



일반논문 (Regular Paper)

방송공학회논문지 제29권 제3호, 2024년 5월 (JBE Vol.29, No.3, May 2024)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2024.29.3.312>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

디지털 개체 중심의 IEEE 2888.3 디지털 트윈 아키텍처 표준의 이해

이 예 지^{a)}, 윤 경 로^{b)†}

Understanding Digital Entity-based IEEE 2888.3 Digital Twin Architecture Standard

Yegi Lee^{a)} and Kyoungro Yoon^{b)†}

요 약

디지털 트윈의 개념은 실제 세계를 3D 모델로 가상화하고 모니터링, 실시간 자동 제어, 시뮬레이션 기반 분석, 예측 및 최적화를 위해 다양한 데이터를 통합하는 것을 포함한다. IEEE P2888.3 표준은 물리적 세계와 사이버 세계 간 디지털 동기화 구조에 중점을 둔다. 이 표준은 현재 작업 문서 단계에 있으며, 디지털 트윈 시스템의 계층적 아키텍처를 정의하고, 기본 및 복합 디지털 개체로 분류되는 디지털 개체로 이루어진 디지털 트윈 시스템을 정의하는 디지털 트윈 시스템 계층, 물리세계를 모델링하는 물리세계 계층, 다수의 디지털 트윈 시스템의 데이터 및 서비스를 통합하여 복합적인 서비스를 제공하기 위한 연합엔진을 포함하는 연합 계층, 실질적 서비스를 제공하는 응용 계층으로 구성된다. 디지털 트윈 시스템 계층은 객체지향 개념에 기반을 두어 추상 클래스, 구체 클래스, 디지털 개체로 구성되는 디지털 개체 개념을 지원하는데 디지털 개체는 물리세계와의 인터페이스를 지원하는 기본 디지털 개체와 기본 디지털 개체가 복합적으로 구성된 복합 디지털 개체로 구분할 수 있으며 이는 매우 효율적인 디지털 트윈 시스템의 개발과 관리를 지원한다.

Abstract

The concept of digital twin involves virtualizing the physical world into a 3D model and integrating various data for real-time automated control, simulation-based analysis, prediction, and optimization. The IEEE P2888.3 standard emphasizes the digital synchronization structure between the physical and cyber worlds. This standard is currently in the working draft stage and defines a hierarchical architecture for digital twin systems. It categorizes digital entities into basic and complex digital entities within the digital twin system layer, models the physical world in the physical world layer, and includes the federation layer which has a federation engine to integrate data and services from multiple digital twin systems to provide composite services, as well as the application layer which provides the practical services. The digital twin system layer supports the concepts of digital entities composed of abstract classes, concrete classes, and digital entities based on the object-oriented concept. Digital entities are divided into elementary digital entities that support interfaces with the physical world and complex digital entities that are composites of basic digital entities. This distinction and object-oriented model supports the very efficient development and management of digital twin systems.

Keyword : Digital twin, IEEE 2888, Digital entity, Reference architecture

Copyright © 2024 Korean Institute of Broadcast and Media Engineers. All rights reserved.

“This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and not altered.”

1. 서론

디지털 트윈의 개념은 2002년대 초반에 미국의 Michael Grieves 교수가 제품 수명 주기 관리 (Product lifecycle management, PLM)에 대한 개념적 이상이라는 모델을 제시하면서 최초로 구체화 되었다^[1]. 여기서 제시한 제품 수명 주기 관리의 개념적 이상의 모델은 그림 1에서 보는 바와 같이 물리 공간에 물리 개체들이 존재하고 이들 물리 개체에 대응하는 디지털 개체들이 가상공간상에 존재하며, 물리 공간에서 데이터가 가상 공간에 전달되고 이들 정보는 처리되어 다시 물리 공간으로 전달되어 물리 개체들에 영향을 미치는 모습으로 정의된다. 또한 물리 공간과 물리 개체들은 필요에 따라서 여러 개의 가상 공간으로 표현되는데 이는 마치 자동차의 모델이 하나의 원천 가상 공간에 구성이 되고 이 모델에 기반 한 다수의 자동차의 인스턴스들이 각각의 가상 공간에 생성되는 것과 같은 개념이다.

2022년 IITP (정보통신기획평가원)에서 발간한 “디지털 트윈 기술 K-로드맵”에 의하면 디지털 트윈 기술을 “현실 세계를 3D 모델로 가상화하고 다양한 데이터를 연계·시각화하여 실시간 자동관제 및 시뮬레이션 기반 분석·예측·최적화를 구현하는 융합 기술”이라고 정의하면서 디지털 트윈이란 “현실 세계를 디지털 세계로 복제·재현하여 복잡한 문제를 해결하고 새로운 산업·서비스 생태계를 창출하는 기술 융합 플랫폼”이라고 설명하고 있다^[2].

