

타워크레인 자율화를 위한 가상환경 플랫폼 개발에 관한 연구

김명준¹ · 윤인석² · 김남균³ · 박문서^{4*} · 안창범⁵ · 정민혁⁶

¹서울대학교 건축학과 석사과정 · ²서울대학교 건축학과 박사과정 · ³서울대학교 건축학과 박사과정 · ⁴서울대학교 건축학과 교수 · ⁵서울대학교 건축학과 교수 · ⁶서울대학교 건축학과 연구교수

A Study on Virtual Environment Platform for Autonomous Tower Crane

Kim, Myeongjun¹, Yoon, Inseok², Kim, Namkyoun³, Park, Moonseo^{4*}, Ahn, Changbum⁵, Jung, Minhyuk⁶

¹Graduate Student, Department of Architecture, Seoul National University

²Graduate Student, Department of Architecture, Seoul National University

³Graduate Student, Department of Architecture, Seoul National University

⁴Professor, Department of Architecture, Seoul National University

⁵Professor, Department of Architecture, Seoul National University

⁶Research Professor, Department of Architecture, Seoul National University

Abstract : Autonomous equipment requires a large amount of data from various environments. However, it takes a lot of time and cost for an experiment in a real construction sites, which are difficulties in data collection and processing. Therefore, this study aims to develop a virtual environment for autonomous tower cranes technology development and validation. The authors defined automation functions and operation conditions of tower cranes with three performance criteria: operational design domain, object and event detection and response, and minimum functional conditions. Afterward, this study developed a virtual environment for learning and validation for autonomous functions such as recognition, decision making, and control using the Unity game engine. Validation was conducted by construction industry experts with a fidelity which is the representative matrix for virtual environment assessment. Through the virtual environment platform developed in this study, it will be possible to reduce the cost and time for data collection and technology development. Also, it is also expected to contribute to autonomous driving for not only tower cranes but also other construction equipment.

Keywords : Autonomous Construction Machinery, Tower Crane, Virtual Environment, Virtual Data

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설산업은 국가 GDP의 15.0%를 차지하는 국가기반산업이나(Bank of Korea, 2019) 노동집약 산업으로 타 산업 대비 낮은 생산성이 꾸준히 문제가 되어왔다. 최근 노동인구의 감소로 생산성은 더욱 낮아질 전망으로 생산성 향상은 건설산업 핵심 이슈이다. 해외건설 시장에서는 선진국의 첨단기술 투자와 개도국의 가격우위로 인해 경쟁력이 약화되고 있는

상황이며, 국내에서는 시장 규모가 감소하는 추세로 양적 성장이 더뎠고 있어, 첨단기술을 접목하는 혁신을 통한 돌파구 마련이 필요한 시점이다(국토교통부, 2018). 국토교통부는 이러한 일환으로 건설산업 생산성 향상 제고를 위해 미래 건설산업 8대 혁신성장동력으로 건설 자동화를 선정하였으며 2030년까지 주요공종 중장비 자율작업화를 목표로 하고 있다(국토교통부, 2018).

건설장비 자율화를 위해서는 장비 주변 상황을 실시간으로 인지하고 의사결정을 통해 장비를 제어하는 일련의 프로세스를 자동화할 수 있어야 한다. 최근의 센서 및 인공지능 기술 발전은 인지 및 제어 프로세스의 자동화를 가능케 하여 생산성과 안전성 향상을 위한 건설장비 자율화 기회를 제공하고 있으며, 실제로 딥러닝과 같은 인공지능 기술은 다양한 산업에서 장애물 탐지, Path Planning 등과 같은 자율 운행에 필요한 각 요소기술의 개발에 적극적으로 활용되고

* **Corresponding author:** Park, Moonseo, Department of Architecture, Seoul National University, 433 B/D 39, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Republic of Korea

E-mail: mspark@snu.ac.kr

Received December 30, 2021: **revised** May 30, 2022

accepted June 2, 2022

있다. 이러한 기술을 건설장비에 적용하기 위해서는 건설현장의 다양한 상황을 포함하는 충분한 양의 데이터를 수집하고 모델을 학습해야 한다(A. Moore & Lee, 1988). 하지만 실제 환경에서 데이터 수집을 위한 테스트베드 확보에 많은 시간과 비용이 소모되며 불확실성 역시 크기 때문에 효과적인 데이터 수집과 처리에 어려움이 존재한다(Yoon et al., 2020). 이에 로봇 및 자동차의 자율주행 분야에서는 가상환경 플랫폼 개발을 통해 높은 비용 및 데이터 수집의 시간적 한계를 해결하면서 제품을 개발하고 기능을 테스트하는 추세이다(Patel, 2020).

가상환경 플랫폼은 타 산업보다 건설장비 자율화를 위해 더욱 효과적이다. 건설 프로젝트는 수행 기간 및 장비의 비용이 많이 들고, 복잡도와 위험도 역시 타 산업 대비 크다. 또한, 프로젝트 진행 중 안전 위험요소들과 장비의 움직임이 상호작용을 이루어 끊임없이 변화하며(Hu et al., 2015), 이러한 특성을 반영하기 위해 건설현장 데이터셋의 다양성과 규모는 더욱 중요하다. 가상환경 플랫폼을 통해 실제 환경에서 수집 및 검증하기 어려운 위험 시나리오를 구현하면서 실제 자율주행 모델의 신뢰성을 확보할 수 있다. 따라서 자율화 기술의 높은 신뢰도를 확보하기 위해 데이터 수집 및 검증이 가능한 가상환경 플랫폼의 개발이 선행되어야 한다.

건설현장 가상환경 개발과 관련된 기존의 연구들은 교육 및 훈련을 위한 모델을 개발하는 데 초점을 맞추었다. 3D 환경과 VR을 통해 가상 물체 및 신호와 상호작용하여 사람들의 건설현장에 대한 감각을 향상시키는 연구들이 수행되어 왔다(Wang et al., 2018). 이러한 가상환경은 교육 대상이 되는 현장을 표현하는 시각적 성능 및 장비의 조작성능 측면에서는 효과적이지만, 인공지능과 같은 자율화 기술 개발에 필요한 다양한 환경을 설정하고 데이터를 수집하는 데 한계가 있다. 따라서 본 연구는 건설장비 자율화를 위한 요소기술과 이를 개발하기 위한 가상환경 요구기능을 정의하고, 가상 데이터 수집을 위한 3차원 가상환경 플랫폼을 개발하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 건설장비 중 건설 프로젝트 생산성에 있어 핵심적인 역할을 하며, 사고 발생 시 중대 재해로 이어질 가능성이 높은(Park, 2016) 타워크레인을 자율화 기술 개발의 대상 장비로 선정하였다. 가상환경 구현을 위해서 유니티 게임 엔진을 사용하였으며, 건축공사 구현 범위는 골조공사로 한정하였다. 본 연구의 절차는 다음과 같다.

- (1) 문헌 고찰을 통해 타워크레인 자율화 기술 개발을 위한 가상환경 구축에 있어 고려할 사항들을 도출한다.
- (2) 타워크레인 기사 인터뷰 및 운행 관련 규정 분석을 통

해 타워크레인 자율주행 성능 기준과 이를 만족하기 위한 요소기술을 도출한다.

(3) 도출한 요소기술을 개발하고 테스트하기 위한 가상환경을 Unity를 활용하여 구현한다.

(4) 가상환경 평가를 위한 평가지표를 도출하고, 해당 평가지표에 의한 가상환경 검증을 진행한다.

2. 문헌고찰

2.1 자율주행 시스템 성능안내서

자동차 자율주행과 관련하여, 미국 고속도로교통안전국(National Highway Traffic Safety Administration; NHTSA)은 자율주행 차량의 안전한 도입 및 활성화를 위해 성능 기준 안내서를 제시하였다(Fig. 1). 자율주행 시스템은 자동차의 특성 및 시스템이 제공하는 기능에 따라 만족해야 하는 성능이 달라진다. 이에 NHTSA는 각기 다른 시스템의 검증 프로세스를 하나의 Guidance로 정리하기 위해 다음의 세 가지 항목으로 제시하고 있다.

