

자율작업 건설기계의 사전 훈련을 위한 디지털 트윈 플랫폼 구성 방안 Configuration Plan of Digital Twin Platform for Pre-training of Autonomous Construction Equipment

장흥석 · 이흥석 · 이연호 · 차영택

Hong Seok Jang, Hong Seok Lee, Yeon Ho Lee and Young Taek Cha

1. 서 론

디지털 트윈(Digital Twin)은 2002년 미국의 마이클 그리브스가 상품 주기 관리를 위한 개념적인 공간이라는 주제로 비슷한 개념을 소개하였으나¹⁾, 2010년 미국 항공우주국의 모델링, 시뮬레이션, 정보 기술 및 처리 기술 로드맵에 17번 언급되면서 해당 용어가 최초 사용되기 시작하였다²⁾. 이후 GE가 자사의 제품(엔진, 터빈 등)에 디지털 트윈 모델을 적용하면서 널리 알려졌으며, 사물인터넷 및 인공지능 기술과 접목되어 산업 전반에 확장되고 있는 추세이다. 디지털 트윈에 대한 정의는 각 분야의 특성에 따라 조금씩 다르지만, 위키 백과에서는 컴퓨터 현실 속 사물의 쌍둥이를 만들고, 현실에서 발생할 수 있는 상황을 컴퓨터로 시뮬레이션함으로써 결과를 미리 예측하는 기술이라고 정의하고 있다³⁾. 비슷한 관점에서 GE리포트는 다양한 물리적 시스템의 구조, 맥락, 작동을 나타내는 데이터와 정보의 조합으로, 과거와 현재의 운용 상태를 이해하고 미래를 예측할 수 있는 인터페이스로 표현하기도 하였다⁴⁾. 즉, 디지털 트윈을 이루는 핵심 요소는 객체에 대한 데이터와 객체의 거동을 예측할 수 모델이라고 할 수 있으며, 이러한 관점에서 텍사스 오스틴(Texas Austin)의 윌콕스(Willcox) 교수는 2020년 TEDxUTAustin 컨퍼런스에서 새로운 데이터를 통해 물리 시스템에 대한 수학적 모델을 지속적으로 업데이트 하는 과정인 데이터 동화가 디지털 트윈 개념의 핵심이라고 강조하였다⁵⁾. 모델은 객체의 상태를 예측가능하게 하나 객체에 대해 정보가 부족하며, 센서를 통해 취득한 데이터는 객체의 현재 상태를 반영하나 예측가능하지 않기 때문이다.

건설분야에서의 디지털 트윈은 BIM(Building Information Modeling)과 같이 건설 작업환경과 공정관리에 집중되어 있으며, 토공작업의 정확성과 측량 편의성에 기반한 MC(Machine Control), MG(Machine

Guidance)와 같은 운전자 보조 기능들과 연동되어 진다. 국토부는 2022년 스마트 건설 활성화 방안으로서 건설공정의 BIM 안착과 MC, MG를 사용한 시공기준 제정 추진을 공표하였으며, 건설현장의 디지털화와 탈현장 건설(Off-Site Construction) 활성화를 추진 중이다. 하지만, 자율주행 자동차와 같이 건설기계도 ‘Concept-X’와 같은 자율작업 건설기계들이 개발되고 있는 추세이며⁶⁾, 이를 위해서는 건설기계 중심의 디지털 트윈 기술을 발전시키는 것이 필요하다. 여기서, 건설기계 중심의 디지털 트윈이란 자율작업 알고리즘이 건설기계에 적용되었을 때의 위험성을 최소화하고, 개발 기간과 비용과 줄일 수 있도록 실제 건설기계와의 모사도를 높인 디지털 모델을 말한다. 이러한 모델은 건설기계의 다양한 작업에서 수집된 데이터로 지속적으로 업데이트되면서 실제 건설기계에 대한 모사도가 높아지며, 디지털 작업환경내에서 사전 훈련함으로써 실제 작업시의 시행 오차를 줄여간다. 유사한 사례로 로봇분야에서는 Fig. 1과 같은 인공지능 신경망의 학습을 가속화하기 위한 NVIDIA ISSAC과 같은 디지털 트윈 플랫폼이 있으며⁷⁾, 디지털 환경에서 로봇을 다양한 작업환경에 노출시켜 사전 훈련하는 용도로 사용되고 있다.



