

고정밀 디지털 트윈을 위한 하이브리드 모델링 방법론

김동연, 조든솔, 김원태*

한국기술교육대학교 컴퓨터공학과 미래융합공학 전공

bk077711@koreatech.ac.kr, whemsthf123@koreatech.ac.kr, *wtkim@koreatech.ac.kr

Hybrid Modeling Methodology for High Precision Digital Twin

DongYeon Kim, Deun-Sol Cho, Won-Tae Kim*

Future Convergence Engineering, Dept. of Computer Science & Engineering, Korea

University of Technology and Education

요 약

로봇팔, 드론, 자율주행차 등의 미션 크리티컬 CPS(Cyber-Physical System)은 제어 시 발생할 수 있는 작은 오차로 인해 사고가 발생할 수 있기 때문에 CPS와 디지털 트윈이 결합된 고신뢰 제어 시스템으로 개발하여 제어 시 발생하는 오차를 줄이며 제한된 시간 내에 정확한 결과를 도출하는 것이 필요하다. 고신뢰 제어 시스템의 개발에 필요한 고정밀 디지털 트윈은 하이브리드 모델링 기법을 통해 물리 시스템을 정밀하게 모사한 디지털 모델을 생성하여 실제 환경에서 CPS를 동작하는 것과 유사한 결과를 도출해야 한다. 본 논문은 고신뢰 제어 시스템의 개발을 위해 필요한 고정밀 디지털 트윈의 구현을 위한 몇 가지 하이브리드 모델링 방법론을 제안한다. 제안하는 하이브리드 모델링 방법론을 통해 실제 환경의 물리 사물과 시뮬레이션 상의 가상 사물의 오차를 줄여 모사도가 높은 고정밀 디지털 트윈을 구현하여 고신뢰 제어 시스템을 개발할 수 있다.

I. 서 론

4차 산업 혁명의 핵심 기술인 디지털 트윈(Digital twin)은 제조 산업을 비롯한 의료, 헬스, 스마트시티, 교통, 농수산, 해양, 건설, 토목, 에너지 등 전 산업 분야에 걸쳐 적용되어 각 분야에 혁신을 가져오고 있다. 특히 로봇 팔, 드론, 자율주행차 등의 미션 크리티컬 CPS(Cyber-Physical System)는 제어 시 발생하는 작은 오차가 사고로 이어질 수 있기 때문에 제한 시간 내에 정확한 결과를 도출해야 한다. 따라서 디지털 트윈을 통한 모니터링, 결과 예측 등을 수행하여 CPS에 기능성, 안전성, 신뢰성을 보장해야 하며 이를 위해서는 CPS와 디지털 트윈이 결합된 고신뢰 제어 시스템이 개발되어야 한다.