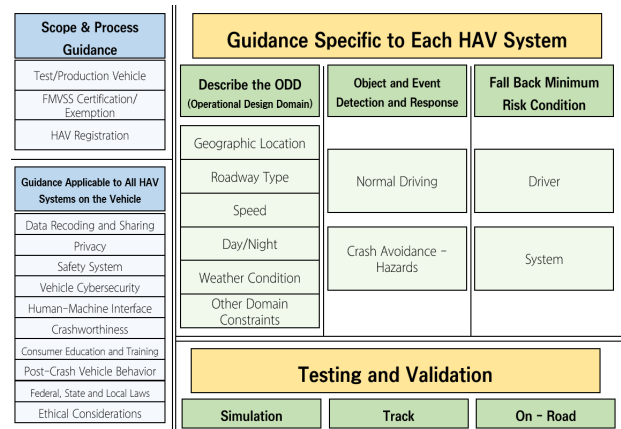


Fig. 1. NHTSA framework for vehicle performance guide

첫 번째는 운영설계영역(Operational Design and Domain; ODD)으로 OEDR이 작동할 수 있는 속도, 낮/밤과 같은 운영환경의 범위를 의미한다. 두 번째는 대상/이벤트 탐지 및 대응(Object and Event Detection and Response; OEDR)으로 자율주행 관련 상황을 감지하고 적절한 대응을 수행하는 기능이며, 방향 및 속도 제어, 장애물 판단과 같은 직접적인 자율화 기술을 의미한다. NHTSA는 ODD 내에서 OEDR 기능이 충분히 수행 가능하지 테스트하도록 지시하고 있다. 세 번째는 최소위험 조건(Fallback Condition)으로 ODD를 벗어날 경우 이를 감지하고 대응하는 기능을 의미한다. 자율주행 시 ODD의 범위를 벗어나게 될 경우를 대비하기 위한 성능조건이다. 마지막으로 NHTSA는 이와 같은 일련의 과정을 가상환경 및 실제 환경에서 검증하도록 한다

(NHTSA, 2016).

타워크레인의 OEDR 기술 개발을 위해 자동 크레인 리프팅을 위한 경로 결정 모델(Dutta, S. et al., 2020), 타워크레인의 충돌 방지 모니터링을 위한 센서 유형과 위치 최적화 모델(Sleiman, J.P. et al., 2016), 초음파 센서를 활용한 장애물 관측 모델(Gu, L. et al., 2012), 타워크레인 진동제어를 위한 스윙 억제 모델(Shi, H.T. et al., 2021) 등의 연구가 수행되었다. 이러한 OEDR 기술들은 서로 상호작용하여 시스템을 구성하므로 하나의 테스트베드에서 검증할 필요성이 있다. 따라서 건설현장과 타워크레인 장비 특성을 반영하여 ODD의 범위, OEDR 및 최소위험조건을 정의하고 이를 테스트할 수 있는 가상환경을 개발할 필요성이 있다.

2.2 자율화기술 개발·검증을 위한 가상환경 조건

건설현장 가상환경을 활용한 자율화기술 개발을 위해 가상환경이 적합한 조건을 갖추었는지 평가하기 위한 기준이 필요하다. Liu et al. 은 가상환경이 실제 세계의 경험 및 효과가 재현되는 정도를 평가하기 위해 Fidelity 지표를 제시하였다(Liu et al., 2008). Fidelity는 시각적 효과, 가상환경의 기능, 가상환경 사용자의 인지 등 다양한 관점으로 구성되어 있으며 <Table 1>은 Fidelity의 종류들을 나타낸다.

Table 1. Classification of fidelity (Liu and Vincenzi, 2008)

Classification	Word	Definition
Physical	Visual-audio Fidelity	Replication of visual and auditory stimulus
	Fidelity	Replication of actual equipment hardware and software
	Motion Fidelity	Replication of motion cues felt in actual environment
Psychological-cognitive Fidelity	Task Fidelity	Replication of tasks and maneuvers executed by user
	Functional Fidelity	How device functions, works, and provides actual stimuli as actual environment

선행연구들은 가상환경의 Fidelity가 자율화기술 성능에 중요한 영향을 미치는 사실을 밝혀 왔다. Tremblay et al. 은 가상환경 기반 이미지 분류모델 개발에 있어 가상 데이터의 각각의 Visual Fidelity뿐 아니라, 데이터의 다양성이 성능에 영향을 미침을 밝혔다(Tremblay et al., 2018). Myers et al. 은 비행기 시뮬레이터와 관련하여 방향타 페달 입력이 실제 비행기 운행과 다른 양상을 보이는 문제를 해결하기 위해 시뮬레이터가 Physical, Cognitive, Functional Fidelity를 모두 만족해야 함을 제시했다(Myers et al., 2018). 이처럼 자율화기술 개발을 위한 가상환경은 다양한 목적을 달성하기 위

해 Fidelity를 만족하는 가상환경 구축이 필수적이지만, 모든 Fidelity에 대해 높은 수준을 만족할수록 가상환경의 하드웨어 요구사항이 높아지며 낮은 가용성을 가지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 건설장비의 자율화를 위한 가상 데이터 수집이라는 가상환경의 목적에 맞는 Fidelity를 선정하고, 해당 Fidelity를 우선시하여 가상환경 내 요소들을 개발한다.

3. 자율화 타워크레인 요구기능 정의

3장에서는 2.1절에서 고찰한 내용을 바탕으로 자율주행을 위해 정의하고 검증해야 하는 사항인 운영 설계 영역(ODD), 대상/이벤트 탐지 및 대응(OEDR), 최소 위험조건에 해당하는 요구기능을 타워크레인에 적합하도록 정의하고 이를 개발하는 데 가상환경의 조건을 도출한다.

3.1 타워크레인 운영 설계 영역(ODD)

본 연구에서는 자율화 타워크레인의 운영 설계 영역을 건설현장 내 타워크레인의 기본 정보, 타워크레인 관련 법 및 문헌의 교차 검증 및 상호 보안을 통해 도출했다. 타워크레인의 운영 설계 영역을 결정하는 요소는 타워크레인 그 자체의 특징으로 인해 운영 가능 범위에 영향을 주는 내부 요소와 타워크레인 주변 환경의 영향으로 인한 외부 요소로 분류할 수 있다.

ODD를 결정하는 내부 요소는 타워크레인의 운행 속도와 운행 가능 범위가 있고, 이는 타워크레인의 종류 및 제원으로 결정된다. 타워크레인은 모바일 크레인, T형, L형 등 다양한 종류를 가지고 있고, 제작사와 모델, 사용연수에 따라 운행 속도, 무게에 따른 운행가능 범위가 달라지게 된다.

ODD를 결정하는 외부 요소는 타워크레인 주변 물리적 환경, 운행 관련 법과 기준에 근거한 안전 운행 조건이다. 먼저, 타워크레인의 주변 물리적 환경은 공사 현장의 건물/야적장/장애물의 위치정보뿐 아니라 시간의 흐름에 따른 공사 진행과 타워크레인의 작업 일정을 포함하며, 지리적·시간적 정보가 모두 포함된 4D 정보로 규정된 규정된 건설현장 정보가 ODD의 물리적 환경이다.

외부 요소에서 가장 중요한 역할을 하는 안전 운행 조건을 도출하기 위해 건설기계장비 사망사고 예방을 위한 안전작업가이드라인, 원격조종 타워크레인 안전작업 매뉴얼, 산업안전보건기준에 관한 규칙 등 타워크레인 관련 안전기준을 분석했다. 각 기준 및 문헌에서 공통적으로 제시하는 3m의 지브 선회 가능 높이, 순간속도 15m/s 이하의 바람 환경, 물체의 가시성이 보장되는 높은 조도의 환경을 타워크레인이 안전하게 운행 가능한 외부환경 조건으로 선정했다.