Fig. 1 NVIDIA ISAAC SIM⁷⁾

NVIDIA ISSAC은 로봇/센서/작업환경에 대한 디지털 모델과 인공지능 개발환경, ROS(Robot Operating System)와의 연동 인터페이스를 제공하고 있으며, Fraunhofer IML, Festo, ETH Zurich 등이 물류로봇, 협동로봇, 4족 주행로봇에 대해 인공지능 알고리즘을 훈련하여 실제 로봇에 적용한 사례를 가지고 있다. 하지만, NVIDIA ISSAC은 토공 작업 환경 모델 등의 부재로 자율작업 건설기계의 사전 훈련에 그대로 활용하기에는 무리가 있다. 따라서, 로봇이나 자동차분야의 것을 일부 차용할 수 있으나, 건설기계의 특성을 살려 재구성할 필요가 있다.

본 기사에서는 자율작업 건설기계의 사전 훈련을 위한 디지털 트윈 플랫폼 구성에 필요한 시뮬레이션 모델을 기존의 연구 사례나 이미 개발된 소프트웨어 들로부터 알아보고, 대략적인 구성 방향을 제시하고자 한다.

2. 디지털 트윈 시뮬레이션 모델

2.1 건설기계 시뮬레이션 모델

건설기계 시뮬레이션 모델은 건설기계의 상태 데이터로 동적거동을 예측할 수 있다. 건설기계는 큰 힘을 내기 위해 유압식 매니플레이터를 사용하는데, 유압식 매니플레이터가 적용된 건설기계는 동역학과 유압이 연성된 형태로 모델링된다. 디지털 트윈 플랫폼내에서 사전훈련을 거친 모델은 실제 기계와도 연동되어야 하므로 거동의 예측에 있어 실시간성이 요구되기도 한다. 하지만, 유압 모델은 수치 해석적으로 스티프(Stiff)하기 때문에 거동 예측의 실시간성이 떨어진다. 모델의 간략화⁸⁾, 동역학과 유압의 해석의 개별 솔버 채용⁹⁾, 모델 분할 병렬 연산¹⁰⁾ 등을 통해 실제 기계와 연동될 정도의 실시간성은 높일 수 있으나, 제작 오차 및 마모, 어태치먼트의 구성에 따른 건설기계의 물성변화들을 수치해석적 모델로 구현하기에는 한계가 있다.

