2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

로봇친화형 설계 지원 기술 개발 프레임워크

A Framework for Developing Robot-friendly Design Support Technology

○최 혁 진* 신 재 연** 송 요 안*** 이 승 현*** 한 기 성**** 차 승 현****
Choi, Hyeokjin Shin, Jaeyeon Song, Yoan Lee, Seung Hyun, Han Gisung Cha, Seung Hyun

Abstract

This study proposes an integrated framework for robot-friendly building design, addressing the limitations of existing methodologies in human-robot coexistence environments. The framework comprises three components: quantitative evaluation criteria distinguishing robot and human mobility impedance indicators, AI-based simulation using sLM agent modeling for predicting complex interactions, and BIM-integrated design support tools for practical implementation. The framework enables systematic consideration of robot operations from early design stages, reducing redesign costs and contributing to efficient robot-friendly building design.

키워드 : 로봇친화형 건축, 인간-로봇 상호작용, AI 기반 시뮬레이션, 건축정보모델링
Keywords : Robot-friendly Architecture, Human-Robot Interaction, AI-based Simulation, Building Information Modeling (BIM)

1. 서론

1.1 연구의 목적

본 연구의 목적은 로봇친화형 건축물 설계를 체계적으로 지원하기 위한 프레임워크를 제안하는 것이다. 서비스 로봇 기술의 급속한 발전으로 물류, 청소, 안내 등 로봇이 건축 공간에서 운용되고 있으나, 기존 건축 설계 방법론은 인간-로봇 공존 환경을 충분히 고려하지 못하고 있다. 특히, 로봇 도입 후 엘리베이터 대기 시간 증가, 복도 혼잡 등의 문제가 사후적으로만 발견되어 비용이 큰 재설계로 이어지는 문제가 존재하지만, 인간의 심리적 반응, 로봇 회피 행동, 시간대별 혼잡도 변화 등 복잡계 상호작용은 체계적인 시뮬레이션 체계를 필요로 한다. 이에 본 연구는 설계 과정이 로봇 운용을 고려한 효율적 계획할 수 있도록 평가 지표, 시뮬레이션, 설계 도구를 중심으로 한 프레임워크를 통해 로봇친화형 건축 설계의 표준 방법론을 확립하고자 한다.

* 한국과학기술원 문화기술대학원 박사과정
** 한국과학기술원 문화기술대학원 석사과정
*** 한국과학기술원 건설환경공학과 박사과정
**** 한국과학기술원 문화기술연구소 박사후연구원
***** 한국과학기술원 문화기술대학원 부교수, 건축학 박사
(Corresponding author : Department 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)

1.2. 연구범위 및 방법

본 연구 범위는 로봇 활용을 위한 신규 건축물 설계 및 기존 건축물의 재설계가 필요한 실내 공간을 대상으로 한다. 구체적으로, 건축물 내 실내공간 및 네트워크 환경을 중심으로하며. 복도, 엘리베이터, 로비 등 인간과 로봇의 상호작용과 동선이 교차하는 공용공간의 특성을 반영한다. 대상 로봇은 현재 상용화된 중앙 통제 및 자율주행 기반 서비스 로봇으로 배송, 안내, 청소 등 이동형 로봇을 포함한다.

본 연구의 목적인 로봇친화형 건축물 설계 지원을 위한 통합 프레임워크 개발는 다음과 방법론을 통해 도출한다. 첫째, 문헌 조사를 통해 건축 공간내 로봇 활용 사례와 문제 현황을 분석한다. 둘째, 기존 로봇친화형 건축 사례와 설계 방법론을 분석하고, 기존 연구에서 간극을 도출하여 AI기반 시뮬레이션 방법론의 활용가능성을 분석한다.

선행 연구 분석을 통해 도출된 요구사항을 반영하여 세 단계 프레임워크를 제안한다. 첫째, 건축물 내 인간-로봇 이동 성능을 정량적으로 평가를 위한 서비스 등급(LOS) 기준. 둘째, AI 기반 인간-로봇 행동 시뮬레이션 기술을 통한 설계안의 성능을 사전 검증 방법. 셋째, 실무 적용성을 확보를 위한 BIM과 연동을 위한 설계 지원 도구 구현 방향. 본 연구에서 제안한 프레임워크는 로봇 친화형 건축 설계 과정에서 요구되는 '평가기준 수립 - 설계안 성능 예측 - 예측결과 설계 반영' 의 피드백 구조를 지원하며 이를 통해 실용적이고 효율적인 설계 프로세스 수립의 기반을 마련한다.

