technology Institute

요 약

포장 자동화 시장은 전자상거래 확대로 인한 대량·고속 포장 수요 증가와 함께, 노동력 부족에 따른 자동화 필요성이 증대되고 있다. 특히 유연 포장 자동화 공정은 다양한 형태와 크기의 포장 제품을 처리해야 하므로, 공정 변경에 따른 영향을 사전에 예측하고 개선할 수 있는 디지털 트윈 기술의 중요성이 커지고 있다. 본 연구에서는 유연 포장 자동화 공정을 대상으로, 공정 단위별로 정의한 디지털 트윈 모듈들을 이벤트 기반으로 연계하는 디지털 트윈 설계 및 구현 방법을 제안한다. 각 공정은 독립적인 디지털 트윈 모듈로 구성되며, 이벤트 기반의 시작·종료 조건을 통해 모듈 간 공정 흐름이 연결된다. 이러한 모듈화 구조를 통해 개별 공정 조건이나 공정 순서가 변경되더라도, 해당 모듈의 수정만으로 전체 공정에 유연하게 대응할 수 있도록 하였다. 제안한 디지털 트윈 모듈 설계 방법의 적용 가능성을 확인하기 위해 가상 시나리오를 구성하여 가상환경에 구현하였으며, 이를 통해 제안한 디지털 트윈 모듈들이 공정 흐름에 따라 정상적으로 연계·동작함을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 디지털 트윈 모듈 설계 및 구현 방법은 향후 다양한 유연 포장 자동화 공정의 디지털 트윈 구성을 위한 기본 구조 모델로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Ⅰ. 서 론

포장 자동화 시장은 2025년에 약 789억 달러 규모로 평가되며 로봇·AI·IoT 기반 자동화 솔루션의 도입 확대와 함께 향후에도 지속적인 성장세가 전망되고 있다 [1]. 이러한 추세에 따라 물류 및 제조 현장에서는 자동화 시스템을 활용한 생산성 향상과 공정 효율화에 대한 요구가 증가하고 있다. 포장 자동화 공정은 컨베이어, 로봇, 물류 이송 시스템 등 이기종 설비가 복합적으로 연계되어 운영되며, 공정 변경이나 설비 재배치에 따른 영향을 사전에 검증할 필요가 있다. 특히 유연 포장 자동화 공정과 같이 제품 종류, 작업 단계, 설비 동작이 빈번하게 변화하는 환경에서는 공정 흐름을 구조적으로 표현하고 사전에 검증할 수 있는 디지털 트윈 기술이 요구된다 [2]. 이에 본 연구에서는 유연 포장 자동화 공정을 이벤트 기반 디지털 트윈 모듈의 집합으로 구성하는 모듈화 전략을 적용하여, 공정 단위에서의 유연한 확장과 변경에 대응할 수 있는 디지털 트윈 모델링 기반을 제안한다.

Ⅱ. 본론

본 연구에서 정의한 디지털 트윈 모듈은 공정 단계에 관계없이 공통된 내부 구조를 가지도록 설계되었다. 그림 1과 같이 각 모듈은 이벤트 기반의 시작·종료 조건, 공정 특성에 따라 정의되는 구동 요소로 구성된다. 시작 조건은 선행 공정의 완료 여부나 객체의 작업 위치 도달 여부와 같이 공정 진행을 유발하는 조건으로 정의되며, 종료 조건은 다음 공정 모듈의 시작 조건으로 작용한다. 구동 요소는 각 공정의 작업 방식과 유연성을 결정하는 내부 구성 요소로서 로봇 구동 시퀀스, 작업 패턴과 같은 공정 특화 로직을 포함한다. 이러한 공통 구조를 기반으로 유연 포장 자동화 공정을 제품·박스·팔레트 투입, 인케이싱, 박스 폴딩, 팔레타이징, AMR 이송 모듈로 구성하였으며 각 모듈은 하나의 공정 단계에 대응되는 독립적인 디지털 트윈 구성 단위로 정의하였다. 모듈들은 이벤트 발생에 따라 순차적으로 연계되어 전체 공정 흐름을 형성하며, 이를 통해 공정 조건 변경이나 공정 확장 시에도 개별 모듈의 수정만으로 전체 공정 흐름을 유연하게 재구성할 수 있도록 하였다.

