

물리시스템 최적화를 위한 디지털 트윈 시뮬레이션의 실험적 구현

김경일

한국교통대학교 융합경영전공 교수

Experimental Implementation of Digital Twin Simulation for Physical System Optimization

Kyung-Ihl Kim

Professor, Division of Convergence Management, Korea National University of Transportation

요약 본 연구는 수작업으로 이루어진 제조현장에서 제조 프로세스를 최적화할 수 있도록 시뮬레이션을 통한 디지털 트윈 구현 방안을 제안하고자 한다. 수작업 모션을 센서로 수집하고 동작 인식에 대하여 반복적인 실험 데이터로 제조 프로세스를 최적화하는 지식관리메커니즘을 제안 범위로 한다. 연구목적 달성을 위하여 물류현장 모의실험을 실시하였는데, 작업자의 경험으로 나타난 기초적 지식에 작업시뮬레이션을 반복 경험하게 함으로써 최적화된 디지털 트윈을 생성할 수 있는 방안을 마련하였다. 실험결과, 디지털 트윈을 생성하는 시뮬레이션으로 보다 빠른 시간내에 작업공간 구성과 작업 특성을 생성하여 최적화된 자원을 구성한 결과를 물리시스템으로 전송함으로써 제조 프로세스의 지속적 개선이 가능한 것으로 파악되었다.

주제어 : 디지털 트윈, 센서 데이터, 사이버물리시스템, 지식관리 메커니즘, 시뮬레이션

Abstract This study proposes a digital twin implementation method through simulation so that the manufacturing process can be optimized in a manual manufacturing site. The scope of the proposal is a knowledge management mechanism that collects manual motion with a sensor and optimizes the manufacturing process with repetitive experimental data for motion recognition. In order to achieve the research purpose, a simulation of the distribution site was conducted, and a plan to create an optimized digital twin was prepared by repeatedly experiencing the work simulation based on the basic knowledge expressed by the worker's experience. As a result of the experiment, it was found that it is possible to continuously improve the manufacturing process by transmitting the result of configuring the optimized resources to the physical system by generating the characteristics of the work space configuration and working step within a faster time with the simulation that creates the digital twin.

Key Words : Digital Twin, Sensor data, Cyber Physical System, Knowledge management mechanism, Simulation

1. 서론

사이버 물리 시스템의 일부인 디지털 트윈 모델은 실제 세계, 가상 세계 그리고 실제 제조시스템에 대한 디지털 통제 역할의 3가지 주요 부분으로 구성된다. 제

조 애플리케이션에 디지털 트윈을 적용하는 것과 관련된 대부분의 연구는 기계, 생산 라인, 로봇 등과 같은 실체에 중점을 두고 있으며 디지털 마케팅을 통해 인간 프로세스를 모델링하고 시뮬레이션하기도 하지만 3가

*Corresponding Author : Kyung-Ihl Kim(kikim@ut.ac.kr)

지 주요 부분 모듈을 통합적으로 고려하는 연구는 미흡하다고 할 수 있다[1].

본 연구에서는 디지털 트윈 개념을 CPS의 일부로 정의하고 수작업 중심의 제조 현장에서의 적용을 방안을 제시하고자 한다. 저가의 센서로 구성하여 자원소비의 최소화를 기하면서 작업자가 경험적으로 숙련된 작업동작을 수행하는 동작 인식 데이터를 지속적으로 수집하여 분석 알고리즘이 포함된 현실성 있는 디지털 시뮬레이션으로 물리시스템을 최적화할 수 있는 방안을 제안함에 연구 목적이 있다.

연구목적을 달성하기 위하여 랙과 카트가 설치된 10 m² 규모의 창고 공간에서 3명의 작업자가 물건을 카트에 적재하여 이동하는 동작에 대한 실험을 시뮬레이션하는 방법을 채택하고 다음과 같은 세부적인 연구범위를 구성하였다.

- (1) 수작업을 모델링하기 위해 디지털 트윈 개념을 적용하는 동시에 모델링 개념을 CPS 하부 모델로 적합시키는 방안
- (2) 작업자의 관점에서 수작업에 중요한 시공간 조건의 분석 및 식별
- (3) 현실적인 시뮬레이션 생성을 위한 조건의 활용.

