

데이터 관점에서의 디지털 트윈 연합 및 프로세싱 기술 동향

한국전자기술연구원 ■ 이상신·최원기·정영환·이진영·황태민

1. 서 론

디지털 트윈은 현실 세계를 가상 세계에 모사하고 수집된 정보를 기반으로 시뮬레이션을 수행함으로써 인간의 의사 결정을 지원하거나 현실 세계의 문제를 해결하는 기술이다. 사회 전반에서 디지털 전환이 수행되고 초연결 네트워크 인프라를 통해 시공간 제약 없이 현실 세계의 현상을 디지털화할 수 있는 환경이 조성되면서 디지털 트윈이 주목 받고 있다. 기존 디지털 트윈은 현실 세계에 대한 3차원 모델링과 가상 세계에서의 시뮬레이션을 수행하는 M&S(Modeling and Simulation)를 중점적으로 다루었다. 하지만 최근 사물인터넷, 인공지능 기술의 발전에 힘입어 디지털 트윈 기술이 고도화되고, 실시간으로 동기화되는 현실 세계의 정보를 바탕으로 새로운 서비스들이 가능해지면서 디지털 트윈이 다양한 영역에서 활용되고 있다 [1].

여러 분야에서 디지털 트윈이 구축되고 현실의 다양한 문제에 대응할 수 있는 기반을 마련하고 있으나, 타 분야와의 유기적인 연계를 고려하지 않은 채 설계되어 아직은 디지털 트윈의 확장성이 제한적이라는

문제점이 있다. 국내외에서는 기존 사일로 형태의 디지털 트윈의 한계를 극복할 수 있는 디지털 트윈 연합 기술에 대해 주목하고 관련 연구를 수행하고 있다. 정보통신기획평가원이 발간한 디지털 트윈 기술 K-로드맵에서는 디지털 트윈 기술 발전 단계를 모사, 관제, 모의, 연합, 자율로 보고 있으며, 디지털 트윈 연합 기술에 대해 확보해야 할 미래 기술임을 제시하고 있다 [2]. 디지털 트윈 연합 기술은 현재 다양한 분야에 구축되고 있는 이종 디지털 트윈을 연합하여 대규모 서비스를 제공하는 것을 목적으로 한다. 디지털 트윈의 메타데이터에 대한 관리, 이종 디지털 트윈 데이터를 연동하기 위한 동기화 기술, 연계하고자 하는 디지털 트윈에 대한 유효성 검증과 서비스 품질 향상을 위한 데이터 증강 등의 기술에 대한 개발이 선행되어야 한다. 디지털 트윈과 디지털 트윈 연합의 개념이 다양하게 해석되고 있기 때문에 특정 분야에 편중해 해석하지 않고, 본 고에서는 기존 정보시스템 또한 넓은 의미의 디지털 트윈으로 바라보고 데이터 관점에서의 디지털 트윈 연합에 필요한 요소 기술에 대한

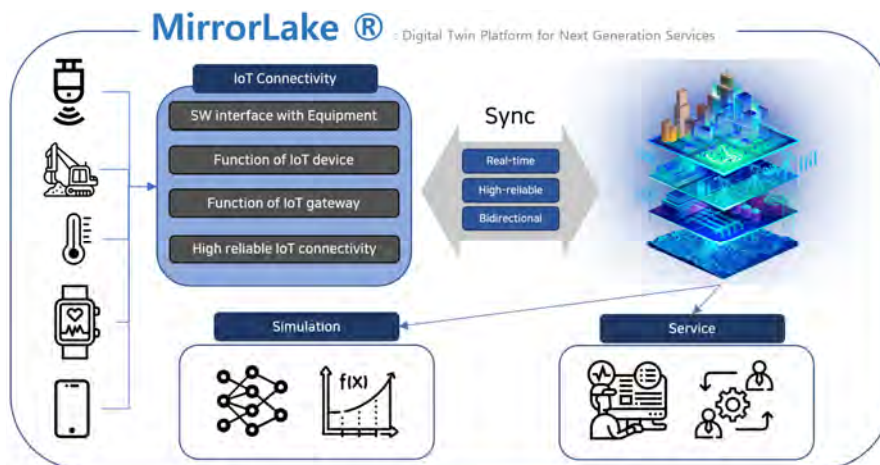


그림 1 디지털 트윈 플랫폼, MirrorLake

* 이 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2022-0-00545).

동향을 서술하고자 한다.

본 고의 2장에서는 디지털 트윈의 전반적인 개념과 사례에 대하여 소개한다. 3장에서는 디지털 트윈 연합 관점에서 동향 및 사례를 소개하고, 4장에서는 디지털 트윈 연합을 위한 핵심 요소 기술을 소개한다. 마지막으로 5장에서는 향후 연구 방향에 대하여 언급하며 결론을 맺는다.