본 절에서 도출한 ODD의 구성 요소는 <Table 2>와 같으

며, 도출한 ODD의 내부요소와 외부요소 범위 안에서 다양한 건설현장을 구현할 수 있는 가상환경을 제작한다.

Table 2. ODD for autonomous tower crane

Classification	Factors for ODD	Definition
Internal Factor	Tower Crane Specifications	<ul style="list-style-type: none"> Types and specifications of tower cranes Determining the speed and range of operation of the tower crane
	Surrounding Physical Space	<ul style="list-style-type: none"> Location information of buildings/fields/obstacles at the construction site Construction progress and work schedule of tower crane
External Factor	Safety Driving Conditions	<ul style="list-style-type: none"> 3m height for turning operation of Jib Wind with instantaneous speed less than 15m/s High illuminance that guarantees the visibility of an object

3.2 대상/이벤트 탐지 및 대응(OEDR) 기술 도출

자율주행의 기본 기능은 크게 인지, 판단, 제어 기능으로 분류할 수 있다(Hong, 2015). 타워크레인 운행 의사결정 프로세스에 대해 조사하기 위해 경력 20년 이상의 숙련된 타워크레인 기사 3명과 인터뷰를 진행하였다. 구체적으로 크레인 주행 도중 얻는 정보, 크레인 주행 정보를 얻는 방법, 물체 운반경로를 결정하는 기준, 운행 중 발생하는 위험상황 및 대처방법에 대해 의견을 수렴하였다. 인터뷰를 통해 타워크레인 자율화에 요구되는 필수적인 OEDR 기술에는 장애물 인식 기술, 경로 계획 기술, 진동 최소화 기술이 있으며 필요성과 이를 개발하기 위한 가상환경의 조건을 각 절에서 구체적으로 설명한다.

3.2.1 장애물 인식 기술

타워크레인은 운행환경은 작업자, 타 건설장비 등 다양한 장애물들이 존재한다. 특히, 작업자 위로 양중하지 못하는 것과 같은 안전규정에 대한 상황 역시 인지해야 한다. 이러한 장애물 및 상황을 인지하기 위해 운전자의 시야와 트롤리에 설치된 카메라를 통해 시각적 정보를 얻으며, 가려진 부분은 신호수의 지시 및 전달에 전적으로 의존하고 있는 것으로 조사되었다. 따라서 신호수에 의한 정보를 어떻게 수집하고 판단할 것인지에 대한 개발이 필요하다.

장애물 인식 기능을 개발할 운행환경을 제공하기 위해, 건설현장에 존재하는 지형, 건물, 가설, 장비 등의 객체들을 현실적으로 모델링하고 이를 현장에 파라미터화 해 배치하여 다양한 위험요소 및 잠재적 장애물들을 포함해야 한다. 또한, 장비, 인부와 같은 동적 객체에 행동 패턴을 부여하여 가상 데이터를 풍부하게 생성시켜야 한다. 한편, 시각적 정보

를 활용한 장애물 인식 기법은 빛 환경의 영향을 크게 받므로 ODD의 범위 안에서 조도 변화를 구현해야 한다.

3.2.2 경로 계획(Path Planning) 기술

자재 양중경로 결정에 있어 기사들의 가장 중요한 기준은 안전성 및 생산성 확보이다. 운행 경로는 현재 크레인의 위치, 목적지, 자재 크기와 같은 작업 정보와 공간 정보를 바탕으로 충돌위험이 없는 공간을 탐색하게 된다. 이후 최대 작업 반경, 최대 양중 용량과 같은 크레인 상태 정보를 종합하여 최종적으로 안전하며 작업 시간 측면에서 효율적인 경로를 선정한다(Zhang, Z., & Pan, W., 2020).

따라서 가상환경은 경로 계획 기능을 개발할 수 있도록 타워크레인에 작업을 할당하여 운행 데이터를 수집시켜야 하며, 다양한 학습환경을 제공하기 위해 다수의 작업이 필요하다. 또한, 크레인의 실제 운행 유사성을 향상시키기 위해 모델마다 다양한 최대 높이, 작업 반경, 최대 양중하중 등 크레인 제원표의 사양을 반영 및 파라미터화 한 크레인을 모델링해야 한다.

3.2.3 진동 최소화(Anti-sway) 기술

운전자는 바람과 같은 외부작용, 크레인의 동작속도, 와이어로프의 길이와 양중물이 흔들리는 각도 등 정보를 동시에 고려해야 한다(Shao, X. et al., 2020). 기사 인터뷰 결과 양중물의 회전/진동감소를 위해 수행하는 조작이 기사마다 차이가 있으며 이것이 주요한 노하우인 것으로 조사되었다.

따라서 진동 최소화 기술자율화의 주요 기술이며 이를 개발하기 위해 와이어로프가 사실적으로 구현되어 높은 motion fidelity를 지닌 자재 흔들림 현상이 발생해야 한다. 또한, 운전자가 진동을 감쇠하는데 필요한 정보를 제공받아 조작할 수 있도록 시뮬레이터 사용자에게 화면 인터페이스와 조작 인터페이스를 제공해야 한다. <Table 3>은 본 장에서 도출한 자율주행의 필요 기능과 관련 데이터를 수집하기 위해 필요한 환경요소 요구사항을 정리한 표이다.

Table 3. Requirements for virtual environments based on OEDR

Classification	Functions	Virtual Environment Specific
Perceptive function	Surrounding -sensing	<ul style="list-style-type: none"> Realistic modeling of construction site objects Various risk factors and potential obstacles with Behavioral patterns Change in illuminance within the scope of ODD.
Decision function	Path planning	<ul style="list-style-type: none"> Collecting driving data by allocating tasks to the tower crane Modeling a parameterized crane
Control function	Anti-sway	<ul style="list-style-type: none"> High Fidelity of wind and wire rope Interface to the simulator user with screen and information

3.3 최소위험 조건

자율화 타워크레인이 앞서 3.1절에서 정의한 ODD가 아닌 상황에서 주행할 경우 위험상황의 발생가능성이 크다. 따라서, ODD를 벗어나는 이벤트를 인지하고 이에 대한 대방안이 필요하다. 이를 위해 타워크레인의 안전 조건을 유지하기 위한 장치들을 조사하였다.

타워크레인의 안전장치에는 다양한 종류가 있으나, 운행에 직접적으로 영향을 미치는 안전장치는 훅이 지면에 닿는 것이나 권상 작업 시 트롤리 및 지브와의 충돌을 방지하는 권상 및 권하 방지장치, 정격하중의 1.05배 이상 권상 시 과부하 방지 및 모멘트 리미터 장치가 작동하는 과부하 방지장치, 트롤리가 최소 반경 또는 최대 반경으로 동작 시 트롤리를 정지시키는 트롤리 정지장치, 주어진 범위 내에서만 선회 동작이 가능하도록 하는 선회 제한 리밋 스위치가 있다. 또한, 동일 궤도상을 주행하는 타워크레인이 2대 이상 설치되어 있을 때 크레인 상호 간 근접으로 인한 충돌을 방지하

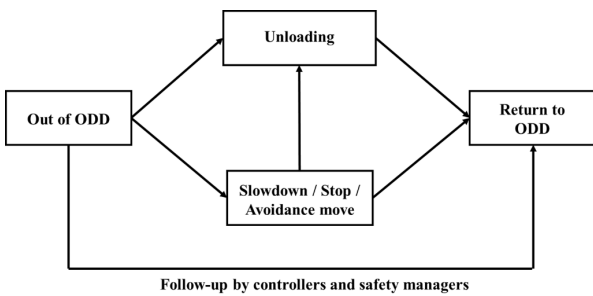


Fig. 2. Fallback framework for Tower Crane

Table 4. Safety devices of tower crane

Safety devices	Functions	Motion limit on parts
Hoist limiter	A device that prevents the hook from touching the ground and collision with the trolley and jib during hoisting	Minimum/maximum hoisting range limits of cables and hook
Trolley end stops	A device that forcibly stops the trolley as a rubber cushioning material that absorbs the impact of the trolley when it operates at the minimum or maximum radius	Minimum/maximum range limit of trolley traversing motion
Trolley limiter	A device that controls the power circuit to prevent the trolley installed in the main jib from collided with the cab inside the jib and escaped to the outer end of the jib	Minimum/maximum range limit of trolley traversing motion
Swing limit switch	A device that detects the number of revolutions of the slewing machine and makes the slewing operation only within a given range	Minimum/maximum rotation range limit of jib slewing motion
Interface System	A device that prevent collisions between cranes due to proximity to each other	Rotation range limit from entering the working radius of other tower cranes

는 간섭 충돌 방지장치도 운행에 영향을 주는 유효한 안전 장치라고 할 수 있다. 따라서 안전장치와 유사한 역할을 하며 작업을 정지시키는 안전 제한요소가 가상환경 내 구현되어야 한다. 해당 내용은 <Table 4>와 같다.

