

온실 내 작물 생육환경 모니터링용 이동식 로봇 플랫폼 및 디지털 쉐도우 프레임워크 개발

전준혁¹, 김성민^{2,3*}

¹전북대학교 농업기계공학과, ²전북대학교 생물산업기계공학과, ³전북대학교 농업기계ICT융합연구소

Development of a Mobile Robot Platform and a Digital Shadow Framework for Greenhouse Plant Growth Environment Monitoring

Jun Hyuk Jeon¹, Seong Min Kim^{2,3*}

¹Department of Agricultural Machinery Engineering, Graduate School, Jeonbuk National University

²Department of Bioindustrial Machinery Engineering, Jeonbuk National University

³Institute for Agricultural Machinery & ICT Convergence, Jeonbuk National University

요약 지구 온난화로 인한 기후변화에 대응하고, 온실에서 최적화된 작물 생육환경 제공을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문의 목적은 온실 작물 생육환경을 모니터링하는 이동식 로봇 플랫폼을 제안하고, 실시간 3D 모델 시뮬레이션 기반의 디지털 쉐도우 프레임워크를 구축하고 검증하는 것이다. 온습도, 조도, 이산화탄소 등의 작물 생육환경을 측정할 수 있는 센서 모듈을 장착한 로봇 플랫폼은 Arduino 기반 컨트롤러 및 RF 송수신기를 통해 제어하였다. 로봇 플랫폼을 프레임워크에 적용하기 위해 실작업 로봇의 1/4 정도 크기인 상용 모델을 기반으로 제작하였다. Simulink를 활용하여 프레임워크를 개발하고 ThingSpeak IoT 서버를 통해 데이터 통신 기반을 구축하였다. 개발된 프레임워크를 검증하고 분석한 결과, 실시간으로 온실의 작물 생육환경과 로봇 작동 정보를 7개의 채널로 분리하여 실시간으로 수집, 분석, 게시할 수 있었으며, 카메라 센서를 통해 원격으로 온실 상황을 확인 및 조작할 수 있었다. 서버에서 받은 데이터를 기반으로 3D 모델 시뮬레이션을 진행하여 물리적 및 디지털 모델을 동시에 제어할 수 있었으며 이때 최소 업데이트 시간을 포함한 지연시간은 평균 4초로 나타났다. 본 연구를 통해 디지털 쉐도우 기술의 농업적 활용에 대한 기초 연구를 제안하였고 향후 추가 연구를 통해 디지털 트윈 기술로 발전시킬 수 있다.

Abstract Research is actively underway to respond to climate change caused by global warming and to provide an optimized plant growth environment in greenhouses. The objectives of the study is to develop a mobile robot platform that monitors the environment, and to establish and to verify a digital shadow framework based on real-time 3D model simulation. The main body of the robot platform, equipped with a sensor module that can measure the growing environment of plants such as temperature, humidity, illuminance, and carbon dioxide, could be controlled by an Arduino-based controller and steered via an RF transceiver. In order to use the platform as a framework, it was built based on a commercial model that is about 1/4 scale of an actual working robot. The framework was developed using Simulink with the data communication established through ThingSpeak IoT server. As a result of verifying and analyzing the developed framework, it was possible to collect, analyze, and publish information of greenhouse environment and robot operation in real time by separated seven channels, and remotely to check the environment through a vision sensor. Simulink 3D model simulations were performed based on data from the IoT server, allowing the digital model to be controlled simultaneously with the physical model, with an average latency of 4 seconds, including minimum update time. In this study, we propose a basic study on the agricultural use of digital shadow technology, which can be developed into true digital twin technology through further researches.

Keywords : Mobile Robot Platform, Digital Shadow, Framework, Greenhouse Environment Monitoring, Simulation

*Corresponding Author : Seong Min Kim(Jeonbuk National University)

email: smkim@jbnu.ac.kr

Received November 22, 2023

Revised January 25, 2024

Accepted February 6, 2024

Published February 29, 2024

1. 서론

1.1 연구 배경

최근 지구 온난화로 인하여 전 세계의 기후변화에 의하여 안정적인 식량 공급을 위한 문제가 대두되고 있다. 농업은 작물의 생육환경이 기후변화에 직접적인 영향을 받아 생산량과 직결되는 문제를 가지고 있다. 이러한 기후변화에 대응하기 위해 전 세계적으로 온실을 활용하여 작물 재배에 최적화된 생육환경을 제공하여 안정적으로 농산물을 생산하고 있다.

온실은 작물 재배에 최적화된 환경을 제공하는 작물 친화형 생육환경을 제공하는 기술이다. 최근 4차 산업혁명 기술로 대두되는 정보통신기술, 사물인터넷, 빅 데이터, 원거리 센서 네트워크, 로봇과 같은 기술들의 발달과 보급에 따라 온실 스마트 팜 기술의 도입으로 농산물 생산 방식이 디지털화 및 자동화가 활발히 진행되고 있다[1].

기존 온실에서는 작물 생육환경을 모니터링 하기 위해 고정식 환경계측 센서를 주로 활용하고 있으나 온실 면적에 따른 수많은 센서 노드의 설치 및 센서별로 제공하는 수많은 데이터는 후처리 분석에 있어 작업 부하를 가질 수 있으며 해충이나 온실 내 스트레스와 같은 농업 이상 현상에 즉각적으로 대응할 수 없다. 이때, 농업용 온실에 이동식 생육환경 모니터링 로봇을 활용할 경우 고정식 센서 설치 비용 감소와 많은 데이터 발생으로 인한 데이터 처리 작업 부하 증가를 줄일 수 있고 온실 내 특이사항 및 이상 현상 감지에도 효과적으로 대응할 수 있다[2].

