

2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

# 로봇 친화형 건축물 설계를 위한 인간·로봇 다중 에이전트 기반 LOS 평가 시뮬레이션 프레임워크 제안

## A Human-Robot Multi-Agent LOS Evaluation Simulation Framework for Robot-Friendly Building Design

○이 승 현\* 류 나 정\*\* 강 지 수\*\*\* 차 승 현\*\*\*\*  
Lee, Seung Hyun Ryu, Najeong Kang, Jisoo Cha, Seung Hyun

### Abstract

This study proposes a multi-agent simulation framework that can assess level of service (LOS) in architectural spaces where humans and robots coexist. The proposed framework consists of three parts: agents, environment, and evaluation. Agents are designed with a BDI-LLM hybrid architecture for real-time movement and interaction implementation reflecting the characteristics of humans and robots, while the environment includes BIM-based geometry and semantic data that link the morphological characteristics of actual architectural spaces with agent behaviors. The evaluation consists of an integrated LOS assessment system based on three categories—safety, efficiency, and experience—that reflects both human user convenience and service robot operational efficiency.

키워드 : 로봇 친화형 건축물, 서비스 수준, 다중 에이전트 시뮬레이션, BIM

Keywords : Robot-Friendly Building, Level of Service, Multi-Agent Simulation, BIM

### 1. 서론

#### 1.1 연구의 배경

최근 로봇 기술의 급속한 발전으로 배송, 청소, 안내 등 다양한 업무를 수행하는 서비스 로봇들이 사무 건물, 병원, 상업시설 등에서 인간과 동일한 공간을 공유하기 시작했다. 그러나 인간과 로봇은 각자 다른 공간적 환경을 요구할 뿐 아니라 이동 중 상호 간섭을 야기할 수 있으며, 이는 로봇의 운영 효율성 저하(Ezhilarasu et al., 2024)와 인간 사용자의 편의성 감소(Sosa et al., 2018)라는 양방향적 문제의 원인이 된다.

이러한 관점에서 건축물 내 공간이 로봇 운영에 적합한 환경을 갖추도록 하는 로봇 친화성(Robot Inclusiveness)이 중요한 고려사항 중 하나로 대두되고 있다. 네이버 1784와 같은 최근의 로봇 친화형 건축물은 로봇 전용 동선 설계, 전용 승강기 시스템 등 인간과 로봇의 이동 간섭을 줄여 로봇 시스템 운영 효율을 높이기 위한 설계 전략을 취하

고 있다. 그러나 이와 같은 특화 전략은 기존 건축물에는 적용이 어렵고, 로봇 기술의 발전에 따라 서비스 로봇의 유형과 역할이 다양해지는 경우에도 보편적 적용을 장담하기 어렵다.

제시된 현실적 문제에 대응하고 건축 설계 및 로봇 운영 시스템을 최적화하기 위해서는 주어진 공간적 조건 내에서 로봇과 인간의 보행 간섭에 따른 문제 상황과 그 원인을 사전에 파악하기 위한 체계적 접근이 요구된다. 그러나 기존의 건축물 내 보행 관련 평가 방법론은 주로 인간 사용자만을 고려한 평가 방법에 국한되어 있으며, 로봇과 인간 사용자의 이동 패턴이나 상호작용에 따른 동적 변화를 예측하기 어렵다.

#### 1.2 연구의 목적 및 방법

본 연구는 로봇 친화형 건축물 설계를 위해 인간과 로봇이 공존하는 공간 내 보행 문제를 사전 평가할 수 있는 다중 에이전트 시뮬레이션의 개념적 프레임워크를 제안하고자 한다. 연구 방법은 다음과 같다. 첫째, 문헌 고찰을 통해 로봇 친화적 건축물의 개념과 서비스 수준(Level of Service, LOS) 평가 체계의 확장 가능성을 탐구한다. 둘째, LOS 평가를 위한 건축 시뮬레이션과 다중 에이전트 시뮬레이션 사례를 검토하여 사실적인 인간·로봇 보행 시뮬레이션을 위한 요구사항을 도출한다. 마지막으로 이론적 검토 결과를 바탕으로 로봇 친화형 건축물 LOS 평가를 위한 에이전트, 환경, 평가로 구성된 통합 프레임워크를 제안한다.