기사 인터뷰를 통해 도출한 타워크레인 위험 대처의 문제점은, 거대한 크기로 인한 낮은 순발력과 이로 인해 갑자기 등장하는 위험 물체에 반응해도 회피 제동을 수행하기 어렵다는 점이다. 또한, 무거운 물체를 운반하는 중이면 갑작스러운 제동이 가속도를 주어 추락 등 추가적인 위험이 발생할 수 있다. 타워크레인은 위험 대처에 있어서는 수동적인 장비이며, 운전자가 돌발 상황에 대처하는 방법은 주로 감속과 운행 방향 변경이다. 또한, 자재를 공중에 둔 채 운행을 정지하는 건 위험한 행동이므로, 감속 및 회피를 통해 위험요소를 벗어나면 주변의 가까운 곳에 자재를 하역해야 한다. 마지막으로, ODD를 벗어나는 순간 관제사 및 안전 관리자에게 관련 정보가 전달되고, 사후처리를 통해 ODD로 복귀할 수 있는 프로세스가 필요하다.

4. 타워크레인 가상환경 플랫폼 구축

가상환경은 건설현장을 표현하기 위해 환경요소, 타워크레인, 자재 및 건설장비와 같은 객체, 사용자 인터페이스로 구성되며, 가상환경 구축 연구에 주로 활용하는 Unity 게임 엔진을 활용하였다. 자율화 기술을 개발하기 위해 3.2절에서 도출한 구현 요소들을 기반으로 해 다양한 ODD 환경을 플랫폼 안에서 사용자가 표현할 수 있어야 한다. 이를 위해 해당 구성 요소들을 파라미터화 함으로써 사용자가 이를 손쉽게 생성할 수 있도록 플랫폼을 구축하였다. 각 요소에 대한 구체적인 구현방안은 각 절에서 설명한다.

4.1 가상환경 구현 중점 Fidelity

본 가상환경의 개발 목적은 건설현장 내 건설장비의 가상 데이터 수집을 목적으로 한다. 자율화 건설장비가 주변 환경 데이터를 수집하려면 카메라, Lidar 등의 센서를 활용하고, 따라서 건설현장 내 자재, 장치의 세부 구조, 주변 건물 등 방해물 구조의 높은 시각적 구현도가 필요하다. 현장의 소리는 데이터 수집에 영향을 주지 않기에, Audio를 제외하고 높은 수준의 Visual Fidelity만이 본 가상환경의 우선 구현 Fidelity이다. 또한, Anit-Sway 기술의 구현에 있어, 자재의 운반 과정에 일어나는 흔들림 현상을 구현하기 위해 자재의 무게, 밀도, 무게중심 등의 물성과 장비의 움직임에 따른 물리적 변화를 실제와 동일하게 구현해야 하고, 이는 높은 Motion Fidelity를 요구한다. 마지막으로, 가상환경의 사용자가 타워크레인을 조종할 때 실제 타워크레인

구동 방식으로 조종되어야 하기에 Functional Fidelity를 우선 구현 Fidelity로 선정했다.

4.2 환경요소 구현

건설현장은 주로 야외에서 행해지므로 날씨는 현장의 Visual Fidelity에 많은 영향을 미치게 된다. 타워크레인 작업은 눈, 비, 안개 등 악천후 상황에서는 작업을 수행하지 않으므로 구현의 범위는 빛 환경과 바람으로 한정하였다. 다양한 환경에서의 가상 이미지 및 운행데이터 생성을 위해 조도 및 바람의 요소들을 파라미터화 하였다.

빛 환경의 경우 태양의 움직임을 구현하여 고도와 방위각에 따라 빛의 세기와 방향이 변화하도록 하였으며, (Fig. 3)은 개발한 시뮬레이션 환경 내 시간 설정에 따른 태양 변화의 모습을 나타내고 있다.

바람의 경우 하중 흔들림에 직접적인 영향을 주는 속력과 방향이 주요 파라미터로 지정할 수 있도록 하였다. 자연스러운 효과를 연출하기 위한 추가적인 요소로는 바람의 세기와 방향에 임의의 변화를 주는 노이즈, 시뮬레이션 연산 부하를

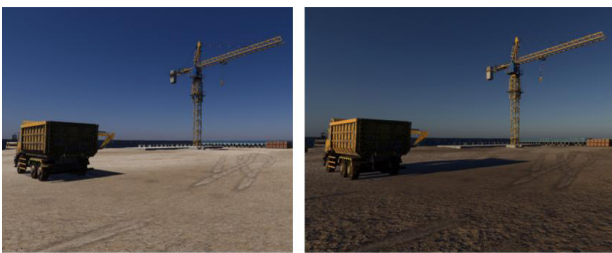


Fig. 3. Illuminance change of virtual environment developed in this study

Table 5. Parameters for wind implementation

Category	Parameters	Description
Strength	Strength	Defines wind strength for dynamic objects by their mass
	Minimum	Minimum strength applied to dynamic object at position where noise strength is 0
	Maximum	Minimum strength applied to dynamic object at position where noise strength is 1
Direction	Direction	Defines angle for wind direction
	Divergency	Defines angle spread for wind direction
Noise	Global Scale	Defines global noise scale. The higher Global Scale make wind more chaotic and dense
	Speed Noise	Defines how quickly strength is changing
	Turbulence	Defines how quickly divergency is changing
	Length Scale	Defines Noise scale over Z axis
	Width Scale	Defines Noise scale over X axis
Filter	Tag	Wind will affect only objects with picked Tag
	Layer	Wind will affect only objects with defined layer

줄이기 위한 필터가 있다. 다양한 바람의 세기에 따른 타워크레인 제어기능을 학습하기 위해 앞서 언급한 요소들을 파라미터화하여 조절할 수 있도록 하였으며, 각 파라미터에 대한 상세한 설명은 (Table 5)와 같다.

4.3 타워크레인 구현

가상환경 내 타워크레인이 실제 타워크레인 움직임과 유사하도록 Motion Fidelity를 확보해야 한다. 이를 위해 구조부 동작과 와이어로프의 물리적 거동을 구현하고, 동작을 정의하기 위해 타워크레인 제원과 방호장치를 표현할 필요성이 있으며, 3D 모델링, 스테이트 머신 정의, 물리환경 적용 등의 과정으로 건설장비를 제작해 가상 공간에 구현할 수 있다. 본 연구에서는 건설현장에서 가장 많이 사용되는 T형 타워크레인을 구현 대상으로 선정했고, 구체적 구현 방안들은 각 절에서 설명된다.