2. 디지털 트윈

디지털 트윈에 대해서는 다양한 표현 방식으로 정의되고 있지만, 현실 세계를 가상 세계에 실시간으로 동기화하고 디지털화된 정보를 바탕으로 수행한 시뮬레이션을 활용하여 현실 세계를 최적화한다는 핵심 개념은 공통적으로 언급되고 있다. 미국의 대표적인 제조기업인 제너럴 일렉트릭(GE, General Electric)은 디지털 트윈을 실시간 분석을 통해 감지, 예방, 예측 및 최적화를 수행하도록 설계된 물리적 자산, 시스템과 프로세스의 소프트웨어라고 정의하였다 [3]. 디지털 트윈 기술 K-로드맵에서는 현실 세계를 3D 모델로 가상화하고 이중 데이터를 연계하여 관계 및 시뮬레이션 기반의 분석·예측·최적화를 구현하는 융합형 기술로 정의하고 있다.

최근 디지털 트윈은 학문으로만 연구되지 않고, 공공·산업 영역에 실제 구현되고 있다. 국가 차원의 디지털 트윈 구축의 대표적인 예시로, 버추얼 싱가포르 프로젝트[4]가 많이 언급된다. 도시 자원을 가상현실에 복제하고 도시 운영 계획에 활용한 대표적인 디지털 트윈 기술이다. 유사한 사례로 네덜란드 암스테르담 디지털 트윈[5], 미국 어반풋프린트[6] 등이 존재한다. 상대적으로 디지털 트윈의 기술 수준이 미흡했던 국내에서도 정부 및 지자체의 투자로 다양한 도시 규모의 디지털 트윈이 구축되었다. 서울시 전역을 디지털 트윈으로 구현한 S-map[7]과 도시침수를 대응하기 위해 구축된 광주의 디지털 트윈 기반 도시침수 스마트 대응 시스템 등의 사례가 있다.

산업에서의 활용 사례도 다양하게 존재한다. 독일의 BMW는 디지털 트윈을 활용하여 자율주행 시스템의 시뮬레이션 환경을 구축하고 자율주행에 영향을 미치는 여러 요소에 대해 실험하면서 자율주행의 완성도를 평가하였다 [8]. NVIDIA는 기후 변화 예측을 위한 지구 디지털 트윈 등 산업 및 과학 분야에서 활용 가능한 디지털 트윈을 연구 개발하고 있다. 마이크로소프트(Microsoft)[9], ANSYS[10], IBM[11] 등의 글로벌 대기업에서도 자체 디지털 트윈 솔루션을 개발

하여 제조를 포함한 다양한 응용 분야에 적용하고 있다.

국내 기업은 글로벌 기업에 대비하여 기술 수준이 열위에 있으나, IoT, 공간정보 등 기업의 특화된 분야를 활용하여 비즈니스 영역을 확대해 나가고 있다. 국내 디지털 트윈 전문 기업인 이에이트는 자체 개발한 시뮬레이션 NFLOW 솔루션을 활용하여 제조, 에너지, 바이오 등 여러 분야에 디지털 트윈을 구축하고 있다 [12]. 3D 공간 정보 전문 기업 플렉시티[13]는 교통·모빌리티, 물류 등 스마트시티 분야에서 활용이 가능한 PLUG 플랫폼을 개발하고 확산하고 있다. 한국전자기술연구원은 IoT 기술을 확장하여 현실 세계 데이터를 동기화하고 이중의 인공지능 모델, 서비스와 상호 작용이 가능한 디지털 트윈 플랫폼 MirrorLake를 개발하여 공공·산업계의 디지털 트윈 도입을 지원하고 있다 [14].

3. 디지털 트윈 연합 기술에 대한 동향

디지털 트윈 산업이 확장되는 과정에서 디지털 트윈 간의 협업에 대한 중요성이 높아지게 되었고, 디지털 트윈간 연계를 지원하기 위한 연구가 진행되고 있다. 영국은 “디지털 영국”이라는 국가 전략을 마련하고 성과를 확산 및 공유하기 위한 국가 디지털 트윈 프로그램을 추진하였다. 영국은 국가 디지털 트윈이 하나의 거대한 형태가 아닌 각 분야에서 구축된 개별의 디지털 트윈의 연결 및 연합으로 완성되는 것이라고 보고 디지털 트윈 구축에 대한 가이드라인인 제미니 원칙을 제시하였다. 호주 또한 영국의 국가 디지털 트윈을 참조해 디지털 트윈 연합 생태계를 제시하고, 위치 정보를 기반으로 개별 디지털 트윈을 연합하고자 하였다 [15].