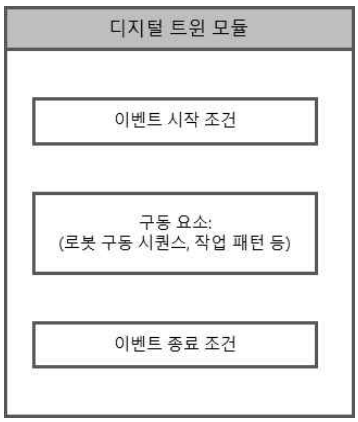

그림 1. 디지털 트윈 모듈 구조

각 모듈에서의 구동 요소는 공정 특성에 따라 정의된다. 로봇 기반 작업이 포함되는 공정의 경우 로봇 구동 시퀀스와 작업 패턴을 중심으로 설계하였다. 특히 인케이싱 및 팔레타이징 공정에서는 제품 또는 박스의 배치 조건에 따라 작업 방식이 변화하므로, 배치 구조와 방향을 패턴 파라미터

표 1. 공정별 디지털 트윈 모듈 구성 요소

모듈	역할	시작 조건	구동 요소	종료 조건
투입	공정 수행에 필요한 제품 / 박스 / 팔레트 객체 생성 및 전체 공정 흐름 개시	선행 객체 처리 완료 여부	(제품): 크기, 형태 등 정의, (박스): 크기, 최대 적재 제품 개수, (팔레트): 크기, 최대 적재 박스 개수, 고유 ID 기반 객체 추적	입력된 제품 투입 개수 충족
인케이싱	제품의 박스 내 적재 수행	제품 작업 위치 도착	로봇 구동 시퀀스, 인케이싱 패턴	박스 객체에 설정된 최대 적재 개수 도달
박스 폴딩	제품 적재 완료된 박스 포장	적재 완료 상태의 박스 작업 위치 도착	상태 전이 중심 폴딩 시퀀스 : 전면부-측면부-테이핑	테이핑 단계 완료
팔레타이징	포장 완료된 박스의 팔레트 적재	팔레타이징 대기 상태의 박스 작업 위치 도착	로봇 구동 시퀀스, 팔레타이징 패턴	팔레트 객체에 설정된 최대 적재 개수 도달
AMR 이송	완료된 팔레트를 지정된 물류 목적지로 이동	팔레타이징 모듈 종료 이후	출발 위치-도착 위치 기반 경로 정의	AMR이 도착 위치에 팔레트 배치 완료

로 정의하여 공정 흐름의 구조를 유지한 상태에서 다양한 작업 시나리오를 표현할 수 있도록 구성하였다. 한편, 투입 모듈은 물리적 작업 수행보다는 이후 공정의 동작 조건을 구성하는 객체 속성 정의와 추적 구조가 핵심이므로, 이를 모듈 동작을 규정하는 구동 요소로 정의하였다. 또한 박스 폴딩 및 AMR 이송 공정과 같이 설비의 세부 제어보다 공정 단계 전환과 작업 완료 여부가 중요한 공정에서는 폴딩 시퀀스나 이동 경로로 구성된 공정 단계 기반 시퀀스를 주요 구동 요소로 반영하여 디지털 트윈 모듈을 설계하였다. 이러한 접근을 통해 실제 설비 구성과 무관하게 공정 흐름 수준에서 디지털 트윈을 구조화할 수 있는 설계 기반을 마련하였다. 표 1에는 이러한 설계 관점에 따라 정리된 각 공정 모듈의 역할, 시작 조건, 구동 요소 및 종료 조건을 제시한다.