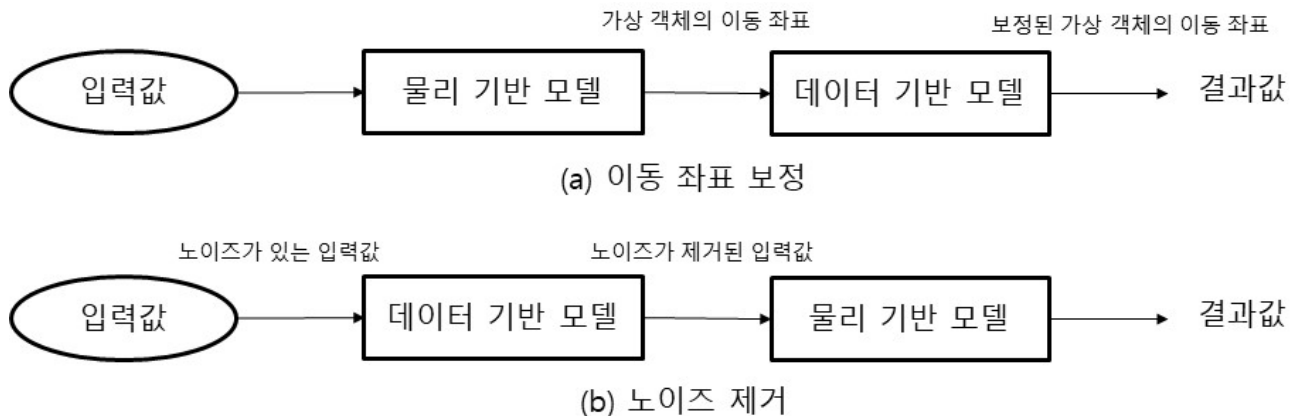
디지털 트윈의 디지털 모델과 시뮬레이터를 통해 계산된 결과를 기반으로 CPS를 제어할 경우 계산 완료까지의 딜레이, 계산된 위치와 실제 위치의 차이 등으로 인해 CPS 제어의 오차가 발생할 수 있다. 고신뢰 제어 시스템은 오차가 발생하면 제한된 시간 내에 정확한 제어 명령을 수행할 수 없기 때문에 이를 해결하기 위해서는 대상 물리 시스템을 정밀하게 모사한 디지털 모델과 실제 환경과 동일하게 동작하는 시뮬레이터가 필요하다. 따라서 고신뢰 제어 시스템의 개발을 위해서는 해당 요소를 제공할 수 있는 고정밀 디지털 트윈이 필요하며, 고정밀 디지털 트윈을 통해 사용자는 입력에 따른 실제 사물의 동작 예측, 실제 환경과 유사한 환경에서의 데이터 확보 등을 수행할 수 있다. 고정밀 디지털 트윈을 구현하기 위해서는 대상 물리 시스템을 정밀하게 모사할 수 있는 모델링 기술이 필요하다. 고정밀 디지털 트윈에 적용되는 모델링 기법은 데이터 의존도, 모델에 적용된 수학적 방정식의 복잡도 등에 따라서 물리 기반 모델링(Physics-Based Modeling), 데이터 기반 모델링(Data-Driven Modeling), 하이브리드 모델링(Hybrid Modeling)으로 구분된다[1].

물리 기반 모델링은 물리적 현상에 대한 관찰 및 이해 기반의 수학적

방정식을 만들고, 수학적 방정식을 적용한 모델을 생성하여 물리적 현상을 모델링한다. 물리 기반 모델은 수학적 방정식을 사용하여 모델링을 수행하기 때문에 데이터 의존도가 낮으며 수학적 방정식에 입력값을 넣어서 결과를 도출하기 때문에 적용 분야에 대한 이해가 필요하지만, 결과가 도출되기까지의 과정을 상세히 알 수 있기 때문에 사용자가 모델의 동작을 이해할 수 있다. 데이터 기반 모델링은 물리적 현상을 해석하기 위해 물리적 현상과 관련된 데이터를 수집하고, 수집된 데이터를 통해 인공지능을 학습시켜 데이터 기반 모델을 생성한다. 데이터 기반 모델링은 학습 시 적용된 데이터의 종류, 품질, 신뢰성 등에 의해서 모델의 품질이 결정되며, 데이터가 부족할 경우 모델링을 수행할 수 없어서 데이터 의존도가 높다.

하이브리드 모델링은 물리 기반 모델링과 데이터 기반 모델링을 융합하여 두 모델링 기법의 장점을 강화하고 모델링 기법이 가진 약점을 보완한다. 하이브리드 모델링은 주로 데이터 기반 모델을 통해 물리 기반 모델이 가진 한계인 비선형적 변수의 반영, 불완전한 수학적 방정식의 보완, 물리 기반 모델의 결과 보정 등을 수행한다. 하이브리드 모델링의 구조는 직렬형 또는 병렬형의 구조로 이루어져있으며 물리 기반 모델의 한계를 극복하여 물리 기반 모델의 성능을 향상시킬 수 있도록 구성된다[2].

실제 환경의 물리 객체와 시뮬레이터의 가상 객체에 동일한 값을 입력해도 가상 객체는 현실에 존재하는 모든 요인을 고려할 수 없기 때문에 물리 객체의 결과와 시뮬레이터를 통해 계산된 가상 객체의 결과에는 오차가 발생한다. 이로 인해 물리 객체와 가상 객체의 결과가 다를 경우 물리 객체에 대한 정밀한 모사가 불가능하며, 고신뢰 제어 시스템의 개발에 필요한 고정밀 디지털 트윈의 구현이 어렵기 때문에 데이터 기반 모델로 물리 기반 모델의 문제점을 보완하여 디지털 트윈의 정밀도를 높여야 한다. 본 논문에서는 고신뢰 제어 시스템을 개발하기 위한 고정밀 디지털 트윈의 적용될 수 있는 몇 가지 하이브리드 모델링 방법론을 제안한다.