2. 선행연구검토 및 연구설계

디지털 시뮬레이션에 대한 초기 연구에서는 데이터 수집과 처리 방법 및 센서 이용에 대한 주제로 한정되었다. 그러나 ICT의 기술 발전으로 데이터 소스가 다양해지면서 스토리지 기능이 고도화되어 물리적 세계에 대한 사실적 표현이 가능한 모델을 생성할 수 있는 기술이 제안되면서 센서데이터 통합으로 시뮬레이션 결과의 정확성을 향상시키는 연구들이 실무에서 이루어지고 있다[2].

디지털 트윈에 대한 연구 활동은 선도적인 글로벌 연구 기관과 기술집약적인 대기업들이 Industry 4.0을 전략적으로 구현함으로써 지난 3년 동안 엄청난 성장을 이루었다. 관련 엔지니어링 연구는 지난 3년 동안 상당한 성장을 보였지만 아직까지는 디지털 트윈을 적용하기 시작하는 초기 단계이다. 2018년 이 주제에 관한 출판물 수는 2017년의 3배가 되었으며 연구 결과의 상당 부분은 Industry 4.0으로의 경쟁을 주도하고 있는 미국, 독일 및 중국에서 발표되었다. 산업계의 관심을 이끌면서 2017년 시장 조사에 따르면 디지털 트윈

시장은 2023년까지 37.87 %의 연간 성장률로 156억 천만달러에 이를 것으로 예상하고 있다[3].

디지털 트윈의 실제 현장 적용을 위한 현황을 살펴볼 때, GE는 자산 성과를 더 잘 이해하고 예측할 수 있는 디지털 트윈 플랫폼인 PREDIX를 개발한 바 있으며 SIEMENS는 제품 설계, 생산 및 운영의 전체 프로세스 내에서의 스마트 운영에 초점을 맞추었고 ABB는 데이터 기반 의사결정을 가능하게 하는 측면을 강조하며 연구개발하고 있다. Microsoft는 사람, 공간 및 장치 간의 상호 작용을 모델링하고 분석하기 위한 유비쿼터스 IoT 플랫폼을 제공하는 Digital Twin 제품 포트폴리오를 준비하였다[4].

디지털 트윈 구현에 있어 사실적인 시뮬레이션을 수행하려면 이기종 데이터를 수집하고 디지털 모델로 결합하여 실제 상황을 정확하게 디지털로 표현하는 것이다. 인간활동의 시뮬레이션 및 분석에 디지털 트윈 개념을 적용하는 일반적인 접근 방식은 고급 동작 추적 시스템을 사용하여 인간 동작을 캡처한 후에 동작 캡처 데이터를 재구성하는 것이다[5]. 디지털 트윈 생성을 위한 모션 재구성 접근 방식은 엔터테인먼트 산업과 같은 일부 산업에서 널리 사용되지만 제조 분야에 적용할 때 다음과 같은 한계점이 존재한다[6].

(1) 모션 캡처 시스템은 일반적으로 구입 및 설치비용이 고가이다.

(2) 사실적인 모션을 생성하기 위해서는 인체에 많은 센서를 부착해야하므로 처리해야 할 데이터 양이 증가하면서 불편성이 증가된다.

(3) 모션이 특정 물체 선택 또는 배치 활동과의 관련 여부와 같이 인간이 수행하는 활동의 의미론에 대한 통찰력을 제공하지 못한다.

(4) 학습효과, 피로, 생산량, 시야, 환경적 제약, 작업자의 지식 등과 같은 제약을 항상 고려하지는 않는다.

본 연구에서는 이러한 한계점을 극복하고자 한계점 (1)과 (2)는 저가형 광학센서, 웨어러블 도구 및 센서를 채택하고자 한다. 처리해야 하는 데이터를 줄일 수 있는 동작 인식 알고리즘을 채택하여 한계점 (3)을 극복할 수 있도록 센서 융합은 추적된 물체에 부착된 관성 측정장치 센서로 측정된 작업 현장 물체와 광학 센서에 의해 인식된 인간 동작의 상관관계를 분석하여 해결하고자 하였다. 한계점 (4)에 대하여는 수 작업을 수행하는 모션을 캡처시스템으로 습득하여 작업자 모션을 지

식화하는 지식관리메커니즘으로 해결하고자 하였다.