농업용 이동식 로봇은 앞서 언급한 고정식 센서의 단점을 극복할 수 있으며, 농작업자의 온실 내 작물환경 스트레스에 대해서도 대응할 수 있다. 또한, 센서를 장착한 농업 이동식 로봇은 온실 자동화에 있어 환경 모니터링 정보를 제공할 뿐만 아니라 온실 내 이상 현상에 대한 즉각적인 피드백을 적용 및 대응할 수 있으며 더 나아가 농산물 및 농자재 운송 등 온실 내 농작업자의 역할을 대체할 수 있다.

Guo 등은 고정식 센서의 성능을 검증하기 위하여 고정식 센서와 이동식 로봇을 조합한 형태의 온실관리시스템을 제안하였다. 제안된 프레임워크에서 이동식 로봇은 고정식 센서의 단점을 극복하며 더 나아가 이상 현상에 더 효율적인 대응을 위하여 디지털 트윈의 전신 기술인 사이버 물리 시스템을 접목해 위기상황에서 문제점을 파악하고 대응을 위한 분석을 할 수 있도록 하였다[2]. 따라서 타 산업 분야의 자동화 기술을 접목할 경우 더욱 효

율적인 형태로서의 농업용 로봇을 구성할 수 있다.

1.2 연구사

1.2.1 디지털 트윈 정의 및 타 산업 분야 활용

최근 제조업에 사용되는 자동화 기술로는 물리 개체를 디지털화시키는 사이버 물리 시스템(Cyber Physical System, CPS) 기반의 디지털 트윈(Digital Twin)기술을 도입하고 있다. 디지털 트윈 기술이란 Greives 및 Vickers가 제안한 개념으로, 물리 환경과 자산을 디지털화하여 시뮬레이션을 통해 문제를 진단, 예측하는 자동화 기술이다. 이 기술은 주로 공장의 제품 제조 과정의 최적화 및 부품 수명주기 예측에 활용된다[3]. 디지털 트윈 기술은 Kritzinger 등에 의하면 3가지 단계로 세분화되며 디지털 모델(Digital Model), 디지털 섀도우(Digital Shadow), 디지털 트윈 단계로 나뉜다. 직접 양방향 상호작용을 해야하는 디지털 모델 단계, 자동화된 단방향 관계인 디지털 섀도우, 자동화된 양방향 네트워크인 디지털 트윈으로서 설명할 수 있다[4]. 세부적인 단계 및 특징을 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

디지털 섀도우는 디지털 트윈으로 가는 필수적인 단계이자 중간단계라고 할 수 있다. 디지털 섀도우의 특징은 가상 모델, 단방향 자동화된 데이터 흐름, 현실 개체의 모델 반영이다. 전 단계인 물리적 데이터의 디지털화뿐만 아니라 이를 기반으로 한 가상 모델이 제작되어 시각적으로 확인할 수 있다. 또한, 이 모델은 자동화된 단방향 데이터 수신으로 인해 가상 모델이 영향을 받아 실제 모델에서 발생한 문제나 상태를 가상 모델에 반영할 수 있다.

제조업에서는 디지털 트윈 기술이 크게 두 가지 형태로써 사용 및 연구되고 있는데, 가상화 공장과 로봇 및 관리이다. 가상화 공장의 경우, Yildiz 등은 디지털 기반의 가상공장을 모델링 및 구축하고 최적화에 효과적이라 하였으며 Vachálek 등은 시뮬레이션 기반 생산설비를 구축하여 위험 감지 및 대처에 효과적이라고 밝힌 바 있다[5,6]. General Electric 社の 경우, 풍력 발전단지를 디지털화 및 가상화시켜 실시간 발전단지 관리 특허를 소유하고 있다[7].

로봇이나 관리의 자동화의 경우, Pawel 등이 공장 내 이동식 로봇에 관한 디지털 트윈을 구축하고, 경로 추종을 최적화하였으며 Venkatesan 등은 전기자동차의 모터의 수명을 예측한 바 있다[8,9].

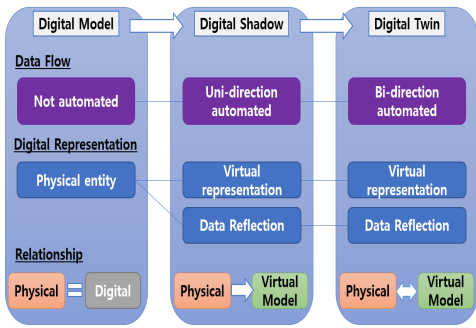


Fig. 1. Development Stages and Characteristics of Digital Twin.

1.2.2 농업 분야에서의 디지털 쉐도우 기술 활용

농업에서의 디지털 트윈의 대표적인 예는 온실 스마트 팜의 적용이다. 이에 관련된 연구가 활발하게 진행되고 있으며 Ariesen-Verschuur 등에 의하면 모니터링 및 제어의 목적으로서 48%가 사용되고 대부분 디지털 트윈 단계에 접어들지 못하였다고 서술하였다. Purcell 및 Neubauer은 일련의 기술들을 농업에 적용할 경우 작물 생육 및 생산량 내외부 요인을 파악하고 생산 및 공급을 효율화시킬 수 있으며, 자동화를 효과적으로 진행할 수 있다고 서술하였다[10,11].

온실 스마트 팜의 경우 Zhou 등이 저가형 온실 모니터링 시스템을 디지털로써 구축한 바 있으나, 고정식 센서를 활용하였고, Stark et al.은 디지털 모델을 활용하여 살충제의 정밀 살포를 진행한 바 있다[12,13]. Guo 등은 원거리 센서 네트워크를 활용하여 로봇과 고정식 센서를 모두 채용하고 디지털 쉐도우화까지 진행하였으나, 대규모 감지작업의 제한이 있다고 하였다[2].

로봇의 디지털 쉐도우 접근은 Agripointella 社가 ROS를 활용하여 Robotti를 가상화 시키고 디지털 트윈에 도달하였으나 안정성과 비동기화가 잦다고 서술한 바 있으며, Durmus 등은 ROS를 통하여 환경 매개변수를 측정하는 온실용 로봇을 제안하였으나 3D모델링과 같은 가상 모델 적 접근은 없었다[14,15].

