Regular paper | Journal of the KIECS. pp. 279-286, vol. 16, no. 2, Apr. 30. 2021, t. 106, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2021.16.2.279

에너지 관리를 위한 가상-물리 시스템

오세랑* · 배영철**

Cyber-Physical System for Energy Management

Se-Range Oh* · Young-Chul Bae**

요 약

최근 4차 산업 혁명과 기후변화에 대응하기 위한 기업의 노력이 가시화되고 있다. 이러한 노력의 하나로 가상 물리 시스템의 도입을 통하여 가상공간에서 실세계와 동일한 조건에서 산업 설비들을 운영하기 위한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 그러나 아직까지 가상-물리 시스템의 개념에 대한 통일된 정의가 없는 문제점이 있다. 이에 본 논문에서는 가상-물리 시스템의 이전의 개념을 살펴보고, 새로운 가상-물리 시스템의 개념을 실세계 영역, 통신 영역, 가상 세계 영역, 관리 영역의 4개 영역으로 나누어 제시하고 각 영역을 레이어(층)을 구분하여 명확한 개념을 제시하였다. 또한 제시된 CPS 개념의 적용 가능성을 확보하기 위해 간단한 모터를 대상으로 적용하고 실세계 모터의 토크와 가상세계 모터의 토크의 결과를 비교하여 한 결과 제기한 CPS의 개념의 적용 가능성이 높음을 확인하였다.

ABSTRACT

Recently, the effort of enterprises are visualized to correspond for 4th industrial revolution and climate change. Reaching the operation of industrial facilities are one of these efforts and is actively progressing under identical condition between real and virtual world through introduction of cyber-physical system (CPS). However, the problem on no unified definition for CPS still exists. Thus, in this paper, we review the previous concept of CPS. We propose new concept of CPS with four sections such as real world section, communication section, virtual world section and management section. We also propose definite concept by classifying the layer of each section. In order to confirm the possibility of application for proposed concept of CPS, we applied simple motor. We compare the result for torque between real motor and virtual motor. Finally we confirm that the applicability of proposed concept of CPS is very high.

키워드

CSP, Energy Management, Data Communication, Data Synchronization, Smart grid
가상-물리 시스템, 에너지 관리, 데이터 통신, 데이터 동기화, 스마트 그리드

*전남대학교 전기 및 반도체공학과(osrang@naver.com)
**교신저자 : 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터공학부
· 접 수 일 : 2021. 02. 20
· 수정완료일 : 2021. 03. 20
· 게재확정일 : 2021. 04. 17
· Received : Feb. 20, 2021, Revised : Mar. 20, 2021, Accepted : Apr. 17, 2021
· Corresponding Author : Young-Chul Bae
Division of Electrical ·Electronic communication and Computer Eng. Chonnam National University,
Email : ycbae@chonnam.ac.kr

Ⅰ. 서론

정보화, 데이터 처리, 인공지능 등으로 대표되는 4차 산업혁명 시대는 기업의 높은 생산성을 요구할 뿐만 아니라 이산화탄소 절감 등을 요구하는 기후 변화에 대응하기 위한 노력을 요구하고 있다. 이러한 노력 중 하나로 산업설비에서 에너지 절약을 포함한 보다 효율적인 에너지 관리가 필요하다. 특별히 여수국가산단의 석유화학설비와 광양의 포스코의 철강 제조설비들은 탄소 제로 요구를 크게 받고 있는 대표적인 설비들이다. 이에 각 기업에서는 탄소 제로를 위한 노력과 에너지 절감을 위한 노력에 힘을 기울이고 있다.

최근에는 4차 산업혁명의 데이터처리와 분배와 관계된 가상-물리 시스템(cyber-physical system; CPS)을 도입하여 실세계에서 발생할 수 있는 다양한 문제를 실세계와 동일한 조건과 상황으로 수학적 또는 물리적으로 모델링한 후 이를 가상세계에서 시뮬레이션을 수행하는 기술이 관심을 가지고 있다. [1-10]. 그러나 CPS는 정의가 명확하지 않고 연구자 각자가 정의하여 사용하는 경우가 많아 통일한 방안이 없는 상황으로 기업에서 도입하게 많은 어려운 점이 있다[1].

