

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제26권 제4호, 2021년 7월 (JBE Vol.26, No.4, July 2021)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2021.26.4.356>

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

## IoT 플랫폼 기반 디지털 트윈 프로토타입 설계 및 구현

김 지 형<sup>a)</sup>, 최 원 기<sup>a)</sup>, 송 민 환<sup>a)</sup>, 이 상 신<sup>a)†</sup>

### Design and Implementation of IoT Platform-based Digital Twin Prototype

Jeehyeong Kim<sup>a)</sup>, Wongi Choi<sup>a)</sup>, Minhwan Song<sup>a)</sup>, and Sangshin Lee<sup>a)†</sup>

#### 요 약

최근 사물인터넷 및 인공지능 기술의 발전에 따라 제조, 스마트시티 등 다양한 분야에서 실시간으로 데이터를 수집하고 분석하여 현실세계 문제에 대한 최적화를 수행하는 연구 및 적용사례가 증가하고 있다. 대표적으로 현실세계를 디지털화한 가상세계와 양방향으로 실시간 동기화를 지원하는 디지털 트윈 기술이 주목받고 있다. 본 논문에서는 디지털 트윈을 정의하고 사물인터넷 국제표준인 oneM2M 기반의 IoT 플랫폼을 활용하여 현실사물과 가상세계의 예측결과를 실시간으로 연결하는 디지털 트윈 플랫폼의 프로토타입을 제안한다. 또한, 제안된 프로토타입을 적용하여 물체의 충돌을 사전에 예측하여 사고를 예방할 수 있는 응용서비스를 구현한다. 응용서비스에서는 사전 정의한 테스트 케이스 수행을 통해 제안한 디지털 트윈 프로토타입이 크레인의 동작을 사전 예측하여 충돌 위험을 감지하고 이를 기반으로 최적 제어를 수행할 수 있으며 실제 환경에 응용 가능성을 보였다.

#### Abstract

With the recent development of IoT and artificial intelligence technology, research and applications for optimization of real-world problems by collecting and analyzing data in real-time have increased in various fields such as manufacturing and smart city. Representatively, the digital twin platform that supports real-time synchronization in both directions with the virtual world digitized from the real world has been drawing attention. In this paper, we define a digital twin concept and propose a digital twin platform prototype that links real objects and predicted results from the virtual world in real-time by utilizing the oneM2M-based IoT platform. In addition, we implement an application that can predict accidents from object collisions in advance with the prototype. By performing predefined test cases, we present that the proposed digital twin platform could predict the crane's motion in advance, detect the collision risk, perform optimal controls, and that it can be applied in the real environment.

Keyword : Digital Twin, Internet of Things, oneM2M, Simulation, Collision prediction

## I. 서론

디지털 트윈은 현실세계를 가상세계에 모사하고, 이를 통해 현실세계의 문제를 해결 또는 최적화하는 기술이다. 기존 디지털 트윈은 현실세계를 가상세계에 시뮬레이션 해 보는 M&S(Modeling and Simulation)의 단계에 머물러 있었으나, 최근 IoT(Internet of Things) 및 인공지능 기술의 발달로 현실세계 사물을 가상세계에 실시간 동기화하고 이를 통해 미래예측 결과를 제공하는 등의 고도화된 기능 증강이 가능해지고 있다. 현실세계의 여러 사물 및 환경에 대한 정보가 가상세계에서 유기적으로 연계되어 기존에 없었던 새로운 서비스들이 가능해지면서 디지털 트윈의 응용 분야가 지속적으로 확장되고 있다<sup>[1]</sup>. 특히 항공우주산업이나 Industry 4.0 기반의 스마트제조와 같은 첨단 제조 분야를 중심으로 산업 공공 환경 등 다양한 분야에서 디지털 트윈에 대한 관심이 커지고 있다<sup>[2]</sup>.

디지털 트윈의 개념을 구현하고 실제 환경에 적용하기 위해서는 다음과 같은 네 가지의 최소 필요기술 요건이 존재한다. 먼저 현실세계 사물의 정보를 정밀하게 취득할 수 있는 IoT 센서 디바이스 기술 및 IoT 데이터 수집 플랫폼 기술이 필요하다. 다음으로 수집된 데이터를 기반으로 현실 사물을 객체화하여 여러 가지 시뮬레이션, 미래 예측 등 복잡한 연산을 수행할 수 있는 가상세계 소프트웨어가 필요하다. 현실세계 데이터와 가상세계 소프트웨어를 연결하여 동기화할 수 있는 기술과 가상세계를 시각적으로 표현할 수 있는 시각화 기술도 필요하다. 이렇게 디지털 트윈을 구현하기 위해서는 가상화, 동기화, 시뮬레이션, 응용서비

스 역할의 소프트웨어 모듈이 구현되어야 하며 이들이 서로 유기적으로 동작할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 IoT 표준 플랫폼 기반 디지털 트윈 설계를 제안하고 플랫폼을 프로토타입 레벨로 구현한다. 또한 구현된 디지털 트윈 플랫폼 프로토타입을 통해 항만의 대형 크레인 충돌 시나리오를 설정하여 디지털 트윈 기반 대형 장비 충돌예측 시뮬레이션을 구현한다. 이를 통해 본 연구에서는 디지털 트윈의 개념 및 소프트웨어 설계를 제안하고, 실제 상황에 활용하는 방법론에 대해 설명한다.

## II. 관련 연구

### 1. 물리엔진 기반 시뮬레이션 기술

물리엔진은 강체동역학, 연체동역학, 유동역학과 같은 특정 물리 현상과 환경을 반영하여 물체 충돌 판정, 동적 시뮬레이션 등의 기능을 지원하는 소프트웨어 엔진을 의미한다. 컴퓨터 하드웨어 및 그래픽 기술의 비약적 발전과 함께 물리엔진 기반 시뮬레이션 기술은 게임뿐만 아니라 로봇, 자율주행 등 다양한 응용 분야에 적용되고 있다. 특히 시뮬레이션을 통해 데이터를 수집하고 동작 패턴을 학습하는 강화학습 연구가 주목받으면서 물리 현상에 대하여 시뮬레이션을 통한 데이터 수집이 가능한 Unity 3D<sup>[3]</sup>, Unreal Engine<sup>[4]</sup> 등 게임엔진의 활용에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 물리엔진 기반의 시뮬레이션 기술은 인공지능 알고리즘을 쉽게 훈련하고 검증할 수 있는 환경을 제공함으로써 제조, 의료, 디자인 분야에서 다양한 활용 가능성을 보여주고 있다. 하지만 이러한 시뮬레이션 기술에는 데이터에 대한 실시간 반영 및 적용에 대한 고려가 미흡하다는 한계점이 있다. 현재 상황의 데이터를 실시간으로 반영하여 시뮬레이션 및 인공지능 기반 예측 기술의 결과를 실제 사물 제어에 쓰는 등의 응용기술에는 적용하기 어렵다.