\* 한국과학기술원 건설및환경공학과 대학원 박사과정

\*\* 한양대학교 산학협력단 연구보조원

\*\*\* 한국과학기술원 문화기술대학원 석사과정

\*\*\*\* 한국과학기술원 문화기술대학원 부교수, 건축학 박사

(Corresponding author : Graduate School of Culture Technology, Korea Advanced Institute of Science and Technology, shcha@kaist.ac.kr)

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 2025년도 지원으로 수행되었음(과제번호 :RS-2025-02532980)

## 2. 로봇 친화형 건축물의 서비스 수준(LOS)

### 2.1. 로봇 친화형 건축물

로봇 친화적 공간은 조명, 가구 배치, 벽과 바닥의 재질 등 건축적 요소의 조율을 통해 로봇의 작업 적합성을 높이고 장애 요소를 최소화한 공간이다(Tan et al., 2016). 이러한 접근법은 복잡한 환경에 대응하는 고성능 로봇 개발보다 단순하고 비용 효율적인 방법으로 로봇 운영 효율을 개선할 수 있다(Mohan et al., 2015). 따라서 로봇 친화적 공간 설계는 단순히 로봇의 물리적 접근성 개선을 넘어서, 서비스 품질 향상, 로봇 시스템 전반의 운영 효율성 증대, 그리고 건축물 내 로봇 시스템의 구축 및 운영비용 절감까지 달성할 수 있는 포괄적 전략이라 할 수 있다.

로봇 친화형 건축물은 이러한 로봇 친화적 공간 설계 접근법이 건축물 전체에 체계적으로 적용된 건축물이다. 이를 위한 핵심적인 관점은 인간과 로봇을 모두 건축물의 능동적 사용자로 인식하는 것이다. Mohan et al.(2015)은 로봇을 특수한 요구사항을 가진 이해관계자로 간주하되, 동시에 가구의 규격이나 기능에서 인간 사용자의 기능적·미학적 요구도 보장해야 한다고 강조하며 로봇 운영 효율성과 인간 사용자 편의성 간의 균형 필요성을 제시하였다. 이에 따라 로봇 친화형 건축물은 로봇 친화성과 인간 중심성을 동시에 고려한 공간으로 구성된 건축물로 정의할 수 있다.

### 2.2 서비스 수준(LOS)

LOS는 공간의 보행 적합성을 평가하기 위한 지표로 활용되어왔다. 전통적 관점에서의 LOS 개념은 보행 속도 선택의 자유와 추월 가능성 등에 따라 단계적 지표로 정의되었다(Fruin, 1971). 현대에 들어 보행자 뿐 아니라 다양한 형태의 이동 수단이 활용되면서 LOS 개념은 안전성, 효율성, 경험 품질 등을 포괄하는 다차원적 개념으로 확장되고 있다. 미국의 National Cooperative Highway Research Program에서 제시한 Multimodal Level of Service(MMLOS) 방법론은 자동차, 대중교통, 자전거, 보행자 등 다양한 교통수단의 서비스 수준을 통합적으로 평가하는 체계를 제공한다(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine., 2008). 이는 LOS 개념의 적용 범위를 보행자 외부로 확장하며, 평가의 범위 또한 정지 횟수나 지연 시간, 배차 간격, 통행 시간 등 이동에 영향을 미치는 다양한 측면으로 확장한다. 또한 보행자 및 교통수단 사용자의 인지 및 만족도에 기반한 평가를 통해 경험적, 주관적 평가를 가능하게 한다.

로봇을 또 다른 공간 사용자로 인식하는 관점에서(Mohan et al., 2015), 기존 LOS 개념의 평가 주체를 건축물 내 공간을 공유하는 로봇과 인간으로 확장할 수 있다. 특히 인간과 로봇이 공유하는 공간에서는 한 이동 주체의 문제가 다른 한 쪽에도 영향을 미치게 된다는 점에서 이러한 다원적, 다면적 평가 방식은 로봇 친화형 건축물의 설계 최적화에 유용한 다양한 정보를 제공할 수 있을 것이다. 예를 들어 로봇이 장애물 사이에서 움직이지 못하는 등의 이동 문제 상황은 결과적으로 인간 사용자의 불편까

지 초래할 수 있다(Ng et al., 2022). 로봇의 경로 최적화 및 작업 수행 효율성, 인간 사용자의 공간 이용 편의성, 그리고 양자 간의 상호작용 품질 등을 종합적으로 고려하도록 LOS 평가 방식을 확장한다면 로봇과 인간 양측의 이동성, 접근성, 안전성을 종합적으로 평가할 수 있는 통합적 지표로서 활용할 수 있을 것이다.