국내에서의 디지털 쉐도우 활용의 경우, Jo 등이 축사에 디지털 쉐도우를 적용해 시뮬레이션을 통해 환기 팬의 수명과 주기를 파악하고, 질병의 흐름을 예측한 바 있다[16]. 로봇의 경우 국내에서는 농업용 로봇에 대한 디지털 트윈 및 쉐도우 연구가 부족한 실정이나, Han 등이 LiDAR, IMU등의 센서를 활용하여 이동식 자율주행 로봇에 대한 디지털 트윈 모델을 개발한 바 있어 점차 연구가 진행될 전망이다[17].

1.3 연구 목적

본 연구의 목적은 온실 내 작물 생육환경 모니터링용 이동식 로봇 플랫폼을 개발하고, 개발된 로봇의 가상 모델 기반 디지털 쉐도우 프레임워크를 구축하고 검증하는 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

2.1.1 하드웨어

온실 내 작물 생육환경을 모니터링하기 위한 이동식 로봇 플랫폼 차체는 상용 원격 조종 모델(Unimog 406 U900, TAMIYA, Japan)을 활용하였으며 상세 제원은 Table 1에 정리하였고 기본 사양으로 정해지지 않은 회전 반경(R_{turn})과 최고 속력(V_{max})은 Eq. (1)과 (2)로 추정치를 계산하였다.

$$R_{turn} = \frac{L}{\tan(\theta)} \quad (1)$$

Where, R_{turn} denotes turning radius(mm), L denotes wheel base distance(mm), θ denotes steering angle in degree.

$$V_{max} = \frac{RPM_{max} \times G \times \pi \times D}{60000} \quad (2)$$

Where, V_{max} denotes maximum speed of robot platform(m/s), RPM_{max} denotes maximum revolution per a minute of motor, G denotes gear ratio, D denotes tire diameter(mm).

Table 1. Specifications of robot platform

Category	Specification
Model Dimension	236 x 220.5 x 415 mm
Tire Width	57 mm
Tire Diameter	125 mm
Wheel Base	242 mm
Max Speed	4.15 km/h
Move Speed	2.76 km/h (80%)
Steering Angle	$\pm 45.8^\circ$
Turning Radius	242 mm

온실 내 환경 모니터링 센서 모듈은 온습도 센서(DHT22, Aosong Electornics, China), 조도 센서(BH1750,

ROHM, Japan), CO₂ 센서(MG-811, DFRobot, China)가 장착되었다. 로봇 차체 제어를 위해 라디오 주파수 수신기 및 송신기(R214GF-e, Futaba, Japan), 비전 센서(ESP32-CAM, DFRobot, China), Wi-Fi 모듈(ESP8266-01, Espressif Systems, China)이 사용되었으며, 센서 수신 및 차체 제어를 위해 소형 마이크로컨트롤러(Arduino Mega 2560, Arduino, Italy)가 사용되었다. 차체의 이동 및 방향 제어를 위한 DC 모터(RS540SH, Mabuchi, Japan)와 서보모터(PGS-CLE, Sanwa, Japan) 및 모터 컨트롤러(TBLE-02 S, TAMIYA, Japan)가 사용되었다. 시스템에 배터리 공급과 분배를 위해 DC 변환기(LM2596, Texas Instruments, USA)와 12 V(BT186, Coms, China) 및 7.2 V(TKC 5000 mAh NIMH, TAMIYA, Japan)의 배터리가 사용되었다. 각 센서들은 컨트롤러의 저전력환경에서 작동하기 위하여 3.3~6 V 사이의 저전력 센서들이 사용되었으며, DC 모터와 서보모터는 차체의 원활한 제어를 위해 7.2 V 배터리 환경에서 활용될 수 있는 모델이 사용되었다. 본 연구에 사용된 부품의 상세한 제원은 다음 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Specifications of devices of robot platform

Category	Device	Specification
Controller	MCU	Operating Voltage: 5 ~ 24 V Digital Pins: 54 (15 PWMs) Analog Pins: 16 Clock Speed: 16 MHz
	Camera board	Memory: 32 Mbit SPI Flash RAM: 520 KB + 4 M PSRAM Network: Bluetooth, Wi-Fi 802.11 b/g/n/e/i
Sensor	Temperature Humidity	Operating Voltage: 3.3 ~ 6 V Temperature Range: -40 ~ 80 ± 0.5°C Humidity Range: 0 ~ 100 ±2%
	Light	Operating Voltage: 3 ~ 5 V Sensor Range: 1-65,535 lux ± 20%
	CO ₂	Operating Voltage: 6 V Sensor Range: 350 ~ 10000ppm
	Voltage Sensor	Range: 0.025 ~ 25 ±0.005 V
	RF Receiver	Operating Voltage: 3 ~ 12 V Clock Speed: 2.4 GHz Range: up to 70 m
	Vision	Resolution: 1600*1200 @15 FPS Output: RGB data, JPEG Clock Speed: 2412 ~ 2484 MHz
Actuator	DC-DC Converter	Input Voltage: 4.5 ~ 60 V Output Voltage: 3 ~ 35V
	Servo Motor	Operating Voltage: 6 ~ 7.4 V Max Speed: 0.09 s/60° Max Torque: 12.8 kg · cm

	Motor Controller	Operating Voltage: 6.6 ~ 7.2 V Max current: 60 A
	DC Motor	Max Speed: 17500 rpm Max Torque: 31.8 mN · m
Others	Battery	7.2V Ni-MH Battery 12V 3A 18650 Li-ion Battery
	Wi-Fi Module	Operating Voltage: 3.3V Memory: 8 Mbit QSPI flash Wi-Fi: 2.4 GHz b/g/n

2.1.2 소프트웨어

작물 생육환경 모니터링용 로봇 플랫폼 차체의 제어를 위한 프로그램으로 아두이노 개발환경 프로그램(Arduino IDE 1.8.13, Arduino, Italy)을 활용하여 차체의 제어 및 센서의 수신을 진행하였다. Arduino IDE는 오픈소스 하드웨어 플랫폼으로서 다양한 센서를 이용한 시스템을 구성하거나, 모터 등의 구동기 시스템을 구성하는데 많은 정보를 제공한다.

