

특집논문 (Special Paper)

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

<https://doi.org/10.5909/JBE.2021.26.4.377>

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

식물공장 적용 디지털 트윈 프레임워크 설계 연구

고 태 환^{a)}, 노 석 봉^{a)}, 노 동 희^{a)*}, 최 주 환^{a)}, 임 태 범^{a)}

Study of Implementation as Digital Twin Framework for Vertical Smart Farm

Tae Hwan Ko^{a)}, Seok Bong Noe^{a)}, Dong Hee Noh^{a)*}, Ju Hwan Choi^{a)}, and Tae Beom Lim^{a)}

요 약

본 연구는 수직형 스마트팜, 즉 식물공장 관리의 디지털화를 위한 시스템의 구현을 위한 프레임워크 설계를 제안한다. 본 연구에서 제안한 디지털 트윈 시스템의 세부 프레임워크 모듈은 1) 스마트 식물공장 트윈 클라이언트 2) 스마트 식물공장 트윈 게이트웨이 및 3) 스마트 식물공장 트윈서버로 구현하였다. 특히 스마트 식물공장 트윈 게이트웨이는 디지털 트윈의 구현을 위한 표준 개방형 하드웨어 플랫폼으로 주로 사용되는 Eclipse Ditto를 사용하여 구현하였다. 또한, 각 요소는 초기화 및 데이터 전송과 같은 메시지 시퀀스를 정의하여 클라이언트, IoT 게이트웨이, 서버와 각기 통신이 가능한 인터페이스를 설계하였다. 본 연구에서 제안된 프레임워크의 검증 을 위하여 식물공장에서 별도로 설치한 라즈베리파이를 통해 환경 및 제어데이터를 수집하여 이를 가상환경에 가시화하는 형태의 프로토타입 디지털 트윈 시스템을 개발하였다.

Abstract

This paper presents a framework design of a digital twin system for a vertical smart farm. In this paper, a framework of digital twin systems establishes three factors: 1) Client 2) IoT gateway, and 3) Server. Especially, IoT gateway was developed using the Eclipse Ditto, which has been commonly used as the standard open hardware platform for digital twin. In particular, each factor is communicating with the client, IoT gateway, and server by defining the message sequence such as initialization and data transmission. In this paper, we describe the digital twin technology trend and major platform. The proposed design has been tested in a testbed of the lab-scale vertical smart-farm. The sensor data is received from 1 Jan to 31 Dec 2020. In this paper, a prototype digital twin system that collects environment and control data through a raspberry pi in a plant factory and visualizes it in a virtual environment was developed.

Keyword : vertical smart-farm, digital twin, eclipse ditto, big-data, framework

I. 서론

현재 사회는 복잡하고 다양한 사회적 이슈를 정확히 분석하고 예측에 의한 신속한 문제 해결 방안을 도출하여야 하는 요구가 증가하고 있다¹⁾. 특히 도시 문제와 재난문제는 물론 코로나19로 인해 발생된 팬데믹 현상에서의 방역 관리문제, 에너지 사용 관련 문제 등 다양한 사회 문제를 해결하기 위해서는 현재 상황을 정확히 분석하고 예측하여 시스템에 적용 가능한 솔루션 확보가 필요하다. 이에 미국, 유럽 등 선진국에서는 가상환경(Cyber Physical System, CPS)와 같은 개념이 등장하게 되었으며, 현재는 이러한 용어가 디지털 트윈(Digital Twin)이라는 개념으로 확장되어 널리 연구되고 있다. 이는 곧 빅데이터 기반의 4차산업혁명 시대에서 디지털화(Digital Transformation)이라는 이름으로 변화를 이끌고 있다.

디지털 트윈 기술은 2014년 GE가 처음 제안한 이후 인공 지능, 블록체인, 빅데이터 등과 함께 4차 산업을 주도하는 2020 가드너 미래 10대 전략기술에 선정²⁾되었으며, 2021년 역시 주요 기술로 선정된 바 있다. 기술적 발전 측면에서 사물인터넷(Internet of Things)이 급속도로 발전함에 따라 초정밀센서(MEMS) 3D 이미지 렌더링 기술은 물론 5G에 의한 초고속, 초저지연, 대용량 데이터 처리가 가능해짐에 따라 디지털 트윈은 급속도로 발전 추세를 보인다. 디지털 트윈 기술은 5G, AI 등 디지털 기술의 집약체이다. 디지털 트윈의 경우 생성, 전달, 분석 등 구조 차원에서 다양한 데이터의 수집 기술을 통해 데이터를 생성하며, 처리된 데이터를 통해 인공지능 등 기술을 이용하여 분석 및 예측 정보를 제공하고 이러한 과정 사이에서는 수많은 디지털 트윈 관련 핵심 기술들이 활용된다.

이러한 디지털 트윈 분야는 제조업은 물론 물류, 스마트 시티 등 다양한 산업군에 폭넓게 적용되고 있으며 농업분

야에서도 스마트팜 개발 추세에 따라 가능성을 보이고 있다. 하지만 스마트팜의 경우 타 산업군과 달리 데이터 수집 및 시스템 인프라 수준에서 다소 낮으나 스마트팜 자체 기술에 대한 성장 가능성은 현재 기술 수준이 세계적으로도 성장 추세를 보이므로 기술 성장에 맞춰 충분히 발전 가능성이 보이는 산업군으로 볼 수 있다.

현재 농업 분야는 스마트팜으로 나아가기 위해 농장 내부에 온도, 습도 CO2 등을 측정할 수 있는 센서와 원격으로 제어 가능한 양액기 등 많은 부분에서 IoT 기기를 활용하고 있다. 이를 디지털 트윈으로 구현하면 대규모 센서를 통해 수집된 데이터를 가상환경으로 표현하여 실제와 동일한 수준으로 가상환경에서 관리하는 이점을 통해 기존 대비 고생산량 달성은 물론 고품질의 농산물을 낮은 인건비 내에서 채배 가능한 환경을 제공할 수 있는 솔루션이 될 것으로 판단된다.

본 논문은 스마트팜에서 적용 가능한 디지털 트윈 관련한 프레임워크에 대한 설계 및 구현 내용에 관하여 기술하고자 하며, 이를 함에 앞서 디지털 트윈 관련 기술 동향과 본 디지털 트윈 프레임워크 설계에 있어 주로 사용된 핵심 기술과 관련 솔루션 등을 기술하였다. 특히 본 프레임워크 설계 시 실증 장소로는 경기도에 소재한 식물공장으로서, 2020년 1월 1일부터 12월 31일까지 약 1년여간의 데이터를 라즈베리파이를 통해 수집하였다. 이렇게 수집된 현실 세계 데이터는 프레임워크 내 별도 구현된 클라이언트를 통해 빌드되는 웹 어플리케이션을 통해 디지털 트윈 정보로 가시화하였다.