이를 Grieves 교수의 PLM 모델과 비교해 보면 현실세계는 물리 세계와 물리 개체로 표현되며 이를 3D 모델로 가상화하는 것은 가상세계의 가상 개체라고 볼 수 있다. 다양한

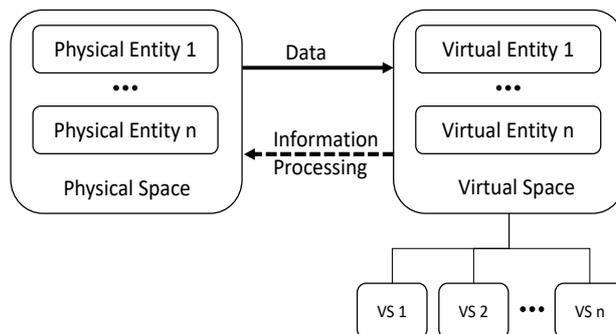


그림 1. 제품수명주기관리의 개념적 이상^[1]
 Fig. 1. Conceptual Ideal of PLM

데이터를 연계하는 것이 물리 세계와 가상 세계간의 데이터로 표현되고 실시간 자동관제 및 분석, 예측, 최적화는 정보처리로 표현될 수 있다. 즉 PLM 모델은 3D 모델로 가상화하고 시각화하는 기능만 추가되면 물리 트윈과 디지털 트윈이 데이터와 정보처리를 통하여 상호 인터랙션하고 동기화되는 디지털 트윈의 개념과 일치한다고 볼 수 있다.

2011년 미국항공우주국 (NASA)의 John Vickers가 Grieves의 PLM 모델에 기반한 이러한 개념을 지칭하기 위하여 디지털 트윈이라는 용어를 처음으로 사용하기 시작하였으며^[3], 이는 항공 우주 분야에서 필수적인 역할을 시작하는 중요한 전환점이 된다. 이때부터 조금씩 사용되던 디지털 트윈이 2015년 이후 급속한 관심을 받기 시작하면서 다수의 거대 기술 기업들이 디지털 트윈 솔루션을 내놓기 시작하였다. 초기에는 주로 제품 설계와 관련된 실시간 데이터 생성, 모니터링, 분석 등에 중점을 두었으며, 이후 제조업을 비롯하여 다양한 산업 분야로 확대되면서 제품의 생명주기 전반에 걸쳐 가상표현을 통한 생산 공정 및 품질 개선에 주력했다. 2010년대 후반부터 빅데이터, 인공지능 (Artificial Intelligence, AI) 등의 첨단 기술 개발과 융합을 통해 스마트시티, 헬스케어, 에너지, 교통 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

이와 더불어 2017년경부터 국제 표준화 기구들에서 디지털 트윈 관련 표준의 제정을 시작하였다. ISO에서는 제조와 관련하여 “제조를 위한 디지털 트윈 프레임워크”라는 주제의 표준들을 2020년부터 제정하기 시작하였으며, ISO/IEC JTC1에서는 2020년부터 사물인터넷 (Internet of Things, IoT)과 관련하여 디지털 트윈의 표준화 작업을 시

a) 건국대학교 컴퓨터공학과(Dept. of Computer Science and Engineering, Konkuk University)

b) 건국대학교 스마트ICT융합공학과(Dept. of Smart ICT Convergence, Konkuk, University)

‡ Corresponding Author : 윤경로(Kyoungro Yoon)

E-mail: yoonk@konkuk.ac.kr

Tel: +82-2-450-4129

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1153-4038>

* 이 논문은 2023학년도 건국대학교의 연구년교원 지원에 의하여 연구되었음.

** 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신방송 혁신인재양성(메타버스융합대학원)사업 연구 결과로 수행되었음(IITP-2024-RS-2023-00256615).

· Manuscript March 20, 2024; Revised April 16, 2024; Accepted April 16, 2024.

작하여 2023년부터 표준들을 제정하기 시작하였다. IEEE SA에서도 2020년부터 디지털 트윈과 관련하여 “Standard on Orchestration of Digital Synchronization between Cyber and Physical World”라는 제목으로 표준화를 시작하여 2024년 말 표준제정을 기다리고 있다.

본 논문에서는 IEEE SA에서 진행되는 표준화 절차에 대하여 설명하고, 물리 개체와 디지털 개체를 중심으로 IEEE 2888 WG에서 진행되고 있는 IEEE P2888.3 표준의 디지털 트윈을 위한 아키텍처를 설명한다.

II. IEEE SA의 표준화 절차 소개

IEEE SA (Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association)는 세계 최대의 전기 전자공학 관련 학회인 IEEE 산하의 표준화 기구이다.