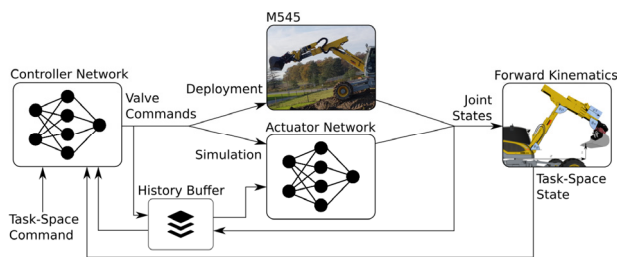


Fig. 2 Data-driven actuator model¹¹⁾

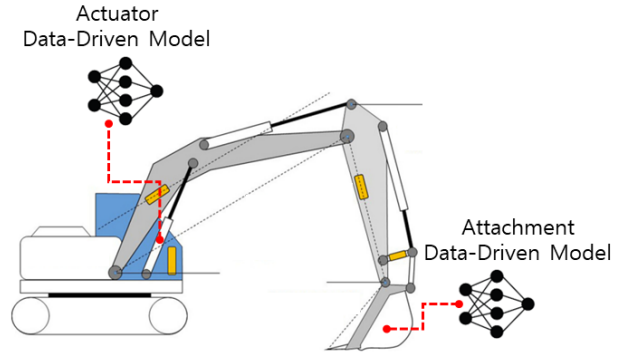


Fig. 3 Numerical analysis model applied with partial data-driven model

건설기계의 물성변화에도 불구하고 범용적인 시뮬레이션 모델 구성 방법으로 Fig.2 같이 ETH Zurich에서는 액추에이터 네트워크(Actuator Network)을 구성하여 모델링하는 방법을 제안하였으며, 유압 밸브의 응답 지연 및 데드 존(Dead zone), 작동유의 온도, 엔진 rpm을 반영하여 유압 액추에이터의 비선형성을 반영할 수 있도록 Data-driven 모델을 구성하였다¹¹⁾. 이러한 모델은 실험으로 인한 입력과 출력 데이터만으로 모델을 쉽게 구성할 수 있다는 장점은 있지만, 모델의 내부 동작과정을 해석하기가 어렵다.

따라서, 수치해석 모델과 Data-driven 모델의 단점을 보완하기 위해서는 Fig. 3과 같이 수치해석 모델로 전반적인 모델을 구성하되, 기계적 물성의 변동성이 큰 부분들을 부분적으로 Data-driven 모델로 구성하는 방법에 대한 검토도 필요하다.

2.2 환경인지 센서 모델

건설기계의 자율작업에는 카메라나 라이다(LiDAR)와 같은 환경인지 센서들이 필요하다. 이러한 환경인지 센서들은 장애물 및 작업 대상물을 인식하거나 형상정보를 얻기 위해 사용되며, 자율작업 모사도를 높이기 위해 디지털 환경에서도 구현되어야 한다. NVIDIA ISAAC SIM은 디지털 환경에서도 카메라 및 라이다를 구현할 수 있도록 되어 있으므로, 이를 통해 건설기계의 디지털 트윈에서 필요한 환경인지 센서 모델을 살펴보고자 한다.

NVIDIA ISAAC SIM은 단순한 카메라 영상의 모사뿐만 아니라, 초점 길이 등과 같은 카메라의 렌즈 특성 조절 및 Fig. 4와 같은 왜곡보정 기능들까지 제공하고 있으며, Fig. 5와 같이 ZED나 Intel RealSense와 같은 상용 스테레오 카메라를 모사 기능까지 제공하고 있다.