본 연구가 제안하는 방법은 공장 현장에서 수작업 중심 작업을 디지털 트윈으로 구현하고자 하는 것이므로 센서 데이터를 사용한 시뮬레이션을 강조함으로써 현실감을 높이고 결과의 정확성을 높이고자 하였다. 이 연구에 제시된 주요 내용은 작업자의 관점에서 수동작업에 필요한 주요 공간 및 시간 조건에 대한 분석과 식별이며 조건을 실제시뮬레이션 생성에 사용할 수 있도록 하였다.

3. 디지털 트윈 설계

디지털 트윈은 아날로그를 디지털로 변환하는 ADC(Analog-digital conversion)와 시뮬레이션 알고리즘 등의 하위시스템을 통해 물리시스템의 주요 조건을 디지털 모델로 변환하는 것이다[7]. 디지털 모델은 작업자의 물리적 환경을 디지털화된 복제본으로 표현하는 것으로 물리시스템 작동행위를 복제할 수 있도록 트윈 행태를 제약하는 것이다. 주로 센서로 부터 수집되는 작업자의 시-공간적 동작에 대한 제약사항들을 평가하는 알고리즘을 이용하여 디지털 트윈으로 통합하는 과정을 거치게 된다[8]. 실제세계에서의 운영데이터에 대한 기록과 주요 조건을 식별할 때 시뮬레이션 현실감을 향상시킬 수 있도록 실행의 특정 포인트를 설정하기도 한다[9]. 본 연구에서의 디지털 트윈 개념은 (1) 동작 인식, (2) 동작 제약 생성, (3) 제공된 디지털 모델 및 (4) Fig. 1.에 제시한 시뮬레이션 하위시스템으로 구성하는 것으로 정의한다.

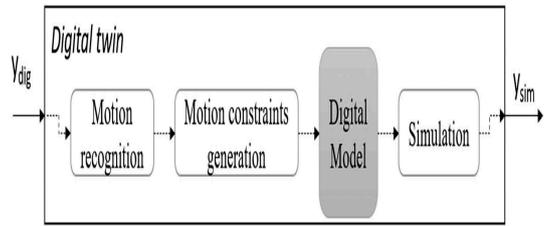


Fig.1. Digital twin subcomponents

3.1 동작인식

수작업의 가상 표현을 위한 동작 인식과 조건과 제약사항 생성은 비교적 저가의 장치로 수집된 데이터 값을 기반으로 하며 이 데이터는 3차원 공간에서 인간 관절의 좌표에 해당한다. 1차로 수집된 관절 좌표 값에 더하여 나사 조임등의 추가적인 특정 작업을 인식하기 위해 추가된 센서로 수집된 2차 데이터로 보완한다. 작업인식은 'If-Then'형식의 미리 정의된 조건-행동규칙 집합을 실행하여 이루어진다[8]. 기존 스크립트 규칙을 수정해 가면서 여러 모션 유형을 유사한 방식으로 인식하는 방식을 사용하면 전체 통합세트가 아닌 캡처된 데이터의 제한된 하위 집합만 처리하여 사람의 움직임을 인식할 수 있다. 디지털 트윈의 경우 센서 데이터에서 모션 제약으로의 전환에 대한 고도화된 방법을 Fig.2에 제시하였다.