디지털 트윈 연합에 대해서 다양한 학술적 연구도 수행되고 있다. 현실 세계를 표현한 서로 다른 디지털 모델을 공유함으로써 상호 작용하고, 협업 및 공유 학습을 수행할 수 있는 디지털 트윈의 구조에 대해서 연구되고 있다. Vergara et al.은 디지털 트윈간 협업과 동기화를 수행할 수 있도록 지원하는 연합 디지털 트윈에 대한 구조를 4가지 형태로 제시하였다 [16]. 중앙에서 다수의 디지털 트윈을 모니터링하고 제어하는 기본적인 중앙집중형 구조, 중앙의 관리 없이도 자체적으로 공동의 목표를 달성하기 위해 상호작용하고 데이터를 동기화할 수 있는 P2P(Peer-to-Peer) 구조, 대규모 디지털 트윈을 연계하기 위해 디지털 트윈을 계층화하여 관리하는 계층식 구조, P2P 방식을 대규모로 확장하는 지역적 구조를 제시하였다. 디지털 트

원 연합의 응용에 대한 연구로, A. Lombardo et al.은 다양한 인간의 장기를 모델링한 디지털 트윈을 연합하여 원격으로 환자를 모니터링하고 진료가 가능한 디지털 트윈 연합의 아키텍처에 대해 제시하였다 [17].

글로벌 제조기업들은 개별 공장 디지털 트윈을 연합하고 그 범위를 밸류체인 수준으로 확대하여 제조에 특화된 디지털 트윈 프로젝트를 추진하고 있다. 대표적인 예시로 벤츠, 현대자동차 등의 자동차 기업들은 생산부터 공급망에 이르는 차량의 가치사슬 전반의 디지털 정보를 통합 관리하여 실제 공장의 운영을 보다 고도화하려고 시도하고 있다 [18]. 다양한 방식으로 디지털 트윈 연합 기술이 개발되고 있으나, 솔루션 측면에서는 응용 도메인 디지털 트윈 간 다이나믹한 로직 처리가 가능하도록 지원하는 Azure Digital Twin[19]와 Twin Federation 기능을 제공하는 Bentley Systems의 iTwin.js[20]를 제외하고는 사례가 미흡하다.

디지털 트윈 연합 기술은 데이터 통합을 통하여 응용 분야에서 기존에 경험하지 못한 새로운 시각을 제시할 수 있다. 또한 최신 인공지능 기술과 결합하면서 기술의 잠재력을 더욱 확장시키고 있으며, 디지털 트윈 연합 기술은 복잡한 시스템의 이해 및 관리에 있어서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

4. 데이터 관점에서의 연합 디지털 트윈 기술

본 고에서는 데이터 관점에서 디지털 트윈 연합을 구현하기 위해서는 4개의 핵심 기술의 구성이 필수적이라고 판단하며, 각 기술의 정의는 다음과 같다. 첫째, 서로 다른 응용에 있는 단일 디지털 트윈의 정보를 표준화된 방법으로 저장·검색하기 위한 메타데이터 관리 기술이다. 두 번째, 연합 디지털 트윈의 안정된 서비스 제공을 위해 연계된 단일 디지털 트윈들과의 양방향·대용량·고신뢰 동기화를 제공하는 기술이다. 세 번째, 안정적인 디지털 트윈 연합을 위하여 단일 디지털 트윈 객체 및 데이터에 대한 유효성을 검증하기 위한 기술이다. 마지막으로 서로 다른 데이터 유형 및 해상도를 갖는 이종 디지털 트윈을 연계하기 위한 디지털 트윈 데이터 증강 및 보강 기술이다. 다음 장에서는 위에서 제시한 4가지 핵심 기술의 개념과 동향에 대해서 서술한다.

4.1 디지털 트윈 메타데이터 관리 기술

이종의 디지털 트윈을 연합을 하기 위해서는 먼저 서로 다른 응용에 있는 단일 디지털 트윈의 정보를 표준화된 방법으로 표현하고 그 방법을 기준으로 교

환하기 위한 메타데이터 관리 기술의 개발이 선행되어야 한다. 메타데이터에는 디지털 트윈 및 객체의 속성뿐만 아니라, 실제 데이터 또는 기능을 연계하기 위하여 필요한 시스템 정보를 포함한다.

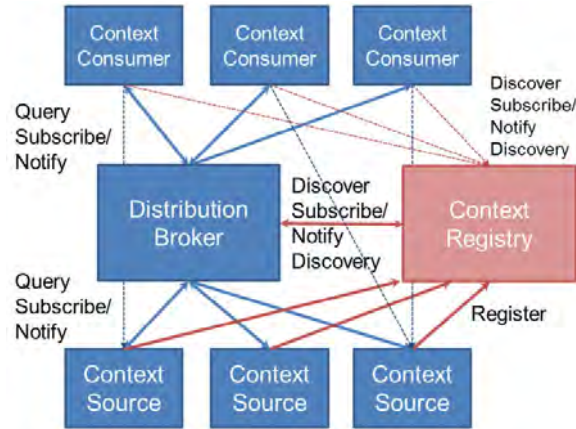


그림 2 NGSI-LD를 지원하는 분산형 아키텍처[22]

개별 디지털 트윈의 기술 개발 및 확산 속도는 빠르나 디지털 트윈 구축에 필요한 공통 플랫폼이나 표준화, 상호운용성에 대한 연구는 상대적으로 미흡하며 초기 단계에 머물러 있다. Park et al.은 디지털 트윈 간 상호 운용성 문제를 해결하기 위해 RDF(Resource Description Framework) 기반의 디지털 트윈 정보 모델을 제안하고 이 모델을 기반으로 메타데이터를 생성, 검색, 저장하는 방법을 제안하였다 [21]. 이 외에도 디지털 트윈이 보유한 데이터를 사람 또는 기계가 같은 의미로 이해할 수 있도록 데이터의 속성 및 의미에 대해서 명시하기 위한 언어와 데이터 모델의 관리 방법론에 대한 연구가 수행되고 있다. ETSI의 NGSI-LD, 마이크로소프트의 DTDL(Digital Twins Definition Language) 등이 대표적인 예시이며 디지털 트윈 데이터의 속성 정보를 표현하는 데 활용되고 있다 [23].