### 2. 디지털 트윈

디지털 트윈은 미국 제너럴일렉트릭(GE)이 처음 제시한 개념으로, 비즈니스 가치를 제공하기 위하여 실시간 분석

a) 한국전자기술연구원(KETI)

✉ Corresponding Author : 이상신(Sangshin Lee)

E-mail: sslee@keti.re.kr

Tel: +82-31-789-7570

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2975-0051>

※ 이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2020-0-00869, 5G 기반 조선해양 스마트 통신 플랫폼 및 융합서비스 개발).

※ This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.2020-0-00869, Development of 5G-based Shipbuilding & Marine Smart Communication Platform and Convergence Service).

• Manuscript received May 11, 2021; Revised July 8, 2021; Accepted July 8, 2021.

을 통해 감지, 예측 및 최적화를 수행하도록 설계된 물리적 자산, 시스템과 프로세스의 소프트웨어화된 표현이라고 정의되었다<sup>[5]</sup>. 특히 스마트시티, 제조, 헬스케어 등의 다양한 분야에서 산업·사회 문제를 해결할 수 있는 기술로 학계 및 산업계의 주목을 받고 있다<sup>[6][7][8][9]</sup>.

디지털 트윈의 개념은 많은 논문에서 다양하게 유사한 방식으로 제시되고 있다. 대표적으로 Y. Chen<sup>[10]</sup>은 모든 기능적 특징 및 작업 요소와의 연결을 나타내는 물리적 장치 또는 시스템의 컴퓨터화 된 모델을 디지털 트윈이라 정의하였다. Negri. E<sup>[11]</sup>는 디지털 트윈은 가상세계가 현실세계를 정확하게 모사하고 실시간으로 데이터를 받아 동일하게 움직이는 것이라고 정의하였다. 이와 유사하게 A. Madni<sup>[12]</sup>는 물리적 시스템의 성능, 유지 관리, 안전 상태 데이터를 전주기동안 지속적으로 갱신하는 가상의 인스턴스라고 정의하였다. 이를 기반으로 여러 가지 디지털 트윈 응용에 대한 연구들도 제안되고 있다. C. Liu<sup>[13]</sup>는 웹기반 디지털 트윈 모델링을 통한 생산시설의 원격제어 시스템을 제안하였다. 현실세계 사물의 모양을 파트 별로 모델링하여 가상객체로 만들고, 이후 여러 가지 가능한 움직임을 모사할 수 있는 수학적 모델링을 해당 가상세계 객체에 적용하였다. 이를 통해 디지털 트윈 기반 원격제어를 수행하였다. H. Laaki<sup>[14]</sup>는 디지털 트윈 개념을 활용하여 무선 네트워크에서 디지털 트윈을 기반으로 한 원격수술 제어 어플리케이션을 제안하였다. 대부분의 관련 연구에서 디지털 트윈은 단순히 현실 세계를 가상세계에 모델링 및 시뮬레이션하는 단계에서 더 나아가 실시간으로 현실세계 사물과 가상세계 사물이 동기화되는 개념으로 정의하고 있다.

### III. 디지털 트윈 플랫폼

본 논문에서는 디지털 트윈의 개념을 다음과 같이 제안한다. 디지털 트윈은 현실세계를 가상세계에 복제 및 모사하고, 실시간으로 양방향 동기화하며 이를 활용한 시뮬레이션을 통해 현실세계의 문제를 예측·해결 또는 최적화하는 기술이다. II-1에 제시한 시뮬레이션 기술과는 다르게 현실세계의 상태를 실시간으로 가상세계에 반영하고 가상세계에서 도출된 최적화 정보 역시 현실세계에 반영하는

특성을 가지고 있다.

본 논문에서 제시한 디지털 트윈은 그림 1과 같이 가상화, 동기화, 시뮬레이션, 응용서비스로 표현되는 4개의 핵심 요소기술로 구성되며, 각 기술의 정의는 다음과 같다. 첫 번째, 가상화 기술(Virtualization)은 현실세계의 구성요소를 디지털 정보화하고 객체화하는 기술이다. 두 번째, 동기화 기술(Synchronization)은 현실세계에 존재하는 객체와 가상세계에 존재하는 객체를 실시간으로 상호 반영하기 위한 기술이다. 세 번째, 시뮬레이션 기술(Simulation)은 가상화된 객체 정보를 기반으로 정보를 분석, 예측하는 기술이다. 네 번째, 응용서비스 기술(Application)은 가상화된 객체 정보 및 시뮬레이션 결과를 바탕으로 사용자에게 서비스를 제공하거나 현실세계의 객체를 제어하는 기술이다. 본 연구에서는 앞서 언급한 4개의 핵심 요소기술을 반영한 소프트웨어 모듈을 구현하고 유기적으로 동작하게 함으로써 디지털 트윈을 구현한다.

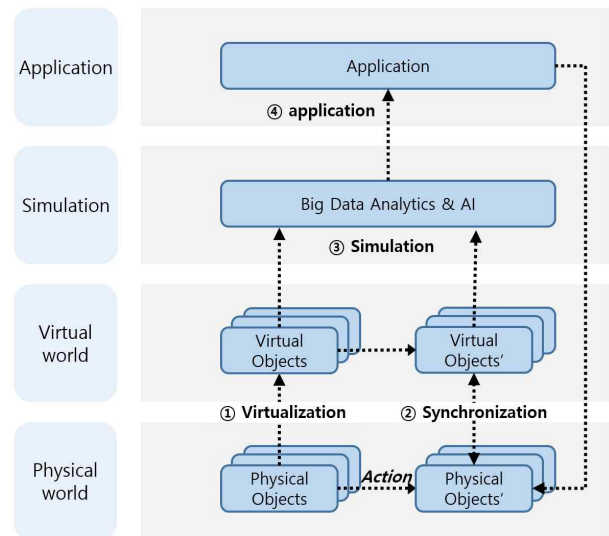


그림 1. 디지털 트윈의 개념도  
Fig. 1. Concept of Digital Twin

#### 1. 디지털 트윈 플랫폼 프로토타입 설계

본 장에서는 디지털 트윈 플랫폼 프로토타입 설계를 위한 소프트웨어 구성도 및 각 구성요소에 대하여 설명한다. 본 연구에서 제안하는 디지털 트윈 플랫폼은 그림 2와 같은