2. 이론적 고찰

로봇친화형 건축 공간 내 로봇 활용은 급속히 확대되며 실질적 성과를 입증하고 있다. 오피스 분야에서, 네이버 1784 빌딩은 110대의 로봇이 운영되는 세계 최대 규모의 로봇 친화형 건물로, ARC(Autonomous Robot Cloud) 플랫폼을 통해 중앙 통제되며 로봇 전용 엘리베이터인 '로보포트'와 완전 평면 바닥 설계를 실현하였다[1][2]. 의료 분야에서, UCSF 메디컬 센터가 TUG 로봇을 활용해 약제 및 식품 물품 운송을 수행하고 있으며[3], Stanford Hospital은 BoxPicker 시스템으로 99.9%의 정확도로 500만 달러 규모의 약품을 관리한다[4]. 유사하게 국내 서울대병원에서 COVID-19 대응 과정에서 CleanBot과 GuideBot 등 CLOi 로봇을 도입해 발열 체크와 비대면 서비스를 성공적으로 구현했다[5]. 공항과 호텔 부문에서도 로봇 도입이 활발하다. 두바이공항은 200대 이상의 Emirates Sara 로봇을 운영중이다[6]. 메리어트 호텔 체인의 Relay 로봇은 100만 건 이상의 배송을 5분 이내에 완료하는 성과를 달성했으며[7], 알리바바의 FlyZoo 호텔은 안면인식 체크인과 로봇 서비스로 기존 호텔 대비 1.5배의 운영 효율성을 달성했다[8].

그러나 이러한 성공 사례에도 불구하고, 실제 운영 과정에서의 문제 역시 드러나고 있다. Schulze 등의 연구에 따르면 로봇의 문과 엘리베이터를 포함한 전체 작업 실패율이 14%에 달하며, 엘리베이터 탑승에만 2-3분이 소요되며[9], 매트 청소를 위한 소형 로봇의 경우 20mm 높이의 문턱도 통과에 어려움을 겪는다[10]. 인간 고객의 심리적 인식 역시 문제로 드러난다. 일본 헨나 호텔의 경우, 로봇의 오작동, 객실 근처에서 불필요한 소음 등으로 인한 문제로 초기 도입한 243대 로봇 중 절반인 120대를 해고하였다[11]. 이는 건축물 내 로봇 활용 시, 건축물의 물리적 제약과 인간과 상호작용을 동시에 염두 해야한다는 점을 시사한다.

한편, 로봇친화형 건축 설계에 대한 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있으며, 체계적인 방법론이 부족한 실정이다. 기존 연구들은 주로 개별 기술 요소나 특정 문제 해결에 집중되어 있다. 산업계의 시선에서, 건물관리시스템(BMS) 기업 CIM 보고에 따르면 대부분의 레거시 시스템으로 구성되어 있어 로봇등 신규 인프라 구축에 제약이 된다고 언급하며[12]. 인간-로봇 상호작용의 학술 연구의 경우, 건축물 내 엘리베이터 공간에서 인간이 '빠른' 로봇보다 '배려하는' 로봇을 선호한다는 결과를 보고했다[13]. 이는 단순한 효율성 추구를 넘어, 건축 구조에 대한 이해와 건축물을 활용하는 인간 요인을 복합적으로 고려한 설계가 필요함을 시사한다.

현재 로봇친화형 건축 설계의 가장 큰 문제는 표준화된 평가 기준의 부재다. 네이버 1784와 같은 선도적 사례에도 불구하고, 신규 및 기건축물에 보편적으로 적용 가능한 설계 가이드라인은 부재하다 [2]. 동시에, AI기반 시뮬레이션의 가능성이 확대되었음에도 불구하고, 설계 단계에서 건축물내 로봇 운영의 영향을 예측할 수 있는 시뮬레이션 방법 및 설계 활용 방안에 대한 연구가 부족하다. 이러한 연구 격차를 해결하고 건축물 내 효과적인 로봇활용을 위해, 설계 초기 단계부터 인간-로봇 상호작용을 고려하고, 성능을 사전 검증할 수 있는 통합적 접근이 요구된다.