디지털 트윈의 범위를 오픈 데이터 플랫폼으로 확장하면 더욱 다양한 메타데이터 체계와 관리 방법이 존재한다. 데이터 종류와 형태가 더욱 복잡하고 다변화됨에 따라 메타데이터 표준인 W3C DCAT(Data Catalog Vocabulary) [24]이 등장하였다. 영국 비영리단체인 OKF(Open Knowledge Foundation)의 개방형 데이터 플랫폼인 CKAN (Comprehensive Knowledge Archive Network)[25]은 DCAT 기반으로 메타데이터를 관리하고 있으며 영국, 미국, 호주 등 각국 공공 데이터 포털에 적용되어 기관 간 데이터 공유에 활용되고 있다. 구글, 야후 등이 주도하는 schema.org[26]는 웹 상의 다양한 종류의 정보에 대해 구조화된 스키마를 관리

하고 있으며, 구글의 검색 엔진에 활용되고 있다.

최근 이중의 시스템간 연합에 대한 요구사항이 증대되고 있으며, 이를 위해 메타데이터에 대한 표준뿐만 아니라 시스템의 데이터와 속성을 표현하고 관리하는 방법론이 주목 받고 있다. 디지털 트윈의 경우 다양한 기술 요소가 융합된 형태이기 때문에 단순히 데이터로 구성된 시스템에 대비해 특화된 형태의 메타데이터를 필요로 하며, 현재의 메타데이터 체계 및 기술로는 추가적으로 개선될 사항이 많아 향후 연구의 요소가 될 것으로 보인다.

4.2 디지털 트윈 연합을 위한 동기화 기술

디지털 트윈 관점에서의 동기화 기술이란 현실 세계와 가상 세계에 존재하는 각 객체의 공간, 시각화 등 정적인 요소와 상태, 행동 등 동적인 요소를 실시간 상호 반영하기 위한 기술이다. 가상 세계와 현실 세계가 동일하도록 정보를 신속히 정제하여 제공하는 것이 필요하다. 이러한 동기화 기술의 정의는 디지털 트윈의 연합 관점에서도 유사하게 반영될 수 있는데, 디지털 트윈 연합을 위한 동기화 기술은 단일 디지털 트윈의 정적·동적인 요소를 효율적으로 상호 반영하기 위한 기술이라고 할 수 있다. 융합형 기술인 디지털 트윈은 다양한 형태의 데이터를 수집할 수 있는 인터페이스를 바탕으로 이중 시스템과도 연동 가능한 형태이기 때문에, 디지털 트윈 동기화 기술은 연합 디지털 트윈을 위한 동기화 기술에도 응용이 될 수 있다. 따라서, 디지털 트윈 동기화 기술과 연합 디지털 트윈에서의 동기화 기술을 포함하여 사례를 조사하였다. 아래는 디지털 트윈간 연합 또는 이중의 시스템을 통합하고 연결된 다양한 데이터 소스의 시공간 정보 변화에 대한 실시간성을 보장하는 동기화 기술에 대한 연구 및 응용 사례에 대해 서술한다.

독일의 차량 제조 기업 BMW에서는 생산 라인의 차량 생산량을 관제하기 위해 세계 각지의 생산 시스템과 협업 가능한 디지털 트윈을 도입하였다. NVIDIA의 디지털 트윈 구축 플랫폼인 Omniverse를 통해 서로 다른 생산라인의 정보를 공유하고, 관리자가 효율적인 공장 운용하는 데 필요한 의사결정을 지원한다 [27]. 독일의 스마트 인프라 전문 기업 Siemens는 차세대 배터리 제조 공정의 새로운 요구사항을 수용하고 지속적인 운용을 위해 디지털 트윈간 연계를 활용하였다. 여러 배터리셀 제조라인 트윈과 모듈 및 팩 공정 라인 트윈을 연계하고 가상 시나리오를 생성하여 새로운 조립 기술과 장비의 엔지니어링 및 검증을 지원하였다 [28].