그림 2는 IEEE SA의 구조를 나타내는데, IEEE SA 산하에는 Standards Committee (SC)들이 Working Group (WG)을 산하에 두고 실질적인 표준을 개발하며, Board of Governors (BoG)에서는 IEEE SA의 주요 운영과 관련된 사항들을 관리하며 관련된 정책들의 최종결정을 내리게 된다. IEEE SA Standards Board (SB)는 IEEE의 표준 개발과정을 감독하며, 이에 관련된 사항들을 BoG에 보고하게 된

다. IEEE SASB에는 AudCom, NesCom, RevCom, PatCom, ProCom의 5개의 위원회가 있어 각각 해당 분야에서 IEEE SA가 진행하고 있는 표준개발 과정을 검토하고 승인하게 된다. AudCom은 재정감사를 맡고 있으며, NesCom은 신규 표준 프로젝트를 시작하고자 할 때 제안된 표준 프로젝트가 IEEE의 스코프와 목적에 맞는지 확인하고, 제안된 표준을 적절한 조직에 할당하며, Project Authorization Request (PAR)라고 불리는 표준과제 제안의 승인여부를 판단하여 IEEE SASB에 권고안을 제출한다. RevCom은 개발이 완료되어 IEEE SASB에 제출된 표준에 대하여 IEEE SASB가 규정한 절차 요구사항을 잘 만족하여 개발하였는지를 확인하는데 IEEE SASB가 해당 표준을 승인하기 위해서는 RevCom의 동의가 필요하다. PatCom은 IEEE SASB와 관련된 규정 IEEE 표준에서 특허 또는 특허 정보의 사용을 감시하며, 특정 특허가 사용되었다고 관련정보가 IEEE SA에 제출된 경우 특허에 관련된 절차와 가이드라인을 잘 지켰는지 검토한다. ProCom은 IEEE 표준화에 관련된 어떤 절차에 대한 개선이나 변경이 필요할 때 해당 사항을 IEEE SASB에 권고하는 역할을 담당한다.

그림 3은 IEEE SA의 표준화 프로세스를 간략히 나타낸다. 처음 표준을 개발하기 위해서는 PAR를 작성하여 RevCom의 승인을 받게 된다. 이를 위하여 Sponsor SC를 구하고 해당 SC의 Scope를 벗어나지 않도록 표준의 범위