4.3.1 타워크레인 구조부 동작 설정

가상환경 내에서 타워크레인의 Motion Fidelity 및 Functional Fidelity를 확보하기 위해 움직임을 분석할 필요성이 있다. 타워크레인은 구조부와 구조부의 동작으로 구성된다. 크레인 작업에 관여하는 주요 구조부로는 마스트(Mast), 지브(Jib), 트롤리(Trolley), 훅(Hook) 등으로 구성된다. 타워크레인 구조부의 동작으로는 크레인 상부 전체를 회전시키는 선회동작, 지브를 따라 트롤리의 이동으로 훅에 매달린 하중을 전·후로 움직이는 횡행 동작, 와이어의 길이를 조절하여 인양물을 들어올리거나 내리는 권상·하 동작, 이

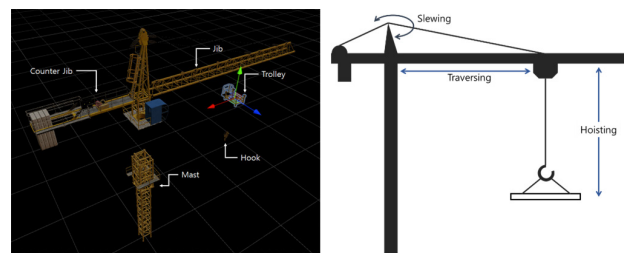


Fig. 4. The main structural parts and their motions of the tower crane implemented in this study

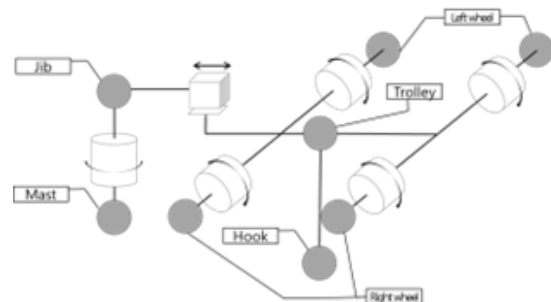


Fig. 5. The joint connection mechanism of the main structure of the tower crane

상 3가지가 있다. 모델링한 마스트, 지브, 트롤리 등 각 주요 구조부와 동작은 다음 <Fig. 4>와 같다.

타워크레인의 동작을 구현하기 위해 주요 구조부를 동작 상태에 적합한 조인트로 연결하였다. 힌지조인트는 모 구조부의 로컬 수직축을 따라 회전 자유도를 부여하며, 일반 조인트는 모 구조부의 로컬 축을 따라 이동하는 자유도를 부여한다. Hung and Kang (2009)이 개발한 표기법을 활용하여 표현한 조인트 연결 메커니즘은 <Fig. 5>와 같다.

4.3.2 와이어로프 시뮬레이션

가상환경 상에서 하중의 진자운동을 표현하기 위해 와이어 로프를 시뮬레이션하는데 케이블 조인트 거리 제약조건에 기반한 FILO 시스템(Müller, M. et al., 2018)을 활용하였다. FILO 시스템은 케이블을 작은 세그먼트(segment)로 표현하고 일련의 케이블 조인트로 연결하여 케이블의 효과를 모델링한다. 세그먼트의 총 개수와 연결 순서로 시뮬레이션의 복잡성을 줄인 케이블 시뮬레이션 시스템이다.

본 연구에서는 FILO 시스템을 활용하여 구현한 타워크레인의 물리진자와 비틀림진자의 자유도를 다음 <Fig. 6>의 왼쪽의 4점식 체결 예시와 같이 구현하였다. 자재 종류에 따른 줄걸이 방법을(예. 2점식, 4점식) 표현하기 위해 세그먼트 구속조건을 설정할 수 있도록 <Fig. 6>의 오른쪽과 같이 파라미터를 설정할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

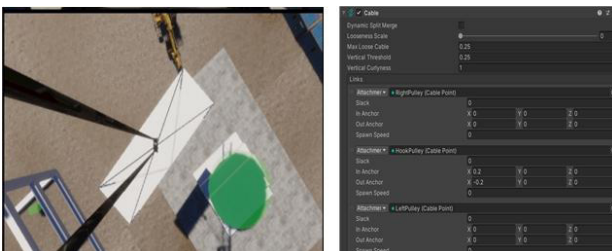


Fig. 6. Implementation of wire rope simulation and segment settings using FILO system

4.3.3 방호장치 구현

안전장치는 타워크레인 작업과정에서 발생 가능한 안전 사고를 예방하기 위해 크레인에 설치되어 동작을 제한한다. 이에 가상환경 내에서 타워크레인이 제한되는 범위 이상의 동작을 하지 못하도록 Constraint를 설정하는 기능을 구성하였다. 본 연구에서는 3.3절에서 도출한 <Table 4>의 방호 장치들을 반영한다.

4.3.4 주요 제원 설정

앞서 개발한 타워크레인 모델의 동작 속성을 사실적으로 설정하기 위해 실제 제원표에 기반하여 인양 하중과 동작 속도를 반영하였다. 인양 하중은 크레인이 인양 가능한 임계 하중으로 지브의 길이 및 작업 반경, 권상 속도에 따라 인양

하중이 변하게 된다. 동작 속도는 동하중 형태로 인양 하중에 영향을 주므로 동작별 정격속도와 인양하중이 함께 주어진다. 최종적으로 인양하중은 동작속도에 의한 값과 작업 위치에 의한 값 중 작은 값을 택하게 된다.

같은 모델이라도 사용환경, 연차 등에 따라 성능이 다르므로 제원표를 참조하되, 사용자가 제원을 직접 설정 가능하도록 하였다. 이를 통해 사용자는 동일한 타워크레인이 아니라 여러 특성을 가진 타워크레인을 조작할 수 있게 된다. 본 연구에서는 Liebherr의 200EC-H10 T형 크레인의 제원에 맞추어 가상 타워크레인을 설정했으며, 해당 타워크레인의 거리에 따른 인양하중값은 <Fig. 7>과 같다.

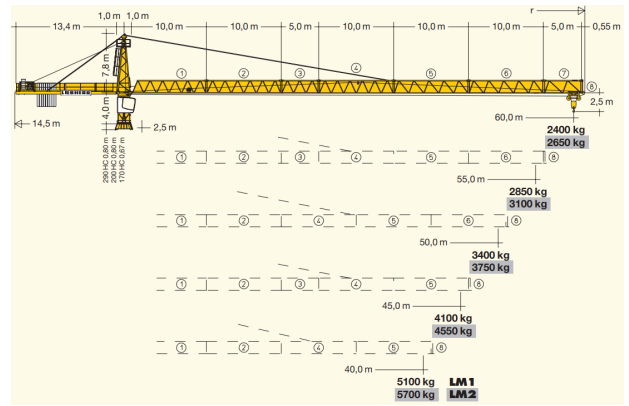


Fig. 7. Load chart diagram of Liebherr 200EC-H10

4.4 객체 모델링

건설현장에는 가시설과 같은 정적인 장애물, 타워크레인이 이동할 자재, 장비, 인부 등 건설현장 내에서 움직이는 동적 객체들이 존재하며 이들을 가상환경 내에 구현해야 한다. 가상환경 내 객체들의 Visual Fidelity 확보를 위해 Unity 커뮤니티에서 관련 3D 모델들을 구입하고 일부 수정하여 구현하였다<Fig. 8>.

더불어 자재의 경우 양중작업 표현을 위해 등장 위치, 목적지 등의 추가적인 정보가 요구되며, 동적 객체의 경우 가상환경 내의 행동 패턴을 지정할 방법이 정의되어야 한다. 이를 통해 사용자는 타워크레인이 수행할 작업과 작업환경을 다양화할 수 있다. 상세한 개발 과정은 각 절에서 구체적