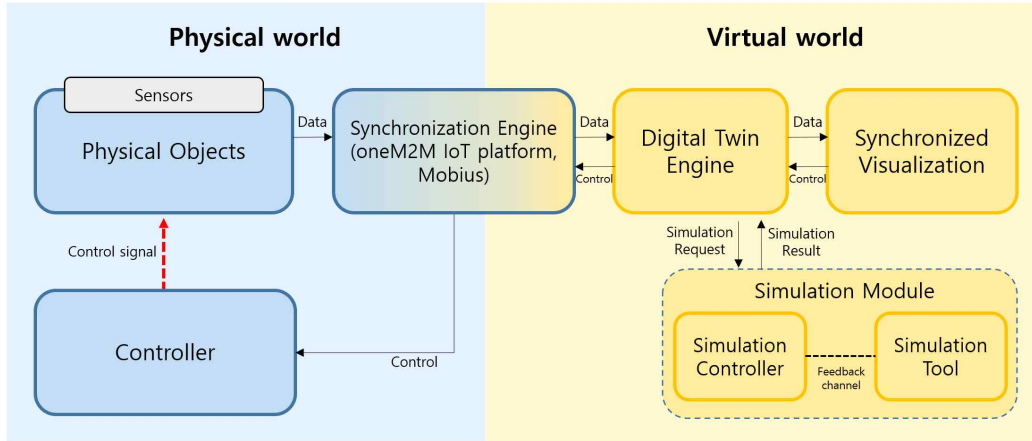


그림 2. IoT 플랫폼 기반 디지털 트윈 프로토타입 소프트웨어 구성도  
Fig. 2. Software architecture of IoT platform-based digital twin prototype

소프트웨어 구조를 통해 디지털 트윈의 현실세계 사물을 가상화 및 객체화하여 해당 데이터를 저장하고, 시뮬레이션 및 시각화하는 일련의 프로세스를 수행한다. 플랫폼은 현실세계의 데이터를 표현하는 물리객체 및 제어시스템, 전달된 데이터를 객체화 및 저장하는 동기화 엔진, 객체 및 시각화, 시뮬레이션 인스턴스를 관리하는 디지털 트윈 엔진, 현실세계와 실시간 동기화를 지원하는 동기 시각화 모듈, 저장된 데이터를 기반으로 시뮬레이션을 수행하는 시뮬레이션 모듈로 표현되는 다섯 가지 핵심요소로 구성된다. 다음 장에서는 각 요소들의 개념과 역할에 대하여 설명한다.

## 2. 물리객체 및 제어 시스템 (Physical Objects and Controller)

본 장에서는 물리 객체 및 제어 시스템에 대해 설명한다. 현실세계의 물리객체는 각 구성요소에 부착된 IoT 센서를 기반으로 상태 및 동작에 대해 디지털화되고 네트워크를 통해 동기화 엔진에 전송됨으로써 물리객체에 대한 데이터를 활용 가능하게 된다. 센서와 제어기의 데이터 수집 및 전송 기술은 현실세계 구성요소를 디지털화하는 가상화 기술을 위해 구현된다.

본 논문에서는 그림 3과 같은 모형 크레인과 센서 및 제어기를 활용하여 물리객체를 표현하고 디지털 트윈 플랫폼 구성에 활용하였다. 모형 크레인은 몸체 부분, 붐 및 후크와



그림 3. 물리세계 크레인 모형  
Fig. 3. Model crane in physical world

화물에 해당하는 컨테이너로 구성되어 있으며 크레인에는 제어 및 데이터 수집을 위하여 총 세 가지의 센서와 제어기가 부착되어 있다. 붐의 지면과의 각도를 측정하는 센서 (angle, MPU-9150), 크레인의 전면 회전각을 측정하는 센서 (heading, GY-85), 화물과 지면 간의 거리 정보를 수집하는 거리 센서 (distance, VL53L0x), 크레인 붐을 제어하기

위한 제어기(control, LEGO Power Functions RC)가 부착되어 있다. 크레인의 센서 정보는 I2C(Inter-Integrated Circuit) 인터페이스로 수집되어 이더넷 통신 보드(Feather M0 Proto)를 통해 HTTP(HyperText Transfer Protocol) 통신으로 동기화 엔진에 전송된다. 크레인 제어는 사용자가 제어기를 통해 수행할 수 있으며 해당 제어 데이터는 동기화 엔진에 전송된다. 가상세계로부터의 제어 정보는 동기화 엔진에서 수신되어 제어기를 통해 크레인을 제어하는데 활용된다.

### 3. oneM2M IoT 플랫폼 기반 동기화 엔진 (Synchronization Engine)

본 장에서는 동기화 엔진에 대해 설명한다. 본 논문이 제안한 디지털 트윈 플랫폼은 센서로부터 전송된 데이터 및 제어 정보를 저장하고 객체를 모델링하기 위하여 oneM2M을 기반으로 설계된 동기화 엔진을 활용하고 있다. oneM2M이란 한국의 TTA, 미국의 TIA, 유럽의 ETSI 등의 표준 단체가 참여하여 정의한 사물인터넷의 상호운용성을 위한 표준화 모델이다. 본 논문에서는 모비우스<sup>[15]</sup> 플랫폼을 동기화 엔

진으로 활용하여 디지털 트윈 프로토타입을 구현하였다. 모비우스는 사물인터넷 관련 서비스를 제공하기 위해 oneM2M 표준화 모델을 기반으로 통신 장치에 연결된 장치들을 관리하고 데이터를 저장하는 서버 플랫폼이다. HTTP, MQTT(Message Queuing Telemetry Transport), CoAP(Constrained Application Protocol) 등 다양한 프로토콜 지원하며, 계층적인 리소스 구조로 데이터를 저장한다.

그림 4는 전체적인 데이터의 전송 흐름과 동기화 엔진에서 데이터가 저장되는 구조에 대해 표현하고 있다. 동기화 엔진은 현실세계와 가상세계의 사이에 위치하며, 현실세계의 객체의 데이터를 전송받아 계층적인 리소스로 가상화하고 가상세계의 디지털 트윈 엔진에게 전달해준다. 가상세계의 디지털 트윈 엔진에서 도출된 데이터 역시 동기화 엔진을 통하여 현실세계에 반영된다. 동기화 엔진은 현실세계 구성요소를 디지털화, 객체화하는 가상화 기술과 현실세계와 가상세계를 실시간으로 상호 반영하는 동기화 기술을 구현하기 위하여 활용된다.