본 논문은 관련 서론을 기술한 후 2장으로 디지털 트윈 관련 기술 동향을 언급하고 3장에서는 디지털 트윈 프레임워크 설계 관련한 설명과 4장에서는 이러한 설계된 프레임워크를 통해 구현된 디지털 트윈 시스템에 관해 설명하고, 마지막으로 연구결과 및 향후 연구계획에 관하여 기술하였다.

II. 디지털 트윈 관련 동향

1. 주요 디지털 트윈 플랫폼 기술 사례

디지털 트윈 구현 시 개방형 플랫폼에 관한 활용 사례가 증가하고 있으며, 특히 농업 분야를 포함하여 다양한 산업

a) 한국전자기술연구원 전북지역본부(Korea Electronics Technology Institute)

‡ Corresponding Author : 노동희(Noh Dong Hee)

E-mail: dheeh.noh@kети.re.kr

Tel: +82-63-219-0080

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6931-2377>

※ 본 결과물은 농림축산식품부, 과학기술정보통신부, 농촌진흥청의 재원으로 농림식품기술기획평가원, (재)스마트팜 연구개발사업단의 스마트팜 다부처패키지혁신 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(421034-04).

· Manuscript received May 20, 2021; Revised June 29, 2021; Accepted June 29, 2021.

군에 적용할 수 있는 범용 플랫폼에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Ditto 플랫폼^[3]은 Eclipse Foundation에서 진행되고 있는 디지털 트윈 오픈소스용 하드웨어 IoT 플랫폼이다. 다수 IoT 기기를 개발하는 소프트웨어 개발자를 위하여 디바이스 연동 및 데이터 송수신 등 디지털 트윈 구현에 필요한 객체 가상화에 필요한 솔루션 개발을 제공한다. 특히 현실 세계에서 IoT 기기를 통해 수집 가능한 다양한 데이터를 클라우드 기반으로 손쉽게 표현할 수 있다. Ditto 프레임워크를 사용하게 되면 다양한 IoT 기기의 인터페이스에 관련 없이 쉽게 연계하여 각 디바이스의 관리 및 데이터 간 연계가 가능하다.

Watson IoT 플랫폼^[4]은 IBM에 의해 의한 IoT 관리 플랫폼으로서 기존 빅데이터 플랫폼 개념에서 확장하여 현실 세계의 사물을 관리할 수 있는 기능을 포함한 디지털 트윈 플랫폼을 연구하고 있다. 특정 사용자의 요구에 맞춰 다양한 디지털 스레드와 데이터 스트림을 결합하여 제품에 대한 여러 형태의 가상화 솔루션을 제공한다. IBM 기술이 집약된 디지털 스레드 기능은 다양한 유저 및 IoT 기기가 연결되었을 경우 디지털 트윈 시스템을 제공함에 있어 기존 플랫폼 대비 높은 성능을 보인다.

Predix 플랫폼^[5-7]은 General Electronics(GE)에서 디지털 트윈 구현을 위한 소프트웨어 플랫폼 형태로 개발한 제품이며, 주로 산업용 기계 및 제조 분야에서의 데이터 수집 및 분석을 위해 사용된다. 주로 표준 데이터 형태로서 데이터, 개인 장비 등 연결을 지원한다. 초기에 Predix 플랫폼은 스마트 공장을 대상으로 설계되었으며, 최근에는 개인 모바일 기기에서도 서비스 가능한 OS 기능을 탑재하는 등 혁신적인 개발을 진행하고 있다.

제조업에서의 디지털 트윈은 미국, 프랑스, 독일, 두바이 등에서 디지털 트윈을 기반으로 하는 스마트팩토리에 사용되는 플랫폼을 개발하여 운영을 통해 필요 생산량, 유지보수 예측, 활동 추적 등을 하고 있으며, 상기와 같은 제조업에서 도시, 국토 관리 등의 응용 분야로 확대하여 활용하려는 모습을 보인다^[8-9].

2. 디지털 트윈 적용 사례

버추얼 싱가포르(Virtual Singapore)는 2018년까지 약

7,800만 달러를 투입한 대형 프로젝트로서, 정부가 주도하고 디지털 트윈 대표 세계적 기업인 다쏘시스템(Dassault Systems), ESRI, 지멘스(Simenses)가 참여하여 싱가포르 도심 모든 구조물과 대응되는 디지털 트윈을 실제 구현하고, 그 후에 전기, 교통 등 도심 내 존재하는 모든 인프라, 기상정보, 인구통계 등 정보를 수치화하여 가상화한 후 이를 테스트할 수 있도록 테스트베드를 구축하였다^[10].

국내의 경우 디지털 트윈을 통해 스마트제조 및 공장, 에너지, 스마트시티 등 기업 기술개발 측면뿐만 아닌 정책적인 측면 등 여러 분야에서 기술개발이 추진되고 있다. 특히, 스마트시티의 경우 지자체와 연구기관이 협업하여 지역의 지하, 지상, 지표의 3차원 객체모델을 구축하고 이를 통하여 하천 모니터링, 어린이 보호구역 예측 서비스를 통한 안전 관리 등 지역에서 발생할 수 있는 다양한 사건 및 사고에 대한 시뮬레이션과 예측을 할 수 있는 시스템을 개발하고 실증 적용하여 기술개발이 실제 정책 수립에 활용되고 있다^[11].

III. 시스템 구현 관련 배경기술

1. 디지털 트윈

디지털 트윈은 현실 세계에 존재하는 사물, 시스템, 환경 등을 S/W 시스템의 가상공간에 동일하게 모사(Visualization)하고, 실물 객체와 시스템의 동적 운동 특성 및 결과 변화를 S/W 시스템에서 모의(Simulation)할 수 있도록 하고, 모의 결과에 따른 최적 상태를 실물 시스템에 적용하고, 실물 시스템의 변화가 다시 가상 시스템으로 전달되도록 함으로써 끊임없는 순환 적응 및 최적화 체계를 구현하는 기술이다^[12]. 이를 식물공장에 적용하게 된다면 다수의 디지털 트윈에 각기 다른 환경 요소를 넣어 나온 결과를 보고 비교하여 최적의 환경 요소를 찾아 식물공장의 효율성을 높일 수 있게 된다. 본 논문에서는 디지털 트윈의 기술발전 단계 중 1단계인 물리 대상을 디지털 트윈으로 복제하는 수준으로 구현하는 것을 목표로한다^[13]. 그리고 현실 세계에서 IoT를 통해 수집된 식물공장의 환경 데이터를 디지털 트윈에 주입함으로써 시뮬레이션할 수 있도록 설계하였다.