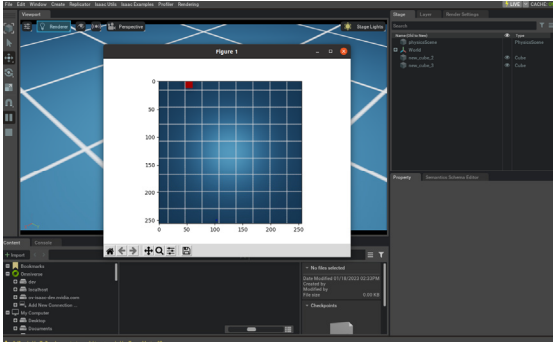


Fig. 4 Camera calibration(NVIDIA ISAAC)⁷⁾

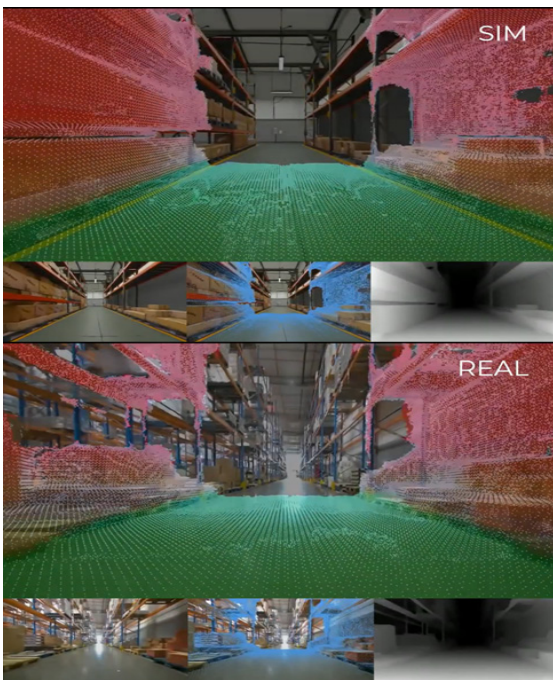


Fig. 5 Stereo camera simulation(NVIDAI ISAAC/ZED)⁷⁾

라이다와 관련하여서도 Fig. 6과 같이 Ouster, SICK, Velodyne 등의 상용 센서에 대한 모사기능을 제공하고 있으며, 카메라와 라이다 융합을 위한 캘리브레이션 기능까지 제공하고 있다.



Fig. 6 Lidar simulation(NVIDAI ISAAC)⁷⁾

또한, ROS환경을 지원하는 ISSAC ROS를 통해 객체 인식 및 분할 등의 알고리즘을 테스트 할 수 있는 환경을 지원하므로, 건설기계의 디지털 트윈내에서도 유용하게 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

2.3 작업 환경 모델

건설기계는 다양한 토공작업 환경에서 작업을 하므로 Fig. 7과 같이 디지털 트윈도 다양한 토공작업 환경을 제공할 수 있어야 하며, 건설기계 시뮬레이션과 물리적으로 상호 작용할 수 있어야 한다. 디지털 환경상에서 완벽하게 토공 작업환경을 구현할 수는 없지만, 토양의 물리적인 물성은 건설기계의 부하를 제공함으로써 건설기계의 거동을 예측할 수 있게 하기 때문에 토양과 건설기계의 상호작용 계산은 필수적으로 구현되어야 한다.

토양과 건설기계의 상호작용 기능을 제공하는 상용프로그램으로는 CM labs사의 Vortex Studio가 있으며, Fig. 8과 같이 FEE(Fundamental Earth moving Equation)와 국부적으로 DEM(Discrete Element Method)을 사용하여 토양과 건설기계 툴간의 상호작용을 실시간으로 계산할 수 있는 기능을 제공하고 있다¹²⁾. Vortex Studio는 Fig. 9와 같이 토공 작업에 대한 강화학습의 사전 훈련으로 ETH Zurich가 활용한 사례가 있으므로¹³⁾ NVIDIA ISAAC과 함께 건설기계 디지털 트윈 구성에 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, FEE와 DEM의 혼용은 계산의 실시간성은 높으나 복잡한 토양의 물성을 반영하기 어렵기 때문에 FEE를 다른 수치모델이나 액츄에이터 네트워크와 같이 인공지능경망으로 구성해야 할 수도 있다.