학계에서도 성격이 다른 이중 시스템 간의 연합과 안정적 데이터 연계를 지원하기 동기화 기술의 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. Cakir et al.[29]은 실질적인 환경에서 디지털 트윈을 구축할 때 발생할 수 있는 통신 지연 및 부정확성으로 인한 병목 현상을 개선하고자 하였다. 디지털 트윈과 연계된 다양한 데이터 소스와 인프라 간 네트워크 트래픽 흐름을 분석하고 성능 지표를 도출하여 디지털 트윈의 동기화 성능을 평가하였다. Yu et al.[30] 디지털 트윈 연합을 위한 IoFDT(Internet of Federated Digital Twin)를 제안하였다. IoFDT는 연합 과정에서 동기화 성능을 보장하기 위하여 디지털 트윈 간 상호작용을 관리하며 네트워크 및 컴퓨팅 리소스를 최적으로 할당하는 기능을 구현하였다. Pang et al.[31]은 COVID-19와 같은 국가 단위의 긴급한 위기에서 적절한 결정을 지원하기 위해 도시 단위로 설계된 디지털 트윈 시스템을 상호 연계 및 통합하여 연합 디지털 트윈을 구성하고 기후 조건, 대응정책, 인구의 이동 궤적과 같은 정보를 통합하여 시뮬레이션하는 방식을 제안하였다. 협력적 모델 훈련 방식인 FL(Federated learning)을 기반으로 여러 디지털 트윈을 협력자로 간주하여 대응 계획과 감염 추세의 상관관계를 모델링하고 동기화하여 전역적 관점에서 도시 간 위기 관리 시나리오를 도출하였다. Tan et al.[32]은 복합적인 제조 환경을 다루는 디지털 트윈에서 시스템 자원의 제약으로 다양한 하위 요소를 실시간으로 동기화하는데 어려운 상황을 극복하기 위해 시뮬레이션 예측의 정확도와 리소스 사용률 간 균형을 조율하는 방법론을 제안하였다. Kim et al. 은 엣지-클라우드가 협업하는 연합 디지털 트윈 환경에서 분산 형태의 심층 신경망 모델 구조를 활용하여 동기화 성능을 최적화하는 방법론을 제안하였다 [33].

이중의 시스템의 데이터를 통합하고 공유하고자 하는 방법론은 디지털 트윈 뿐만 아니라 모든 영역에서 제시되고 있다. 데이터 매쉬(Data mesh), 데이터 패브릭(Data fabric)의 개념과 데이터 공유를 위한 시스템 아키텍처가 지속적으로 제안되고 있으며, 디지털 트윈 연합의 관점에서도 활용될 수 있다. 다만 디지털 트윈의 경우, 실시간성과 다양한 형태의 데이터가 존재한다는 특징으로 기존 아키텍처에 대비해 추가적으로 고도화될 요소가 많고 이러한 점에 대해 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

4.3 디지털 트윈 유효성 검증 기술

여러 산업 분야에 디지털 트윈을 적용하여 효율성

을 높이고자 하는 사례가 증가하고 있으나, 디지털 트윈을 통해 얻은 결과를 실세계에 활용할 수 있을 만큼 신뢰할 수 있는 지에 대한 논의의 필요성은 여전히 남아있다. 디지털 트윈 연합을 수행하는 과정에서도 안정성을 보장하기 위하여 연합하고자 하는 단일 디지털 트윈에 대한 유효성을 검증하기 위한 기술이 필수적이다.

Hua et al.은 디지털 트윈 모델 검증과 관련된 문제를 모델링 현실성, 데이터 불확실성, 시스템 동역학, 사용 사례 정렬, 오류 보고 등 5가지로 분류하고 이를 해결하기 위한 디지털 트윈 모델 검증 프레임워크 로드맵을 제시하였다. 프로세스 마이닝 접근법을 통해 모델을 추출하고, 실제 출력 결과와 모델이 추정한 결과를 지속적으로 비교하여 모델 유효성을 검증할 수 있도록 구성함으로써 디지털 트윈 운영 전 주기에 걸쳐 모델을 최신화할 수 있도록 하였다 [34]. Dahmen et al.은 점차 복잡해지고 있는 디지털 트윈의 유효성 검사를 유연하게 확장하기 위한 모듈형 프레임워크와 다층 검증 방식에 대한 연구를 수행하였다. 복잡한 문제를 하위 문제로 분해하고 하위 문제들의 결과를 통합하여 종합적으로 검증 및 평가하는 다층 검증 방식을 제시하였다 [35]. Baek et al.은 다수의 디지털 트윈을 효과적으로 운영하기 위하여 데이터의 무결성과 유효성을 검증하는 방법론을 제안하였다 [36]. 이외에도 Lugaresi et al.은 대규모 데이터 세트와 긴 소요 시간을 요구하는 통계적 유효성 검사 방식에서 벗어나, 디지털 모델의 유효성을 실시간으로 평가하기 위해 물리적 시스템과 디지털 모델을 시퀀스로 정의하고 두 데이터의 유사성을 측정하여 디지털 모델의 유효성을 실시간으로 평가하는 방안을 제안하였다 [37].