## 3. 로봇-인간 다중 에이전트 시뮬레이션

### 3.1. LOS 평가를 위한 건축 시뮬레이션

로봇과 인간의 상호작용을 고려한 LOS 평가를 위해서는 실제 사용 시나리오를 구현할 수 있는 시뮬레이션 방법론이 필요하다. 이를 위해서는 시뮬레이션을 통한 LOS 평가 방법과 다중 에이전트 시뮬레이션 설계 방안에 대한 종합적 접근이 요구된다.

에이전트 기반 모델링(ABM)은 도시 및 건축 연구에서 설계 최적화를 위해 활용되는 핵심 방법론 중 하나로, 특히 LOS 평가 영역에서 주목받고 있다. Senanayake et al.(2024)는 응급 대피 상황에서 ABM이 인간 행동 및 집단 상호작용을 실제에 가깝게 재현할 수 있는 잠재력을 강조하며, 모델링 방법론과 적용형 행동모델의 발전 가능성을 체계적으로 제시하였다. 이러한 접근법은 복잡한 인간 행동 패턴을 시뮬레이션 환경에서 효과적으로 모델링할 수 있는 기반을 제공한다.

기존 연구들은 주로 BIM을 활용하여 건축 환경의 시뮬레이션을 수행해왔다. Beyaz et al.(2021)는 BIM 기반 시뮬레이션을 통해 공간 구성 변화에 따른 화재 발생 시 대피 동선의 효율성과 안정성을 평가하였으며, Alac et al.(2023)는 출구 위치 최적화를 통한 대피 시간 및 운영비용 감소 효과를 검증하였다. 이들 연구는 BIM의 3D 환경과 의미론적(Semantic) 정보를 활용하여 에이전트와 환경 간의 상호작용을 사실적으로 구현함으로써 설계 최적화를 위한 유용한 정보를 제공하였다.

최근에는 BIM을 활용하여 로봇 친화성을 평가하기 위한 시뮬레이션 연구도 진행되고 있다. 이러한 연구는 경사로, 가구와 같은 공간적 환경뿐만 아니라 인간의 존재가 로봇의 이동 성능에 미치는 영향까지 시뮬레이션 시나리오에 포함하여, 인간과 로봇이 공간을 공유하는 상황을 종합적으로 고려하고 있다(Ezhilarasu et al., 2024).

### 3.2. 다중 에이전트 시뮬레이션 (MAS)

기존 건축 설계 평가를 위한 시뮬레이션에서 다중 에이전트 모델은 주로 Social Force Model(Helbing & Molnár, 1995)이나 RVO(Reciprocal Velocity Obstacles)/ORCA(Optimal Reciprocal Collision Avoidance)와 같은 군중 시뮬레이션 알고리즘을 통해 구현되어 왔다(van den Berg et al., 2008; Snape et al., 2009). 이러한 접근은 다수 보행자의 이동 경로와 충돌 회피를 효과적으로 재현하며 대규모·실시간 시뮬레이션에 적합하나, 각 개체의 특성을 반영한 예외적 상황의 관찰에는 한계가 있다.

보다 자율적이고 독립적인 에이전트를 구현하여 실제에 가까운 행동과 상호작용을 모사하고자 하는 연구 또한 이루어지고 있다. 대표적으로 BDI(Belief-Desire-Intention) 에이전트(Boissier et al., 2013)와 대형 언어 모델 (Large Language

Model, LLM) 기반 에이전트(Park et al., 2023)가 있다.

BDI 에이전트는 인간의 의사결정 과정을 단순화하여 믿음(Belief), 욕구(Desire), 의도(Intention)라는 세 가지 요소로 나눈다. 이를 통해 상황 이해, 목표 설정, 행동 실행을 단계적으로 처리할 수 있으며, 규칙이나 역할과 같은 요소를 체계적으로 다룰 수 있다. 다만, 자연어 같은 개방형 입력을 해석하는 능력은 부족하고, 다양한 상황에 맞는 행동 규칙을 미리 정의하는 데 많은 노력이 필요하다. 한편, LLM 기반 에이전트는 대규모 언어모델을 활용해 기억(Memory)-계획(Planning)-반성(Reflection)을 자연어로 처리하며, 자연스럽고 인간에 가까운 대화와 행동을 보여줄 수 있다. 모델링 과정이 훨씬 생산적이지만, 여전히 일관성과 안전성 확보가 어렵고 프롬프트와 모델에 의존하는 한계가 있다.