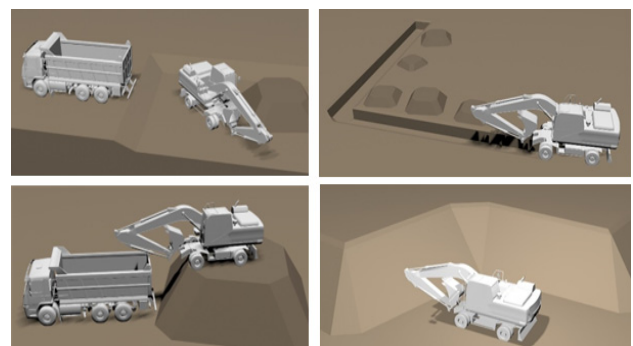


Fig. 7 Working environment model of construction Equipment

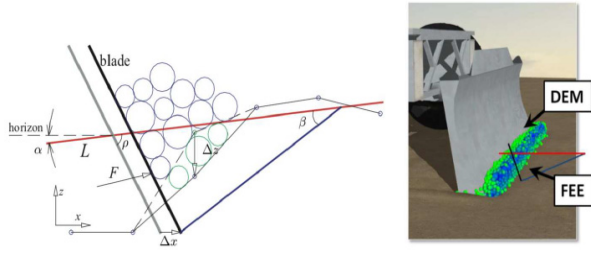


Fig. 8. Hybrid method(FEE and DEM)¹²⁾

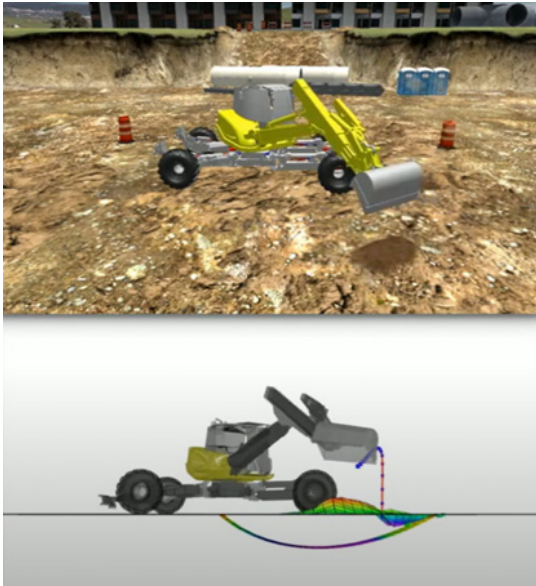


Fig. 9 Reinforcement learning using bucket-soil interaction(ETH Zurich)¹³⁾

3. 디지털 트윈 플랫폼의 구성

앞서 기술했던 디지털 플랫폼 시뮬레이션 필요한 3가지 요소에 객체 인식 및 분할, 자율작업 제어기를 추가하여 자율작업 건설기계의 사전훈련이 가능한 디지털 트윈 플랫폼의 구성을 Fig. 10 같이 간략하게 구성하였다.

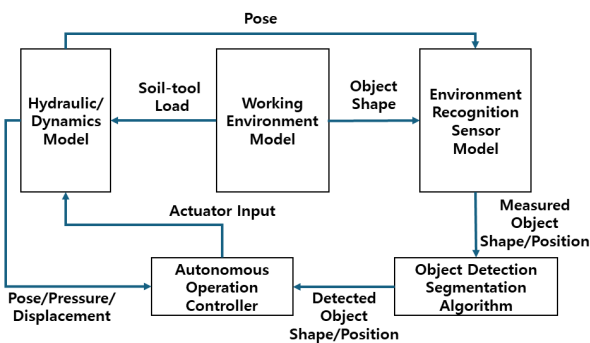


Fig. 10 Configuration of digital twin platform for pre-training of autonomous construction equipment

유압/동역학 모델로 구성된 건설기계 시뮬레이션 모델은 작업 환경 모델과의 상호작용으로 생긴 부하를 받아 건설기계의 자세, 압력, 변위와 같은 동적 거동 정보를 생성하고, 건설기계의 거동 정보는 환경 인지 센서 모델과 자율작업 제어기에 전달된다. 환경 인지 센서 모델은 전달받은 건설기계의 동적 정보로 예측된 객체의 위치 및 형상 정보를 객체 인식과 분할 알고리즘을 거쳐 자율작업 제어기에 전달한다. 이때, 자율작업 제어기는 건설기계의 동적 거동 정보와 객체의 위치 및 형상 정보로 건설기계 제어입력을 건설기계 시뮬레이션 모델에 전달한다.