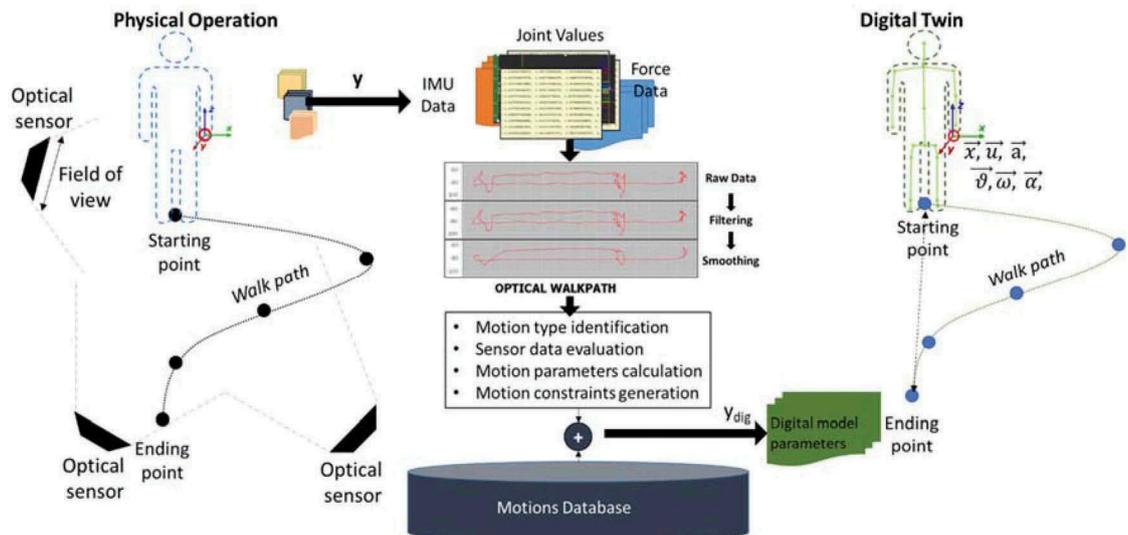


Fig. 2. Digital twin data connection for replicating a walk motion

3.2 동작 조건과 제약 생성

작업 현장에서 수행하는 동작과 작업을 인식 한 후 가상 모델로 전송하기 위해 실세계 데이터들에 대한 조건들을 평가한다. 수집한 센서데이터로 식별한 조건은 가상시스템 동작과 시뮬레이션 실행을 제어하는 목적으로 사용된다. 식별한 조건을 통해 획득한 실세계 지식을 기반으로 가상시스템의 동작을 제어하는 조건목록은 Table 1에 제시하는 바와 같다.

Table. 1. Parameters for constraining the virtual model behavior

Operation Type	Motion constraints
Walking	Walking speed and finish point, walking distance
Picking Object	Number of hands grasping, Reach distance, Standing position, Grasp points
Placing Object	Place position, Place surface, Model stance for placement, Reach distance, Grasp points
Carrying Object	Carry speed, Start position, Carry stance, Carry surface, Grasp points

다음 단계는 식별된 모션 조건과 제약사항으로 시뮬레이션과 시뮬레이션 시나리오 및 실세계 작업의 복제에 사용될 모션 영상에 대하여 사전 저장된 조건을 평가하는 것이다. 모션을 제약하는 알고리즘은 실세계 행동제약과 사전에 녹화된 해당 모션 영상을 비교하는 것이다. 비교를 위한 프로그램은 통제된 자연어(CNL: Controlled Natural Language)를 이용하여 연속적으로 기록한 궤적과 키 프레임 값을 비교하도록 구현하였다.

궤적 조건들은 일련의 규칙으로 묘사된 자연스러운 정도로 평가되며 3D공간에서 실행가능한 제어 포인트를 제공한다. 다음으로 3D포인트는 행동순서에서 다음 작업의 궤적 값과 일치해야 하므로 전체 보행 경로는 궤적 제어 포인트를 고려하여 생성된 곡선으로 표현되는 것이다.

행동에 대한 제약조건을 생성하기 위해 사전에 기록된 행동 영상에서 둔부관절의 궤적 제어 포인트를 보간하기 위한 큐빅 Catmull-Rom spline을 생성한다. 생성된 스플라인은 연속점의 접선을 계산하므로 자연스럽다는 평가를 받을 수 있다. 자연스러움이 만족스럽지 않은 경우 큐빅 B-스플라인을 생성한다. 자연성 목표가 달성되지 않으면 자연스럽지 않은 영역을 정의하는 연결점을 식별하여 그 값이 최소 반복 횟수에 도달하거나 자연성 목표가 달성 또는 근사화될 때까지 반복적으로

변경한다. 그렇지 않으면 더 높은 차수의 스플라인이 생성되고 앞서 언급한 단계가 반복된다[10].

start_walking, start_pick_contact 등의 작업 시작 및 중지 시간 인스턴스를 정의하는 키 프레임 값에 대해서도 유사한 접근 방식을 따르며 이에 대한 알고리즘의 단계는 Fig. 3에 제시하였다.

```

Data: key joints control points; Smoothness target;
          max iterations;
Result: spline with control points

If smoothness target not achieved then
  For spline in [catmull-rom; cubic B; degree 4 B]
    while 1
      iterations++;
      create spline;
      evaluate smoothness;
      if smoothness target then
        output = spline;
        Break;
      else_if max iterations then
        Break;
      else
        adjust control points values
      end
    end
  end