본 연구에서는 제안한 디지털 모듈 설계 방법의 적용 가능성을 검증하기 위해, 유연 포장 자동화 공정을 단순화한 가상 시나리오를 그림 2와 같이 Unity 3D (2022.3.31f1) 엔진을 이용하여 가상환경에 구현하였다. 해당 공정은 Unity의 컴포넌트 기반 구조를 활용하여 각 공정 모듈을 독립적인 실행 단위로 구성하고, 이벤트 기반 실행 제어를 통해 공정 흐름이 순차적으로 전이되도록 설계하였다. 또한 모듈의 내부 동작은 비동기적 실행 제어 방식으로 구현되어 작업 완료 여부를 기준으로 공정 흐름이 제어되며, 이를 통해 공정 모듈 간의 직접적인 결합을 최소화하였다. 이러한 구조는 로봇 기반 작업이 포함된 인케이싱 및 팔레타이징 공정뿐만 아니라, 상태 전이 중심으로 구성된 박스 폴딩 및 AMR 이송 공정에도 동일하게 적용된다. 특히 박스 폴딩 공정의 경우, 단계 기반 상태 전이를 확인할 수 있도록 애니메이션을 시각적 표현 수단으로 활용하여 공정 진행 단계를 현하였다. 이를 통해 제품 투입 개수, 박스 적재 조건 등 입력 파라미터가 변경되더라도 공정 흐름을 구성하는 모듈 구조는 유지된 상태에서 다양한 공정 시나리오를 유연하게 재구성할 수 있음을 확인하였다. 이는 제안한 모듈 기반 접근 방식이 유연 포장 자동화 공정의 구조적 표현과 공정 시나리오 확장에 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다.

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 유연 포장 자동화 공정을 대상으로 공정 단위 중심의 디지털 트윈 모듈 설계 및 구현 방법을 제안하였다. 본 연구는 제품·박스·팔레트 투입, 인케이싱, 박스 폴딩, 팔레타이징, AMR 이송의 각 공정을 독립적인 디지털 트윈 모듈로 정의하고, 이벤트 연계를 통해 전체 공정 흐름을 구성하였다. 제안한 모듈 구조는 이벤트 시작·종료 조건과 내부 구동 요소로 구성되며, 가상환경 구현을 통해 모듈 간 연계 구조가 공정 흐름을 일관되게 표현할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 모듈 기반 접근 방식은 유연 포장 자동화 공정의 구조적 이해를 돕고, 공정 조건 변경이나 공정 단계 추가와 같은 구조적 변화가 발생하더라도 기존 모듈 구조를 유지한 상태에서 공정 흐름을 재구성할 수 있는 설계 기반을 제공한다. 향후 연구에서는 실제 설비 데이터와의 연계를 통해 실시간 디지털 트윈으로 확장하고, 다양한 포장 공정 시나리오에 대한 적용성을 검증함으로써 제안한 접근 방식의 실용성을 더욱 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

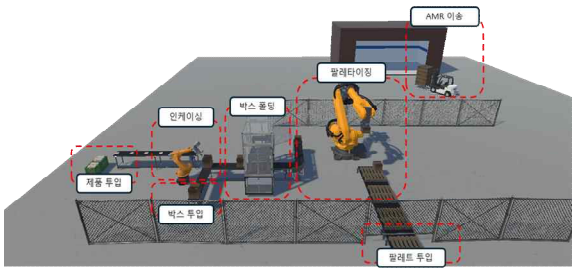

그림 2. 유연 포장 자동화 공정 전체 디지털 트윈 모듈

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2025년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원(KETI) 로봇산업핵심기술개발사업 "다품종 소량 유연 포장 공정의 생산성 향상 위한 자동화 운영시스템 기술 개발(00508387)" 사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

[1] Grand View Research, “Automated Packaging Solutions Market(2025-2033) Size, Share & Trends Analysis Report By Type, By Application, By Region, And Segment Foreacasts”, 2025.

[2] Florescu, Adriana. "Digital twin for flexible manufacturing systems and optimization through simulation: A case study." Machines 12.11 (2024): 785.