차체의 모델링을 통한 디지털 슈도우 프레임워크를 구현하기 위해 상용 프로그램(MATLAB & Simulink R2022a, Mathworks, USA)을 사용하였다. Simulink는 블록 형태의 코딩을 활용함으로써 시스템을 한눈에 확인할 수 있으며, Simscape 툴박스를 통해 Joint 및 모터 등의 전기적 신호 블록을 활용하여 로봇의 구조 및 신호를 확인하며 설계를 진행할 수 있다.

3D 모델링은 상용 프로그램(Inventor Professional 2021, Autodesk co., USA)을 활용하여 Simscape에서 구현하지 못하는 세부적인 부품에 대한 모델링을 진행하였으며, Joint 등의 조립품을 Simulink로 추출할 수 있는 기능이 있어 로봇의 구조에 대한 정보를 우선으로 정의할 수 있었다.

IoT의 발전 및 보급으로 인해 원격 센서 네트워크(Wireless Sensor Network)가 발전된 현재의 기술은 Wi-Fi, RFID, Thread, ZigBee, LoRa 등의 형태로서 WSN을 구축하는데 센서 노드를 구현하기 위하여 ZigBee 및 LoRa가 많이 사용되고 있다. 그러나, 이러한 통신 형태는 소수의 개별적 시스템의 감시에 이점이 있는 데 반해, 노트북과 같은 서버 개념의 장비가 추가로 필요하다. 본 연구에서는 시스템의 전반적인 부분을 제어할 수 있도록 Wi-Fi를 통하여 서버에 저장하고, 저장된 데이터를 불러오는 방식으로 전체 시스템을 감시하기 위하여 IoT 서버(ThingSpeak IoT Server, Mathworks, USA)를 활용하였다. ThingSpeak 서버는 Mathworks에서 제공하는 IoT 서버로, 센서 장비별 별개의 채널을 구성하고, 센서별 필드를 다수 제공할 수 있어 통합 시스템 관리에 강점을 가진다.

2.2 연구 방법

2.2.1 온실 환경 모니터링용 이동식 로봇 개발

2.2.1.1 이동식 로봇 차체 개발

이동식 로봇 플랫폼의 하드웨어 구조는 Fig. 2에서 확인할 수 있으며 크게 센서부, 제어부, 구동부 등 3개 부분으로 나눌 수 있다.

센서부에서는 온도, 습도, CO₂, 조도 등의 작물 생육환경 데이터를 측정할 수 있으며, 별도의 카메라 보드를 통하여 컬러 영상 데이터를 수신하여 IoT 서버로 데이터를 전송한다. 제어부에서는 로봇 차체 제어를 위하여 차체 내의 배터리 용량을 관측할 수 있는 전압 센서와 RF 신호로 받아들인 PWM 신호를 처리한다. 또한, Wi-Fi 모듈을 설치하여 컨트롤러로부터 받아들인 모든 센서의 값을 통합하고 최적화하여 8개의 필드로 정리하고 IoT 서버로 전송한다. 구동부에서는 모터 컨트롤러를 통한 로봇 플랫폼 차체의 속도 및 조향을 제어한다.

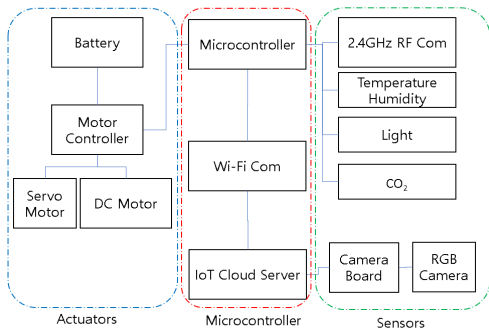


Fig. 2. Hardware Configuration of Mobile Robot Platform.

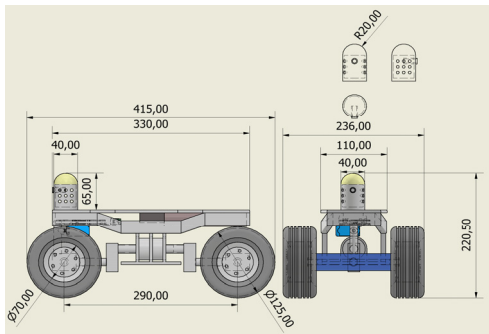


Fig. 3. Detailed Drawing of Mobile Robot System.

최근 농업용 온실에서 실질적으로 사용되는 작업용

로봇은 레일 형태로 움직이며, 작물의 크기를 고려하여 다양한 크기의 로봇을 개발 및 적용하고 있으나 평균적으로는 온실 방제기 로봇 기준으로 작물 간 간격을 고려하여 1000 x 600 x 1500 mm의 형태를 가진다. Fig. 3은 본 연구에서 디지털 쉐도우를 적용하기 위한 목적으로 대략 농작업 로봇 크기의 1/4 정도인 415 x 236 x 220 mm 규모의 이동식 로봇 플랫폼 세부 설계도이다.

크기를 바탕으로 작성한 3D 모델은 Fig. 4에 나타냈다. 이동식 작물 생육환경 모니터링 로봇 플랫폼은 전면부에 원통 형태의 센서 모듈이 위치하여 온도, 조도, 이산화탄소 센서들과 Wi-Fi 모듈을 탑재한다. 차체의 중앙에 배터리와 컨트롤러, RF 송수신기가 배치된다. 각 바퀴는 중앙 하단부에 있는 DC 모터로부터 유니버설 조인트를 통해 동력이 전달되고, 전면부에 있는 서보모터를 통해 전면 바퀴를 조향한다.