2. Unity

Unity는 3D 및 2D 비디오 게임의 개발 환경을 제공하는 게임엔진이자, 3D 애니메이션과 건축 시각화, 가상현실 (VR) 등 인터랙티브 콘텐츠 제작을 위한 통합 제작 도구이다^[14]. 본 논문에서 디지털 트윈을 구현할 때 Unity를 쓰게 된 이유는 다음과 같다. 첫 번째, 현실 세계에 존재하는 사물, 시스템, 환경 등을 가상공간에 쉽게 배치할 수 있다. 두 번째, Unity 게임엔진 안의 물리 엔진은 가상공간이 현실 세계와 거의 동일하게 시뮬레이션을 할 수 있도록 환경을 구축해준다. 세 번째, Unity는 하나의 프로젝트를 25개 이상의 플랫폼에 빌드가 가능하다. 그래서 원하는 플랫폼에 쉽게 이식할 수 있다. 본 논문에서는 Unity로 구현된 디지털 트윈을 WebGL로 빌드하였다.

3. WebGL

WebGL은 OpenGL을 기반으로 하고 있으며, OpenGL과 마찬가지로 Khronos Group에서 관리하는 오픈소스 라이브러리이다. Khronos Group에서는 브라우저의 HTML 5 Canvas element 위에 화면을 그려내며, Javascript를 사용하여 OpenGL ES 3.0 버전을 기반으로 한다. WebGL 라이브러리 사용에 있어서의 주요 장점으로서는 Javascript와 브라우저, HTML을 주로 사용함에 따라 첫째, NPM 모듈을 자

유로이 사용할 수 있으며, 둘째 React, Vue와 같은 프론트엔드 라이브러리를 함께 이용할 수 있어 개발에 용이하며, 셋째, OpenGL 등 게임엔진에서 직접 구현해야 하는 버튼 등 UI element를 HTML의 지원을 받아 쉽게 추가할 수 있다. 이를 통해 멀티플레이어 게임 등 네트워킹이 필요한 애플리케이션의 경우 다양한 모듈과 브라우저를 기반으로 개발이 용이하기 때문에 웹 기반 디지털 트윈 시스템 구현에 있어 WebGL 활용이 용이하다.

현재 WebGL은 AMD, NVIDIA 같은 그래픽 관련 대기업과 브라우저 관련 전문기업인 모질라(Mozilla)와 오페라(Opera) 등 산업체와 협업하여 다양한 애플리케이션 개발 지원이 가능하다^[15].

IV. 시스템 구현

본 논문의 스마트팜 디지털 트윈 시스템 구조는 아래 그림 1과 같이 설계하였다.

1. 스마트팜 트윈 데이터 구성

본 논문에서는 경기도 소재 식물공장에서 별도로 설치한 라즈베리파이를 통해 환경데이터를 수집하여 이를 가상환경에 가시화하는 형태의 프로토타입 디지털 트윈 시스템을

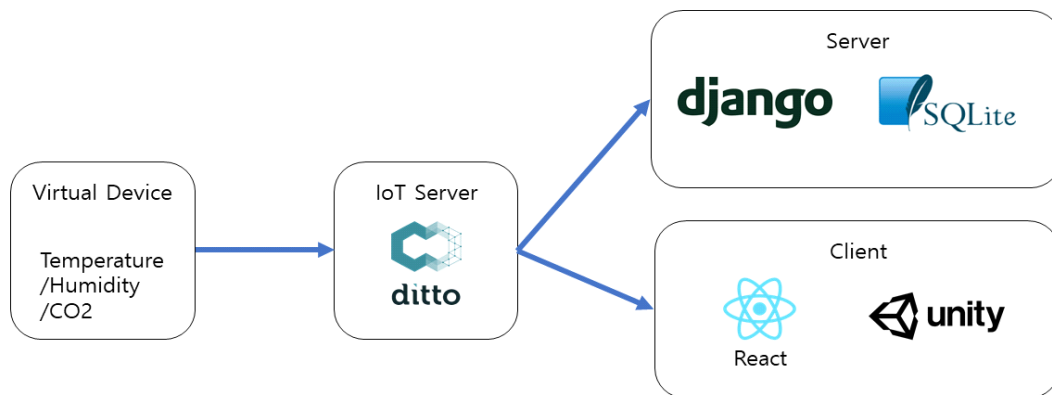


그림 1. 디지털 트윈 시스템 구조
Fig. 1. Digital twin system structure

개발하였다. 이때 본 시스템 구현을 위해 라즈베리파이를 통해 수집한 주요 센서 데이터로는 실내 온도, 실내 습도, 실내 CO2이며, 상세 내용은 아래 표와 같다.

표 1. 디지털트윈 시스템 내 주요 수집 환경데이터
 Table 1. Environment Data of Digital Twin System

Data	Type	Data Format
Internal Temperature	Float	JSON
Internal Humidity	Float	JSON
Internal CO2(ppm)	Integer	JSON

표 1과 같이 수집된 데이터에 대한 DB 구조는 다음과 같은 구조로 ERD(Entity-Relationship Diagram)을 설계하였다(그림 2).

2. 스마트팜 트윈 클라이언트

본 논문에서는 임의의 실증 환경(시설원예 온실, 수직

형 스마트팜 등)에서 수집되는 환경정보와 시설정보를 실제와 동일한 가상환경으로 표현하기 위한 프레임워크를 클라이언트, 서버 및 게이트웨이 모듈로 세분화하여 구현하였다.

본 시스템의 프레임워크 중 “스마트팜 트윈 클라이언트”는 센서 등을 통해 수집되는 데이터를 가상환경 내에 소프트웨어로 객체화하고 특히 3D 이미지 형태로 형상화하기 위한 기능을 담당한다. 서버로 전송되는 현실 세계 데이터 정보인 환경정보, 생육 정보 및 시설 관련 정보를 정의하고 이를 서버와 통신할 수 있도록 인터페이스를 개발한다. 이를 통해 실제와 동일하게 데이터를 객체화한 후 디지털 트윈으로 구현한다. 이를 통해 본 시스템을 사용하는 주 사용자인 식물공장 형태의 팜을 운영하는 농민과 주요 관리자에게 현장에 직접 가지 않더라도 실제와 동일하게 식물공장 스마트팜을 실사화하여 관리의 편의성과 접근성을 제공할 수 있도록 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 클라이언트 내 웹 기능 모듈을 추가하여 사용자가 웹을 통한 접근으로 본 서비스를 이용할 수 있도록 설계하였다.