3. 로봇친화형 건축물 설계 지원 기술 개발 프레임워크

3.1. 인간-로봇 이동 성능 평가 기준 개발

첫 번째 고려해야할 프레임워크 구성요소는 로봇친화형 건축물의 성능을 정량적으로 평가하는 이동 성능 평가기준이다. 이는 설계 의사결정의 객관적 근거를 제공하며, 동시에 시뮬레이션 결과를 모델링하고 검증하는 기준점 역할을 한다. 평가 기준의 체계를 설계할 때 저해받는 주체를 중심으로 (1) 로봇 이동 저해 지표와 (2) 인간 이동 저해 지표로 구분하는 것이 가능하다.

로봇 이동 저해 지표는 로봇의 이동 방식을 수직 이동과 수평 이동으로 분류하여 세분화 할 수 있다. 각각의 이동 양식에 따른 운영 효율성에 대한 평가가 요구된다. 예를 들어, 수직 이동에서는 엘리베이터 대기시간과 층간 이동 소요시간을, 수평 이동에서는 복도 통행량과 동선 충돌 빈도를 측정하여 지표를 설계할 수 있다. 로봇 제어 네트워크 평가의 경우 이동 제어의 정확성과 안정화 지원 시스템의 신뢰성등이 활용될 수 있다. 또한 특히 특수 상황 대응 측면에서 로봇-건축물 연계방안과 재난/대피 상황 시 대응 능력을 평가하는 지표 역시 고려되어야 한다,

인간 이동 저해 지표는 로봇 정보(크기 및 높이, 이동 속도, 안정성)와 실내 환경 정보(공간 구성, 통로 간격, 출입구 크기, 코너부 특성)등 요소를 정량화하여 인간에 미치는 영향을 평가하는 지표를 설계해야 한다. 예를 들어, 심리적 요인으로는 위협감, 신뢰도, 통제감을 측정, 사회적 요인으로는 공존 가능성, 사회적 거리 등이 분석될 수 있다. 미적 요인으로, 디자인 조화도, 동작음, 소리/소음 수준등이 평가될 수 있다. 이러한 다차원적 평가를 통한 서비스 등급 체계를 구축은 성능 평가 기준의 개발의 토대가 된다.

그림1. 인간-로봇 이동 성능 평가 기준 도식화

3.2. 인간-로봇-건축공간 상호작용 시뮬레이션 기술 개발

두 번째 고려해야할 프레임워크 구성요소는 설계 안의 성능을 사전 예측하는 AI 기반 시뮬레이션 기술이다. 이는 건축 공간 내 인간-로봇의 복잡한 상호작용을 예측하고 검증하는 핵심 요소이다. 이는 개발 한 '인간-로봇 이동 성능 평가 기준'에서 정의한 세부사항을 활용하여 설계안의 성능을 사전에 분석하며, 잠재적 문제점을 조기에 식별할 수 있게 한다. 최신 인공지능 기술의 발전을 고려하였을 때, 시뮬레이션 체계는 (1) sLM 기반 에이전트 모델링, (2) 건축물 속성 및 설계자 의도 반영, (3) 시나리오 생성 및 행동 모델링으로 구성 가능하다.

sLM(Small Language Model) 기반 에이전트 모델링은 사용자 유형을 인적사항, 신체 스펙, 역할 및 활동으로 구분하여 입력받아 Generative Agent Memory를 구축한다. Short-Term Memory와 Long-Term Memory의 이중 구조를 통해 에이전트의 즉각적 반응과 학습된 패턴을 모두 반영하며, Retrieve 메커니즘으로 상황에 적합한 행동을 추론하도록 한다. 계획 및 추론 모듈에서는 목표 설정, 의사 결정, 작업 계획을 수립하고, 이를 바탕으로 실제 행동이 실행되며 사용자 피드백을 통해 지속적으로 개선된다.

건축물 속성 분석을 위해 건축물 유형 분류와 공간 유형 및 구성을 구분한 시뮬레이션의 물리적 환경을 정의가 필요하다. 공간별 기능 및 지원 활동을 명시하고, 건축물 유형별 사용자를 그룹화하여 현실적인 시뮬레이션 환경을 구축한다. 시나리오 생성 단계에서는 다양한 조건들을 조합하여 복수의 시나리오를 자동 생성하며, 인간과 로봇 Agent의 행동을 High-Level 행동 모델링(추상화된 작업 수행)과 Low-Level 행동 모델링(세부 동작)으로 계층화하여 최종적으로 Agent 행동 시뮬레이션 시나리오를 도출한다.