최근에는 두 방식을 결합한 하이브리드 아키텍처도 연구되고 있다. 예를 들어 NatBDI(Ichida et al., 2024)에서는 LLM이 환경을 이해하고 행동 제안을 생성하는 역할을 맡고, BDI는 이 제안을 검증하면서 실제 실행과 규칙 준수를 관리한다. 이렇게 하면 LLM의 유연한 해석 능력과 BDI의 안정적인 실행 구조를 동시에 활용할 수 있다.

이러한 하이브리드 접근은 건축 시뮬레이션의 맥락에서도 적용 가능성이 크다. LLM과 BDI 아키텍처를 결합하면 단순히 지정된 목적지에 도달하는 수준을 넘어, 에이전트의 역할(예: 직장인, 학생, 관리자)과 특성(연령, 신체능력, 사회적 선호도 등)에 기반한 고도화된 이동 계획을 설계할 수 있다. 이를 통해 재난 대피와 같은 특수 시나리오는 물론, 사무공간, 상업시설, 교육시설 등 일상적 환경에서도 복합적인 동선 패턴까지 정밀하게 모델링할 수 있으며, 결과적으로 다층적이고 현실적인 LOS 평가와 공간 활용 분석이 가능하다.

#### 4. 시뮬레이션 프레임워크 제안

##### 4.1 프레임워크 개요

본 연구에서 제안하는 프레임워크는 주어진 설계안을 기반으로 인간·로봇 다중 에이전트를 활용하여 건축물 내 LOS를 사전 평가할 수 있는 시뮬레이션 구축을 목적으로 한다(그림1). 이를 위해서는 (1) 실제 공간 사용 상황을 사실적으로 모사할 수 있는 자율적 에이전트 아키텍처, (2) 이동 및 상호작용을 지원하는 충분한 의미론적 정보와 LOS 영향 요인을 반영하는 시뮬레이션 환경, (3) 시뮬레이션 산출을 바탕으로 한 LOS 평가 시스템이 요구된다.

##### 4.2 인간·로봇 에이전트 아키텍처

모든 에이전트는 지각(Perceive) → 인지(Cognition) → 계획(Planning) → 행동(Action) 순환 구조를 따르며(Nilsson, 1994), 내부적으로는 BDI 아키텍처와 LLM 기반 기억-계획-반성 루프(Park et al., 2023)를 통합한 하이브리드 구조를 채택한다. 규범적 관리와 역할 기반 계획은 BDI 코어가 담당하고, 맥락 해석과 자연어 상호작용은 LLM 코어가 담당하며, 최근 제안된 NatBDI(Ichida et al., 2024)와 유사하게 두 체계를 조정된 방식으로 병합한다.

이러한 구조를 통해 각 에이전트는 자율적으로 행동하는 과정에서 개별적 특성을 반영할 수 있으며, 또한 BDI 코어에 기

반한 각기 다른 목표와 공간에 대한 차별화된 지식을 바탕으로 보다 사실적으로 이동 및 상호작용 패턴을 구현할 수 있다.