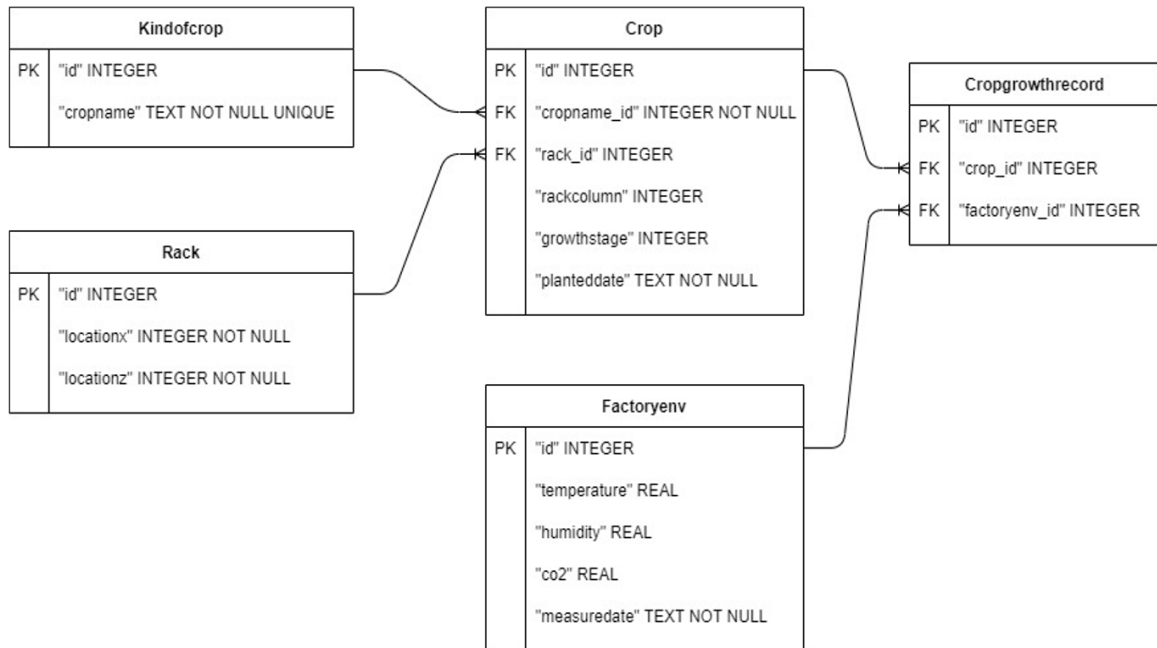


그림 2. 데이터베이스 구조
 Fig. 2. Database Structure of Digital Twin

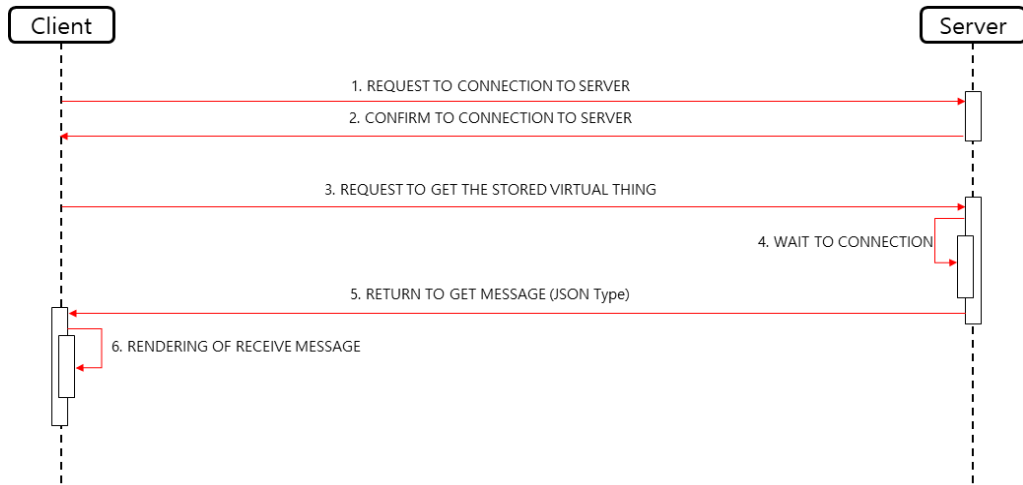


그림 3. 웹 어플리케이션 실행 시 시퀀스 다이어그램
 Fig. 3. Sequence diagram when running web application

2.1 스마트팜 트윈 클라이언트 : 디지털 트윈 인터페이스
 물리적 객체와 가상화 객체 간 데이터의 실시간 동기화를 위한 프로토콜 설계는 WebSocket을 활용하여 현실 세계의 물리적 정보를 수집하도록 개발하였다. 현재 식물공장 환경에서의 데이터 통신 표준은 현재 제정된 사례는 존재하지 않으나 표준 온실을 대상으로 한 데이터 통신 표준은 PG426을 통해 제정되었으므로 이를 참조^[16]하여 인터페

이스를 설계하였다. 주요 통신 절차로는 크게 초기화 절차와 초기화가 이루어진 후 클라이언트와 게이트웨이, 서버 간 순차적인 데이터 전송절차로 이루어진다.
 첫째, 초기화 절차로 처음에 웹 어플리케이션을 실행하여 초기화 화면을 인터페이스로 설계하였으며, 이때의 상황을 시퀀스 다이어그램으로 표현하면 다음과 같다 (그림 3). 웹 어플리케이션이 실행되면서 스마트팜 트윈 서

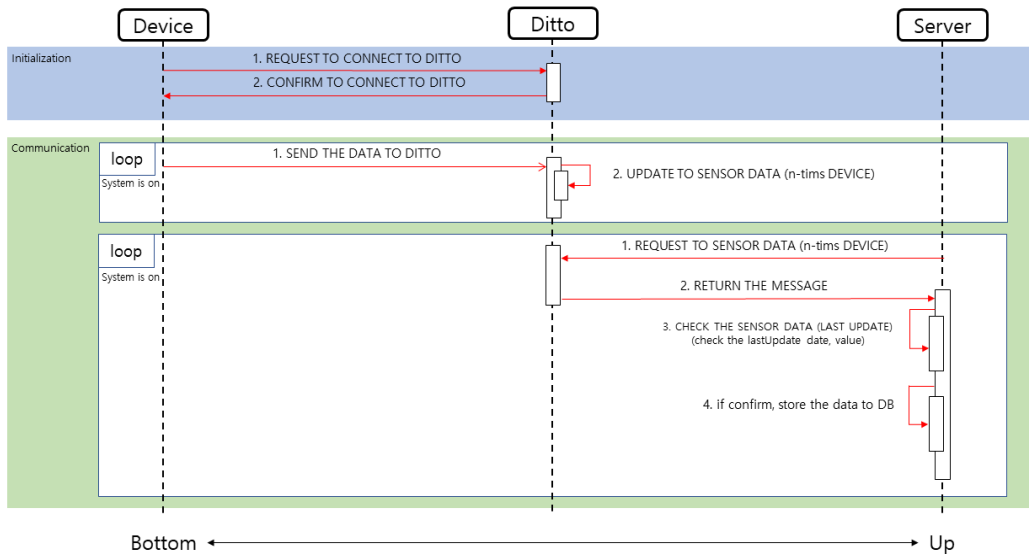


그림 4. 환경 데이터를 주고 받는 시퀀스 다이어그램
 Fig. 4. Sequence diagram for sending and receiving environmental data

버에 저장된 가상화된 객체들을 요청하고, 반환이 서버를 통해 클라이언트로 이루어지면 해당 객체를 바탕으로 가상 환경 내 배치 후 사전에 렌더링 된 3D 이미지를 WebGL을 통해 실시간으로 렌더링이 이루어지게 된다. 관련하여 렌더링 절차 등은 2-2장에 상세하게 기술하였다.