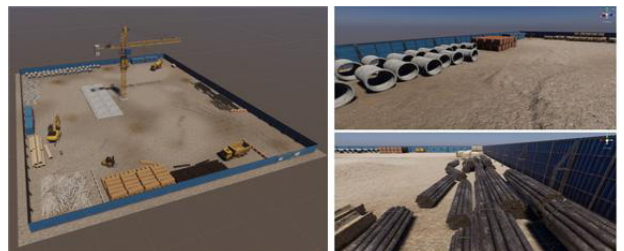


Fig. 8. Virtual construction sites developed in this study

Material code				Size and Weight				Location of supply point						Location of demand point					
ID	No	Floor	Type	W	D	H	Weight	pos_X	pos_Y	pos_Z	rot_X	rot_Y	rot_Z	pos_X	pos_Y	pos_Z	rot_X	rot_Y	rot_Z
CO1	1	1	Column	800	800	3200	4000	15.2	1	10	0	0	0	-14.7	2.6	24.5	0	0	0
CO1	2	1	Column	800	800	3200	4000	15.2	1	10	0	0	0	-14.7	2.6	14.7	0	0	0
CO1	3	1	Column	800	800	3200	4000	15.2	1	10	0	0	0	-14.7	2.6	4.9	0	0	0
CO1	4	1	Column	800	800	3200	4000	15.2	1	10	0	0	0	-14.7	2.6	-4.9	0	0	0
CO1	5	1	Column	800	800	3200	4000	15.2	1	10	0	0	0	-14.7	2.6	-14.7	0	0	0
CO1	6	1	Column	800	800	3200	4000	15.2	1	10	0	0	0	-14.7	2.6	-24.5	0	0	0
CO2	7	1	Column	1200	1200	3200	9000	15.2	1	15	0	0	0	-4.9	2.6	14.7	0	0	0
CO2	8	1	Column	1200	1200	3200	9000	15.2	1	15	0	0	0	-4.9	2.6	4.9	0	90	0
CO2	9	1	Column	1200	1200	3200	9000	15.2	1	15	0	0	0	-4.9	2.6	-4.9	0	180	0
CO2	10	1	Column	1200	1200	3200	9000	15.2	1	15	0	0	0	-4.9	2.6	-14.7	0	270	0

Fig. 9. Database for material information of each activity

으로 설명한다.

4.4.1 자재의 작업정보 설정

자재의 경우 3D 모델에 더불어 양중을 위한 작업 정보가 별도로 필요하다. 작업 정보는 자재를 구분하기 위한 자재 코드, 자재 속성을 표현하기 위한 자재 규격, 작업 지정을 위한 도착지와 설치위치 같은 작업 정보로 구성되며 자세한 내용은 다음 (Fig. 9)와 같다.

기둥, 보, 슬래브 등 타워크레인이 양중할 프리캐스트 부재가 부재별 규격 정보에 따른 크기와 무게, 작업 정보에 따른 좌표와 회전값을 바탕으로 조합되어 건물의 구조를 형성한다. 자재 종류와 그 위치를 함께 설정함으로써 건물의 3D 모델이 없어도 구현이 가능하도록 설계하였다. 이와 같이 자재에 작업 정보가 포함되도록 건물을 상향식으로 설계함으로써 타워크레인에 작업을 부여하기에 용이하도록 했다.

4.4.2 동적 객체 행동 패턴 설정

동적 객체는 타 객체와 달리 현장에서 동적으로 움직이며 건설현장의 복잡성과 사고 위험도를 높게 된다. 타워크레인은 동적 객체와의 충돌, 작업 지침에 유의하며 작업을 수행한다. 따라서 자율화 기술이 동적 객체에 의해 작업에 방해 받는 상황을 재현하기 위해 가상 건설현장에 다양한 방해요소들이 등장하도록 했다.

동적 객체의 행동 패턴은 사전에 입력된 행동 스케줄 데이터셋이 Unity에 연동되는 방식으로 구현된다. 행동 스케줄은 동적 객체 리스트와 각 객체별 이동 지점(Waypoint)들

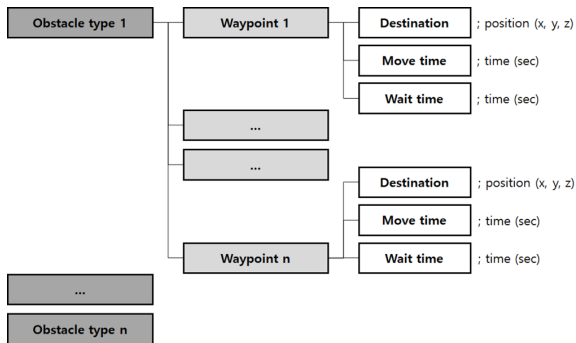


Fig. 10. Data structure of dynamic object behavior pattern

의 리스트로 구성된다. 이동 지점에는 지점 간 이동 시간과 유휴 상태 표현을 위한 대기 시간에 대한 정보가 담겨있어 동적 객체의 행동을 정의할 수 있다(Fig. 10). 이를 통해 동적 객체의 Motion Fidelity를 확보하여 데이터의 다양성 및 사용자의 몰입성을 높일 수 있다.

4.5 유저 인터페이스 구현

자율화 기술을 가상환경에서 개발하고 검증하기 위해서는 앞서 개발한 가상환경 구성요소들이 내외부적으로 상호 작용할 수 있도록 자율화 기술 대상인 타워크레인을 조작할 방법과 타워크레인이 작업하는 환경을 시각적으로 표현할 방안을 마련해야 한다.

이를 위해 사용자가 직접 타워크레인 모델을 조종하기 위한 조작 인터페이스와 양중작업을 수행하기 위한 정보를 획득하기 위한 화면 인터페이스를 개발 및 설계했다. 개발한 사용자 인터페이스는 가상환경의 상호작용 수단일 뿐만 아니라 타워크레인 조작데이터, 운행환경 데이터 등 데이터 수집 방안과 다음 장과 같이 사용자 경험을 통한 가상환경의 평가도구로 활용된다.

1) 조작 인터페이스

가상환경 내에서 사용자가 크레인을 조작하기 위해서는 타워크레인의 유휴, 선회, 횡행, 권상하 동작 상태가 사용자의 의도에 따라 입력장치를 사용하여 타워크레인을 조작될 수 있어야 한다. Fig 11과 같이 상태 전환 조건을 사용자 입력장치(Input Device)와 맵핑하여 사용자가 키보드 버튼(W, A, S, D, Q, E)으로 타워크레인의 트롤리, 지브, 훅을 조작할

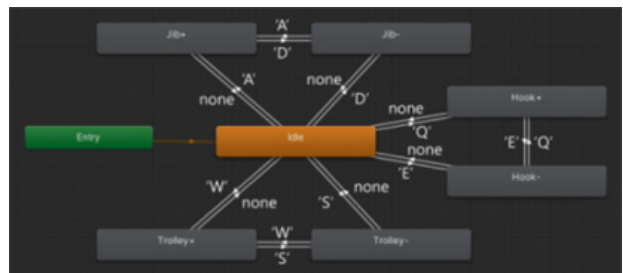


Fig. 11. Keyboard mapping for tower crane motion

수 있도록 개발하였다.

2) 화면 인터페이스

크레인 기사 인터뷰 내용을 기반으로 실제 정보 획득 방법과 유사한 화면 인터페이스를 기획하고 개발하였다. 인터뷰 결과 타워크레인 운행에 필요한 정보를 얻는 수단은 주로 육안 확인과 신호수와의 커뮤니케이션이었으며, 이를 통해 양중물 및 장애물의 위치를 판단한다. 따라서 하나의 화면에서 여러 정보를 획득할 수 있도록 화면을 나누어, <Fig. 12>와 같이 크레인 기사의 육안으로 볼 수 있는 화면인 Driver View, Hook View를 추가하고, 신호수를 대체하는 Perspective View를 추가해 화면 인터페이스를 구성했다.

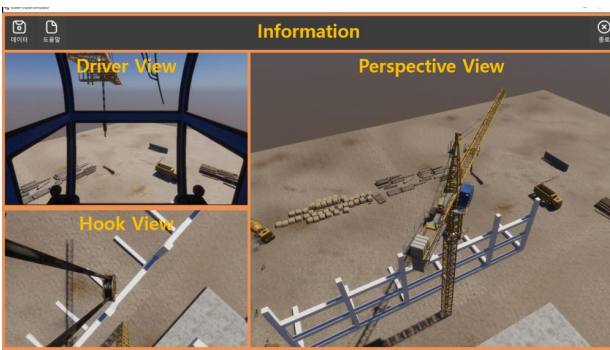


Fig. 12. User interface developed in this study

4.6 소결

이상으로 가상의 건설현장을 구축하기 위해 환경요소, 타워크레인인 장애물, 그리고 사용자 인터페이스를 개발했다. 가상환경의 각 구성요소의 개발에 있어 중점을 둔 Fidelity와 운행데이터셋 다양화를 위한 요소를 정리하면 <Table 6>과 같다.