이에 본 논문은 이전의 CPS 개념을 살펴보고, 새로운 CPS의 개념을 4개의 영역 즉 실세계, 통신, 가상세계, 그리고 이들을 관리하는 영역으로 제시하며, 각 영역에 프로토올을 제한한 개념을 제시한다. 또한 제시된 개념을 검증하기 위하여 실세계의 모터를 가상세계로 동일하게 구현하여 모터에서 실세계의 토크와 가상세계의 토크를 비교한 실험을 수행하고 그 결과를 보여주고 CPS의 적용가능성을 확인한다.

Ⅱ. 이전 CPS 개념

이전의 CPS 시스템에서는 명확한 개념 정립이 없이 연구자들이 각자 개념을 제시하여 혼선이 있어왔다. 이전에 제시한 CPS는 중 하나는 임베디드 시스템을 확장하여 구성하는 것으로서 하드웨어적으로 루프를 구상하는 방법이 있다. 이 방법은 그림 1과 같이 통신, 계산, 제어 부분으로 구성된다. 통신과 계산 부분은 사이버로 정의하여 전달하며, 계산에서는 제어부분으로 물리적으로 전달하고, 제어부분에서 통신부분으로는 시스템으로 전달하는 구조를 가진다. 임베디드 시스템은 주로 공장과 같은 시설에서 모니터링의 목적으로 사용되었다. 그러나 이 방법은 물리적 환경에 센서를 설치하고, 센서를 통해 전송 받은 정보를 처리한 뒤, 액츄에이터에 연결한 후 다시 물리 시스템에 연결하는 것이다. 이는 단순히 물리적 환경에 설치된 센서를 통한 데이터 이동일 뿐 물리적 환경을 가상 환경에서 시뮬레이션을 구현하는 과정이 없거나 시뮬레이션 구현과정이 있다하더라고 실세계의 환경을 있는 그대로 반영하는 것이 아니라 이상적인 데이터만을 제공하여 가장 이상적인 조건에서 시뮬레이션을 수행하므로 실세계 환경을 정확하게 반영하지 못하는 문제점이 있다.

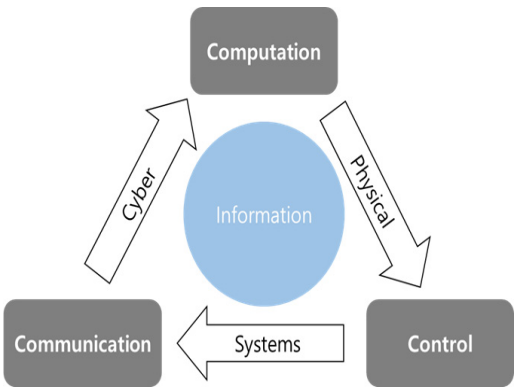

그림 1. 과거의 CPS 구성방법
Fig. 1 Historical CPS configuration methods

Ⅲ. 제안하는 가상-물리 시스템의 개념

제안하는 새로운 가상-물리 시스템은 에너지 관리를 위한 실세계 시스템을 먼저 디지털 트윈(digital twin)을 기반으로 가상 시스템을 구성한다. 일반적으로 디지털 트윈 기반 가상 시스템은 완전한 실세계를 모사하지 못하며 주로 외관이나 외형적인 형태만을 구성할 수 있으므로 본 논문에서 제안하는 완전한 가상-물리 시스템을 구성한다고 보기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 디지털 트윈에 기반

으로 실세계를 외형적으로 모사한 후 실세계의 고정·가변 속성 데이터들을 디지털 트윈에 병합시키는 작업이 필요하다. 이를 위해 가상세계에서 실세계의 고정 속성 데이터와 가변 속성 데이터를 동기화하고, 상업용 프로그램으로 모델링 및 이를 계산하는 과정이 요구된다. 이에 본 논문에서는 이러한 과정을 명확하게 정의하기 위해서 가상-물리 시스템을 실세계(physical), 통신(network), 가상세계(cyber) 그리고 관리(management)까지 네가지 영역으로 나누고 이들 각 영역을 층(layer)로서 정의하고 이를 그림 2에 나타내었다.