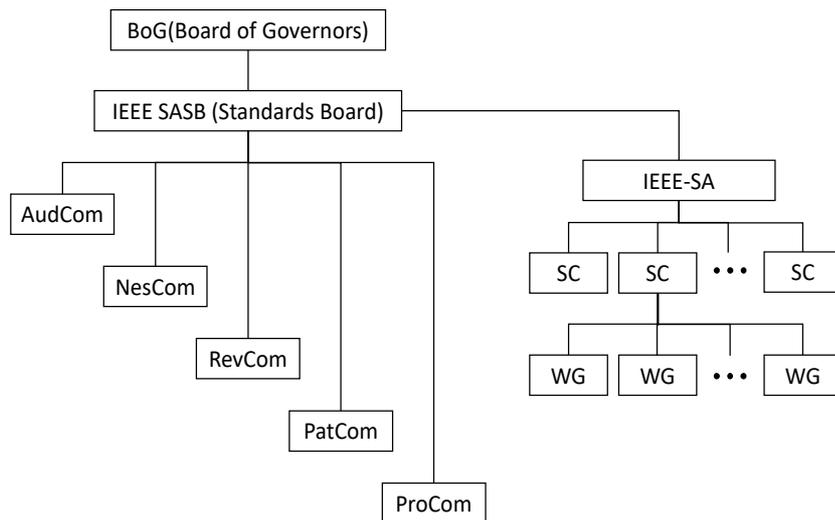


그림 2. IEEE-SA 구조
Fig. 2. Structure of IEEE-SA

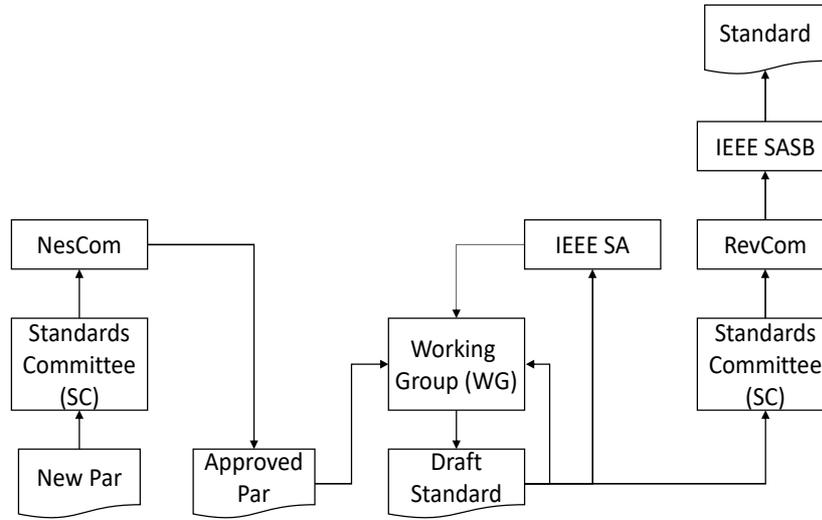


그림 3. IEEE SA 표준화 프로세스
 Fig. 3. Standardization Process of IEEE SA

를 설정하고, 해당 SC의 협조를 받아 PAR를 작성하게 된다. 작성된 PAR는 해당 SC에서 RevCom에 승인을 요청하고, 승인되는 경우 이의 개발을 해당 SC의 특정 WG에서 개발하거나, 새로운 WG를 설립하게 된다. WG에서는 승인된 PAR를 기반으로 표준을 개발하고 작성하여 표준안이 완성되면 WG 내부의 투표를 거쳐 IEEE SA 레벨의 투표를 하게 되는데 투표과정에서 발생하는 모든 코멘트들에 대하여 처리가 끝나고 더 이상 처리해야 하는 코멘트가 발생하지 않을 때까지 표준안의 개선과 투표를 반복한다. 모든 코멘트들에 대하여 합당하게 처리가 되고 나면 SC에서 승인을 하고 RevCom에 승인을 요청한다. RevCom은 프로세스를 모두 검토하고 나서 문제가 없다고 판단되면 IEEE SASB에 표준의 승인을 권고하는 결의를 하고, 이에 기반하여 IEEE SASB에서 최종 승인을 한다. 최종 승인이 되고 나면 IEEE SASB의 전문 에디터와 표준안 전체의 단어의 사용, 양식 등에 대한 검토와 수정을 마친 후 표준으로 공개가 된다.

III. IEEE P2888.3 의 소개

제 3장에서는 IEEE Interfacing Cyber and Physical World Working Group (IEEE 2888 WG)에서 진행하고 있는 표준 프로젝트인 IEEE P2888.3을 소개하고자 한다.

1. IEEE Interfacing Cyber and Physical World Working Group

IEEE Interfacing Cyber and Physical World Working Group은 IEEE 2888 WG으로 간략히 나타내기도 하는데 IEEE Computer Society Standards Activities Board의 지원을 받아 2019년 9월 설립되어 현재까지 6개의 표준화 프로젝트를 진행하고 있는 IEEE SA 산하의 WG이다. 그 이름이 나타내는 것과 같이 IEEE 2888 WG은 가상세계와 물리 세계 사이의 인터페이스를 표준화하고, 이러한 인터페이스에 기반한 다양한 응용을 지원하는 데 필요한 표준들을 제정하는 것을 그 표준화의 범주로 하고 있다. 2019년 9월부터 시작하여 6개의 표준 프로젝트가 제안되었으며 2023년 12월까지 3개의 표준을 출간하고 2024년 현재 2개의 표준이 승인을 위한 투표과정에 있으며 1개의 표준이 표준 초안을 개발하고 있는 단계에 있다. 이상의 6가지의 표준 또는 표준 프로젝트들은 다음과 같다.

- IEEE Std. 2888.1-2023 IEEE Standard for Specification of Sensor Interface for Cyber and Physical Worlds^[4]
- IEEE Std. 2888.2-2023 IEEE Standard for Actuator Interface for Cyber and Physical Worlds^[5]
- IEEE P2888.3 Standard on Orchestration of Digital

Synchronization between Cyber and Physical Worlds^[6]

- IEEE Std. 2888.4-2023 IEEE Standard for Architecture for Virtual Reality Disaster Response Training System with Six Degrees of Freedom (6 DoF)^[7]
- IEEE P2888.5 IEEE Draft Standard for Virtual Training System Evaluation Methods^[8]
- IEEE P2888.6 Standard for Holographic Visualization for Interfacing Cyber and Physical Worlds^[9]

상기 6개의 표준 또는 표준 프로젝트에서 IEEE Std. 2888.1-2023과 IEEE Std. 2888.2-2023은 2023년에 IEEE SA Standards Board의 승인을 받은 표준으로 가상세계와 물리세계의 동기화를 위한 인터페이스로 사용될 수 있는 센서와 구동기의 매개변수를 설정하고 센서 데이터 수집과 구동기 명령을 위한 표준 데이터 포맷과 그 응용 프로그래밍 인터페이스 (Application Programming Interface, API)를 각각 정의한 표준이다. 해당 두 표준은 가상세계와 물리세계 간 동기화를 위한 표준화된 형식을 제공함으로써 시스템 간 통합성과 호환성을 높여 다양한 제조사의 장비와 소프트웨어를 손쉽게 연동이 가능하도록 표준화된 형식을 제공한다.

IEEE P2888.3은 현재 첫 번째 표준초안의 개발을 완료한 프로젝트로 2024년 5월까지 IEEE SA의 승인을 위한 투표를 진행할 예정이다. 이 프로젝트는 가상세계와 물리세계의 디지털 동기화의 조율을 위한 표준을 개발하는 것으로, 가상세계와 물리세계의 디지털 동기화라고 하는 표현은 디지털 트윈을 의미한다. 해당 표준에서는 디지털 트윈 아키텍처 및 디지털 개체에 대한 정의 및 요구사항 등이 정의되어 있으며, 아키텍처 기반 디지털 트윈 유즈케이스도 포함되어 있다.