3.3. 시뮬레이션 시각화 및 설계 지원 기술 개발

마지막 프레임워크의 구성요소는 설계가의 시안을 기반으로 시뮬레이션을 수행하고 결과를 시각화하는 설계 지원 기술이다. 이 때 효과적인 성능 지표 반영과 시뮬레이션 결과 도출 위해 IFC 표준에 기반한 BIM 모델 기반 설계가 권장된다. 이는 궁극적으로 다차원의 시뮬레이션 결과 데이터를 설계자의 설계 시스템에 연동를 가능하게 한다. 이를 설계 지원 체계는 (1) 파라미터 특성 분석, (2) UI 구성 및 개발, (3) 다차원 시각화 모듈와 같이 구분할 수 있다.

UI 구성 파라미터 설정에서는 BIM 모델 및 환경 중심 변수(공간 크기, BIM 모델 위계, 간섭요소), 로봇 중심 변수(기기 사양, 기기행동반경, 네트워크 환경), 사용자 중심 변수(Demographic, 신체행동반경, 행동 시나리오), 상호 인식 및 행동 중심 변수(상호작용수준, 안전 거리, 독립교차 및 충돌)를 체계화한다. UI 설계 및 개발 단계에서는 Robot DB 연동을 위한 입력 포맷 표준화, Agent 사양 기반 파라미터 제공 반영, 파라미터 기본값 설정 및 조정 범위 표준화를 수행하며, 설계자 친화적 인터페이스 구현이 요구된다.

또한, 시각화 모듈에는 실시간 경로 정보 시각화, 분포도 계산, 시계열 애니메이션 구현을 통한 파라미터 특징 분석이 요구된다. 공간 성능지도 모듈에서는 평가지표 및 데이터 구조를 설계하고, 공간 성능 지표 알고리즘을 구현하여 지도화 방식으로 표현하며, 인간 경험 저해 요소 시각화는 스트레스-불편도 모델링과 지표계산 알고리즘을 통해 컬러 맵핑 및 히트맵을 생성하는 과정이 필요하다. 최종적으로 시뮬레이션 결과 애니메이션 편집 모듈은 시나리오별 결과를 기록하고, 이벤트 기반 시스템을 통해 결과를 추출하여 BIM 플러그인과 연동함으로써 설계자가 즉각적으로 설계안을 수정하고 검증할 수 있는 체계가 된다.

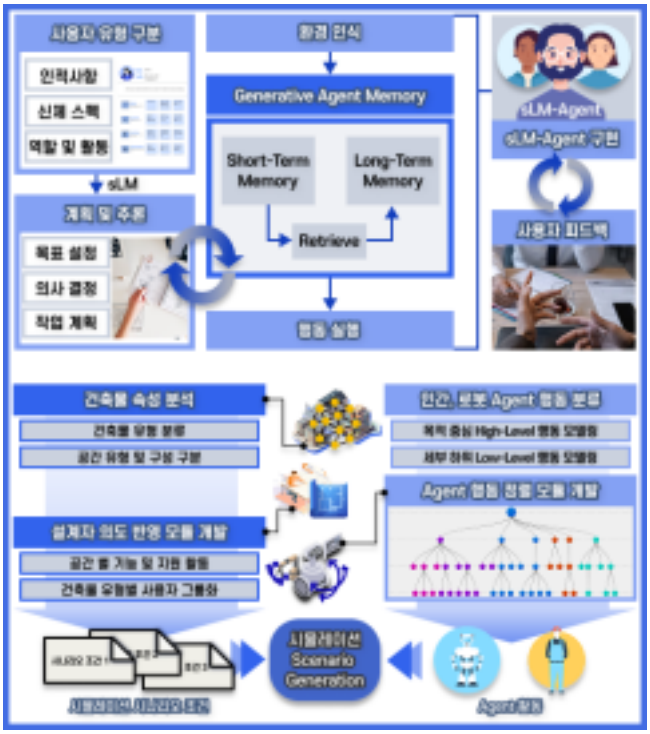

그림2. 인간-로봇-건축공간 상호작용 시뮬레이션 기술 도식화

그림3. 시뮬레이션 시각화 및 설계 지원 기술 요소 도식화

4. 결론 및 제언

본 연구는 로봇친화형 건축물 설계를 체계적으로 지원하기 위한 통합 프레임워크를 제안하였다. 건축 공간 내 로봇 도입이 확대되는 현실에서, 기존 설계 방법론이 인간-로봇 공존 환경을 충분히 고려하지 못하는 문제를 해결하기 위해 평가 기준, 시뮬레이션, 설계 도구를 중심으로 한 세 가지 핵심 구성요소를 개발하였다.