3. 결론

본 기사는 자율작업 건설기계의 사전 훈련이 가능한 디지털 트윈 시뮬레이션 플랫폼의 필요 시뮬레이션 구성 요소에 대해 알아보았으며, 건설기계 시뮬레이션, 환경 인지 센서, 작업 환경 모델로 나누어 기존 연구사례와 소프트웨어 중심으로 검토하였다. 검토된 사항을 바탕으로 자율작업 건설기계 사전훈련을 위한 디지털 트윈 플랫폼의 구성방향을 대략적으로 제시하였으며, 제시된 방안으로 구성된 디지털 트윈 플랫폼은 자율작업 알고리즘의 실제 건설기계 적용시의 위험성을 최소화하고, 개발 기간과 비용을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 1) Grieves, Michael, "Completing the Cycle: Using PLM Information in the Sales and Service Functions". SME Management Forum, 2022.
- 2) E. Negri, L. Fumagalli, M. Macchi, "A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems", Procedia Manufacturing, vol. 11, pp. 939 - 948, 2017.
- 3) WIKIPEDIA, 'Digital twin', https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_twin#cite_note-6
- 4) GE Reports Korea, "Gartner Top 10 Technology Trends 2017 'Digital Twin' Story - Key Technologies in IoT and Industrial Digitization", 2017. <https://www.gereports.kr/the-rise-of-digital-twins/>

- 5) ODEN INSTITUTE, "Karen Willcox's Talk on Digital Twins Elevated to TED.com", 2023. <https://oden.utexas.edu/news-and-events/news/karen-willcox-digital-twins-ted-talk/>
- 6) DEVELON, "The Concept-X Projects", 2023. <https://eu.develon-ce.com/en/innovation-concept-x>
- 7) NVIDIA, "NVIDIA ISAAC", 2024. <https://developer.nvidia.com/isaac>
- 8) Y. Im, S. Lee, M. Cho, D. Shin, S. Hwang, "Real-time simulation of an excavator considering the functional valves of the MCV", vol. 16, no.4, pp. 38~47, 2019.
- 9) J. Kim, J. Lee, J. A. Jung, "The methodology development of real-time simulation model for an excavator," SAE Technical Paper, 2016.
- 10) C. Park, S. Yoo, H. Ahn, J. Kim, D. Shin, "A coupled hydraulic and mechanical system simulation for hydraulic excavators", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, vol. 234, no. 4, pp. 527~549, 2020.
- 11) P. Egli, M. Hutter, "Towards RL-Based Hydraulic Excavator Automation", International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 2692-2697. 2020.
- 12) D. Holz, T. Beer, T. Kuhlen, "Soil deformation models for real-time simulation: a hybrid approach", Workshop in Virtual Reality Interactions and Physical Simulation, 2009.
- 13) P. Egli, D. Gaschen, S. Kerscher, D. Jud, M. Hutter, "Soil-Adaptive Excavation Using Reinforcement Learning", IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 7, no. 4, pp 9778-9785, 2022.

[저자 소개]



장홍석

E-mail : hsjang@kitech.re.kr

Tel : 053-580-0323

2014년 창원대학교 기계공학과 석사.
2016년~현재 한국생산기술연구원 연구원



이흥석

E-mail : leehs@kitech.re.kr

Tel : 053-580-0329

2014년 창원대학교 기계공학과 석사.
2014년~현재 한국생산기술연구원 대경 지역본부 모빌리티시스템그룹 연구원.
다물리시스템 해석, 건설기계 부품의 연구에 종사. 유공압건설기계학회의 회원



이연호

E-mail : leeyeonho@kitech.re.kr

Tel : 053-580-0347

2014년 경북대학교 기계공학과 석사.
2014년~현재 한국생산기술연구원 대경 지역본부 모빌리티시스템그룹 연구원.
건설기계 무인 자율화 제어 연구.



차영택

E-mail : chayt3@kitech.re.kr

Tel : 053-580-0321

2005년~2008년 LG생산기술연구원 주임 연구원. 2010년 경북대학교 기계공학과 석사 과정 졸업. 2010년~현재 한국생산기술연구원 선임연구원. 한국소음진동공학회, 한국정밀공학회, 유공압건설기계학회 등의 회원, 공학 석사