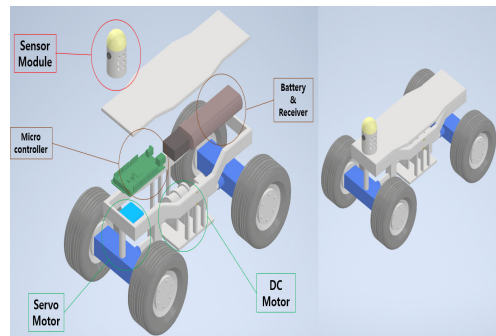


Fig. 4. 3D Model of Mobile Robot Platform.

2.2.1.2 로봇 센서 모듈 회로도 및 신호 흐름

컨트롤러는 Wi-Fi 모듈과 온실 작물 생육환경을 측정하기 위한 센서 모듈을 제어하며 Wi-Fi 환경을 통해 IoT 서버로 데이터를 전송한다. 로봇 플랫폼은 센서의 전압과 모터의 구동 전압을 위하여 외부 배터리를 사용하며, Fig. 5는 센서 모듈과 로봇 시스템의 연결에 대한 회로도이다.

로봇 플랫폼은 두 개의 배터리를 사용하였다. 구동모터와 모터 컨트롤러, 서보모터에 7.2 V의 배터리로전원을 공급하였고, 12V의 배터리를 이용하여 작물생육 환경 모니터링 센서들과 Wi-Fi 모듈, 컨트롤러에 대한 전원을 공급하였다. 센서들의 작동 전압값을 고려하여 DC-DC 컨버터를 이용하여 12 V를 각각 5, 6 V로 전압을 낮춰 공급하였다.

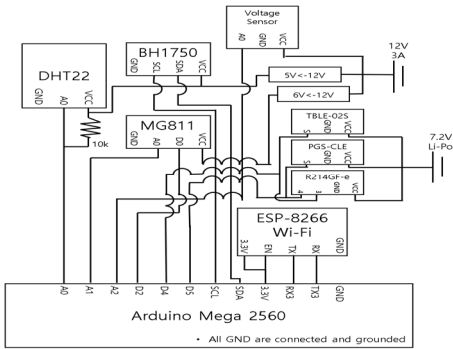


Fig. 5. Circuit Diagram of Robot Control Part.

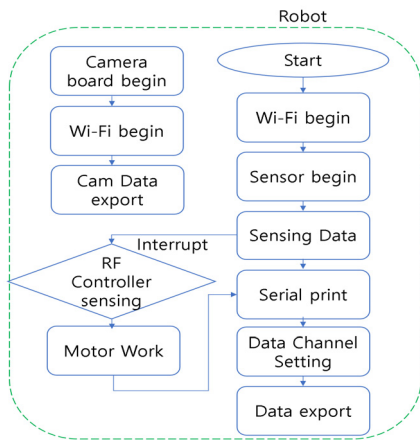


Fig. 6. Signal Flow Chart of Robot System.

본 연구에서의 로봇의 역할은 3D 모델을 구동할 정보와 온실에 대한 정보를 송신하는 것이며 이에 대한 신호의 흐름도는 Fig. 6에 나타났다. 따라서 로봇은 센서 모듈을 장착한 원격 조종형 로봇으로, 배터리 공급 시 별개의 카메라 보드와 함께 컨트롤러에서 Wi-Fi 모듈을 통해 통신을 시작하고, 센서의 상태를 점검한 뒤 센서를 준비 상태로 만든다. 준비된 센서들에서 값을 표시하면, 시리얼 모니터로 점검할 수 있도록 확인 데이터를 보낸 다음, 형성된 네트워크를 통해 IoT 서버로 데이터를 전송한다. 센서 네트워크를 구축하면서 RF 송수신기를 활용하여 로봇 플랫폼을 제어할 수 있으며 동시에 PWM 값을 출력한다. 출력된 PWM의 디지털 신호는 조향각과 속도를 계산하는 용도로서 데이터를 송신하게 된다. 이러한 형태로 로봇의 배터리가 충분한 상태에서는 로봇은 계속해서 1초마다 센서와 로봇의 상태 신호를 업데이트하여 디지털 쉐도우의 자동화된 단방향 센서 네트워크를 구축할 수 있다.

2.2.2 디지털 쉐도우 프레임워크 개발

2.2.2.1 디지털 쉐도우 프레임워크 구축

본 연구에서 제시하고자 하는 디지털 쉐도우 프레임워크는 센싱한 데이터들과 로봇이 물리적 공간에서 작동하는 동시에 가상의 공간인 컴퓨터 내의 모델도 동시에 작동할 수 있도록 데이터를 전송하는 것으로서, Fig. 7에 보이는 것과 같이 구축하였다.

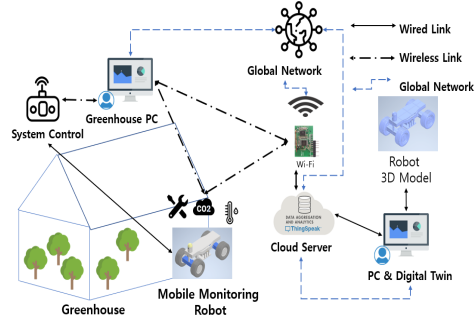


Fig. 7. Proposed Digital Shadow Framework for Plant Growth Environment Monitoring.

작물 생육환경 모니터링용 이동식 로봇은 70 m 이내의 RF 신호를 수신하여 차체의 이동 및 제어 등의 작동을 할 수 있다. 로봇에 부착된 센서들은 온습도, 조도, 이산화탄소의 온실 데이터와 전압 센서 및 PWM 신호를 통해 속도 및 조향 방향 데이터를 출력하고 이에 대한 정보를 SCL, SDA 및 GPIO 등의 직접적인 핀으로 데이터를 수집하여 시리얼 데이터로 출력한다.