둘째 환경데이터에 대한 송수신 절차로서, IoT를 통해 실제 온실에서 환경 데이터를 수집하고, 수집된 데이터를 서버를 통해 전달하는 절차로서 관련 시퀀스 다이어그램은 아래와 같다(그림 4).

스마트팜 트윈 서버를 통해 사전에 정의된 시간에 온도, 습도 및 CO2 등 환경 데이터값을 JSON 기반으로 GET 요청을 통해 받아온다. 이때, 서버는 REST API의 설계 규칙에 맞춰서 동작하도록 설계하였으며, 서버에서 받은 데이터를 저장하고 WebSocket을 통해 Client와 통신을 항상 유지하며 실시간으로 환경 데이터를 조회할 수 있도록 환경 데이터를 보내준다. 특히, 게이트웨이의 경우에는 디지털 트윈 하드웨어 오픈 프레임워크로 범용으로 사용되는 플랫폼으로, 센서에서 받은 데이터를 상시 최신 정보로 갱신하는 역할을 담당하므로, 서버에서 요청 시 최신 갱신된 센서 데이터를 Ditto를 통해 수신받으며, 이를 서버에 적재한 후 클라이언트를 통해 웹 애플리케이션으로 실제와 유사하게 표현하였다.

실제 살아있는 작물을 재배하고 있는 식물공장에 실제 적용할 수 있도록 무결성과 안전성이 보장된 통신 인터페이스를 설계하기 위하여 AUTOSAR 플랫폼을 참고하여 스마트팜 디지털 트윈 인터페이스를 설계하였다. 시스템을 통해 각 모듈 간 연결이 되고 초기화될 시 구현을 그림 5와 같이, 특정 이벤트 등에 의해 연결이 해제 혹은 지연될 경우의 상황은 그림 6과 같이 나타낼 수 있도록 구현하였다.

이때, 클라이언트는 게이트웨이 혹은 서버와 통신 과정에서 발생할 수 있는 오류 상황에 대한 조치 계획을 인터페이스로 수립하였다. 클라이언트는 주기적으로 게이트웨이와 통신을 주고받는다. 만약 IoT 기기에서 데이터가 정상적으로 게이트웨이로 전송되지 않을 시 절차는 그림 7과 같다. 디바이스는 정해진 재연결 횟수 동안은 지속해서 서버를 통해 통신을 시도하나, 그렇지 않을 시 통신에 문제가 있거나 기타 문제로 인해 데이터가 전송되지 않음을 별도 알림으로 푸시 처리한다.

또한, 디바이스가 게이트웨이인 Ditto와 통신 과정에서 오류가 발생할 수 있으며, 이때의 메시지 전송 절차는 그림 8과 같다. 이에 대한 세부 통신 절차는 아래와 같다.

첫째, 각 디바이스는 센서 데이터를 Ditto로 전송한다. 이때 Ditto를 통해 메시지가 수신되지 않을 경우, 즉 접속이 끊긴 것으로 판단될 경우 직전에 저장된 데이터를 1분에

```
{
  "definition": "org.example:virtualDevice:0.1.0",
  "attributes": {
    "manufacturer": "kth",
    "location": "Nowhere",
    "model": "virtual model"
  },
  "features": {
    "EnvSensor_0": {
      "definition": ["org.example:virtualDevice:0.1.0"],
      "properties": {
        "temperatureValue": 0,
        "humidityValue": 0,
        "CO2Value": 0,
        "lastUpdate": "",
        "samplingRate": 1,
        "prevData": []
      }
    }
  }
}
```

그림 5. 각 모듈 간 인터페이스 연결이 정상일 경우
Fig. 5. Interface connection between each module is normal

```
{
  "definition": "org.example:virtualDevice:0.1.0",
  "attributes": {
    "manufacturer": "kth",
    "location": "Nowhere",
    "model": "virtual model"
  },
  "features": {
    "EnvSensor_0": {
      "definition": ["org.example:virtualDevice:0.1.0"],
      "properties": {
        "temperatureValue": 0,
        "humidityValue": 0,
        "CO2Value": 0,
        "lastUpdate": "",
        "samplingRate": 1,
        "prevData": [
          {
            "temperatureValue": 26,
            "humidityValue": 80,
            "CO2Value": 1000,
            "lastUpdate": "2021-05-12 13:48:01.905377",
            "samplingRate": 1
          },
          {
            "temperatureValue": 26,
            "humidityValue": 80,
            "CO2Value": 1000,
            "lastUpdate": "2021-05-12 13:49:01.905377",
            "samplingRate": 1
          }
        ]
      }
    }
  }
}
```

그림 6. 각 모듈 간 인터페이스 연결이 해제되고 재 연결된 경우
Fig. 6. Interface connection between each module is reconnected

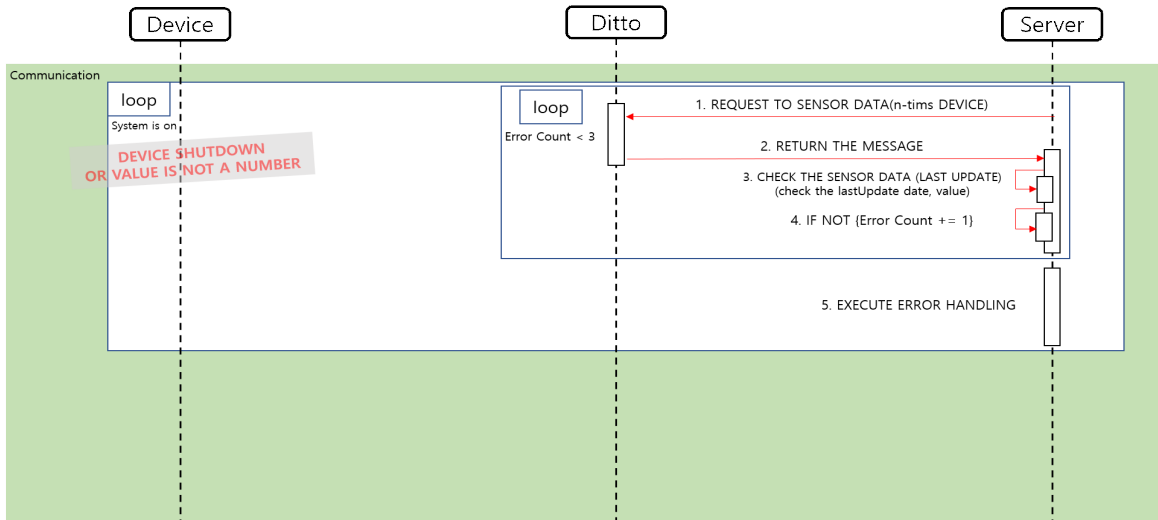


그림 7. IoT 기기와 서버 간 데이터 전송에 따른 오류 조치 과정
 Fig. 7. Error Handling process according to data transmission between IoT device and server