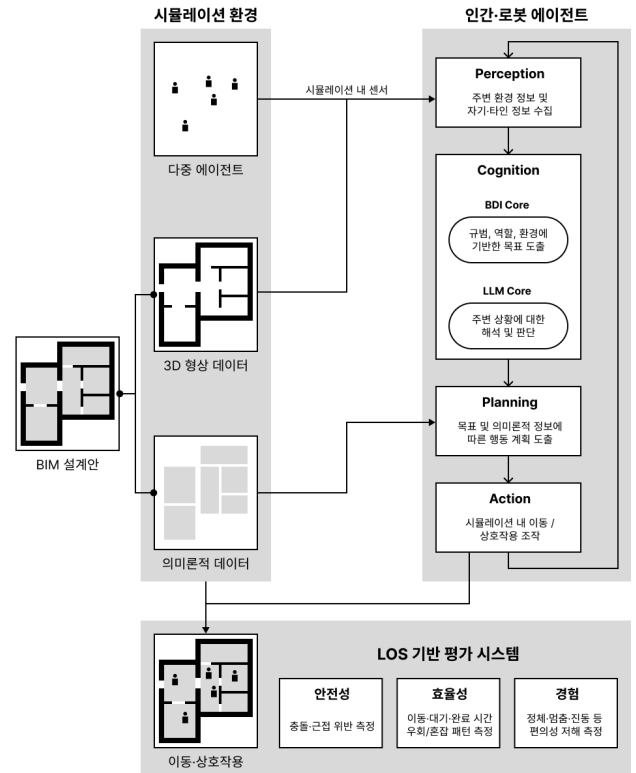


그림1. 인간·로봇 다중 에이전트 기반 LOS 평가 시뮬레이션 프레임워크

##### 4.3 BIM 건축 설계 기반 시뮬레이션 환경

시뮬레이션 환경은 BIM 데이터에 기반하여 실제 건축 공간의 형태적 특성을 반영한 3D 형상 데이터와 에이전트의 목표, 지식, 행동과 연계된 의미론적 정보를 포괄한다. 3D 형상 데이터는 에이전트의 동선, 이동 거리 등에 대한 정밀한 측정의 기반이 된다. 또한 공간적 조건에 따라 각 에이전트들의 보행 밀도, 통행 시간 등 이동 관련 성능에 영향을 미쳐 실제 공간 내에서 이루어지는 인간 사용자와 서비스 로봇의 LOS 평가를 가능하게 한다. 의미론적 정보는 BIM 데이터에 포함되어 있는 각 공간(방, 복도, 로비, 계단 등) 및 그 내부의 객체(문, 가구, 설비 등)에 대한 정보에 기반하여 구성된다. 이는 에이전트가 해당 공간 또는 객체에 기반하여 수행할 수 있는 행위 가능성(Affordance)을 포함하여 각 에이전트의 행동 계획이 이동을 넘어, 각 위치에 대한 구체적인 목적성을 갖도록 한다.

##### 4.4 LOS 기반 평가 시스템

LOS 기반 평가 시스템은 인간 및 로봇 에이전트의 이동 및 상호작용으로부터 데이터를 수집하고 분석하여, 궁극적으로 로봇 친화형 건축물 설계를 위한 최적화 방향성을 제시하는 정보를 생성한다. 이는 설계 단계에서 다양한 설계 대안을 정량적으로 비교하고 평가할 수 있는 기준을 제공한다. 본 프레임워크에서는 기존 연구에서 제시된 다양한 평가 요소들을 큰 틀에서 안전성, 효율성, 경험의 세 범주로 체계화한다. 안전성 지표는 충돌 및 근접 위반 이벤트를 측정하며, 효율성 지표는

이동/대기/완료 시간과 우회/혼잡 분산 패턴을 분석한다. 경험 지표는 기존 연구에서 강조된 사용자 인식의 중요성을 반영하여 정제, 멈춤, 진동 등의 편의성 저하 요인을 평가함으로써 로봇과 인간 모두의 주관적 만족도를 포괄한다. 이러한 세 가지 범주는 인간 에이전트의 편의성과 관련된 지표이자 로봇 에이전트의 운영 효율성과 관련된 지표로 구체화될 수 있으며, 이를 통해 로봇과 인간이 공존하는 환경을 평가하는 데에 필요한 다양한 관점을 보다 정량화된 형태로 활용할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 로봇 친화형 건축물 설계에 활용할 수 있는 인간 사용자와 서비스 로봇의 LOS 평가를 위해 로봇 친화형 건축물, LOS, 시뮬레이션 분야의 선행연구를 고찰하였으며, 이를 통해 인간·로봇 다중 에이전트 시뮬레이션 프레임워크를 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 개념적 프레임워크는 BDI와 LLM을 결합한 하이브리드 에이전트 아키텍처, 3D 형상 데이터와 의미론적 데이터를 포함하는 BIM 기반 시뮬레이션 환경, 안전성, 효율성, 경험의 세 범주에 기반한 LOS 기반 평가 시스템으로 구성된다.