이렇게 수신된 시계열 데이터들은 Wi-Fi 모듈을 통해 IoT 서버에 저장되고 분석되며, 분석된 결과는 웹상에 그래프 형태와 같은 시각적 자료로서 사용자에게 제공된다. 이후 이렇게 서버 내에 저장된 데이터는 Simulink에서 데이터를 실시간으로 수신하여 디지털 모델에 적용해 실시간 로봇 조향 및 속도 데이터에 반응하는 차체 모델을 제어하면서 3D 시뮬레이션이 진행된다.

2.2.2.2 디지털 쉐도우 프레임워크 작동

이동식 로봇에서 센서와 Wi-Fi통신을 통해서 데이터 및 카메라 정보에 대한 데이터를 가진 상태로 웹 페이지 상에 전송하게 되면, IoT 서버와 Simulink에서 해당 데이터를 활용하기 시작한다.

IoT 서버에서는 미리 설정된 API 키를 통해서 로봇과 통신을 진행하며, 7개의 필드로서 온실의 환경과 로봇에 대한 정보를 1초 간격으로 수집하게 되는데, 각 필드에

대한 정보를 Table 3에 나타냈다. 환경정보 측정 센서와 배터리 전압 데이터는 아날로그 형태의 신호를 받아들이며, 각도 및 속도, 영상 데이터는 디지털 형태로 데이터를 수신한다.

Table 3. Sensor Channels of ThingSpeak IoT Server

Channel No.	Data	Signal Type
1	Temperature	Analog
2	Humidity	Analog
3	Light	Analog
4	CO ₂	Analog
5	Battery Voltage	Analog
6	Speed	Digital
7	Angle	Digital
Image Channel	2D image	Digital

디지털 쉐도우 프레임워크는 디지털 트윈과의 3D 가상 모델의 활용이라는 공통점이 있으나 데이터의 소통 방식에서 중요한 차이점을 가지는데, 디지털 트윈의 양방향성과 달리, 디지털 쉐도우에서는 가상 모델에 자동화된 단방향 흐름을 형성해야 한다. 따라서 본 논문에서 제안하는 디지털 쉐도우 프레임워크는 로봇, IoT 서버, Simulink 등 3가지로 나누어져 있으며 각 부분에 대한 신호 흐름은 Fig. 8에 나타냈다.

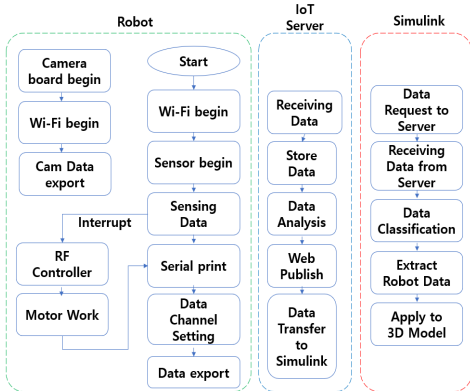


Fig. 8. Signal Flow Chart of Digital Shadow Framework.

로봇 플랫폼은 RF 신호를 수신하며 온실 내를 원격으로 주행할 수 있고, 이때 센서 모듈을 통해 데이터를 송신한다. 송신한 데이터는 IoT 서버에 저장되며, 1초의 주기로 실시간으로 업데이트된다.

IoT 서버에서는 미리 설정된 API 키를 통하여 로봇플

랫폼과 통신을 진행하며 7개의 채널로 온실 환경 및 로봇 상태에 대한 데이터를 수집한다. 별도의 카메라 보드를 통해 받은 영상 데이터를 이미지 형태로 이미지 채널에 저장하게 된다. 수집된 데이터는 실시간으로 업데이트되면서 사용자가 웹상에서 확인할 수 있다.

Simulink에서는 IoT 서버의 API를 통해 읽어 들인 데이터 값을 분류한다. 수신된 데이터 중 차체 모델에 적용에 필요한 데이터인 조향각과 모터의 RPM에 대한 정보를 수집하여 이를 토대로 3D 모델의 바퀴 속도와 방향을 설정하여 시뮬레이션을 진행하여 실시간으로 반영한다.

3. 결과 및 토의

3.1 시뮬레이션 결과 분석

Fig. 9는 Inventor로 모델링 한 3D 모델을 기반으로 Simulink 내에서 구현한 것이다. 구현된 모델은 IoT 서버에서 받아들인 RPM과 조향각 값을 반영하여 Simulink 내에서 차체의 방향과 속도를 조절하고 시뮬레이션을 진행하였다.

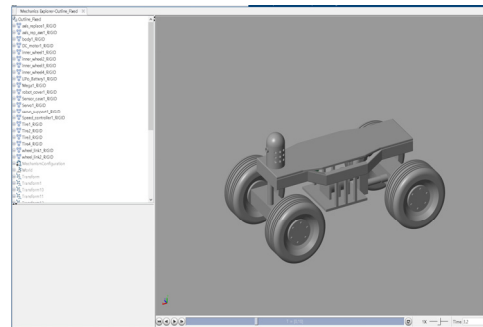


Fig. 9. Snap Shot of Simulation of Robot on Simulink.

Simulink를 기반으로 구현한 디지털 쉐도우 프레임워크의 블록 다이어그램은 Fig. 10에 나타냈다. IoT 서버에서 받아들인 로봇 플랫폼의 센서 정보들과 플랫폼 자체의 구동 정보들을 수집하여 온실에 대한 데이터와 로봇 플랫폼 정보 데이터를 나누고 시뮬레이션에 필요한 데이터를 추출한다.

로봇 플랫폼에 대한 단순화 모델링을 진행하였고, 각 요소에 대하여 Contact Force로써 물리 조건을 적용하였다. 또한, 모델에는 표준 중력이 작용하도록 중력 설정을 진행하였다. 온실과 관련된 온습도, 조도, 이산화탄소 등의 데이터들은 각 Display 블록을 통해 실시간으로 받

아들인 센서 데이터를 확인할 수 있으며 Scope 블록을 통해 Simulink 내에서도 데이터의 활용 및 분석을 할 수 있다.