동기화 엔진은 현실세계에서 HTTP 통신으로 전달된 제어 및 센서 데이터를 oneM2M의 계층구조 형태로 저장한다. 객체 단위인 Application Entity(AE) 리소스에 현실세계

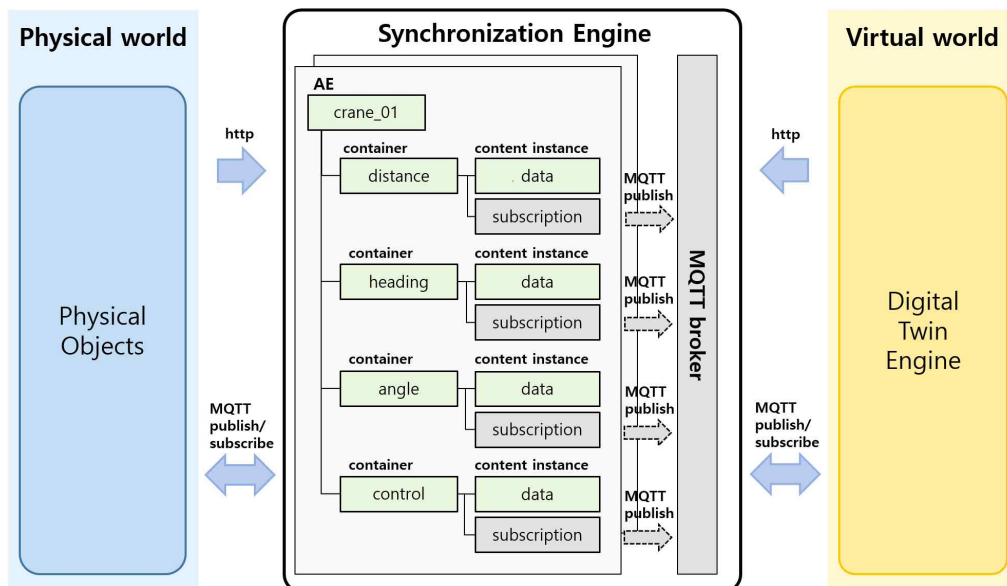


그림 4. oneM2M IoT 플랫폼 기반 동기화 엔진 개요

Fig. 4. Overall architecture of oneM2M IoT platform-based synchronization engine

에서 가상세계로 디지털화한 객체에 대한 메타정보가 저장되며, 그 하부에 객체에 부착된 제어 및 센서들에 대한 메타정보가 **container** 리소스에 저장된다. 실제 제어 및 센서의 데이터는 **container** 리소스 내부의 **content instance** 리소스에 저장된다. 데이터가 저장될 시 **subscription** 리소스를 참조함으로써 해당 데이터를 구독 중인 노드를 확인하고 MQTT 브로커를 통하여 데이터를 전송한다.

MQTT는 TCP/IP 프로토콜 위에서 동작하는 발행-구독 기반의 표준 메시징 프로토콜이다. MQTT 프로토콜은 클라이언트가 마이크로컨트롤러에서 동작할 수 있도록 최소한의 리소스를 활용하게 설계되었다. 가볍고 효율적이라는 장점을 기반으로 사물인터넷의 데이터 통신으로 활용되며 다수의 IoT 디바이스와의 연결이 가능하고 서버와 디바이스 간의 양방향 통신이 가능하다. MQTT 프로토콜의 메시지를 발행-구독할 수 있도록 해주는 중간 매개체 역할로서 다양한 브로커 소프트웨어가 존재한다. 현재 디지털 트윈 프로토타입에서 현실세계와 가상세계를 동기화하는 핵심 기술을 구현함에 있어 오픈소스 MQTT 브로커인 Mosquitto<sup>[6]</sup>를 활용하고 있다. 제어기와 크레인에 부착된 센서가 정보를 동기화 엔진에 전송하면 앞서 설명한 **subscription** 리소스의 동작을 통해 MQTT 브로커로 전달되고 디지털 트윈 엔진이 해당 정보를 전달받아 구독 중인 시각화 모듈과 시뮬레이션 모듈에게 전달한다. 반대로 디지털 트윈 엔진에서도 출력된 최적화 제어 정보 역시 동기화 엔진에 전송됨으로써 **subscription** 리소스를 통해 MQTT 브로커에 전달되고 이를 구독 중인 현실세계의 제어기가 정보를 받아들임으로써 실제 장치를 제어하게 된다.

#### 4. 가상세계 관리를 위한 디지털 트윈 엔진 (Digital Twin Engine)

본 장에서는 가상세계에서 사용되는 객체 데이터와 시각화나 시뮬레이션 등의 기능들을 관리할 수 있는 디지털 트윈 엔진 모듈 모듈을 정의한다. 구체적으로 디지털 트윈 엔진은 동기화 엔진에 저장된 데이터로부터 가상세계에서 사용될 데이터를 선별하고 시각화나 시뮬레이션에 필요한 데이터로 정리하여 보내주는 역할을 한다. 또 시각화 모듈이나 시뮬레이션 모듈에서 전달된 제어 관련 데이터를 동기

화 엔진에 전달하여 실제 제어에 반영할 수 있도록 하는 역할도 수행한다. 본 연구에서 제안하는 디지털 트윈 프로토타입에는 시각화 모듈과 시뮬레이션 모듈이 각 하나씩 존재하지만, 실제 디지털 트윈에서는 복수의 시각화 및 시뮬레이션 모듈이 존재할 수 있다. 동일한 상황/객체 데이터에 대해서 여러 가지 관점과 모델로 시뮬레이션을 수행할 경우 복수의 시뮬레이션 모듈이 필요할 수 있는데, 디지털 트윈 엔진은 그러한 시뮬레이션 인스턴스들을 관리하는 기능을 수행한다. 디지털 트윈 엔진은 상황에 따라 유동적으로 구현되어야 하는 소프트웨어 모듈이다. 디지털 트윈은 디지털 트윈 엔진을 통해 시뮬레이션 인스턴스 생성이나 시뮬레이션 결과 분석 등의 기능을 지원하여 디지털 트윈의 가상세계를 운용할 수 있게 된다.

#### 5. 동기 시각화 모듈 (Synchronized Visualization)

본 장에서는 동기 시각화 모듈에 대하여 설명한다. 동기 시각화 모듈은 현실세계를 그대로 가상세계에 동기화하고 시각화하여 사용자에게 제공하는 응용서비스의 기능을 수행한다. 현실세계 사물과 시각화 모듈에 나타나는 가상세계 사물의 동기화에 초점을 맞춘다. 현실세계 사물이 움직이면 해당 사물의 센서 및 제어정보로 동기 시각화 모듈에 존재하는 가상 사물도 동일하게 움직인다. 동기 시각화 모듈에서도 가상세계와 현실세계의 사물을 동시에 제어할 수 있다. 동기 시각화 모듈에서 제어신호를 발생시키면 해당 제어신호는 디지털 트윈 엔진 및 동기화 엔진을 거쳐 물리세계의 제어기에 전달되고 이는 물리세계에서 실제로 제어를 조작했을 때와 마찬가지로 프로세스를 통해 물리세계와 가상세계가 동기화되게 된다.

