

ROS 2 기반 센서 데이터 통합을 활용한 굴착기 디지털 트윈 시스템 구축

서다연, 황정훈, 박민철*

한국전자기술연구원, 한국전자기술연구원, *한국전자기술연구원

seodayeon416@keti.re.kr, hwangjh@keti.re.kr, *mincheol.p@keti.re.kr

Development of an Excavator Digital Twin System Using ROS 2-Based Sensor Data Integration

Dayeon Seo, Junghoon Hwang, Mincheol Park*

Korea Electronics Technology Institute, Korea Electronics Technology Institute, *Korea Electronics Technology Institute

요약

본 논문에서는 ROS 2 기반 센서 데이터 통합을 활용한 굴착기 디지털 트윈 시스템을 제안한다. 제안한 시스템은 URDF 기반 굴착기 디지털 트윈 모델을 중심으로 LiDAR, IMU, CAN 센서 데이터를 ROS 2 미들웨어를 통해 통합하여 실제 굴착기의 동작 상태를 가상 환경에 반영한다. LiDAR 센서는 굴착기의 위치 추정 및 굴착 지점 인식을 위해 사용되며, IMU 센서는 굴착기 관절의 움직임을 실시간으로 추정하여 모델의 조인트(joints) 상태를 갱신한다. 또한, CAN 신호는 굴착기 상부체(cab) 스윙 동작을 감지하는 상태 트리거로 활용되어, LiDAR 기반 오도메트리와 결합된 좌표 보정을 가능하게 한다. 제안한 시스템을 실제 굴착기(ix10e) 플랫폼과 RViz 환경에 적용한 결과, 굴착기의 주행, 위치 변화, 그리고 굴착 작업 중 관절 움직임이 실제 환경과 가상 환경 간에 일관되게 동기화되어 표현됨을 확인하였다. 본 연구는 실제 중장비 기반 디지털 트윈 시스템 구현의 가능성을 제시하며, 향후 자율 굴착 알고리즘 검증 및 작업 분석을 위한 기반으로 활용될 수 있다는 점에서 의의가 있다.

I. 서 론

최근 건설 자동화 및 무인화 기술의 발전과 함께, 중장비의 원격 제어 및 자율작업을 위한 디지털 트윈(Digital Twin) 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 디지털 트윈은 실제 시스템의 상태를 가상 환경에서 실시간으로 반영함으로써, 원격 모니터링, 시뮬레이션 기반 검증, 자율 알고리즘 개발 및 안전성 향상에 기여할 수 있다 [1]. 특히 굴착기와 같은 중장비의 경우, 복잡한 기구학 구조와 다양한 센서 데이터가 결합 되기 때문에, 실제 장비와 가상 모델 간의 정밀한 동기화가 필수적이다.

굴착 분야에서는 그동안 시뮬레이션 기반 플랫폼 및 가상 환경 중심의 연구가 활발히 수행 되어왔다 [2]. 이러한 접근은 알고리즘 검증 및 반복 실험 측면에서 장점을 가지지만, 실제 장비에서 발생하는 센서 데이터와의 실시간 연동에는 한계가 존재한다. 디지털 트윈의 핵심 요구 사항 중 하나인 실제 환경 - 가상 환경 간의 실시간 센서 연계는 여전히 중요한 연구 과제로 남아 있다 [3].

실제 굴착기 환경에서는 CAN(Controller Area Network) 기반 제어 신호, IMU(Imperial Measurement Unit) 데이터, 그리고 LiDAR 센서 정보 등 다양한 센서 데이터가 동시에 발생한다. 이러한 데이터들은 서로 다른 주기와 형식을 가지며, 이를 실시간으로 통합하고 처리하기 위한 통신 구조 설계가 필수적이다. 그러나 기존 연구들에서는 일부 센서 또는 제한적인 관절 정보만을 활용하여 디지털 트윈을 구성하는 경우가 많아, 실제 작업 환경을 충분히 반영하지 못하는 문제점이 발생한다 [4].

본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 ROS 2 기반 센서 데이터 통합을 활용한 굴착기 디지털 트윈 시스템을 구축한다. ROS 2는 DDS(Data Distribution Service) 기반 통신 구조를 바탕으로 실시간성, 확장성, 그리

고 다중 센서 데이터 통합에 적합한 미들웨어로, 실제 기계 기반 디지털 트윈 시스템 구현에 효과적으로 활용될 수 있다.

본 논문에서는 ROS 2 기반 센서 데이터 통합을 활용한 굴착기 디지털 트윈 시스템을 구축한다. 이를 위해 실제 굴착기의 2D 도면을 기반으로 SolidWorks를 이용한 3D 모델링을 수행하고, 이를 URDF(Unified Robot Description Format) 형태로 변환하여 RViz 및 Gazebo 환경에서 시각화 및 제어가 가능한 디지털 트윈 모델을 구현하였다. 또한, 실제 굴착기에서 수집한 CAN 및 IMU 센서 데이터를 ROS 2 환경으로 통합하여, 가상 모델에 실시간으로 반영함으로써 실제 환경 - 가상 환경 간 동기화를 수행하였다.

II. 본론

본 연구에서 구축한 디지털 트윈 시스템은 크게 네 부분으로 구성된다: (1) URDF 기반 굴착기 디지털 트윈 모델링 및 시각화, (2) LiDAR 기반 위치 추정 및 굴착 지점 인식, (3) IMU 기반 굴착기 관절 움직임 구현, (4) CAN 기반 굴착기 동작 상태 트리거.