IEEE Std. 2888.4-2023은 2023년 IEEE SASB의 승인을 받은 표준으로 6-자유도를 지원하는 가상현실기반의 재난대응 훈련시스템을 위한 표준이다. 해당 표준은 대규모 물리적 공간에서 발생할 수 있는 재난에 대한 대응을 할 수 있는 가상현실 훈련 시스템을 구현하는데 필요한 표준화된 아키텍처를 서술하고 있으며, 이를 위한 요구사항 및 시스템 디자인 등을 제시하고 있다.

IEEE P2888.5는 현재 표준초안이 나와 IEEE SA의 승인

을 위한 투표를 진행 중인 프로젝트로 가상훈련 시스템의 평가 방법에 대한 표준이다. 해당 표준은 가상훈련 시스템의 효과성, 효율성, 만족도 등을 평가 할 수 있는 표준화된 주관적/객관적 평가방법, 평가기준, 평가질문, 평가지표 등이 서술되어 있으며, 실험 환경 및 설정, 실험 대상 선정, 실험 대상 그룹 구성, 실험 설계, 실험 절차 등을 포함한 평가 방법을 제공한다.

IEEE P2888.6은 2021년에 시작하여 현재 첫 번째 표준초안을 개발하고 있는 프로젝트로 가상세계와 물리세계간의 인터페이스의 한 방법으로 홀로그램의 가시화에 대한 표준이다. 해당 표준은 물리세계에 존재하는 사물을 가상세계에 표현하는 다양한 시각화에 대해 정의를 하고 있으며, 이에 따른 요구사항, 유즈케이스, 시각화 방법 등을 제공한다.

2. IEEE P2888.3의 기본 아키텍처

그림 4는 IEEE P2888.3에서 정의하고 있는 디지털 트윈을 위한 계층적 아키텍처를 보여주고 있다. 총 4개의 계층을 가지고 있으며, 각 레이어 별 서술은 아래와 같다.

물리세계 계층 (Physical World Layer)에서는 물리적 개체, 시스템 또는 환경을 반영하는 디지털 개체의 실제 대응물이 될 수 있는 다양한 물리적 엔티티가 포함되어 있으며, 디지털 트윈 시스템으로 모델링 할 수 있는 하나 이상의 물리 트윈 시스템을 포함한다. 물리 트윈 시스템은 디지털 트윈 시스템을 모사 및 상호 작용에 필요한 물리 개체들이 포함되어 있으며, 디지털 트윈 시스템의 구현 범위에 맞게 구성된다. 예를 들어, 디지털 트윈 기반 스마트 팜의 경우 작물을 모니터링하기 위한 센서나 농장의 환경을 측정 및 조정하기 위한 센서와 구동기들을 모아 하나의 물리 트윈 시스템으로 정의하며, 이를 하나의 디지털 트윈이라고 정의하고 시스템을 구현한다. 디지털 트윈 기반 스마트 팜 시스템 구성에 필요하지 않은 물리 개체는 물리 세계에 존재할 수 있지만 해당 디지털 트윈 시스템과 연결된 물리 트윈 시스템에는 속하지 않는다.

디지털 트윈 시스템 세계 계층 (Digital Twin System World Layer)에서는 물리 트윈 시스템을 디지털 방식으로 변환하여 생성된 디지털 트윈 시스템으로 구성된다. 각각의 디지털 트윈 시스템 내에는 대응하는 물리 트윈 시스템을 모사