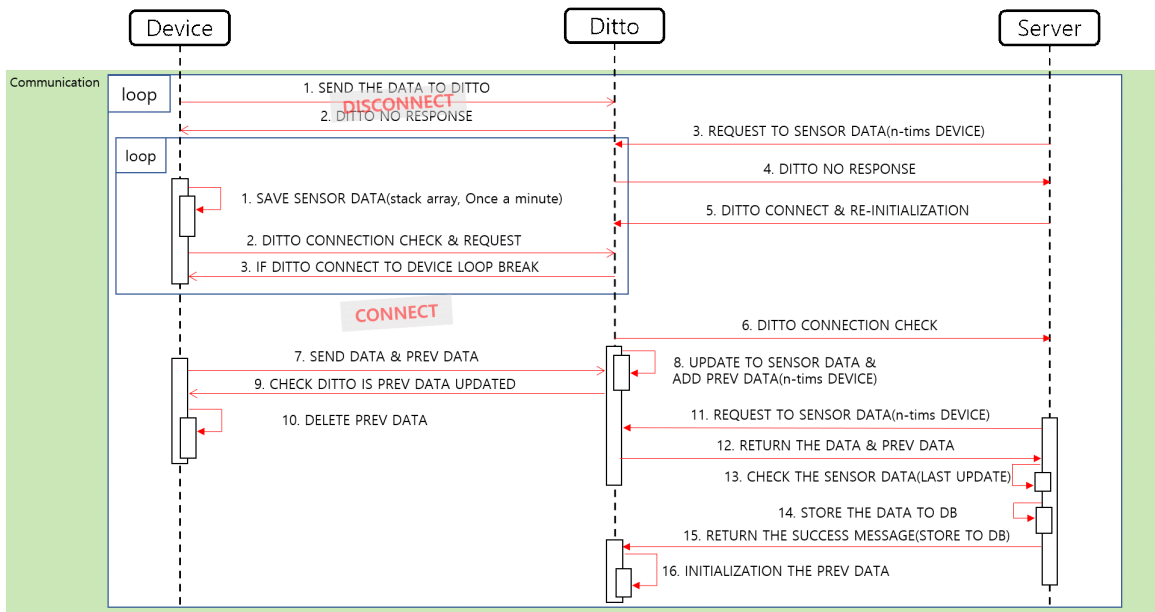


그림 8. IoT 기기와 Ditto Gateway 간 데이터 전송에 따른 오류 조치 과정
 Fig. 8. Error Handling process according to data transmission between IoT device and Ditto Gateway

한 번씩 저장이 안 되므로 서버를 통해 Ditto가 끊겼다는 정보를 전달하여 서버가 잘못된 데이터를 Ditto를 통해 수신받지 않도록 조치한다.

둘째, 앞서 기술한 첫 번째 절차를 통해 서버가 Ditto의 통신 문제를 인지한 상황에서 만약 Ditto가 다시 동작하여

디바이스를 통해 데이터를 수신받게 되면, 해당 정보를 서버를 통해 재전송한 후 Ditto에서 디바이스를 통해 적재된 최신 정보를 서버를 통해 반환한다. 이후 직전 적재된 정보는 갱신한 후 실시간으로 디바이스와 게이트웨이, 서버 간 통신을 진행한다.

2.2 스마트팜 트윈 클라이언트 : 가상화 객체의 이미지 형상화

본 프레임워크 내 스마트팜 트윈 클라이언트 모듈 중 스마트팜 정보에 대한 3D 이미지 기반으로 형상화를 담당하는 모듈 개발은 WebGL 라이브러리를 사용하였다. WebGL은 웹 기반의 그래픽 라이브러리로서, 자바스크립트 프로그래밍 언어를 통해 사용 가능하며 호환성이 있는 웹 브라우저를 통해 인터랙티브한 3D 그래픽 지원이 가능하다. 특히 별도 플러그인 사용 없이 3차원 형태의 컴퓨터 그래픽스 API를 제공하는 캔버스 HTML 요소의 일부로서 사용 가능하기 때문에 개발에 용이성을 제공한다.

본 논문에서 개발되는 디지털 트윈 프레임워크의 인터랙티브 요소 강화를 위해서는 실제와 동일한 정보를 가상환경에서도 제공이 되어야 하며, 이를 위해서는 각 식물공장에서 재배 작물에 대한 3D 렌더링을 진행하며, 이를 위해

아래와 같이 3D 이미지를 그래픽 작업하고 WebGL을 통해 이미지를 디지털 트윈 객체와 매핑하여 인터랙티브 요소를 가미하였다.

상기 그림(그림 9)과 같이 모델링된 이미지는 소프트웨어적으로 표현된 각 요소 객체와 WebGL을 통해 웹 애플리케이션을 통한 매핑을 수행하며, 이렇게 WebGL을 통해 디지털 트윈에서의 Unity를 이용한 빌드에서의 인터랙티브한 요인을 강조하였다.

본 논문에서는 식물공장에서의 작물 재배에 주로 사용되는 rack을 실제와 동일하게 그래픽 작업하였으며(그림 10), 이를 통해 최종적으로 식물공장과 동일한 시설과 환경을 아래 그림(그림 9, 10)과 같이 구현하였으며, WebGL을 통해 객체와 이미지 요소 간 매핑을 하였으며, 실제 식물공장에서 제공되는 데이터를 호출받아 웹을 통해 실시간으로 값을 처리하는 프로토타입 형태의 시스템을 개발하였다.



그림 9. 식물공장 적용 작물에 대한 3D 모델링
 Fig. 9. 3D modeling of plant applied crops for plant factory

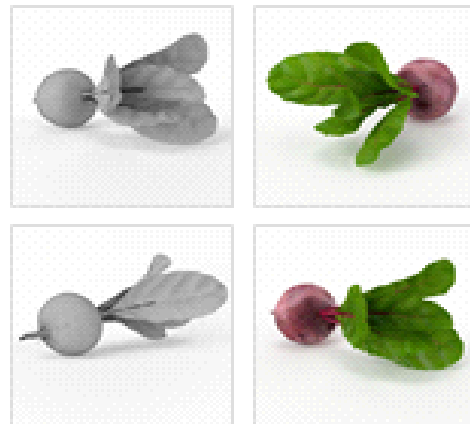


그림 10. WebGL을 통해 식물공장 내 Rack 모델링
 Fig. 10. Rack modeling in plant factory through WebGL

3. 스마트팜 트윈 게이트웨이

본 시스템의 프레임워크 중 “스마트팜 트윈 게이트웨이”는 식물공장 디지털 트윈 시스템에 연결되는 다수의 IoT 기기를 관리하는 역할로서, 현재 디지털 트윈에서 범용으로 사용되는 개방형 하드웨어 플랫폼인 “Eclipse Ditto” 플랫폼을 사용하여 개발하였다. Eclipse Ditto는 현실 세계에 있는 IoT 기기들을 모아 등록하고 관리할 수 있는 프레임워크로서, 다수 IoT 기기 간 연결 지원을 위하여 크게 5가지 프로토콜(HTTP, MQTT, CoAP, AMQP, custom)을 Eclipse Hono^[17]형태 모듈로 제공이 가능하여 디바이스 관리에 용이하다.