본 연구의 디지털 트윈 프로토타입 플랫폼에서는 Unity를 통해 동기 시각화 모듈을 구현하였다. 그림 5는 본 디지털 트윈 프로토타입 플랫폼에서 개발한 Unity 기반 동기 시각화 모듈을 나타내고 있다. 항만 환경을 가정하여 모델링하고 4개의 소프트웨어 카메라를 통해 4분할 화면으로 시각화 기능을 구현하였다. 빨간색 크레인과 노란색 크레인은 현실 사물인 레고 크레인들과 움직임이 동기화되어 있다.



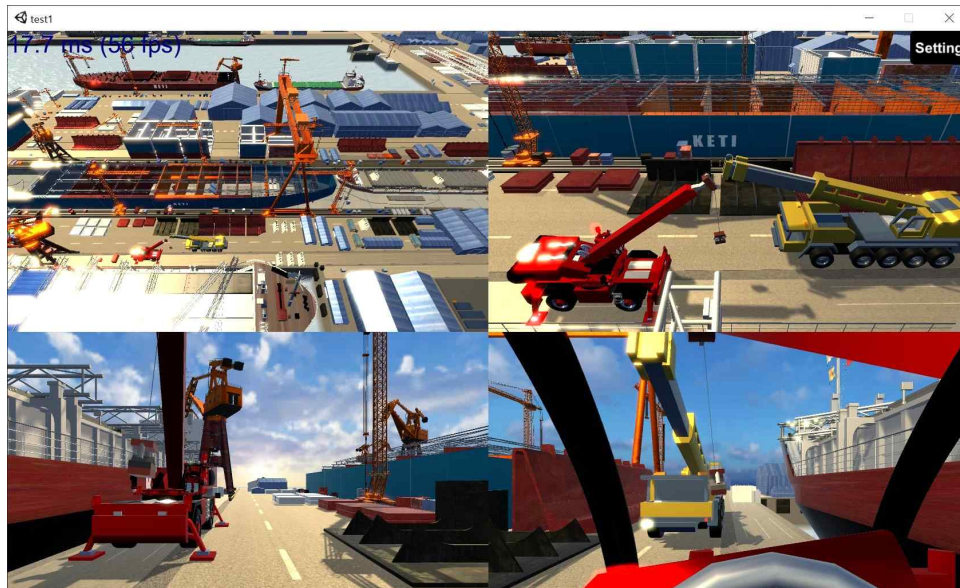


그림 5. Unity 기반 동기 시각화 모듈  
Fig. 5. Synchronized visualization module based on Unity

## 6. 시뮬레이션 모듈 (Simulation Module)

시뮬레이션 모듈은 디지털 트윈 엔진으로부터 전달받은 데이터를 활용하여 현실세계에서 발생하지 않은 동작에 대해 가상세계에서 수행해보고 이를 기반으로 현실세계의 문제 해결을 위한 최적화 정보를 도출하는 기능을 한다. 시뮬레이션 모듈은 시뮬레이션 툴과 컨트롤러로 구성되어 있다. 시뮬레이션 컨트롤러는 시뮬레이션 수행에 필요한 절차를 세분화하여 실행하고 해당 결과를 분석하여 가상 제어 명령과 함께 다음 절차에 반영하는 역할을 한다. 시뮬레이션 수행을 위해서는 가상 객체에 대해 정해진 가상 제어 명령이 정해진 시간에 적절하게 가상세계에서 수행되어야 한다. 시뮬레이션 컨트롤러는 주어진 시뮬레이션 환경에서 어떤 객체에 어떤 명령이 어떤 시간에 수행되는지 구체적으로 결정하고 이를 실행한다. 시뮬레이션 툴은 시뮬레이션 컨트롤러가 실행하는 가상객체에 대한 가상 제어 명령을 반영하고 그 결과를 나타내는 기능을 한다. 본 연구에서는 Unreal 엔진의 물리현상 모델링 및 좌표계 이동 등의 기능을 활용하여 시뮬레이션 툴을 구현하였다. 해당 제어 명령에 대한 객체의 상태 변화 정보는 피드백 채널을 통해 다시

시뮬레이션 컨트롤러에 전달된다. 이러한 시뮬레이션 과정은 시뮬레이션 컨트롤러에 의해 반복하여 수행되게 된다. 그림 6은 Unreal 엔진 기반으로 수행한 동작 시뮬레이션 시각화를 나타내고 있다. 본 논문에서는 다양한 시각화 및 물리 엔진과의 호환되는 디지털 트윈 플랫폼의 특징을 제시하기 위하여 동기 시각화 모듈에서 사용한 Unity 엔진과 다른 Unreal 엔진을 활용하여 고품질이며 현실적인 영상을 재현하는 시뮬레이션 툴을 구현하였다.



그림 6. Unreal 엔진 기반 크레인 충돌 시뮬레이션  
Fig. 6. Collision simulation with cranes based on Unreal engine

## IV. 구현 및 실험

본 연구에서는 제안하는 디지털 트윈 프레임워크 프로토타입을 통해 크레인 디지털 트윈을 구현하였다. 제안한 디지털 트윈 플랫폼의 응용 시나리오로서 물리세계 크레인 모형을 통해 두 크레인의 충돌 시나리오를 설정하고 구현한 크레인 디지털 트윈을 통해 해당 충돌 시뮬레이션을 수행한다. 두 개의 현실세계 크레인을 가상화하고, 이를 기반으로 해당 크레인들의 충돌 시나리오를 설정 및 실험하여 제안한 플랫폼의 유효성을 검증한다.

### 1. 크레인 충돌 시나리오

크레인의 충돌은 실제 산업현장에서 발생할 수 있는 중대한 산업사고이다. 이동형 크레인들의 경우 상대적으로 충돌 위험이 적지만, 좁은 공간에서 최대한의 효율을 내기 위해서 두 개 이상의 크레인이 근접하여 임무를 수행하는 경우가 발생할 수 있다. 일반적으로 크레인 상단은 물체를 들어 올릴 때 쓰는 붐과 붐을 제어할 수 있는 제어실로 구성되어 있다. 이때 붐은 기본적으로 좌우 회전 및 상하 제어, 길이 조절 등의 3축으로 6종의 제어가 가능하다. 이러한 제어 요소들이 복합적으로 작용할 수 있고 붐의 끝에는 컨테이너 화물이 달려있는 상황을 상정하고 있으므로 직관적인 움직임 및 충돌 예측이 어려울 수 있다. 본 장에서는 충돌 시뮬레이션 실험을 위해 충돌 시나리오를 크레인의 충돌 시나리오에 대하여 정면에서 붐이 충돌하는 경우, 대각선 방향으로 붐이 충돌하는 경우, 붐대 부분이 충돌하는 경우,

컨테이너가 충돌하는 경우, 컨테이너가 충돌하지 않고 지나가는 경우로 세분화하였다. 제시한 다섯 가지 시나리오를 수행함으로써 디지털 트윈 플랫폼의 충돌 예측 정확도 및 유효성에 대해 설명한다.