시스템 전체 개략도는 그림 1과 같다. 본 연구에서는 실제 굴착기(ix10e)의 2D 도면을 기반으로 SolidWorks를 이용한 3차원 모델링을 수행하였다. 굴착기의 주요 구성 요소인 cab, boom, arm, bucket 및 주행부를 개별 부품으로 설계한 후 이를 하나의 어셈블리로 구성하였다. 초기 자세에서 boom, arm, bucket이 cab 기준으로 평행하도록 정렬하여 RViz에서의 초기 자세 일관성을 확보하였다. 설계된 3D 모델은 URDF exporter를 이용하여 URDF 형태로 변환했으며, 이 과정에서 각 조인트에 대해 회전축, 조인트 제한 각도, 그리고 좌표 변환을 위한 기준점을 정의하였다.

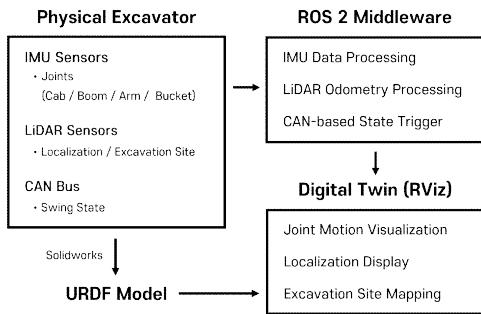


그림 1. 시스템 개략도

굴착기의 위치 추정 및 작업 환경 인식을 위해 Livox MID-360 및 Ouster OS0 LiDAR 센서를 굴착기에 장착하였다. LiDAR 센서는 실외 환경에서 굴착기 주행 및 굴착 작업 중 포인트클라우드 데이터를 수집하는 데 사용되었으며, ROS 2 기반 Localization 결과를 통해 굴착기의 위치 변화를 RViz 상에 반영하였다. 또한, 굴착 지점(돌 무더기)에 대한 포인트클라우드를 기반으로 한 고도맵(elevation map) 데이터를 취득하여, 향후 작업 분석을 위한 기반 데이터를 확보하였다.

굴착기 관절(joints) 움직임을 디지털 트윈에 반영하기 위해 cab, boom, arm, bucket에 총 4개의 IMU 센서를 장착하였다. 각 IMU로부터 수집되는 orientation 데이터는 quaternion 형태로 입력되며, 이를 통해 각 링크의 절대 각도를 계산하였다. URDF의 조인트 각도는 부모 링크 대비 자식 링크의 상태 각도를 요구하므로, 본 연구에서는 IMU로부터 획득한 절대 각도를 기반으로 부모 - 자식 링크 간 상태 각도를 계산하였다. 초기 자세에서 각 IMU의 출력값을 초기값으로 설정한 후, 시간에 따른 각도 변화량을 이용하여 boom, arm, bucket 관절의 상대 회전각을 계산하였다. 이를 통해 실제 굴착기의 관절 움직임이 RViz 상의 디지털 트윈 모델에 실시간으로 반영됨을 실외 환경에서 확인하였다.

CAN 신호는 본 시스템에서 상태 트리거로 사용되며, 상부체(cab) 스윙이 시작되는 시점을 감지하는 데 활용된다. 이를 통해 LiDAR 기반 오도메트리 결과와 결합하여, 굴착기 하부체는 고정된 상태로 유지하면서 상부체 회전만을 RViz 상에 정확히 표현할 수 있었다. 해당 구조를 통해 실제 굴착기의 동작 상태와 디지털 트윈 간의 시각적 일관성을 확보하였다.

본 연구의 시스템은 실제 굴착기(ix10e) 플랫폼과 RViz 기반 디지털 트윈 환경에 적용하여 검증되었다. 제안한 시스템은 개별 센서의 단순 시각화에 그치지 않고, 서로 다른 역할을 가지는 LiDAR, IMU, CAN 데이터를 ROS 2 미들웨어를 통해 통합함으로써 실제 굴착기의 동작 상태를 일관되게 반영할 수 있도록 구성되었다.

III. 결론

본 논문에서는 URDF 기반 디지털 트윈 모델을 중심으로 LiDAR, IMU, CAN 센서 데이터를 ROS 2 미들웨어를 통해 통합하는 시스템을 구축하였다. LiDAR 센서는 굴착기의 위치 추정 및 굴착 지점 인식을 담당하며, IMU 센서는 굴착기 관절의 움직임을 실시간으로 추정하여 디지털 트윈 모델의 조인트 상태를 생성한다. 또한, CAN 신호는 굴착기 상부체(cab) 스윙 동작을 감지하는 상태 트리거로 활용되어, LiDAR 기반 오도메트리와 결합된 좌표 보정을 가능하게 한다. 이를 통해 굴착기의 주행 및 위치 변화와 굴착 작업 중 관절 움직임이 실제 환경과 가상 환경 간에 실시간으로 동기화되어 표현될 수 있음을 확인하였다. 이러한 통합 구조는 실제 장비 기반 디지털 트윈 시스템 구현의 가능성을 보여주며, 향후 자율 굴착 알고리즘 검증 및 작업 분석을 위한 기반으로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

※ 본 연구는 산업통상자원부의 소재부품기술개발사업(No. 00508189, 다수의 필드 로봇에 동시 적용가능한 소형 고해상도 광시야각 융합 라이다 센서 개발)의 지원을 받았습니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Grieves and J. Vickers, "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems," *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer, 2017.
- [2] Son, Bokun, et al. "Expert-emulating excavation trajectory planning for autonomous robotic industrial excavator." 2020 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). IEEE, 2020.
- [3] Omrany H. et al., "Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions," *Sustainability*, vol. 15, no. 14, p. 10908, 2023.
- [4] X. Wang et al., "Sensor Acquisition and Allocation for Real-Time Monitoring of Articulated Construction Equipment in Digital Twins," *Sensors*, vol. 22, no. 3, 2022.