Eclipse Ditto는 IoT 기기와의 통신을 위해 앞서 설명한 5가지 프로토콜을 활용하며 다수 IoT 기기 간 제어 및 데이터 수집 등 프로세스를 추상화시켜 Client나 Server에서 API 요청을 통해 IoT 기기들을 쉽게 다룰 수 있게 한다. Eclipse Ditto는 현실 세계에서 연결된 IoT 기기를 Thing으로 표현하고, IoT 기기가 다룰 수 있는 부분을 features로 표현한다. 본 논문에서는 IoT 기기가 온도, 습도, CO2 등 측정된 환경정보를 별도 데이터베이스에 적재하고, 이를 토대로 각 IoT 기기를 정의하고 Eclipse Ditto에 등록하기 위해 아래와 같은 형식에 맞춰 디바이스를 등록 및 관리한다.

4. 스마트팜 트윈 서버

“스마트팜 트윈 서버”는 IoT Gateway로부터 수집된 데이터를 저장하는 기능을 갖추고 있다. 다수 디바이스 및 Ditto 하드웨어 플랫폼을 통해 수집된 다수 데이터들은 클라이언트에서 시각화 도구를 통해 사용자에게 소프트웨어로 표현된 가상화된 객체 단위로 표현된다. 본 논문에서 구현된 서버의 기본 아키텍처는 다수 디바이스에서 수집되는 데이터를 적재 및 관리하여 클라이언트로 적절하게 데이터 매핑 가능한 데이터베이스를 설계하였고, 이를 지원하기 위한 CRUD 로직 구현 기반의 Django로 구현하였다.

디지털 트윈을 구현하기 위해서는 가상으로 표현된 온실 내에서 어느 위치에 가상화된 소프트웨어 객체를 배치해야 할지 알려줘야 한다. 그래서 스마트팜의 경우 Rack의 좌표값을 가지고 있어야 하며 각 작물은 몇 번째 Rack에 몇 번

째 단에 있는지 좌표값을 가지고 있어야 한다. 또한, 작물이 가지고 있어야 할 속성값(작물의 종류, 성장 단계, 심긴 날짜 등)들도 DB에 포함되어야 한다. 상기 기술한 내용의 관리를 위해 설계된 데이터베이스는 Django에 내장되어 있으며, ORM을 통해 데이터베이스로 쉽게 접근이 가능한 파일 기반 데이터베이스인 SQLite로 설계하였다.

V. 시스템 구현 결과

본 논문은 식물공장 대상으로 디지털 트윈 시스템 구현을 위한 프레임워크를 설계하고 이를 프로토타입 형태로 개발하여 현실 세계, 즉 식물공장에서 수집되는 데이터가 가상환경으로 실시간 동기화하여 수집 및 가상환경 내 연계하여 데이터가 가시화되는지에 대하여 검증하였다. 이러한 시스템 설계 및 개발을 위하여 본 논문에서는 경기도 소재 식물농장에서 데이터 수집을 위한 실증 테스트를 진행하였으며, 주 데이터 수집 기간은 2020년 1월부터 2020년 12월까지 약 1여 년간의 데이터를 수집하였으며, 주로 수집한 데이터는 온도, 습도, CO2 등 환경데이터를 수집하였다. 수집에 사용된 IoT 디바이스는 범용 하드웨어 플랫폼인 라즈베리파이를 사용하였으며, 개발 언어는 C#, javascript를 사용하였으며 서버 개발 시 내장한 데이터베이스는 우분투 리눅스 18.04 기반에서 관계형 데이터베이스 중 파일기반 형태인 SQLite 데이터베이스로 사용하였다.

본 논문에서는 앞서 설명한 1여 년간의 데이터를 수집하고 이를 관리하였다. 해당 데이터는 Ditto를 통해 배포되고 약 1분씩 서버에서 요청에 따라 데이터를 서버로 전달하고 클라이언트에 의해 가시화하여 실시간 동기화되는 디지털 트윈 시스템을 개발하였다.

본 연구에서는 특히 식물공장에 사용 가능한 디지털 트윈 프레임워크를 설계하였으며, 디지털 트윈을 위해 사전에 렌더링된 가상 이미지를 가상화 객체에 실시간 좌표에 따라 연동시켜 인터랙티브한 시스템 개발을 진행하였다. 데이터를 실시간 수집하여 클라이언트를 통해 웹으로 표현한 디지털 트윈에 대한 시스템 화면은 아래 그림과 같다(그림 11). 또한 디지털 트윈 내의 수치로 표현될 수 있는 요소(온, 습도, CO2)들을 그래프로 표현하는 기능을 추가하였다(그림 12).

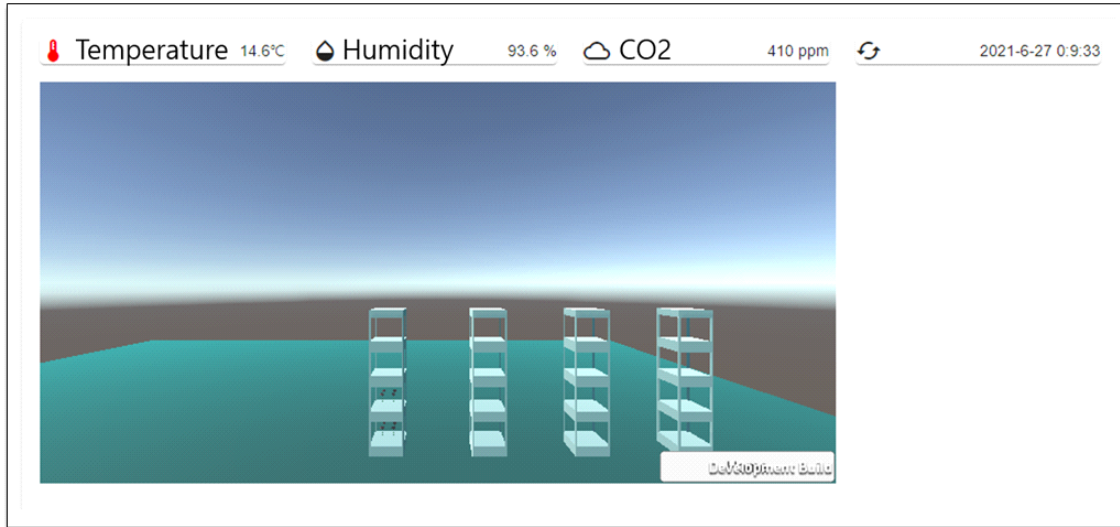


그림 11. WebGL을 통해 구현된 식물공장 가상환경
 Fig. 11. Plant factory virtual environment implemented through WebGL