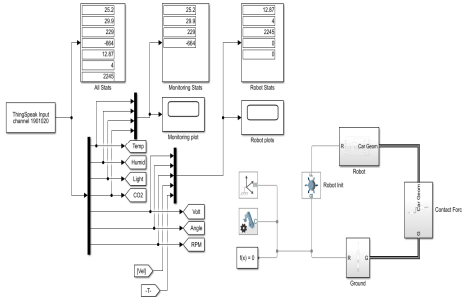


Fig. 10. Simulink Block Diagram of Proposed Framework.

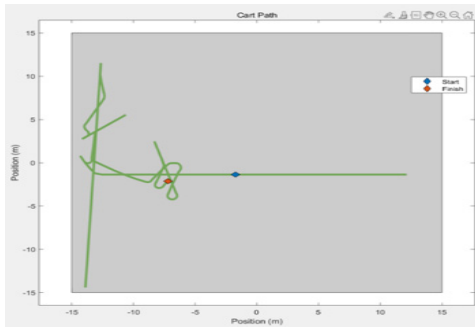


Fig. 11. Trajectory of Robot Movement on Framework.

Fig. 11은 해당 로봇 모델을 운용하며 동시에 프레임 워크를 통해 가상 환경의 이동 궤적을 그린 것이다. 실제 모델과 비교 결과, 속도는 실제 모델보다 부족한 평균 2.15 km/h를 기록하였으나, 최대 속도의 경우 제한이 없어 측정하지 못하였다. 회전 반경은 실제 모델과 유사한 242 mm 정도로 나타났으나, 마찰 설정의 부재로 인한 간섭이 발생하였다.

3.2 환경 및 로봇 상태 모니터링 결과 분석

데이터는 기본적으로 로봇의 차체 내에서 Wi-Fi를 통한 인터넷 통신으로서 데이터의 교환이 이루어진다. 센서로부터 수신한 데이터를 Wi-Fi 모듈을 통해 IoT 서버에 전송하게 된다. ThingSpeak의 무료 사용판의 경우 업데이트 주기가 최소 15초로, 실시간 데이터 흐름에는 제한이 있었다. 따라서 유료 라이선스 기준인 최소 업데이트 주기를 1초로 설정하고 각 데이터와 통신을 진행하였다.

로봇 플랫폼과 데이터를 주고받은 IoT 서버의 센서 데이터 분석 및 실시간 업데이트 사항은 Fig. 12과 같이 확인할 수 있다. 각 1~4 채널은 로봇에서 받아들인 온도, 습도, 조도, 이산화탄소로 주위 환경에 대한 데이터를 실시간으로 업데이트 한다. 5~7 채널은 배터리 전압, 조향각도, 속도 신호로서 가상 환경에서 로봇의 움직임 및 조향을 결정한다. 8번째 채널은 이미지 채널로서 실시간으로 촬영된 영상으로부터 이미지를 추출하여 표시한다.

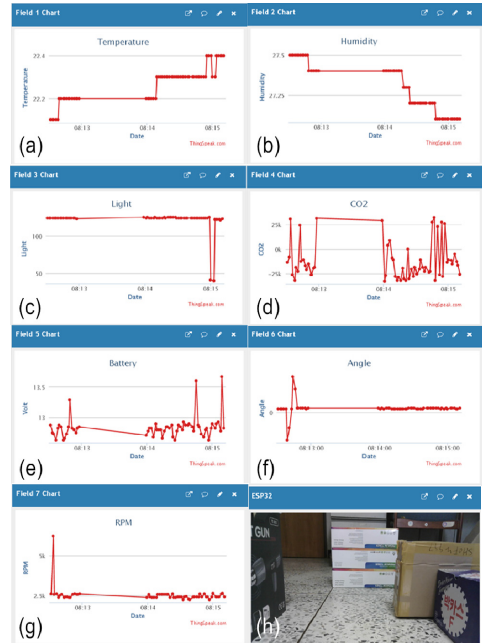


Fig. 12. Data Display on IoT Server.

(a) Temperature (b) Humidity (c) Light (d) Carbon Dioxide (e) Battery Voltage (f) Angle PWM (g) Speed PWM (h) Camera Snapshot.

3.3 시뮬레이션 시간 지연 분석

로봇 플랫폼과 IoT 서버의 시간을 추출하여 비교하면 평균적으로 지연시간이 업데이트 주기 1초를 포함한 1.5-2초의 지연이 있는 것을 확인하였다. 또한, IoT 서버에서 Simulink로 전송하는 과정에서 나타난 시간 지연은 Simulink가 데이터를 수신하고, 이를 시뮬레이션으로 돌렸을 때, 2초마다 데이터를 받아들이는 것을 확인하였으며 이는 시뮬레이션을 돌리고자 하는 크기에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다. 시뮬레이션의 크기가 크면 클수록 데이터의 전송과 적용과정은 시간이 들었으며 1~3초 사이의 지연이 발생하였다. 따라서 총시간지연

은 Wi-Fi 통신 이후 Simulink에서 서버로 연결되기까지 지연시간의 합산인 최소 4초가 걸리는 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 논문은 온실 작물 생육환경 모니터링용 이동식 로봇 플랫폼을 개발하고, 이를 바탕으로 디지털 섀도우 프레임워크를 구축하고 검증하였다.

온습도, 조도, 이산화탄소 등으로 구성된 센서 모듈을 개발하여 작물 생육환경을 측정하였고, 카메라, RF 송수신기, 전압 센서로 로봇 플랫폼 제어에 활용하였다. Wi-Fi 모듈을 통해 웹 서버에 데이터를 전송하고 가상 모델을 조작할 수 있었다. 데이터는 7개의 개별 채널로 얻어져 분석되었으며, 서버의 최소 조건에 따라 1초의 업데이트를 주기에 따른 업데이트 시간은 2초였다.