```

Fig. 3. Motion constraints algorithm

3.3 시뮬레이션

모션은 데이터 기반 모션합성접근법을 통해 시뮬레이션 할 수 있다[11]. 모션 캡처와 센서 데이터는 Min과 Chai가 제시한 모션 영상을 나타내는 모션 모델의 조건과 함께 계층적 골격 모델에 저장된다[12]. 센서 데이터와 결합된 데이터 기반 모션의 합성은 고품질 모션 캡처를 실세계 조립 작업과 연관시킬 수 있다. 물리적 작업과 가상 작업 사이의 주요 모션 제약을 식별하여 사실적인 시뮬레이션을 생성할 수 있다. 이러한 방법은 가상 시스템 y_{opt} 의 원하는 결과를 정의하는 일련의 최적화 제약과 기준을 충족시키기 위한 데이터 기반 시뮬레이션을 통해 어셈블리 프로세스를 개선할 수 있는 것이다[13].

4. 적용을 위한 모의 실험

Fig. 3에서 설계한 디지털 트윈을 구성하기 위한 요소기술을 기반으로 하여 모의실험을 실시하였다. 실험

의 내용은 (a) 운영자가 작업을 수행하는 방식에 대한 실제 정보 기록하고 (b) 기록된 정보를 디지털 트윈으로 전송하고 (c) 디지털 트윈의 연속적인 재구성성을 통해 잠재적인 개선 사항을 식별하는 것과 함께 현재 프로세스의 인체 공학 및 작업 수행 시간을 평가하는 것이다.

실험을 위한 시나리오는 약 10m² 창고에 대한 작업 환경으로 구성된다. 환경은 서로 다른 높이의 랙 두 개를 갖도록 배치되었으며, 여기서 물체를 골라서 다른 곳으로 옮기는 수행 동작은 Kinect v2 2 개와 e-glove 1 개로 추적되었고 파일럿 케이스 설정과 창고 환경 및 3D 모델을 Fig. 4에 제시하였다.

시나리오는 신체적 특성이 다른 3명의 작업자가 5회 반복하도록 하였으며 Table 2는 평가된 각 행위자의 동작 인식 접근 방식의 결과를 보여준다.

Table 2. Results of recognising motion

	Height (cm)	Weight (kg)	Walk	Pick	Carry	Place
Actor 1	195	120	12/20	20/20	12/20	14/20
Actor 2	168	74	19/20	19/20	16/20	15/20
Actor 3	172	62	18/20	20/20	19/20	18/20

인식된 모션으로 부터 물리적 환경으로 기록되어지는 데이터에 해당하는 모션 제약이 생성된다. 좌표 변

환 및 시간 동기화를 포함하여 실제 기록을 모션 제약 정보로 변환하는 데 필요한 시간은 약 5-10분이었다. 이러한 제약을 통해 모션합성모델은 가상환경에서 3D 인간모델을 통해 실제 작업자의 행동을 시뮬레이션 할 수 있다. 모션 및 환경 제약이 달라지면 시뮬레이션이 달라지며 스파게티 차트와 앞서 언급한 시나리오에 대한 인체 공학적 평가는 다음 Fig.5에 제시하였다.

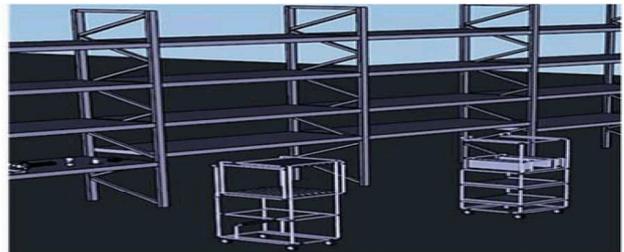
시뮬레이션 결과를 평가해 볼 때, 디지털 트윈 재구성 및 새로운 시뮬레이션 실행을 포함하여 제시된 접근 방식을 반복적으로 실행할 때 창고 운영과 관련된 인체 공학적 성과는 며칠이 소요되던 것이 수시간 내에 디지털 트윈 시뮬레이션을 통해 최적화되는 개선효과를 달성할 수 있다. 시뮬레이션이 원하는 작업 공간 구성과 조립 단계의 특성을 생성한 후에는 최소한의 비용과 노력으로 결과를 물리시스템으로 전송하여 지속적 개선을 가능하게 하는 것이다.