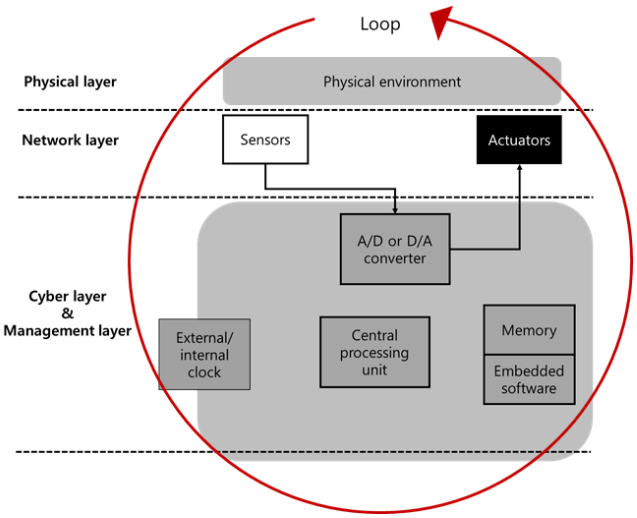

그림 2. 새로운 가상-물리 시스템 개념
Fig. 2 New cyber-physical system concept

3.1 실세계 영역

에너지 관리 시스템을 위한 새로운 가상-물리 시스템의 개념을 제안한다. 그림 3에는 에너지 관리를 위한 가상-물리 시스템을 나타냈다. 실세계를 나타내기 위하여 물리층을 구성하였다, 이 물리층은 실제공장 및 설비(real plant, facility)와 센서(IoT sensor)가 존재하며 설비의 특성에 따라 부가적인 장비(other real environment)가 존재하는 물리적인 세계를 말한다. 현재 실세계에는 실세계의 본래의 목표인 발전을 위한 공장과 장비, 발전설비들이 있으며 운영하기 위한 다양한 설비들이 있고, 통신영역을 위한 인터페이스 및 실세계 영역에서 발생하는 각종 물리량 데이터의 측정을 위한 센서 설비들이 상호 연결되어 구성되어 있다. 에너지 관리 시스템의 시점에서는 발전을 수행하는 풍력 발전기, 태양광 발전기와 이들 발전기에 부가적으로 연결된 에너지 저장 장치, 변환장치 등이 모두 포함된다. 이 실세계 영역에서는 전압, 전류, 주파수 등과 같은 가변 속성 데이터와 기기 또는 시설물들이 가지는 고정 속성 데이터를 실제로 가지게 되며 이는 가상세계 영역의 고정 속성 데이터 층과 가변 속성 데이터 층과 연계된다.

3.2 통신 영역

통신 영역은 실세계 영역과 가상세계 영역을 물리적으로 연결하기 위한 도구들이 존재한다. 기본적으로는 실세계의 각종 설비에 전원과 통신선이 연결되고, 센서를 통하여 취득한 물리량의 정보를 상호 전달하기 위해 통신망이 이용된다. 통신영역은 실세계 영역과과 가상세계 영역 사이를 연계하는 네트워크를 구성하는 층이다. 네트워크 층으로 부른다. 이 통신에는 인터페이스, 동시성(concurrency), 보안(security)이 요구된다.