Table 6. Related fidelity and parameters for diversification by each developed component

Category	Component	Related Fidelity	Parameters
Environment	Light	Visual Fidelity	Light condition (Illumination, Angle, Cloudiness)
	Wind	Motion Fidelity	Wind condition (Magnitude, Direction, Turbulence, Noise)
Object	Tower crane	Motion Fidelity	Specification (Length, Height, Load capacity, Speed)
	Static Object	Visual Fidelity	Type, Location
	Material	Visual Fidelity	Type, Location
		Functional Fidelity	Material information, Task information
	Dynamic Object	Visual Fidelity	Type, Location
Motion Fidelity		Behaviour pattern	
User Interface	Control	Functional Fidelity	-
	Display		-

5. 가상환경 검증

가상환경의 Fidelity를 검증하기 위해 건설업 경력자(건설사, CM사 및 타워크레인 기사) 20명을 대상으로 설문 조사를 수행했다. 설문참여자는 시뮬레이터를 경험한 후 각 항목에 대해 5점 척도로 평가했다.

5.1 설문의 내용

가상환경의 평가항목은 4.1절에서 도출한 내용을 바탕으로 환경의 그래픽 현실성(Visual Fidelity), 타워크레인 운행의 현실성(Motion Fidelity), 작업과 인터페이스의 현실성(Function Fidelity)의 세 가지 항목으로 구성했다. Fidelity 별 세부 평가항목은 <Table 7>과 같다.

Table 7. Detailed evaluation for similarity between developed program and actual operation

Target	Puroose Fidelity	Evaluation part
Graphic reality of the simulation environment	Visual Fidelity	<ul style="list-style-type: none"> • Reality of the tower crane driving scene • Reality of tower crane modeling • Reality of hook, jib, and trolley structure • Reality of the precast object • Reality of graphics at the construction site
Reality of the tower crane operation	Motion Fidelity	<ul style="list-style-type: none"> • Vibration of a fastened object • Reflecting physical phenomenon of hook/trolley/jib • Reflecting the physical phenomenon of the tower crane rope • Vibration of an object by the wind
Ul and User operation interface	Function Fidelity	<ul style="list-style-type: none"> • Rationality of the program workflow • Intuitiveness of the program • Intuitiveness of how to manipulate tower crane • Reaction speed of the control key • Immersion in the work process

5.2 설문 결과

1) Visual Fidelity 평가

Visual Fidelity를 측정하기 위해 타워크레인의 운행 화면 및 공사현장 그래픽의 현실성에 대해 조사했고, 추가로 타워크레인을 구성하는 주요 부재인 훅, 지브, 트롤리 구조의 현실성에 대한 문항으로 설문을 진행했다. 설문 결과는 다음 <Fig. 13>과 같다.

2) Motion Fidelity 평가

Motion Fidelity를 측정하기 위한 중점 포인트로 물리 현상 중 하나인 진동을 핵심으로, 체결된 물체 및 바람에 의한 진동이 잘 관측되는지, 타워크레인을 구성하는 주요 부재인 훅, 지브, 트롤리의 움직임에 있어 물리적 현상이 제대로 관측되는지에 대한 설문 결과는 <Fig. 14>와 같다.

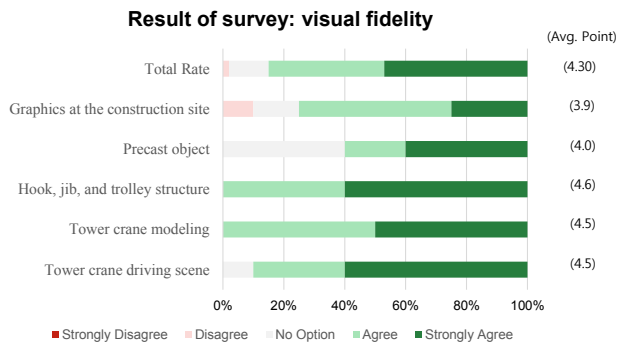


Fig. 13. Result of survey: visual fidelity

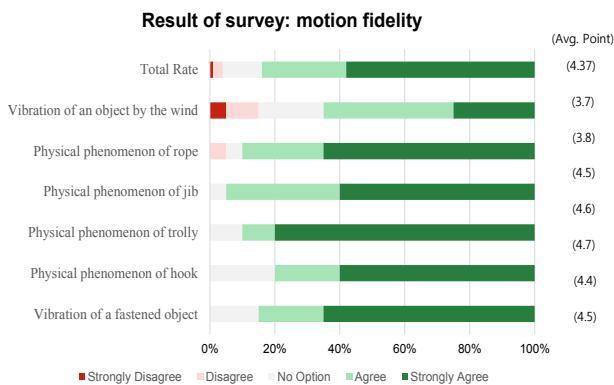


Fig. 14. Result of survey: motion fidelity

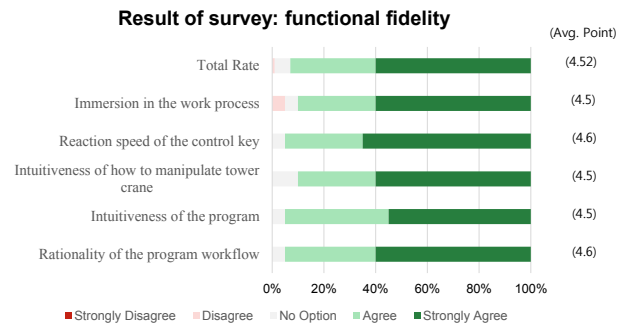


Fig. 15. Result of survey: functional fidelity

3) Function Fidelity 평가

가상환경의 몰입감은 훌륭한 Functional Fidelity로부터 나오며, 이는 조작 버튼을 눌렀을 때 크레인의 반응속도, 조작 방식의 직관성의 영향을 받는다. 추가로 프로그램 자체의 몰입성 및 진행 흐름의 합리성, 직관성에 대한 설문을 진행했다. 결과는 <Fig. 15>와 같다.

5.3 검증 결과 논의

각 Fidelity에 대해 설문을 5점 척도로 진행한 결과, Visual Fidelity는 4.3점, Motion Fidelity는 4.37점, Function Fidelity는 4.52점으로 본 연구에서 개발한 가상환경 플랫폼

이 각각의 Fidelity를 충분히 확보한 것으로 나타났다. 특히 프로그램 몰입성 측면에서 높은 평가를 받았으며 가상환경의 활용 시나리오 구성이 성공적으로 이루어졌다고 평가된다. 하지만 바람의 구현의 현실성에 대한 점수가 3.7점으로 상대적으로 낮으며, 이는 타워크레인 케빈 카메라 View의 진동이 구현되어있지 않기 때문으로 해석되며, 추후 모방학습을 통해 개발한 자율주행 모델 성능에 영향을 줄 수 있다. 향후 진동에 따른 카메라 View의 흔들림을 구현하여 이를 보완 가능할 것으로 사료된다.

6. 결론

건설장비 자율화 기술 개발을 위해서는 다양한 종류의 많은 데이터를 필요로 하지만 건설프로젝트의 복잡한 특성, 장비의 비용, 프로젝트의 기간 등으로 인해 실제 건설장비의 운행 데이터를 수집하는데 어려움이 있다. 이에 건설장비의 가상 데이터를 수집할 수 있는 건설현장 가상환경 플랫폼을 구축하기 위해, NHTSA 자율주행 차량 성능안내서를 기반으로 타워크레인에 적합한 ODD, OEDR, 최소위험 조건의 세부사항을 도출하였다. 이후 다양한 ODD 환경에서 작동하는 Path planning, 장애물 인식 기능 등을 개발하고 테스트할 수 있는 가상환경을 Unity를 활용하여 개발하였다.