디지털 트윈이 설계 요구사항과 부합하여 동작하는

지 판단하고 기술적 기준과 사양을 평가하는 유효성 검증 절차에 대한 중요도가 점차 높아지고 있다. 유효성 검증 기술을 통해 디지털 트윈 데이터의 신뢰성, 무결성 및 보안성을 확보하고 유지하는 방안에 대한 연구가 진행되고 있다.

4.4 디지털 트윈 데이터 증강 및 보강 기술

디지털 트윈 기술은 현실 세계의 객체와 현상을 가상 세계에 정확하게 복제하는 것을 목표로 하며, 이를 통해 현실 세계의 다양한 상황을 시뮬레이션하고 분석할 수 있도록 한다. 디지털 트윈의 정확도를 높이고 디지털 트윈 서비스의 품질을 향상하기 위하여 데이터 증강 및 보강 기술이 필요하다. 데이터 증강은 기존 데이터에 변형, 노이즈, 합성 데이터를 추가하여 디지털 트윈의 분석 능력을 향상시키는 기술이다. 데이터 보강은 기존 데이터를 정제하고 보완하여 더 정확한 분석을 지원하는 기술이다. 이러한 기술들은 디지털 트윈이 다양한 상황에서 신뢰성 있게 작동할 수 있도록 지원한다. 서로 다른 데이터 유형 및 해상도를 갖는 이중 디지털 트윈을 연계하기 위해서는 디지털 트윈에 대한 데이터 증강 및 보강 기술이 필수적이다. 디지털 트윈 연합에서 활용 가능한 디지털 트윈 데이터의 증강 및 보강 기술에 대한 주요 연구 및 응용 사례는 다음과 같다.

Liang et al.[38]은 고급 모바일 네트워크의 예측 디지털 트윈 구축에서, 데이터 증강을 통해 예측 정확도를 향상시키기 위해 TimeGAN을 활용하여 합성 데이터셋을 생성하였다. 이를 통해 원래 데이터셋과 동일한 채널 계수 분포 및 다중 도메인 상관관계를 유지하는 방법이 제안되었다. Moya et al.[39]의 디지털 트윈은 데이터 증강과 보강 측면에서 컴퓨터 비전과 머

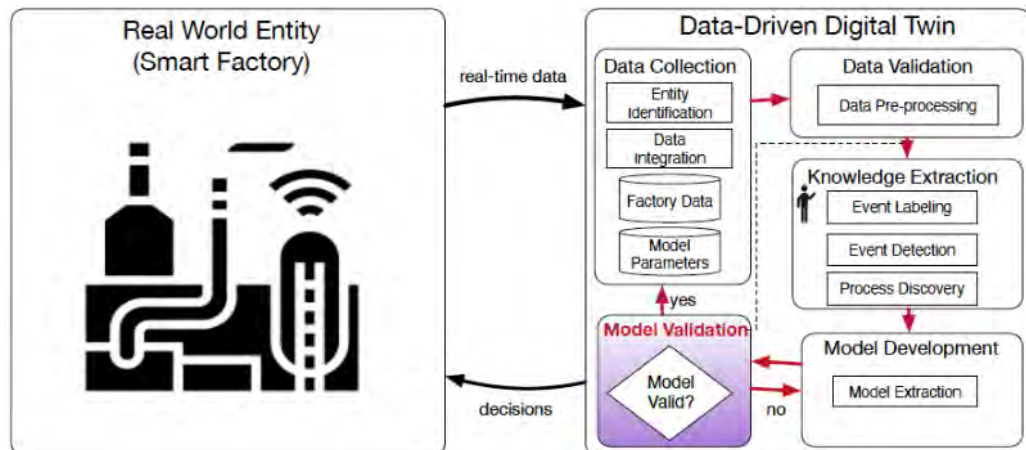


그림 3 데이터 기반 디지털 트윈의 모델 유효성 검증 절차

신러닝을 통해 실시간 데이터를 수집하고 해석하였으며, 예측과 실제 데이터 간의 편차를 실시간으로 수정함으로써 상황 인식의 정확성을 향상시키는 방법을 제안하였다. Khan et al.[40]는 광범위한 환자 데이터가 필요한 헬스케어 분야의 디지털 트윈에서 데이터 가용성 문제를 해결하기 위해 시계열 데이터 증강 방법을 통해 호흡 관련 합성 데이터를 생성하여 디지털 트윈 분석 모듈의 정확성을 향상시키는 방법을 제안하였다.

데이터 증강 관리 기술의 연구 사례들은 디지털 트윈의 성능을 높이는 데 있어 데이터 증강 및 보강 기술이 얼마나 중요한 역할을 하는지를 명확히 보여준다. 각기 다른 분야에서 적용된 다양한 방법론들은 데이터의 한계를 극복하고, 예측 정확성을 향상시키며 [41], 실시간 데이터를 효과적으로 활용할 수 있는 가능성을 제시한다 [42]. 이러한 데이터 증강 및 보강 기술의 지속적인 발전은 디지털 트윈의 적용 범위를 확장하고, 현실 세계의 복잡한 문제들을 해결하는 데 중요한 기여를 한다 [43].