5. 결론

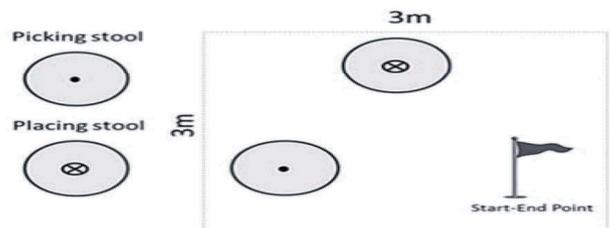
본 연구는 수작업 기반 제조 시스템의 실제 정보를 사이버 형태로 전송하는 접근방식을 제안하였다. 데이터는 비용-효율적인 접근 방식으로 후속처리와 평가를 가능하게 하고 센서기록은 창고운영의 인체공학을 개선하고 스테이션을 재구성할 수 있도록 제안하였다.



a) Warehouse environment



b) 3D model of warehouse environment



c) Evaluated scenario

Fig. 4. Experimental setup

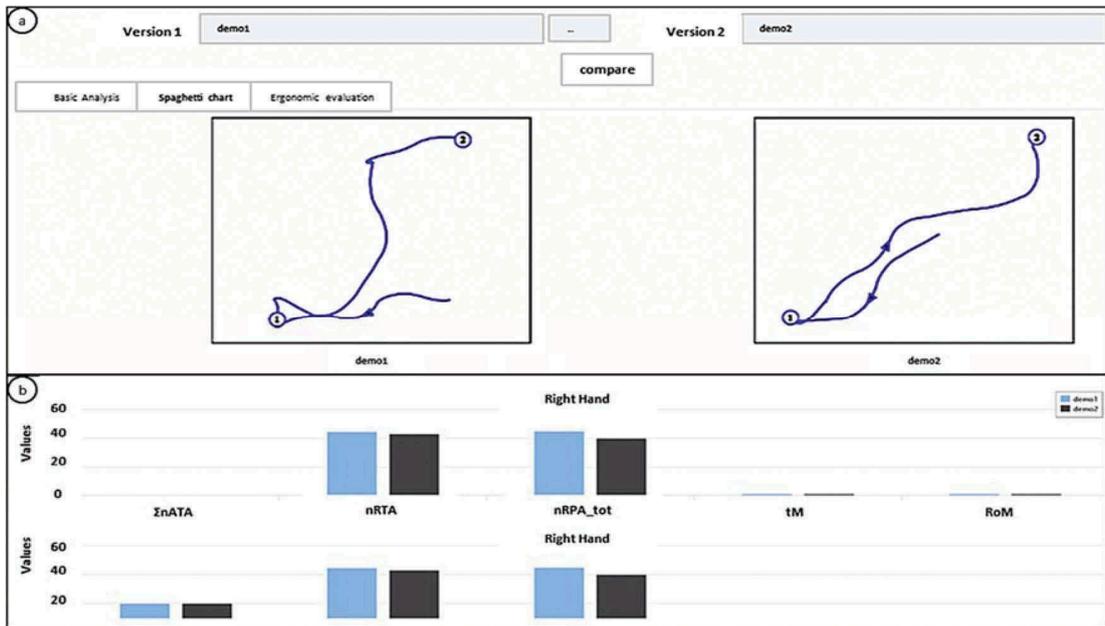


Fig. 5. Spaghetti chart & ergonomic results

실제생산공정을 중단하지 않고 이러한 실험이 가능하므로 디지털 트윈 개념은 제어 루프를 종료하는 제조 시스템의 컨트롤러로 사용될 수 있는 가능성을 보여준다. 폐쇄 루프시스템은 인적자원계획, 스테이션 설계 및 재구성, 신속한 프로토타이핑과 같은 생산방식에 관련된 애플리케이션을 강화할 수 있는 디지털 테스트베드를 제공할 수 있다.