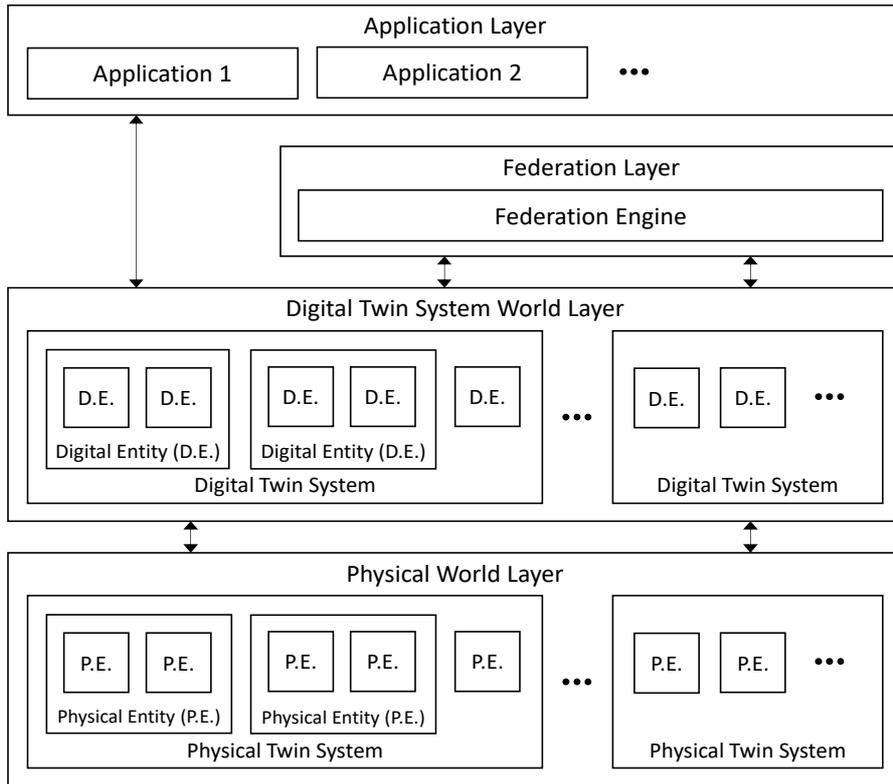


그림 4. IEEE P2888.3의 계층적 아키텍처
 Fig. 4. Layered Architecture of IEEE P2888.3

하고 있으며, 디지털 트윈 시스템 내에는 분석 및 시뮬레이션 등을 위한 수많은 디지털 개체가 정의되어 있다. 그중 물리 개체와 연결된 디지털 개체는 IEEE Standard 2888.1-2023과 IEEE Standard 2888.2-2023를 따라 연결되며, 이를 통해 물리 개체를 실시간으로 모니터링하고 제어할 수 있다. 디지털 개체를 통해 디지털 트윈 시스템 내에서는 물리공간의 현재 상태를 모니터링하고, 물리공간의 상태와 동작을 분석, 시뮬레이션을 가능하게 한다.

응용계층에서 필요로 하는 독립된 서비스의 제공이 가능한 경우 독립적인 디지털 트윈 시스템으로 정의되며, 이러한 디지털 트윈 시스템은 해당 응용시스템에 직접 서비스를 제공할 수 있다. 그러나 요청된 서비스를 독립된 하나의 디지털 트윈 시스템 만으로 제공이 불가능하여, 두 개 이상의 디지털 트윈 시스템에서 제공하고 있는 서비스를 결합해야 하는 경우 연합 계층 (Federation Layer)을 통하여 서비스를 제공하게 된다. 이 경우, 연합계층에 존재하는 연합

엔진 (Federation Engine)이 복수의 디지털 트윈 시스템에서 제공하는 데이터와 서비스를 융합하여 응용시스템에 정보를 제공하는 역할을 담당한다.

응용 계층 (Application Layer)에서는 사용자의 요구사항에 부합하는 서비스를 제공함으로써, 사용자가 디지털 트윈을 이용하여 물리 세계를 모니터링하고, 시뮬레이션 및 분석 결과를 확인할 수 있다. 따라서 디지털 트윈을 개발할 때는 응용 분야에 따른 요구사항과 개발 범위를 명확하게 해야한다.

3. 디지털 트윈 시스템 정의

디지털 트윈 시스템은 디지털 개체 (Digital Entity)의 조합으로 구성된다. 디지털 개체는 기본 디지털 개체 (Elementary Digital Entity)와 복합 디지털 개체 (Complex Digital Entity)로 구분할 수 있다. 기본 디지털 개체는 더 이상 다른

디지털 개체로 나누어지지 않는 개체이며, 디지털 트윈 시스템을 구성하는 기본 요소이다. 따라서 기본 디지털 개체는 더 분할하는 경우 의미 있는 고유의 기능이나 인터페이스가 정의되지 않는 개체로, 가상 센서나 가상 구동기와 같이 물리세계의 개체와 인터페이스를 가지고 있는 디지털 개체를 예로 들 수 있다. 기본 디지털 개체는 주로 물리세계와의 인터페이스를 담당하며, 단순한 특성으로 인해 물리세계와의 데이터 처리에 효율적이며, 디지털 트윈 시스템을 쉽게 설계, 구현 및 유지 관리를 할 수 있게 한다.

하나의 개체가 복수의 고유 기능과 인터페이스를 갖는 센서나 구동기와 같은 개체로 분할되는 경우 복합 디지털 개체라고 정의한다. 특정 데이터 처리 프로세스나 추론 모델 등을 모델링 한다면 이는 복합 디지털 개체로 정의한다. 이러한 복합 디지털 개체는 디지털 트윈에서 기본 디지털 개체가 제공하는 것 이상의 고급 기능을 제공하고, 단순한 디지털 복제를 능가하여 디지털 트윈 시스템에서 정교한 모델링 및 시뮬레이션을 가능하게 한다. 또한 복잡한 환경이나 요구 사항에 따라 엔티티를 조정하여 변화하는 상황에 적응할 수 있는 유연성을 제공할 수 있다.