### 2. 시뮬레이션 기반 크레인 충돌 감지 알고리즘

컨테이너를 포함한 크레인 붐의 모양이 입체적이기 때문에 가상세계에서의 단순 모델링을 통해 컨테이너의 충돌을 판단하는 것은 쉽지 않다. 본 연구에서는 다양한 사물 구조의 충돌을 판단하는 데에 쉽게 적용할 수 있는 포인트 기반 객체 모델링을 제안하였다. 포인트 기반 객체 모델링이란 가상세계 객체에 일정 간격으로 좌표값을 가지는 가상의 포인트들을 설정하고, 이를 기반으로 충돌을 판단한다.

그림 7은 해당 충돌 감지 알고리즘에 대한 개념을 설명한다. 충돌을 판단하기 위해 거리를 계산하고자 하는 두 객체가 보유한 모든 포인트 간의 거리 계산을 통해 충돌을 판단한다. 두 가상세계의 객체에 일정 간격으로 복수 개의 포인트를 설정한 후, 해당 포인트들간의 거리를 계산하여 최소값을 두 가상세계 객체 간 거리로 판단한다. 이 거리 데이터를 특정 임계치와 비교하여 객체간의 충돌 여부를 판단한다. 포인트 개수는 설정 가능하며 개수가 많을수록 정확도가 증가하지만 거리 계산을 위한 연산량도 증가한다. 하지만 두 개의 포인트 집합에 대해 각 포인트 간 거리들을 계산하는 것은 병렬 연산이 가능하여 포인트의 개수가 많아진다고 해도 전체 시뮬레이션 속도에는 큰 영향을 주지 않는다. 포인트 기반 객체 모델링을 통한 충돌 판단은 입체적인

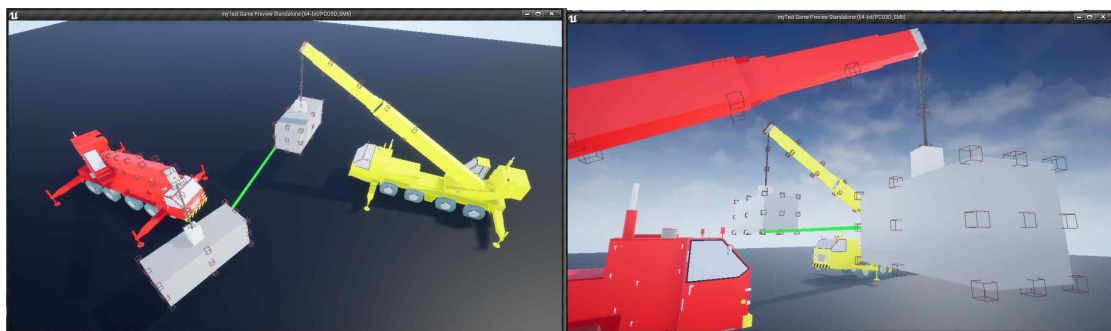


그림 7. 디지털 트윈 기반 충돌 감지 알고리즘을 위한 Point 배치  
Fig. 7. Point arrangement for digital twin-based collision detection algorithm



물체가 유동적으로 움직이는 다양한 상황에 대해 효과적으로 적용할 수 있는 장점이 있다.

Unreal에서도 물리엔진을 통하여 오브젝트 간 충돌을 탐지할 수 있는 기능을 제공한다. Unreal은 충분히 검증된 게임엔진으로, 해당 소프트웨어의 충돌을 탐지하는 기능을 사용하는 것이 본 연구에서 제안하는 충돌 탐지 알고리즘보다 더 정확할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 디지털트윈 프레임워크 프로토타입의 시뮬레이션이 특정 모델/소프트웨어에 종속되지 않음을 나타내기 위해 별도의 알고리즘을 사용하여 시뮬레이션을 구현하였다. 디지털트윈 시뮬레이션에는 물리적 충돌 이외에도, 기체확산모델, 화재확산모델 등 여러 가지 모델 및 환경이 사용될 수 있다. 구현 측면에서도 간단한 수학적 시뮬레이션부터 Unreal과 같은 소프트웨어 엔진을 사용한 시뮬레이션, 또는 여러 가지 소프트웨어 모듈이 서로 데이터를 주고받는 형태의 시뮬레이션도 가능하다. 이렇듯 본 연구에서 제안하는 디지털트윈 프레임워크는 시뮬레이션의 종류나 특정 소프트웨어 형식에 종속적이지 않은 특징을 가지고 있다. 본 연구에서는 해당 특징을 나타내기 위하여 디지털트윈 프레임워크 프로토타입의 대표 시나리오로 별도로 구현된 충돌 탐지 알고리즘과 Unreal 게임엔진이 유기적으로 동작하는 크레인 충돌 시뮬레이션을 수행하였다.

### 3. 크레인 충돌 예측 결과

크레인의 제어는 일반적으로 간단한 제어명령의 연속수행으로 이루어진다. 예를 들어, 크레인의 붐이 특정 방향으로 움직이는 제어를 수행할 때, 해당 움직임에 대한 제어신호가 사용자가 원하는 만큼 연속적으로 발생함으로써 사용자가 필요한 제어를 수행하게 된다. 본 연구에서는 이러한 상황에서 입력받은 제어명령에 대한 연속적 수행에 대해 시뮬레이션 한다. 특정 움직임에 대한 제어명령이 수행되었을 때, 해당 명령을 빠르게 연속적으로 시뮬레이션을 통해 수행해보고 그때의 충돌 여부를 미리 사용자에게 알려주게 된다. 이를 통해 사용자는 해당명령을 얼마나 더 연속적으로 수행할 수 있는지에 대한 정보를 얻게 된다.