4. 향후 연구 전망 및 결론

디지털 트윈은 이미 다양한 분야에서 활용되고 있지만 기술 발전에 따라 활용이 더욱 가속화될 것으로 보이며 디지털 트윈간 연합의 필요성 또한 증대될 것이라고 생각된다. 디지털 트윈이 스스로 성장할 수 있는 자율 디지털 트윈으로 발전할 전망에 따라 [2] 디지털 트윈 간 식별, 연합, 협업에 대한 자동화 등 고도화된 디지털 트윈 연합 기술이 향후 연구 될 것으로 보인다.

본 고에서 정리하였듯이, 디지털 트윈을 넓은 의미의 정보 시스템이라고 본다면 디지털 트윈 연합은 새로운 개념이 아닐지도 모른다. 사일로의 형태로 존재하는 다양한 정보를 연합하여 기존보다 고도화된 혹은 새로운 서비스를 창출하기 위한 시도이다. 디지털 트윈이 융합 기술이라는 특징으로 인하여 디지털 트윈 연합에 대해서도 다양한 방법론이 존재할 뿐이다. 본 고를 통해서 독자들이 디지털 트윈 연합 기술에 대한 전반적인 이해와 핵심 기술에 대한 동향 확인에 도움이 되었기를 바란다.

참고문헌

[1] B. R. Barricelli, E. Casiraghi and D. Fogli, “A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications”, IEEE Access, 7, 167653-

167671, 2019.
 [2] 정보통신기획평가원, “디지털 트윈 기술 K-로드맵 ver 1.0”, 2021.
 [3] 제너릭 일렉트릭 디지털 트윈 정의, <https://www.ge.com/>
 [4] 버추얼 싱가포르, <https://www.sla.gov.sg/articles/press-releases/2014/virtual-singapore-a-3d-city-model-platform-for-knowledge-sharing-and-community-collaboration/>
 [5] 암스테르담 디지털 트윈, <https://3d.amsterdam.nl/>
 [6] 어번 풋프린트, <https://urbanfootprint.com/>
 [7] 서울시, <https://smap.seoul.go.kr/>
 [8] Unity Industry, <https://blog.unity.com/industry/bmw-automotive-lifecycle/>
 [9] Azure Digital Twin, <https://azure.microsoft.com/ko-kr/products/digital-twins/>
 [10] ANSYS Digital Twin, <https://www.ansys.com/ko-kr/products/digital-twin/>
 [11] Watson IoT Platform, <https://internetofthings.ibmcloud.com/>
 [12] 이에이트, <https://e8ight.co.kr/>
 [13] 플럭시티, <https://www.pluxity.com/ko/>
 [14] 최원기, 정영환, 이상진, “디지털 트윈 기술 동향”, 정보과학회지, 42권 3호, p36-44, 2024.
 [15] 국토연구원, “국토정책 Brief- 디지털 트윈 국토 구현을 위한 전략 및 과제”, 2022.3.
 [16] C. Vergara, R. Bahsoon, G. Theodoropoulos, W. Yanez and N. Tziritas, “Federated Digital Twin,” in Proc. IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT), 2023.
 [17] A. Lombardo and C. Ricci, “Digital Twins Federation for Remote Medical Care of De-Hospitalized Patients,” IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events, 2022.
 [18] 벤츠 디지털 트윈 사례, <https://blogs.nvidia.co.kr/blog/mercedes-benz-next-gen-factories-omniverse/>
 [19] azure digital twin, <https://learn.microsoft.com/ko-kr/azure/digital-twins/overview/>
 [20] iTwins.js, <https://www.itwinjs.org/bis/guide/intro/federated-digital-twins/>
 [21] 박경현, 임영재, 윤대섭, 이양구, “디지털 트윈간 의미적 상호운용성 지원을 위한 통합 정보 모델 관리”, 디지털콘텐츠학회논문지, 22권 5호, p823-829, 2021.
 [22] ETSI, “GS CIM 009 Context Information Management (CIM); NGSI-LD API,” v1.6.1, 2022.
 [23] 김영진, 김한진, 김원태, “디지털 연합 트윈을 위한 명세 언어 비교 분석”, 한국통신학회 학술대회논문집,

2022.