3D 모델을 통한 프레임워크를 개발하고 검증한 결과, 서버에서 RPM과 조향각 데이터를 토대로 3D 모델의 제어를 진행할 수 있었다. 제어 결과 실제 모델의 추정치와 유사한 회전 반경을 나타내나 기본 속도 감소, 최대속도의 제한을 둘 수 없는 문제가 나타났다.

통신 지연시간은 4초로 나타나 해당 값들의 세부적인 분석에 어려움이 있었다. 이는 2.4 GHz의 Wi-Fi 환경에서 데이터의 연속된 전송으로 일어난 지연시간과 서버 최소 업데이트 시간인 1초에서 나타난 것으로 추정된다.

추후 프레임워크 수준에서 마찰 계수 재설정 및 물리 법칙 상세 설정을 통해 유의미한 가상 시험이 가능할 것으로 생각된다. 외적인 부분에서는 Wi-Fi, 서버 환경, 데이터 통신 방법 변경을 통해 지연시간을 더욱 감축할 수 있을 것으로 추정된다. 본 연구를 통해 디지털 섀도우 기술의 농업적 활용에 대한 기초 연구를 제안하였고 향후 추가 연구를 통해 디지털 트윈 기술로 발전시킬 수 있다.

References

[1] A. McBratney, B. Whelan, T. Ancev and J. Bouma, "Future directions of precision agriculture", *Precision agriculture*, Vol.6, No. 1, pp.7-23, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-005-0681-8>

[2] P. Guo, P. O. Dusadeerungsikul and S. Y. Nof, "Agricultural cyber physical system collaboration for greenhouse stress management", *Computers and electronics in agriculture*, Vol.150, pp.439-454, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.022>

[3] M. Grieves and J. Vickers, "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems." *In Transdisciplinary perspectives on complex systems*, pp.85-113, 2017.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

[4] W. Kritzing, M. Karner, G. Traar, J. Henjes and W. Sihn, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification", *IFAC-PapersOnLine*, Vol.51, No.11, pp.1016-1022, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>

[5] E. Yildiz, C. Møller and A. Bilberg, "Demonstration and evaluation of a digital twin-based virtual factory", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.114, No.1, pp.185-203, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06825-w>

[6] J. Vachálek, L. Bartalský, O. Rovný, D. Šišmišová, M. Morháč, et al., "The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept", *21st international conference on process control (PC)*, IEEE, Štrbské Pleso, Slovakia, pp.258-262, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1109/PC.2017.7976223>

[7] M. L. Arnold, M. Karl, L. Jeng-weei, O. Raimundo, S. Jayanthi et al., U.S. Patent No. US20160333855A1. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 2016.

[8] P. Paweł and O. Adam, "Integration of Digital Twin with Simulation in Order to Meet Factory Expectations", *CMST*, Vol.27, No.3, pp.121-128, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.12921/cmst.2021.0000020>

[9] S. Venkatesan, K. Manickavasagam, N. Tengenai and N. Vijayalakshmi, "Health monitoring and prognosis of electric vehicle motor using intelligent digital twin", *IET Electric Power Applications*, Vol.13, No.9, pp.1328-1335, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5732>

[10] N. Ariesen-Verschuur, C. Verdouw and B. Tekinerdogan, "Digital Twins in greenhouse horticulture: A review", *Computers and electronics in agriculture*, Vol.199, pp.107183, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107183>

[11] W. Purcell and T. Neubauer, "Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review", *Smart Agricultural Technology*, pp.100094, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094>

[12] K. Ding, F. T. Chan, X. Zhang, G. Zhou and F. Zhang, "Defining a digital twin-based cyber-physical production system for autonomous manufacturing in smart shop floors", *International Journal of Production Research*, Vol.57, No.20, pp.6315-6334, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1566661>

[13] B. Stark, S. Rider and Y. Chen, "Optimal pest management by networked unmanned cropdusters in precision agriculture: A cyber-physical system approach", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol.46, No.30, pp.296-302, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.3182/20131120-3-FR-4045.00019>

- [14] G. Lumer-Klabbers, J. O. Hausted, J. L. Kvistgaard, H. D. Macedo, M. Frasheri, et al., "Towards a digital twin framework for autonomous robots", *2021 IEEE 45th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, IEEE, Madrid, Spain, pp.1254-1259, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1109/COMPSAC51774.2021.00174>
- [15] H. Durmuş, E. O. Güneş and M. Kırçı, "Data acquisition from greenhouses by using autonomous mobile robot", *2016 Fifth International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, IEEE, pp.1-5, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2016.7577696>
- [16] S. K. Jo, D. H. Park, H. Park and S. H. Kim, "Smart livestock farms using digital twin: Feasibility study", *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, IEEE, Jeju Island, Korea, pp.1461-1463, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTC.2018.8539516>
- [17] J. B. Han, S. S. Kim and H. J. Song, "Development of Real-Time Digital twin model of Autonomous Field Robot for Prediction of Vehicle Stability", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol.27, No.3, pp.190-196, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2021.20.0181>

김 성 민(Seong Min Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대학교 대학원 농업기계학과 (농업석사)
- 1995년 12월 : University of California, Davis (공학박사)
- 2016년 7월 ~ 2017년 7월 : 국립 농업과학원 농업공학부 부장
- 1998년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 생물산업기계공학과 교수

<관심분야>

농업비파괴센싱, 농업전기전자

전 준 혁(Jun Hyuk Jeon)

[준회원]



- 2021년 2월 : 전북대학교 생물산업기계공학과 (공학사)
- 2023년 2월 : 전북대학교 대학원 농업기계공학과 (공학석사과정 수료)
- 2023년 2월 ~ 현재 : ㈜티와이엠 아이씨티 주임연구원

<관심분야>

농업기계, 전기전자