디지털 트윈 내에서 정의되는 다수의 디지털 개체는 객체 지향 설계 방법론을 적용하여 정의되고 관리될 수 있다. 반복적으로 사용되는 디지털 개체의 재활용성을 높이기 위하여 추상 클래스 (Abstract Class)와 구체 클래스 (Concrete Class)를 정의하고 구체 클래스로부터 디지털 개체를 생성할 수 있다. 추상 클래스는 디지털 트윈 내에서 정의하고자 하는 디지털 개체들이 공통적으로 가지는 표준화된 속성 및 프로세스(또는 기능)를 정의함으로써, 시스템 내에서의 일관된 상호 작용과 관리를 가능하게 한다. 추상 클래스는 직접 인스턴스화 할 수 없으며, 구체 클래스를 구현하는 데에 도움을 준다. 구체 클래스에서는 디지털 개체의 속성과 기능이 구체적으로 정의되고 구현되어, 디지털 트윈 내에서 인스턴스화 될 수 있다. 예를 들면 자동차라고 하는 추상 클래스를 정의하고 이를 기반으로 승용차, 승합차, 화물차와 같은 구체 클래스를 정의하며, 다시 승용차 클래스의 하위 클래스로 특정 모델의 승용차를 정의할 수 있다. 이러한 클래스 기반 디지털 개체 관리 및 구조는 디지털 트윈 운영 비용을 절감하고 디지털 트윈 시스템의 개발 및 유지 관리를

단순화하는 데 큰 이점을 제공한다. 또한 공통적인 속성과 기능을 가진 클래스를 정의하고 이러한 클래스의 설계를 재활용함으로써 디지털 트윈의 생성과 관리를 더 효율적으로 할 수 있다.

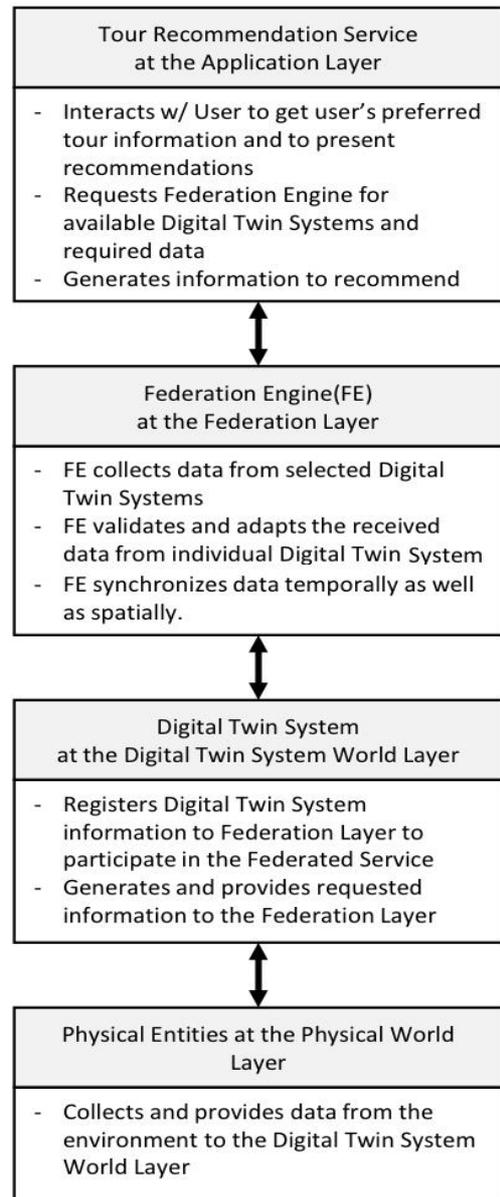


그림 5. 관광추천시스템의 계층적 동작 구조
 Fig. 5. Layered Operational Architecture of Tour Recommendation System

4. 디지털 트윈 시스템의 용례 (Usecase)

그림 5는 IEEE 2888.3에서 지원하고자 하는 연합디지털 트윈의 한 용례를 보여준다. 이 예에서는 날씨 (Weather) 디지털 트윈 시스템, 유동인구 (Floating Population) 디지털 트윈 시스템, 교통량 (Traffic) 디지털 트윈 시스템, 강 (River) 디지털 트윈 시스템의 4가지 디지털 트윈 시스템이 연합하여 관광 추천 서비스를 제공하는 상황을 보여 준다. 먼저 사용자는 응용계층에 위치한 한 응용으로서 관광 추천 서비스를 이용하여 자신이 원하는 기간과 몇 가지 희망하는 목적지를 입력한다. 관광 추천 서비스는 연합엔진을 통하여 사용가능한 디지털 트윈 시스템의 리스트를 받고 그 중 날씨, 유동인구, 교통량, 강의 네 가지 디지털 트윈 시스템을 선택한다. 관광 추천 서비스는 연합엔진에게 필요한 정보를 요청한다. 연합계층에 존재하는 연합엔진은 관광 추천 서비스가 요청한 정보를 디지털 트윈 세상 계층에 존재하는 선택된 네 가지 디지털 트윈 시스템들에게 요청하며, 각 디지털 트윈 시스템은 요청받은 정보를 제공한다. 연합엔진은 받은 정보의 검증, 시간적동기화, 공간적동기화, 데이터포맷의 변환 등을 거친 후 관광 추천 시스템에게 정리된 데이터를 전달한다. 관광 추천 시스템은 이를 기반으로 사용자에게 도움이 될 관광정보를 생성하여 제공한다.