그림 12. 현실세계 식물공장에서 수집된 데이터에 대한 가시화 그래프 조회 화면
 Fig. 12. Visualization graph inquiry screen for data collected in real world plant factory

VI. 결론 및 향후 연구계획

본 논문은 스마트팜 디지털 트윈을 구현할 때 실제 세계와 연결하기 전 가상공간 및 가상화된 소프트웨어 객체를

Unity로 구현하고 접근이 간편하도록 웹 플랫폼에 배포하는 단계까지 구현하였다. 특히 스마트팜 디지털 트윈 시스템 개발에 필요한 프레임워크를 연구하였으며, 프레임워크 내 각 모듈 간 통신에 필요한 인터페이스를 설계 및 개발하

고, 경기도 소재 식물공장 데이터를 라즈베리 파이 기반으로 데이터를 수집 및 객체에 연동하여 실제-가상환경 간 데이터를 실시간 동기화시켰다. 또한, 인터랙티브한 형태의 식물공장 디지털 트윈 시스템을 개발하고 이를 사용자가 조회할 수 있도록 프레임워크 내 클라이언트 모듈로 관리되는 웹 애플리케이션 시스템을 개발하였다.

향후 연구로는 디지털 트윈 프레임워크 고도화 방안에 관하여 연구를 추진할 계획이며, 특히 서버 구현에 사용된 Django의 비동기적 한계를 극복하기 위하여 Node.js 기반으로 서버를 구현할 계획이며, IoT 게이트웨이로 사용된 Eclipse Ditto에 대한 기능 고도화와 함께 추가로 제공되는 Eclipse Hono를 적용하여 시스템을 개발 및 성능을 검증할 계획이다. 그리고 기본적인 환경데이터 이외에도 영상데이터(RGB, 초분광 등), 제어데이터에 대한 실시간 통신을 통해 가상환경 내 객체에 연계될 수 있도록 시스템을 고도화하고 이를 실증을 통해 검증할 계획이다.

참 고 문 헌 (References)

[1] G. S. Martinez, S. Sierla, T. Karhela and V. Vyatkin, "Automatic Generation of a Simulation-Based Digital Twin of an Industrial Process Plant," IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2018, pp. 3084-3089,

[2] Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2020
 [3] Eclipse Ditto, <http://eclipse.org/ditto>.
 [4] WASTON IoT, <https://www.ibm.com/cloud/watson-iot-platform>
 [5] Predix Architecture, <https://www.predix.com/sites/default/files/gepredix-architecture-r092615.pdf>.
 [6] GE Predix, <https://www.ge.com/digital/predix-platform-foundation-digital-industrial-applications>.
 [7] H. D. Morris, S. Ellis, J. Feblowitz, K. Knickle and M. Torchia, "A software platform for operational technology innovation", International Data
 [8] Jun-Sung, Bang, Digital Twin Technology Trend for Realization of Smart City / KICS(Information & Communication Magazine), 37(5), 2020.04. page 11-19
 [9] Sang-Hee Shin, Digital Twin Technology Trend and Vision / KRIHS, 2021.04, page 6-12
 [10] Yee-Ji Jang, "The core of digital transformation, digital twin-manufacturing and city-centered" ICT SPOT Issue, 2019. 12.
 [11] Kwang-Do, Lee, Local Government Digital Twin Application and Implications: Jeonju City Case / KRIHS, 2021.04 page 31-36
 [12] Un-Yong Kim, Digital twin concept and Technical issues, OSIA, 2021.3 page 4-9.
 [13] Duk-Young Jeong, The technical definition of the digital twin and the detailed development 5 level model, OSIA, 2021.3 page 10-15.
 [14] Unity, [ko.wikipedia.org/wiki/Unity_\(game_engine\)](http://ko.wikipedia.org/wiki/Unity_(game_engine))
 [15] WebGL, <http://www.bit-tech.net/news/bits/2009/08/05/webgl-brings-3d-acceleration-to-browsers/1>
 [16] noh at, el, Communication protocol between smart farm greenhouse integrated controller and sensor-Actuator integrated node (TTAK.KO-10.0943), 2016.12.27.
 [17] Eclipse HONO, <https://www.eclipse.org/hono/>

저 자 소 개



고 태 환

- 2019년 : 전북대학교 전자공학부 학사
- 2021년 ~ 현재 : 한국전자기술연구원 IT응용연구센터
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-1742-5035>
- 주관심분야 : 스마트팜 IoT 기기, 스마트팜 디지털 트윈



노 석 봉

- 2014년 : 전북대학교 무역학 학사
- 2020년 ~ 현재 : 전북대학교 경영학과 석사과정
- 2018년 ~ 현재 : 한국전자기술연구원 IT응용연구센터
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-9744-9079>
- 주관심분야 : 생산, 경영정보, ERP, 시스템 설계, 데이터 분석, 데이터 처리, 스마트팜, 농생명

저 자 소 개

노 동 희



- 2006년 : 금오공과대학교 전자공학 학사
- 2013년 : 금오공과대학교 대학원 IT융복합공학과 석사
- 2015년 ~ 2018년 : 한국전자통신연구원 연구원
- 2018년 : 한국전자기술연구원 IT응용연구센터 선임연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-6931-2377>
- 주관심분야 : 스마트팜, 빅데이터, 디지털 트윈, 채널 코딩, 무선 센서 네트워크 시스템

최 주 환



- 1991년 : 전북대학교 물리학 학사
- 1996년 : Univ. of Mass, Lowell 물리학 석사
- 2000년 : Univ. of Mass, Lowell 물리학 박사
- 2005년 : 한국전자기술연구원 IT응용연구센터장
- 농생명 SW융합클러스터 사업단장
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4588-1046>
- 주관심분야 : 스마트팜 빅데이터, 스마트팜 IoT 기기, 스마트팜 디지털 트윈

임 태 범



- 1995년 : 서강대학교 물리학과 학사
- 1997년 : 서강대학교 전자계산학과 석사
- 2012년 : 건국대학교 컴퓨터공학과 박사
- 1997년 : 대우전자 전략기술연구소 주임연구원
- 2002년 : 전자부품연구원 스마트미디어연구센터장
- 2017년 : 과기정통부/정보통신기획평가원 디바이스PM
- 2019년 : 한국전자기술연구원 스마트네트워크연구센터장
- 2018년 ~ 현재 : NIA 디지털전환사업 자문/평가위원
- 2019년 ~ 현재 : 과기정통부 과기혁신본부 소부장 자문위원
- 2018년 ~ 현재 : 한국방송 미디어공학회 이사
- 2021년 ~ 현재 : 전라북도 4차산업혁명 민간위원장
- 2020년 ~ 현재 : 건국대학교 겸임교수
- 2021년 ~ 현재 : 한국전자기술연구원 전북지역본부장
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-1173-6606>
- 주관심분야 : 홈네트워크 솔루션, IoT, 클라우드 방송, DTV방송, 맞춤형방송, 멀티미디어 검색, IPTV, 디지털 트윈, 자율주행