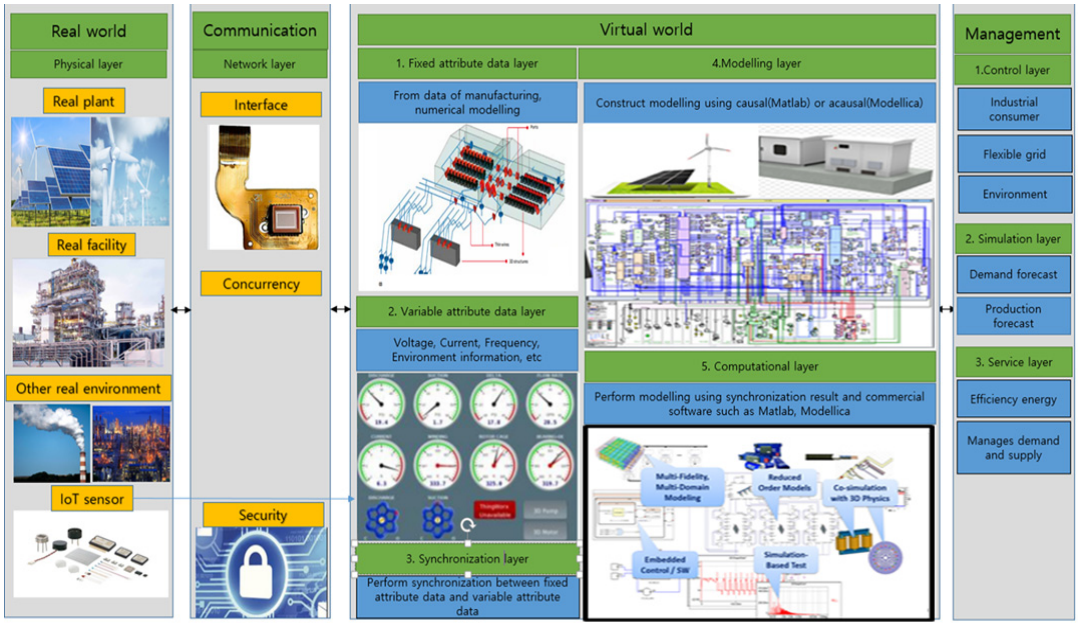

그림 3. 에너지 관리를 위한 가상-물리 시스템의 개념
Fig. 3 Concept of cyber-physical system for energy management

3.3 가상세계 영역

가상세계 영역은 실세계 영역의 정보를 실시간으로 처리하거나, 동일한 물리적 조건으로 시뮬레이션을 수행하거나 제어하기 위한 영역이다. 이 영역은 실세계의 센서로부터 취득한 정보를 실시간으로 처리하기 위한 가변 속성 데이터 층(variable attribure data layer)과 설비 자체의 고유한 변하지 않는 고정 속성 데이터를 받아서 처리하기 위한 고정 속성 데이터 층(fixed attribute data layer)이 있다. 또한 이 두 개의 데이터들의 상호 연동을 위해 데이터간의 동기화를 해주어야 하며 이를 위해 동기화 층(synchronization layer)이 마련되어 있다. 데이터가 동기화되면 모델링 층(modeling layer)과 계산 층(computational layer)에서 실세계와 최대한 유사한 환경에서 모델링하고 시뮬레이션을 수행한다. 이렇게 가상세계 영역에는 고정 및 가변 속성 데이터 처리를 위한 층과 실세계 층과 가상세계 층의 데이터를 동기화하기 위한 층, 모델링 층, 계산 층으로 구성되며 이 5개의 층으로 정의된다.

3.3.1 고정 속성 데이터 층

고정 속성 데이터는 실세계의 가변 속성 데이터 측정에서 얻어지지 않는 나머지 속성 데이터를 말한다. 예를 들면 풍력 발전기에서 자속, 회전자 관성 모멘트(moment), 토크(torque) 등 실세계의 시스템이 가지는 변화하지 않고 고정된 값을 가지는 데이터를 말한다. 이는 관측하는 것이 아니라 제작되는 시점에서 고유한 값으로 정해지는 것이 대부분이다. 이들 고정 속성 데이터를 이용해서 가상세계 층에서는 실세계와 동일하게 동작하도록 디지털 트윈으로 모사한 가상세계 층 내의 실세계에 이 고정 속성데이터를 수학식을 이용하여 모델링 한 실세계의 물리층에서 센서 또는 측정기를 통하여 들어오는 값과 병합하여 나타낸다. 고정 속성 데이터는 제조회사로부터 받아서 물리적 또는 수학적 모델링을 통하여 가상세계 영역에서 모사한 시스템에 제공한다.