충돌의 위험성을 시각화하기 위해 거리에 따른 충돌 위험도를 안전, 주의, 경고의 3단계로 정의하고 이를 기반으

로 다섯 가지의 충돌 시나리오를 설정하였다. 각 충돌 시나리오의 충돌 위험도는 두 크레인 오브젝트의 최단거리의 색으로 나타낸다. 안전은 초록색, 주의는 주황색, 경고는 빨간색으로 나타내고 있다. 표 1은 각 크레인 충돌 시나리오에 따른 예측 결과를 나타낸 것이다. 먼저 시나리오 (a)와 (b)는 붐이 충돌하는 시나리오이다. (a)는 정면에서 붐이 충돌하는 시나리오를 나타내고 (b)는 복잡한 3축 제어로 인해 대각선 방향으로 충돌하는 시나리오를 나타낸 것이다. 표 1에서 나타난 바와 같이 진행 방향에 관계 없이 디지털 트윈으로 충돌예측을 잘 수행하는 것을 확인할 수 있다. 시나리오 (c)는 크레인 붐대 부분의 충돌 시나리오를 나타내고 있다. 충돌을 감지하는 포인트 오브젝트가 붐대에도 일정 간격으로 설정되어 있기 때문에 여러 각도의 붐대 충돌도 잘 탐지하는 것을 확인할 수 있다. 시나리오 (d)와 컨테이너가 충돌하는 시나리오이다. 마찬가지로 다양한 각도의 방향에 대해 충돌을 탐지하는 것을 확인할 수 있다. 시나리오 (e)는 안전, 주의, 경고의 순서로 두 개의 컨테이너가 빗겨 지나가는 시나리오를 나타내고 있다. 특히 초기상태와 시뮬레이션 진행 상태를 보면 컨테이너의 진행경로에 따라 최단경로를 나타내는 포인트 오브젝트가 바뀌는 것을 확인할 수 있다.

본 장에서는 이러한 시나리오 (a)~(e)를 통해 다양한 충돌 시나리오에서 시뮬레이션이 효과적으로 미래 충돌을 잘 예측하는 것을 확인하였다. 또 해당 시뮬레이션의 결과가 잘 시각화되어 있어서 이를 기반으로 사용자가 현실세계 사물을 제어할 때 직접적으로 도움을 받거나 시스템 레벨에서 충돌 가능성이 있는 제어를 못하게 하는 응용들이 가능하다. 결과적으로 본 연구에서 제안하는 디지털 트윈 프레임워크 프로토타입이 충분히 현실세계 모사를 통한 현실 세계 문제 해결에 적용될 수 있음을 보였다.

## V. 결론 및 추후 과제

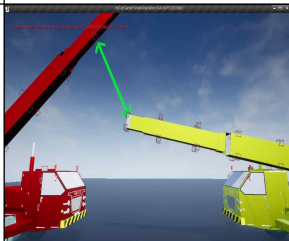
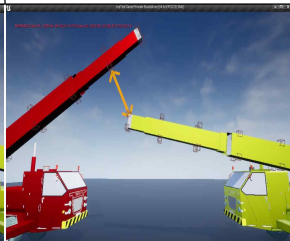
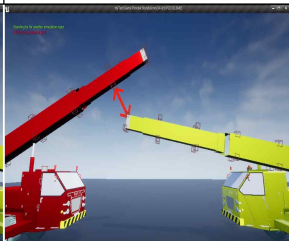
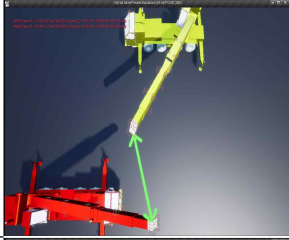
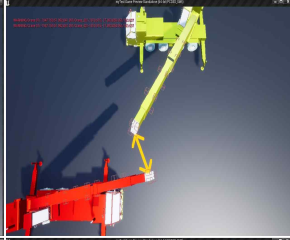
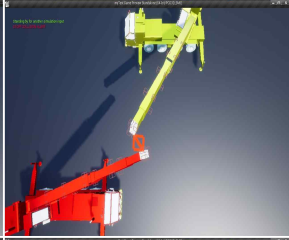
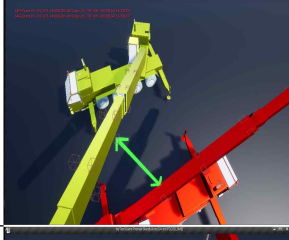
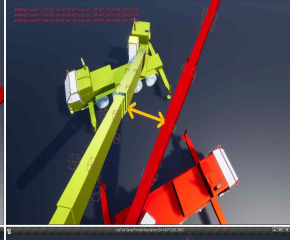
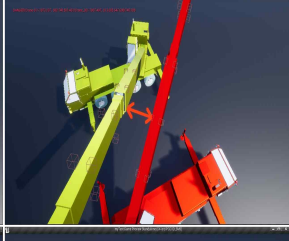
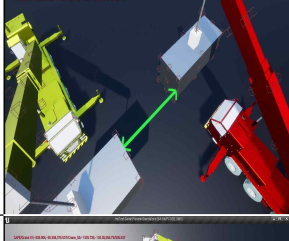
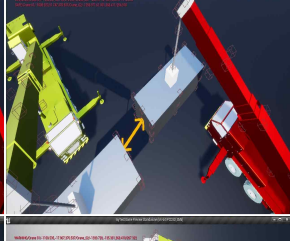

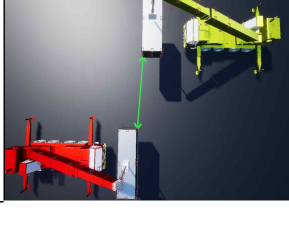
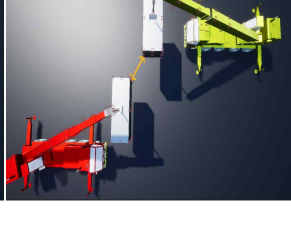
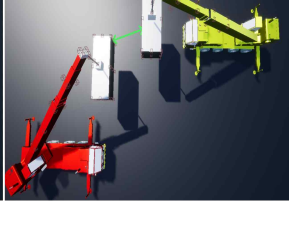
본 논문에서는 디지털 트윈을 현실세계를 가상세계에 복제 및 모사하고, 실시간으로 양방향 동기화하며 이를 활용한 시뮬레이션을 통해 현실세계의 문제를 예측·해결 또는 최적화하는 기술이라 정의하였다. 디지털 트윈 구현을 위

한 핵심 요소기술인 가상화, 동기화, 시뮬레이션, 응용서비스 기술에 대해 정의하고 이를 기반으로 한 디지털 트윈 플랫폼의 프로토타입을 제안하였다.