〈그림 1 고정밀 디지털 트윈을 위한 하이브리드 모델링 방법론〉

II. 고정밀 디지털 트윈을 위한 하이브리드 모델링 방법론

시뮬레이터 상의 가상 객체를 통해 물리 객체의 이동 결과를 예측할 경우 가상 객체의 물리 기반 모델을 통해 이동 후의 위치를 계산할 수 있지만 가상 환경과 실제 환경의 오차로 인해 두 좌표의 오차가 발생할 수 있다. 물리 객체와 가상 객체의 위치 오차가 누적되면 두 객체의 위치가 달라지기 때문에 가상 객체를 통해 물리 객체의 움직임을 예측할 수 없으며 물리 객체에 대한 가상 객체의 모사도가 떨어져 고정밀 디지털 트윈의 구현이 어렵다. 따라서 물리 객체와 가상 객체의 위치 오차를 줄이기 위해 [그림1 (a)]와 같은 순서로 물리 기반 모델과 데이터 기반 모델로 구성된 하이브리드 모델을 제안한다. 하이브리드 모델에 사용되는 데이터 기반 모델은 가상객체와 물리 객체가 이동한 좌표를 학습하여 가상 객체의 이동 좌표를 보정한다. 물리 기반 모델을 통해 이동한 가상 객체의 이동 좌표를 데이터 기반 모델에 입력하여 보정된 가상 객체의 이동 좌표를 출력하는 하이브리드 모델링 구조를 통해 물리 기반 모델이 실제 사물과 동일하게 움직이게 만들어 모사도를 높일 수 있다.

물리 객체의 제어는 물리 기반 모델에 제어값을 입력하여 출력된 결과를 통해 예측할 수 있지만, 물리 기반 모델의 수학적 방정식에서 고려하지 못한 노이즈가 입력값에 반영될 경우 물리 기반 모델의 출력 결과가 달라진다. 물리 기반 모델의 출력이 실제 CPS의 출력과 달라질 경우 디지털 트윈의 모사도가 감소하기 때문에 고정밀 디지털 트윈의 구현을 위해서는 물리 기반 모델의 입력값에 존재하는 노이즈를 제거해야한다. 노이즈를 제거하기 위한 방법으로 <그림1 (b)>와 같은 순서로 데이터 기반 모델과 물리 기반 모델로 구성된 하이브리드 모델을 제안한다. 하이브리드 모델에 사용되는 데이터 기반 모델은 입력값에 따른 실제 사물의 제어 결과, 물리 기반 모델의 제어 결과를 학습하여 입력값에 대한 노이즈 필터링 기능을 수행한다. 하이브리드 모델은 노이즈가 존재하는 입력값을 데이터 기반 모델을 통해 필터링하여 물리 기반 모델을 통해 제어되는 가상 객체가 실제 환경에서 동작하는 물리 객체와 유사하게 동작하도록 만들어 모사도를 높일 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 고신뢰 제어 시스템의 개발에 필요한 고정밀 디지털 트윈의 구현을 위한 하이브리드 모델링 방법론을 제안했다. 제안하는 하이브리드 모델링 방법론을 통해 실제 환경의 물리 객체와 시뮬레이션 상의 가상 객체 사이에 발생하는 오차를 감소시켜 디지털 트윈의 모사도를 높여 고정밀 디지털 트윈을 구현할 수 있을 것이다. 향후 연구에서는 본 논문에서 제안한 하이브리드 모델링 방법론을 실제로 수행하여 제안하는 하이브리드 모델링의 성능에 대해 분석하고, 보다 상세한 하이브리드 모델링 방법론에 대해 연구할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터육성지원사업(IITP-2022-2021-0-01816) 및 정보통신산업진흥원(NIPA-D0335-22-1022)의 지원을 받아 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] Zendeboudi, S., Rezaei, N. and Lohi, A., "Applications of hybrid models in chemical, petroleum, and energy systems: A systematic review," *Applied energy*, 228, pp.2539–2566, 2018
- [2] Yang, S., Navarathna, P., Ghosh, S. and Bequette, B.W., "Hybrid modeling in the era of smart manufacturing," *Computers & Chemical Engineering*, 140, p.106874, 2020