3.3.2 가변 속성 데이터 층

가변 속성 데이터는 실세계에서 실제 관측 가능한 데이터를 말한다. 예를 들어 풍력발전에서는 풍력 발전기에서 생성되는 전압, 전류, 주파수, 바람의 세기 및 방향 등 각종 센서 및 계측기를 이용하여 측정 가능한 속성 데이터가 여기에 해당한다. 이들 동적 속성 데이터는 각종 센서 및 계측기를 통하여 측정한 후 네트워크 층을 통하여 디지털 값으로 변환한 후 디지털 트윈으로 구성한 가상세계로 매칭하여 전송한다. 본 논문에서는 가변 속성 데이터 층에서 담당하도록 구성한다.

3.3.3 데이터 동기화 층

센서로부터 들어오는 가변 속성 데이터와 제조회사 또는 수학적 모델링을 통해 정해진 고정 속성 데이터가 하나의 데이터로 가상 세계의 시스템에서 동작하기 위해서는 시간 동기화를 포함한 동기화가 이루어져야 한다. 가상세계 영역에서 실세계에서의 설비의 추가 증설 및 고정 속성 데이터의 변화에 따른 시뮬레이션 및 예측을 위해서는 먼저 실세계 영역과 가상세계 영역 사이에 동기화를 이루어야 한다. 이 과정에서는 시간 동기화를 비롯한 다양한 데이터에 대한 상태 동기화도 고려되어야 한다. 이러한 동기화를 이루기 위해서는 먼저 IoT 센서를 통하여 가상세계 층에 들어오는 가변 속성 데이터와 제조회사 또는 수학적 모델링을 통하여 들어오는 고정 속성 데이터에 대한 시간 동기화가 선행되어야 한다. 실시간으로 들어오는 가변 속성 데이터를 디지털 통신으로 변환한 결과와 수학적 모델링을 통해 얻어진 고정 속성 데이터 사이에 동기화가 이루어지지 않으면 실세계 영역과 가상세계 영역에서 같은 시간대의 결과를 얻기가 어렵다. 따라서 모든 고정 및 가변 속성의 데이터들과 실세계와 가상세계의 시간 동기화가 필요하다. 본 논문에서는 이를 동기화 층에서 구성한다.

3.3.4 모델링 층

모델링 층은 현재 판매되고 있는 다양한 상용 프로그램을 이용하여 실세계의 설비를 모델링하는 영역이다. 이 영역에서 고정 속성 데이터의 처리는 현재 상용 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램(Matlab, Modellica, ANSYS 등)을 이용하여 실세계와 동일 또는 근사화된 모델을 만든다. 기존 프로그램으로 적용 가능한 모델은 그대로 이용할 수 있지만 그렇지 못한 경우에는 디지털 트윈과 수학적 모델을 적용하여 새로운 모델을 재구성하여야 하며 이 과정을 본 논문에서는 모델링 층에서 정의한다.

3.3.4 계산 층

실세계에서 설비 증강과 같은 계획을 세울 때, 미리 모델링 층에서 모델링한 결과를 가지고 계산을 수행하여 계획의 안정성 및 효율성을 판단하거나 시간이 지남에 따라 노후화된 장비에 대한 교체 판단 등 실세계에서 발생하는 상황을 계산하여 시뮬레이션을 수행하도록 구성한다.

3.5 관리 영역

이 영역은 응용 영역으로 제어 층, 시뮬레이션 층, 서비스 층으로 구성한다. 실제 사용자가 사용하여 응용할 수 있는 영역이다. 이 층에서는 에너지 관리를 위한 다양한 프로그램들로 구성하여 수요 예측, 생산 예측, 에너지 효율 등을 관리한다.