첫째, 인간-로봇 이동 성능 평가 기준은 로봇 이동 저해 지표와 인간 이동 저해 지표로 구분하여 정량적 평가 체계를 구축하였다. 이는 설계 의사결정의 객관적 근거를 제공하며, 기존에 부재했던 표준화된 평가 기준의 공백을 메운다. 둘째, AI 기반 시뮬레이션 기술은 sLM 기반 에이전트 모델링과 건축물 속성 분석을 통해 복잡한 인간-로봇 상호작용을 예측 가능하게 하였다. 셋째, 설계 지원 기술은 BIM과 연동되는 시각화 및 최적화 도구를 통해 실무 적용성을 확보하였다.

본 프레임워크의 의의는 설계 초기 단계부터 로봇 운용을 고려한 체계적 접근을 가능하게 한다는 점이다. '평가기준 수립 - 성능 예측 - 설계 반영'의 피드백 구조는 사후적 문제 발견으로 인한 재설계 비용을 감소시키고, 인간과 로봇이 효율적으로 공존하는 건축 환경 조성에 기여할 것으로 기대된다. 특히 몇 개의 성공사례를 중심으로 응용하는 방식에서 나아가, 로봇 친화형 건축물 설계를 보편적으로 가능하게 하는 시작점을 제시하였다는 점에서 학술적 기여가 있다.

향후 연구에서, 본 연구에서 제안한 프레임워크 제안 단계에 맞춘 실제 설계 프로젝트 적용을 통한 검증을 이어나갈 것이다. 이 과정을 통해 다양한 건축물 유형과 로봇 종류에 대한 실증 연구를 통해 프레임워크의 유효성을 검증하고, 평가 기준의 세부 지표를 정교화가 가능할 것이다. 나아가, 시뮬레이션 정확도 향상을 위한 실제 운영 데이터 수집과 학습 체계 구축하여, 최신 기술이 건축 설계 실무에서 적용되는 효율적인 과정을 만들기 위한 기반을 마련할 것이다. 본 연구가 제시한 프레임워크가 로봇친화형 건축 설계의 표준 방법론으로 발전하여, 다양한 주체들의 효용을 극대화 할 수 있는 미래 건축 설계에 기여하기를 기대한다.

참고문헌

1. 이상원. (2024). Architectural Research on Human-Robot Collaboration (Doctoral dissertation, 서울대학교 대학원).
2. 네이버랩스. (2024). NAVER LABS. https://www.naverlabs.com/en/
3. KQED. (2023). Robots Are Taking Over UCSF. https://bayareatelegraph.com/2023/04/21/robots-are-taking-over-ucsf/
4. Stanford Medicine. (2019). Robots join workforce at the new Stanford Hospital. https://med.stanford.edu/news/all-news/2019/11/robots-join-the-workforce-at-the-new-stanford-hospital-.html
5. Korea Biomed. (2020). Hospitals resort to robots amid Covid-19 pandemic. https://www.koreabiomed.com/news/articleView.html?idxno=8964
6. Khaleej Times. (2024). From scanning passports to telling weather: How Emirates' new robot can make Dubai travellers' airport journey faster. https://www.khaleejtimes.com/uae/from-scanning-passports-to-telling-weather-how-emirates-new-robot-can-make-dubai-travellers-airpo
7. Hotel Dive. (2023). Hotel Tech-in: The robot butlers taking over hotel deliveries. https://www.hoteldive.com/news/hotel-tech-in-robot-deliveries/689438/
8. Hotel Dive. (2023). Hotel Tech-in: The robot butlers taking over hotel deliveries. https://www.hoteldive.com/news/hotel-tech-in-robot-deliveries/689438/
9. Schulze, L., et al. (2025). On realizing autonomous transport services in multi story buildings with doors and elevators. Frontiers in Robotics and AI. DOI: 10.3389/frobt.2025.1546894
10. ECOVACS. (2024). How Robot Vacuums Get Over High Thresholds. https://www.ecovacs.com/us/blog/robot-vacuums-for-going-over-thresholds
11. Hotel Management. (2019). Japan's Henn na Hotel fires half its robot workforce. https://www.hotelmanagement.net/tech/japan-s-henn-na-hotel-fires-half-its-robot-workforce
12. 이상원. (2024). Architectural Research on Human-Robot Collaboration (Doctoral dissertation, 서울대학교 대학원).
13. Kim, S., Bak, S., & Kim, K. (2024, May). Which Robot Do You Prefer When Boarding an Elevator: Fast vs. Considerate. In Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 1-7).