IV. 결 론

디지털 트윈이라는 개념이 소개된 이후로 제조업을 비롯하여 스마트 시티, 헬스케어, 교통 등 다양한 분야로 확대되고, 활용됨에 따라 다양한 국제 표준화 기구들에서 디지털 트윈 관련 표준 제정을 시작하였다. 본 논문에서는 IEEE 2888에서 진행하고 있는 IEEE 2888.3 표준을 기반으로 디지털 트윈의 개념과 디지털 트윈 기반 응용을 지원하기 위한 계층적 아키텍처를 소개하였다. 계층적 아키텍처는 물리 세계 계층, 디지털 트윈 시스템세계 계층, 연합 계층, 응용 계층으로 구성되어 있으며, 각 계층의 정의와 간단한 요구사항들이 표준 내 정의되어 있다. IEEE 2888.3 표준은 현재 작업문서 단계로 IEEE-SA의 Ballot 과정을 진행 중으로, 여기에서 물리세계와 가상세계간의 인터페이스를 담당하는 센

서와 구동기를 기반으로 디지털 개체를 정의하고 다시 디지털 개체를 중심으로 디지털 트윈 시스템을 구성한다. 디지털 트윈 시스템은 디지털 개체로 구성되는데 디지털 개체는 기본 디지털 개체와 복합 디지털 개체로 구분될 수 있으며, 객체지향 방법론에 의거하여 추상 클래스 - 구체 클래스 - 하위 구체 클래스 - 개체 인스턴스로 정의되며, 추상 클래스에서 하위 구체 클래스로 이어지는 상하 관계로 인하여 각 클래스와 인스턴스는 재사용되며 효율적으로 관리될 수 있다. IEEE P2888.3 표준은 물리 세계의 디지털 동기화의 조율을 위한 표준 문서를 개발 중에 있으며, 이를 통해 개발자와 사용자에게 구조화된 가이드라인을 제공하여, 다양한 산업 분야에서의 디지털 트윈 구현을 촉진하고, 이를 통해 더 효율적인 자원 활용, 생산성 향상, 그리고 원활한 서비스 개발이 가능할 수 있도록 공헌하리라 기대된다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] M. Grieves, and J. Vickers, "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems," *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*, pp. 85-113, Springer, 2017.
doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- [2] D. Chung et. al, "Digital Twin Technology K-Roadmap ver 1.0," *Institute of Information and Communication Technology Planning and Evaluation (IITP)*, 2021.
- [3] E.H. Glaessgen, and D. Stargel, "The digital twin paradigm for future NASA and US airforce vehicles", *AIAA 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Honolulu, Hawaii, 2012.
doi: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
- [4] IEEE-SA, "IEEE Std. 2888.1-2023 IEEE Standard for Specification of Sensor Interface for Cyber and Physical Worlds," 2023.11.
doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2024.10384624>
- [5] IEEE-SA, "IEEE Std. 2888.2-2023 IEEE Standard for Actuator Interface for Cyber and Physical Worlds," 2023.11.
doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2024.10382445>
- [6] IEEE-SA, "IEEE P2888.3 Draft 1.0 IEEE Standard on Orchestration of Digital Synchronization between Cyber and Physical Worlds," 2024.2.
- [7] IEEE-SA, "IEEE Std. 2888.4-2023 IEEE Standard for Architecture for Virtual Reality Disaster Response Training System with Six Degrees of Freedom (6 DoF)," 2023.12.
doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2024.10424717>
- [8] IEEE-SA, "IEEE P2888.5 Draft 2.0 IEEE Standard for Virtual Training System Evaluation Methods," 2024.2.
- [9] IEEE-SA, "IEEE P2888.6 Draft 0.3 IEEE Standard for Holographic Visualization for Interfacing Cyber and Physical Worlds," 2024.2.

저 자 소 개



이 예 지

- 2018년 2월 : 극동대학교 스마트모바일학과 졸업(학사)
- 2020년 2월 : 건국대학교 스마트ICT융합과 졸업(석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 건국대학교 컴퓨터공학과 박사과정
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-0292-160X>
- 주관심분야 : 영상처리, 인공지능, 컴퓨터비전



윤 경 로

- 1987년 2월 : 연세대학교 전자전산기공학과 졸업(학사)
- 1989년 12월 : University of Michigan, Ann Arbor, 전기전산기공학과 졸업(석사)
- 1999년 5월 : Syracuse University, 전산학과 졸업(박사)
- 1999년 6월 ~ 2003년 8월 : LG전자기술원 책임연구원/그룹장
- 2003년 9월 ~ 현재 : 건국대학교 컴퓨터공학과/스마트ICT융합공학과 교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-1153-4038>
- 주관심분야 : 스마트미디어시스템, 멀티미디어검색, 영상처리, 컴퓨터비전, 멀티미디어/메타데이터 처리