3.6 적용 사례

그림 2에서 새롭게 정의한 가상-물리 시스템과 그림 3의 에너지 관리를 위한 가상-물리 시스템의 개념을 기반으로 하여 모터에 대한 적용 사례를 제시한다. 여기서 제시하는 적용 사례는 앞서 제안했던 가상-물리 시스템을 검증하기 위한 것으로 최소한의 모델로서 모터를 선정하여 진행하였다. 그림 4에 실제로 구성해본 실세계의 모터와 가상세계의 모터를 나타냈다. 두 세계는 고정 속성 데이터와 가변 속성 데이터의 양방향 통신이 가능하며 시간 동기화가 이루어진 상태에서 실시간으로 작동하는 가상-물리 시스템이다. 실제 모터의 모델링과 고정 파라미터 설정에는 wolfram system modeler와 modelica를 사용했다. 그림 5에는 모델링된 가상세계의 모터와 실세계의 모터를 구동하고 두 모터의 토크를 비교했으며 그래프로 출력했다.

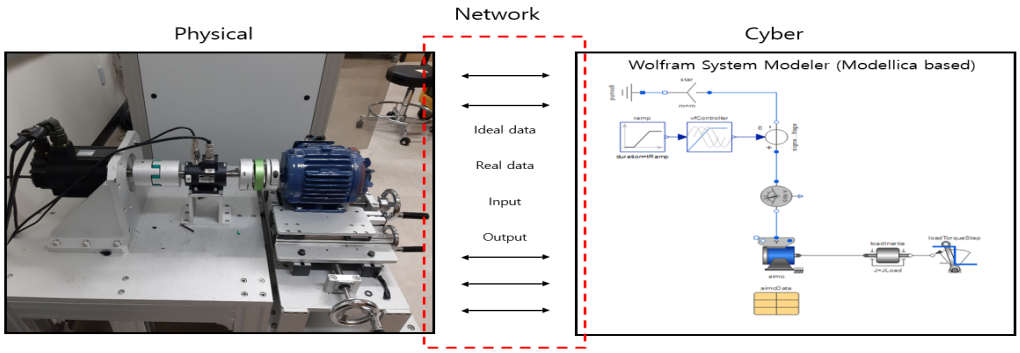

그림 4. 실세계의 모터에 대해 상업 프로그램을 사용하여 구축한 가상세계의 모터
Fig. 4 Virtual world motors built using commercial programs for real world motors

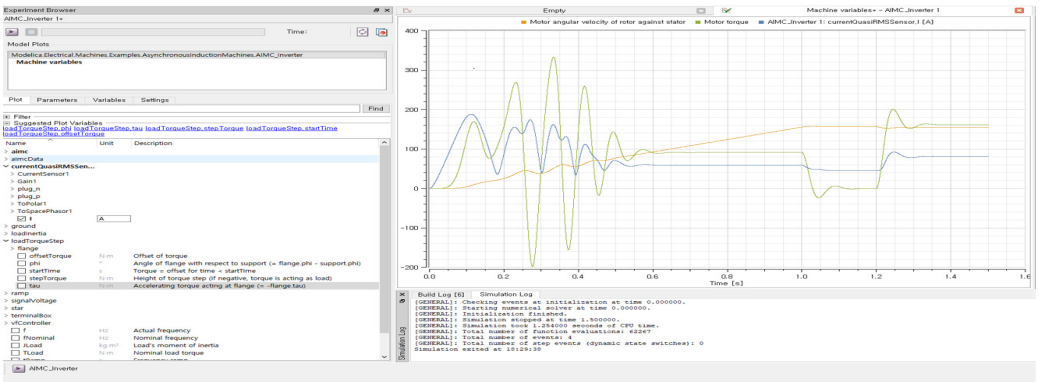

그림 5. 모델리카를 통해 구현된 가상세계의 토크와 실세계의 토크
Fig. 5 Virtual world torque and real world torque implemented through modelica

Ⅳ. 결론

기존의 가상-물리 시스템은 데이터 통신에만 그치고 양방향의 데이터의 동기화와 그에 따른 제어부 기술의 부족으로 인해 이는 IoT 센서를 통한 모니터링 시스템과 큰 차이가 없는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 새로운 가상-물리 시스템의 개념을 실세계 영역, 통신 영역, 가상 세계 영역, 관리 영역으로제시하고 세부적인 구성을 레이어(층)를 통하여 실세계에서는 물리층, 통신 영역에서는 네트워크 층, 가상 세계에서는 고정 속성 데이터 층, 가변 속성 데이터 층, 데이터 통기화 층, 모델링 층, 계산 층으로, 마지막으로 관리 영역에서는 제어 층, 시뮬레이션 층, 서비스 층으로 구성하는 개념을 제시하였다.