후속연구를 통하여 실제작업을 기록하는데 사용되는 센서의 확장 뿐만 아니라 작업을 인식하고 동작 제약을 생성하기 위한 데이터 처리 접근 방식의 정확성을 개선할 수 있는 추가 연구가 필요하며 디지털 트윈의 정확도를 높이기 위해 센서시스템을 지원하는 조건 추출 및 모션 합성을 위한 대체적인 접근방식에 대한 평가가 연구되어야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] F. Tao & M. Zhang. (2017). Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access* 5: 20418-20427. DOI : 10.1109/ACCESS.2017.2756069.
- [2] B. G. Thiede, S. Posselt, S. Kauffeld & C. Herrmann. (2017). Enhancing Learning Experience in Physical Action-Oriented Learning Factories Using a Virtually Extended Environment and Serious Gaming Approaches. *Procedia Manufacturing*, 9, 238-244. DOI : 10.1016/j.promfg.2017.04.042.
- [3] Y. Lu, T. Peng & X. Xu. (2019). Energy-efficient cyber-physical production network: architecture and technologies, *Computing and Industrial Engineering*. 129, 56-66. DOI : 10.1016/j.cie.2019.01.025.
- [4] M. Schluse, M. Priggemeyer, L. Atorf & J. Rossmann. (2018). Experimentable digital twins streamlining simulation-based systems engineering for industry 4.0, *IEEE Trans. Industrial Informatics*. 14, 1722-1731. DOI : 10.1109/TII.2018.2804917.
- [5] Blender. (2015). *Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software*. (Online). <https://www.blender.org/>
- [6] D. M. Battini, F. Faccio, A. Persona & F. Sgarbossa. (2011). New Methodological Framework to Improve Productivity and Ergonomics in Assembly System Design." *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(1), 30-42. DOI : 10.1016/j.ergon.2010.12.001.
- [7] M. Rietzler, F. Geiselhart, J. Thomas, & E. Rukzio. (2016). FusionKit: A Generic Toolkit for Skeleton, Marker and Rigid-Body Tracking. *In Proceedings*

of the 8th ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems - EICS '16, 73-84. New York, USA: ACM.
DOI : 10.1145/2933242.2933263

- [8] D. Park, M. Choi & D. Yang, (2020), A Study on a framework for digital Twin management system applicable to smart factory, *Journal of convergence for information technology*, 10(9), 1-7.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2020.10.09.001.
- [9] S. Herath, M. Harandi & F. Porikli. (2017). Going Deeper into Action Recognition: A Survey. *Journal of Image and Vision Computing*. 60. 4-21.
DOI : 10.1016/j.imavis.2017.01.010.
- [10] G. Pintzos, N. Nikolakis, K. Alexopoulos & G. Chrissolouris. (2016). Motion Parameters Identification for the Authoring of Manual Tasks in Digital Human Simulations: An Approach Using Semantic Modelling. *Procedia CIRP*. 41. 752-758.
DOI : 10.1016/j.procir.2015.12.077.
- [11] M. Manns & N. A. A. Martin. (2015). Improving A Walk Trajectories with B-Splines and Motion Capture for Manual Assembly Verification. *Procedia CIRP*. 33. 364-369.
DOI : 10.1016/j.procir.2015.06.083.
- [12] E. Herrmann, M. Manns, H. Du, S. Hosseini & K. Fischer. (2017). Accelerating Statistical Human Motion Synthesis Using Space Partitioning Data Structures. *Computer animation & Virtual worlds*. 28. e1780.
DOI : 10.1002/cav.1780.
- [13] J. Min & J. Chai. (2012). Motion Graphs++: A Compact Generative Model for Semantic Motion Analysis and Synthesis. *ACM Transactions on Graphics*, 31(6), 12.
DOI : 10.1145/2366145.2366172.

김 경 일(Kyung-Ihl Kim)

[종신회원]



- 1983년 2월 : 명지대학교 경영학과 (경영학사)
- 1995년 2월 : 명지대학교 경영학과 (경영학박사)
- 1993년 4월 ~ 현재 : 한국교통대학교 융합경영학과 교수

- 관심분야 : AIS, IMS, 중소기업정보화
- E-Mail : kikim@ut.ac.kr