제안하는 디지털 트윈 프로토타입은 동기화 엔진, 디지

털 트윈 엔진, 동기 시각화 모듈, 시뮬레이션 모듈로 구성된다. 프로토타입은 먼저 oneM2M 기반 IoT 플랫폼 모비우스를 동기화 엔진으로 활용하여 현실세계의 데이터를 수집하고 계층적인 구조를 활용해 객체화한다. 또한 현실세계와

표 1. 충돌 시나리오에 따른 시뮬레이션 결과  
Table 1. Simulation result of collision test cases

Collision scenario	Beginning	Progress	Result
(a) Frontal collision			
(b) Diagonal collision			
(c) Boom collision			
(d) Container collision			
(e) safe distance			

가상세계를 동기화하기 위하여 동기화 엔진 내부의 MQTT 서버를 활용하고 현실세계 및 가상세계의 데이터를 양방향으로 전달한다. 가상세계에는 디지털 트윈 엔진이 존재하여 사용되는 객체를 관리하고 동기 시각화 모듈과 시뮬레이션 모듈에 필요한 데이터를 선별 및 전처리하여 전달한다. 디지털 트윈 엔진은 도출된 제어 데이터를 동기화 엔진에 전달하여 실제 제어에 반영할 수 있는 역할도 수행한다. 동기 시각화 모듈은 디지털 트윈 엔진에서 전달된 데이터를 기반으로 3D 모델링하여 사용자에게 시각 정보를 전달하는 역할을 하며 본 논문에서는 Unity 엔진을 활용하였다. 시뮬레이션 모듈의 경우 디지털 트윈 엔진에서 전달된 데이터를 바탕으로 데이터 분석 및 연산을 통한 미래 상황에 대한 예측을 수행하며 본 논문에서는 Unreal 물리엔진을 활용해 크레인 붐의 충돌을 실시간으로 예측하는 역할을 한다. 본 논문에서 제안하는 디지털 트윈 플랫폼의 경우, 특정 응용프로그램에 종속되지 않고 현실세계에서 전송된 데이터를 기반으로 다양한 시각화 및 시뮬레이션용 물리엔진과 호환이 가능하다는 점을 제시하기 위하여 Unity 엔진, Unreal 엔진을 동시에 사용하여 각각 동기 시각화 모듈 및 시뮬레이션 모듈을 구현하는 데 사용하였다.

본 논문에서는 제안된 프로토타입을 활용하여 물체의 충돌을 사전에 예측하여 사고를 예방할 수 있는 응용서비스를 구현하고 사전 정의한 테스트 케이스를 수행함으로써 프로토타입의 유효성을 설명하였다. 크레인 붐 간의 좌표 거리를 계산하여 임계치와 비교를 통해 크레인 붐의 충돌을 실시간으로 예측하는 응용서비스를 구현하고 실제 환경에서도 적용 가능함을 제시하였다.

향후 과제로 동기화 엔진의 성능 가속화를 통한 디지털 트윈의 고속·저지연 동기화를 지원하고 인공지능 기술의 적용과 시뮬레이션 모듈의 고도화를 통해 다양한 응용서비스를 개발할 예정이다.

## 참 고 문 헌 (References)

- [1] S. Haag and R. Anderl, "Digital twin - Proof of concept," *Manufacturing Letters*, Vol.15, No.2, pp.64-66, January 2018.
- [2] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol.15, No.4, pp.2405-2415, April 2019.
- [3] Unity 3d, <https://unity.com/> (accessed July 20, 2021)
- [4] Unreal Engine, <https://www.unrealengine.com/> (accessed July 20, 2021)
- [5] GE, <https://www.ge.com/> (accessed July 20, 2021)
- [6] T. Ruohomaki, E. Airaksinen, P. Huuska, O. Kesaniemi, M. Martikka, and J. Suomisto, "Smart city platform enabling digital twin," *International Conference on Intelligent Systems*, Funchal, Portugal, pp. 155-161, 2008.
- [7] C. Zhuang, J. Liu, and H. Xiong, "Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.96, No.7, pp.1149-1163, February 2018.
- [8] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, and F. Sui, "Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.94, No.3, pp.3563-3576, March 2018.
- [9] Y. Liu, L. Zhang, Y. Yang, L. Zhou, L. Ren, F. Wang, R. Liu, Z. Pang, and M. J. Deen, "A novel cloud-based framework for the elderly healthcare services using digital twin," *IEEE Access*, Vol.7, pp.49088-49101, April 2019.
- [10] Y. Chen, "Integrated and intelligent manufacturing: Perspectives and enablers," *Engineering*, Vol.3, No.5, pp.588-595, October 2017.
- [11] E. Negri, L. Fumagalli, and M. Macchi, "A review of the roles of digital twin in cps-based production systems," *Procedia Manufacturing*, Vol.11, No.1 pp.939-948, September 2017.
- [12] A. Madni, C. Madni, and S. Lucero, "Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering," *Systems*, Vol.7, No.1, pp. 1-13, January 2019.
- [13] C. Liu, P. Jiang, and W. Jiang, "Web-based digital twin modeling and remote control of cyber-physical production systems," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol 64, No.1, pp. 1-16, August 2020.
- [14] H. Laaki, Y. Miche, and K. Tammi, "Prototyping a Digital Twin for Real Time Remote Control Over Mobile Networks: Application of Remote Surgery," *IEEE Access*, Vol.7, No.1, pp.20325-20336, February 2019.
- [15] I. Ahn, J. Lim, J. Seo, and I. Yun, "Development of an oneM2M-compliant IoT Platform for Wearable Data Collection," *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, Vol.13, No.1, pp.1-15, January 2019.
- [16] R. A. Light, "Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol," *Journal of Open Source Software*, Vol.2, No.13, pp. 265, May 2017.

---

저 자 소 개

---



김 지 형

- 2015년 2월 : 한양대학교 ERICA 컴퓨터공학과 학사
- 2020년 8월 : 한양대학교 컴퓨터공학과 박사
- 2021년 2월 ~ 현재 : 한국전자기술연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-1650-0902>
- 주관심분야 : 디지털 트윈, 딥러닝, 강화학습, 자율네트워크



최 원 기

- 2014년 2월 : 연세대학교 컴퓨터과학과 학사
- 2021년 2월 : 연세대학교 컴퓨터과학과 박사
- 2021년 2월 ~ 현재 : 한국전자기술연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-7793-4651>
- 주관심분야 : 디지털 트윈, 데이터베이스 시스템, 빅데이터 플랫폼



송 민 환

- 2003년 2월 : 건국대학교 정보통신공학과 학사
- 2005년 2월 : 건국대학교 정보통신공학과 석사
- 2005년 ~ 현재 : 한국전자기술연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-6345-274X>
- 주관심분야 : 사물인터넷, 지능형 서비스, 디지털 트윈 플랫폼



이 상 신

- 1997년 2월 : 한국외국어대학교 수학과 학사
- 2000년 2월 : 한국외국어대학교 컴퓨터공학과 석사
- 2012년 2월 : 한국외국어대학교 컴퓨터공학과 박사
- 2000년 ~ 현재 : 한국전자기술연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-2975-0051>
- 주관심분야 : 디지털 트윈, 네트워크 시스템, 사물인터넷