제시한 개념을 검증하기 위하여 실세계에서의 모터를 가상세계로 구현하여 데이터의 양방향 통신과 시간대 동기화를 통해 실시간으로 토크 데이터를 전송하고 시뮬레이션 하여 결과를 제시하였으며 그 결과 제시한 CPS의 적용 가능성을 확인하였다.

앞으로 본 논문에서 제안한 새로운 가상-물리 시스템의 현실화를 위해서는 가장 먼저 고정 속성 데이터들의 수집 혹은 생성이 중요하다. 그 이후에는 다양한 종류의 데이터들의 모든 동기화와 그에 따른 시뮬레이션, 제어, 예측 등 많은 분야에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 결과물은 2020년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 플랫폼 사업의 결과입니다.

References

[1] H. Chen, "Applications of Cyber-Physical System: A Literature Review," *J. of Industrial Integration and Management,* vol. 2, no. 3, 2017, pp. 1750012.

[2] M. Ragulskis, H. Jiang, Q. Quan, A. Fedaravicius, and G. Xie, "Mechatronics and Mechanical Engineering in Cyber-Physical Systems," *Advances in Mechanical Engineering,* vol. 2014, 2014, pp. 1-2.

[3] K. Kim and P.R. Kumar, " An Overview and Some Challenges in Cyber-Physical Systems," *J. of the Indian Institute of Science,* vol. 93, no. 3, 2013, pp. 341-351.

[4] V. Gunes, S. Peter, T. Givargis, and F. Vahid, "A Survey on Concepts, Applications, *KSII Transaction on internet and information systems,* vol. 8, no. 12, 2014, pp. 4242-4267.

[5] P. Marwedel, *Embedded Systems, Embedded Systems, Foundations of Cyber-Physical Systems, and the Internet of Things.* Cham, Switzerland: Springer, 2018.

[6] L. C. Cordeiro, E. B. de Lima Filho, and I. V. Bessa, "Survey on automated symbolic verification and its application for synthesising cyber-physical systems," *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications,* vol. 5, no. 1, 2020, pp. 1-24.

[7] H. Lin and F. Yang, "Design and implementation of a CPS-based predictive maintenance and automated management platform," *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications,* vol. 5, no. 1, 2020, pp. 100-109.

[8] M. M. Rana and R. Bo, "IoT-based cyber-physical communication architecture: challenges and research directions," *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications,* vol. 5, no. 1, 2020, pp. 25-30.

[9] N. Yoo, "A Heat Shock Simulation System for Testing Performance of EWP," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 3, 2019, pp. 553-558.

[10] G. Steindl, M. Stagl, L. Kasper, W. Kastner, and R. Hofmann, "Generic Digital Twin Architecture for Industrial Energy Systems," *Applied science,* vol. 10, no. 24, 2020, pp. 8903.

저자 소개

오세랑(Dae-Hyeon Hwang)

2020년 전남대학교 전기 및 반도체공학과 졸업(공학사)
2020년~현재: 전남대학교 대학원 전기 및 반도체공학과 석사과정

※ 관심분야 : Python, Tensorflow, Deep learning, CPS

배영철(Young-Chul Bae)

1984년 광운대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1986년 광운대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
1997년 광운대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
1986년~1991년 한국전력공사
1991년~1997년 산업기술정보원 책임연구원
1997년~현재 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터공학부 교수
2002년~2002년 Brigham Young University 방문교수
2011년~2011년 University of Utah 방문교수

※ 관심분야 : Chaos Control and Chaos Robot, Robot control etc.