본 연구에서 개발한 가상환경을 통해 타워크레인 자율화에 있어 요구되는 가상 데이터를 수집하고, 각 기능을 테스트하는 데 소모되는 비용 및 시간을 절감할 수 있을 것이다. 또한, 본 연구의 결과물을 확장함으로써 타워크레인뿐 아니라 타 건설장비의 자율화 기술 개발에 있어서도 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 추후 가상환경을 바탕으로 수집한 가상 데이터셋을 활용해 자율화 기술을 개발한 뒤 성공률, 운반 실패율 등을 검증하면서 추가적인 보안을 진행하면 높은 완성도의 가상환경을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호: 21CTAP-C163785-01).

References

Moore, A., and Lee, M.S. (1988). "Cached sufficient statistics for efficient machine learning with large datasets." *Journal of Artificial Intelligence Research*, 8, pp. 67-91.

Bank of Korea. (2019). National Accounts.

Borden, R.H., Holtz, R.O., and Juran, I. (1992). "Grouting, soil improvement and geosynthetics." *Proceedings of*

- the 1992 ASCE Specialty Conference, New Orleans, LA, USA.
- Construction Economy Research Institute of Korea (CERIK) (2008). Global Engineering-Construction Strategies for Korean Construction Companies, CERIK Research Report, 2008-08.
- Dutta, S., Cai, Y., Huang, L., and Zheng, J. (2020). "Automatic re-planning of lifting paths for robotized tower cranes in dynamic BIM environments." *Automation in Construction*, 110, 102998.
- Garrett, D.L. (2003). "Coupled analysis of flating production systems." Proc., Int. Symp. on Deep Mooring Systems, ASCE, Reston, vacancy decontro, 23(4). pp. 152-167.
- Gu, L., Kou, X., and Jia, J. (2012). "Distance measurement for tower crane obstacle based on multi-ultrasonic sensors." In 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), IEEE, pp. 1028-1032.
- Hong, G.D. (2005). "Market of CM for fee." CM Forum, <<http://www.kicem.or.kr>> (Dec. 15, 2005).
- Hong, Y. (2015). "A Study on the Function and Safety Evaluation of Autonomous Cars." Monthly KOTI Magazine on Transport, pp. 13-18.
- Hu, Y., Chan, A.P., Le, Y., and Jin, R.Z. (2015). "From construction megaproject management to complex project management: Bibliographic analysis." *Journal of management in engineering*, 31(4), 04014052.
- Hung, W.H., and Kang, S.C. (2009). "Physics-based crane model for the simulation of cooperative erections." In 9th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, pp. 5-6.
- Liggett, J.A., and Caughey, D.A. (1998). "Fluid statics." Fluid mechanics (CD-ROM), ASCE Press, Reston, Va.
- Liu, D., Macchiarella, N.D., and Vincenzi, D.A. (2008). Simulation fidelity. Human factors in simulation and training, pp. 61-73.
- Lynch, K., and Hack, G. (1994). Site Planning, 3rd ed, MIT Press, Cambridge, pp. 132-153.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018). "Innovation Plan for the Construction Industry."
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018). "Smart Construction Technology Roadmap for Construction Productivity Innovation and Safety Enhancement."
- Müller, M., Chentanez, N., Jeschke, S., and Macklin, M. (2018). Cable joints. In Computer Graphics Forum, 37(8) pp. 1-10.
- Myers, P.L., Starr, A.W., and Mullins, K. (2018). "Flight Simulator Fidelity, Training Transfer, and the Role of Instructors in Optimizing Learning." *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 5(1), pp. 6.
- National Highway Traffic Safety Administration. (2017). Automated driving systems 2.0: A vision for safety. Washington, DC: US Department of Transportation, DOT HS, p. 812, 442.
- Park, G. (2016). "A Study on the Improvement of Tower Crane Operation in Construction Sites". Construction Policy Review, 2016-06.
- Park, M.S., Ham, Y.J., Lee, H.S., and Kim, W.Y. (2010). "Development of Design Process Management Model using Dependency Structure Matrix for Constructability." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 11(5), pp. 65-74.
- Patel, K.K. (2020). A Simulation Environment with Reduced Reality Gap for Testing Autonomous Vehicles, Doctoral dissertation, University of Windsor, Canada.
- Shao, X., Zhang, J., Zhang, X., Zhao, Z., and Chen, Z. (2020). "A novel anti-swing and position control method for overhead crane." *Science progress*, 103(1), 0036850419883539.
- Shi, H.T., Huang, J.Q., Bai, X., Huang, X., and Sun, J. (2021). "Nonlinear Anti-swing Control of Underactuated Tower Crane Based on Improved Energy Function." *International Journal of Control, Automation and Systems*, 19(12), pp. 3967-3982.
- Sleiman, J.P., Zankoul, E., Houry, H., and Hamzeh, F. (2016). "Sensor-based planning tool for tower crane anti-collision monitoring on construction sites." In Construction Research Congress 2016, pp. 2624-2632.
- Sotiropoulos, S.N. (1991). "Statis response of bridge superstructures made of fiber reinforced plastic." MS thesis, West Virginia Univ., Morgantown, W. Va.
- Stahl, D.C., Wolfe, R.W., and Begel, M. (2004). "Improved analysis of timber rivet connections." *J. Struct. Eng.*, 130(8), pp. 1272-1279.
- J. Tremblay, A. Prakash, D. Acuna, M. Brophy, V. Jampani, C. Anil, T. To, E. Cameracci, S. Boochoon, and S. Birchfield (2018). "Training deep networks with synthetic data : Bridging the reality gap by domain randomization ." In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops, IEEE, pp. 969-977.
- Unity. Wind component [Website]. (2021, Sep 26). <http://rayfirestudios.com/online-help-unity/components/unity-wind-component/>
- Wang, P., Wu, P., Wang, J., Chi, H.L., and Wang, X. (2018). "A critical review of the use of virtual reality in construction engineering education and training." *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(6), p. 1204.
- Yoon, S., Jung, J., Hong, J., Lim, k., Kim, J., and Kim, H.

(2020). "Development of Autonomous Vehicle Learning Data Generation System," *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, 19(5), pp. 162-177.

Zhang, Z., and Pan, W. (2020). "Lift planning and optimization in construction: A thirty-year review." *Automation in Construction*, 118, 103271.

요약 : 건설현장 생산성 및 안전성 향상을 위해 건설장비 자율화를 위해 산학에서 많은 노력을 기울이고 있다. 장비 자율화를 위해서는 다양한 환경과 많은 양의 데이터 수집이 필요하다. 하지만 실제 환경에서 데이터 수집을 위한 테스트베드 확보에 많은 시간과 비용이 소모되며 불확실성 역시 크기 때문에 효과적인 데이터 수집과 처리에 어려움이 존재한다. 이에 본 연구에서는 타워크레인을 대상으로 자율화기술 개발을 위한 데이터 수집 및 테스트가 가능한 가상환경을 개발하는 것을 목표로 한다. 본 연구에서 달성한 연구 성과는 다음과 같다. 1. 타워크레인 자율운행에 필요한 기술과 기술이 적용될 수 있는 환경을 운영설계 도메인, 물체 및 이벤트 감지 및 반응, 최소기능조건이라는 세 가지 성능기준을 활용하여 정의함. 2. 정의된 환경 내에서 자율화 장비의 인지, 판단, 제어를 위한 각 기술을 학습하고 테스트하기 위한 가상 환경을 Unity를 활용하여 구축함. 3. 가상환경의 목적 달성 여부를 위한 평가지표로 Visual, Motion, Functional Fidelity를 사용해 가상환경이 현실 공사현장을 충실하게 표현하고 있음을 검증함. 본 연구에서 구축한 가상환경 플랫폼을 통해 등 타워크레인 자율화에 있어 요구되는 가상 데이터를 수집하고, 각 기능들을 테스트하는 데 소모되는 비용 및 시간을 절감할 수 있을 것이며, 또한 타워크레인 뿐 아니라 타 건설장비의 자율화기술 개발에 있어서도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 건설장비 자율화, 타워크레인, 가상환경, 가상 데이터