- [24] Data Catalog Vocabulary, <https://www.w3.org/TR/vocab-dcat-3/>
- [25] CKAN, <https://www.ckan.org/>
- [26] schema.org, <https://schema.org/>
- [27] BMW 디지털 트윈 사례, <https://blogs.nvidia.com/blog/nvidia-bmw-factory-future/>
- [28] Siemens 디지털 트윈 사례, <https://resources.sw.siemens.com/en-US/e-book-battery-how-simulation-can-help-manufacturers-adapt-to-emerging-battery-technologies>
- [29] Cakir, L. V., Al-Shareeda, S., Oktug, S. F., Özdem, M., Broadbent, M. and Canberk, B., “How to synchronize digital twins? a communication performance analysis”. IEEE 28th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), 2023.
- [30] Yu, T., Li, Z., Sakaguchi, K., Hashash, O., Saad, W. and Debbah, M., “Internet of federated digital twins (iofdt): Connecting twins beyond borders for society 5.0”, arXiv preprint arXiv:2312.06432, 2023.
- [31] Pang, J., Huang, Y., Xie, Z., Li, J. and Cai, Z., “Collaborative city digital twin for the COVID-19 pandemic: A federated learning solution. Tsinghua science and technology”, vol. 26, no. 5, pp. 759-771, 2021.
- [32] Tan, B. and Matta, A., “Optimizing digital twin synchronization in a finite horizon”, Winter Simulation Conference (WSC), p2924-2935, 2022.
- [33] Kim, J. W., Je-Gal, H. and Lee, H. S., “Efficient Federated Digital Twin Synchronization in Edge-Cloud Collaborative System”, IEEE International Conference on Metaverse Computing, Networking and Applications (MetaCom), p714-719, 2023.
- [34] E. Y. Hua, S. Lazarova-Molnar and D. P. Francis, “Validation of Digital Twins: Challenges and Opportunities”, Winter Simulation Conference (WSC), p2900-2911, 2022.
- [35] U. Dahmen, T. Osterioh and J. Roßmann, “Verification and validation of digital twins and virtual testbeds”, International Journal of Advances in Applied Sciences, Vol. 11, No. 1, pp. 47~64, 2022.
- [36] Baek, M. S., “Digital Twin Federation and Data Validation Method”, 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC), p445-446, 2022.
- [37] Lugaresi, G., Gangemi, S., Gazzoni, G. and Matta, A., “Online validation of digital twins for manufacturing systems”, Computers in Industry, Volume 150, 103942, 2023.
- [38] Liang, G., Hu, J., Yang, K., Song, S., Liu, T., Xie, N., and Yu, Y. “Data Augmentation for Predictive Digital Twin Channel: Learning Multi-Domain Correlations by Convolutional TimeGAN”, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 18, no. 1, pp. 18-33, 2024.
- [39] Moya, B., Badias, A., Alfaro, I., Chinesta, F., and Cueto, E., “Digital twins that learn and correct themselves. International Journal for Numerical Methods in Engineering”, Volume123, Issue13, p3034-3044, 2022.
- [40] Khan, S., Alzaabi, A., Ratnarajah, T., and Arslan, T., “Novel statistical time series data augmentation and machine learning based classification of unobtrusive respiration data for respiration Digital Twin model”, Computers in Biology and Medicine, Volume 168, 107825, 2024.
- [41] Zhang, C., Qin, F., Zhao, W., Li, J., and Liu, T., “Research on rolling bearing fault diagnosis based on digital twin data and improved ConvNext”, Sensors, 23, 11, 5334, 2023.
- [42] Khalifa, N. E., Loey, M., and Mirjalili, S., “A comprehensive survey of recent trends in deep learning for digital images augmentation”, Artificial Intelligence Review, 55, 3, 2351-2377, 2022.
- [43] Fukawa, N., and Rindfleisch, A. “Enhancing innovation via the digital twin”, Journal of Product Innovation Management, 40, 4, 391-406, 2023.

약 력



이 상 신

1997 한국외국어대학교 수학과 졸업(학사)
2000 한국외국어대학교 컴퓨터공학과(공학석사)
2012 한국외국어대학교 컴퓨터공학과(공학박사)
2000~현재 한국전자기술연구원 센터장
관심분야 : 디지털트윈, 사물인터넷, 웹기반 서비스, 네트워크 시스템
Email : sslee@keti.re.kr



최 원 기

2014 연세대학교 컴퓨터과학과 졸업(학사)
2021 연세대학교 컴퓨터과학과 졸업(박사)
2021~현재 한국전자기술연구원 선임연구원
관심분야 : 디지털 트윈, 빅데이터 플랫폼, 데이터 베이스
Email : cwk1412@keti.re.kr



정영환

2021 단국대학교 모바일시스템공학 졸업(학사)
2023 단국대학교 컴퓨터학과 졸업(석사)
2023~현재 한국전자기술연구원 연구원
관심분야 : 디지털 트윈, 분산기계학습, 인공지능
시스템 및 응용
Email : cjstntjd@keti.re.kr



이진영

2013 광운대학교 정보제어공학과 졸업 (학사)
2023 세종대학교 컴퓨터공학과 졸업 (박사)
2023~현재 한국전자기술연구원 선임연구원
관심분야 : Volumetric, Digital Twin, Noise Reduction,
Deep Learning
Email : jylee@keti.re.kr



황태민

2015 서강대학교 전자공학과 졸업(학사)
2017 서강대학교 전자공학과 졸업(석사)
2021 LG전자 CTO부문 선임연구원
2021~현재 한국전자기술연구원 선임연구원
관심분야: 디지털 트윈, 임베디드 SW 플랫폼, 온
디바이스 AI 및 응용
Email : taemin.hwang@keti.re.kr