또한 본 연구가 제안하는 프레임워크는 신축 건축물이 아닌 기존 건축물에 대한 적용 가능성과 기술 발전에 따라 등장 가능한 서비스 로봇들의 잠재적 다양성을 포괄하고자 모듈성과 확장성을 고려하여 설계되었다. 현재에도 기술의 급속한 발전으로 인해 이족 보행 로봇, 벽면 주행 로봇 등 새로운 유형의 로봇들이 지속적으로 등장하고 있으며, 각각의 목적, 물리적 특성, 이동 방식이 상이하다. 또한 병원, 사무시설, 교통시설 등 기존에 운영되던 건축물들의 유형 또한 다양하다. 제안된 프레임워크의 에이전트 아키텍처와 시뮬레이션 환경은 이러한 다양한 로봇 유형과 공간적 조건을 모두 반영할 수 있다. 이는 향후 전용 동선 구축이 어려운 환경이나 새로운 유형의 서비스 로봇 활용 시나리오에서도 건축 설계 및 로봇 운영 시스템 최적화를 위해 실제 구현 이전에 다양한 시나리오를 검증하고, 인간과 로봇이 조화롭게 공존할 수 있는 건축 환경을 설계하는 데에 활용될 수 있다.

향후 본 연구에서 제안한 개념적 프레임워크를 기반으로 실제 시뮬레이션 시스템을 구축하여 실증 연구를 수행할 필요가 있다. 이를 통해 프레임워크의 유효성을 검증하고 실무 현장에서 적용 가능한 형태로 발전시켜, 로봇 친화형 공간 설계를 위한 구체적이고 실용적인 도구로 활용될 수 있을 것이다. 또한 다양한 건축물 유형과 로봇 유형, LOS 지표에 대한 추가적인 연구를 통해 프레임워크의 범용성과 확장성을 지속적으로 개선할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. Alac, R., Wa Hammad, A., Hadigheh, A., & Opdyke, A. (2023). Optimising egress location in school buildings using mathematical modelling and Agent-Based simulation. *Safety Science*, 167, 106265.
2. Beyaz, C., Özgüner, E. D., Bağcı, Y. G., Akın, Ö., & Demirel, H. (2021). INTEGRATION OF BUILDING

INFORMATION MODELING AND AGENT-BASED MODELING FOR EVACUATION SIMULATION. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-4/W5-2021, 109-112.

3. Boissier, O., Bordini, R. H., Hübner, J. F., Ricci, A., & Santi, A. (2013). Multi-agent oriented programming with JaCaMo. *Science of Computer Programming*, 78(6), 747-761.
4. Ezhilarasu, A., Pey, J. J. J., Muthugala, M. A. V. J., Budig, M., & Elara, M. R. (2024). Enhancing Robot Inclusivity in the Built Environment: A Digital Twin-Assisted Assessment of Design Guideline Compliance. *Buildings*, 14(5), 1193.
5. Georgeff, M. P., & Lansky, A. L. (1987, July). Reactive reasoning and planning. In *AAAI* (Vol. 87, pp. 677-682).
6. Helbing, D., & Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5), 4282-4286.
7. Ichida, A. Y., Meneguzzi, F., & Cardoso, R. C. (2024). BDI Agents in Natural Language Environments. *Proceedings of the 23rd International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. AAMAS*.
8. Mohan, R. E., Tan, N., Tjoelsen, K., & Sosa, R. (2015). Designing the robot inclusive space challenge. *Digital Communications and Networks*, 1(4), 267-274.
9. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2008). *Multimodal Level of Service Analysis for Urban Streets*. Washington, DC: The National Academies Press.
10. Ng, Y. J., Yeo, M. S. K., Ng, Q. B., Budig, M., Muthugala, M. A. V. J., Samarakoon, S. M. B. P., & Mohan, R. E. (2022). Application of an adapted FMEA framework for robot-inclusivity of built environments. *Scientific Reports*, 12(1), 3408.
11. Park, J. S., O'Brien, J., Cai, C. J., Morris, M. R., Liang, P., & Bernstein, M. S. (2023). Generative Agents: Interactive Simulacra of Human Behavior. *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 1-22.
12. Senanayake, G. P. D. P., Kieu, M., Zou, Y., & Dirks, K. (2024). Agent-based simulation for pedestrian evacuation: A systematic literature review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 111, 104705.
13. Snape, J., Van Den Berg, J., Guy, S. J., & Manocha, D. (2009, October). Independent navigation of multiple mobile robots with hybrid reciprocal velocity obstacles. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 5917-5922). IEEE.
14. Tan, N., Mohan, R. E., & Watanabe, A. (2016). Toward a framework for robot-inclusive environments. *Automation in Construction*, 69, 68-78.
15. van den Berg, J., Lin, M., & Manocha, D. (2008). Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation. *IEEE ICRA*, 1928-1935.