

에이전트 기반 시뮬레이션의 보행자 이질성 시각화 방법론

Visualization Methodology for Pedestrian Heterogeneity in Agent-based Simulation

○신 재 연* 최 혁 진** 차 승 현***

Shin, Jaeyeon Choi, Hyeokjin Cha, Seung Hyun

Abstract

Architectural design simulations play a critical role in predicting and validating building performance and occupant behaviors, yet existing systems often fail to represent the detailed attributes and dynamic characteristics of agents. To address this limitation, this study proposes a visualization framework using consistent encoding strategies across three media types: 3D simulation animation, heatmap, and data reports. The framework strengthens the semantic connection of agent attributes and state changes through Informational Hierarchy and Chronological Visualization. While 3D and 2D media enable dynamic exploration via web interfaces, data reports present static metrics hierarchically. This approach balances analytical depth with interface simplicity, enhancing the interpretability and applicability of architectural simulations.

키워드 : 에이전트 기반 시뮬레이션, 언어 모델 에이전트, 데이터 시각화, 시각화 방법론

Keywords : Agent-based simulation, Language model agents, Data Visualization, Visualization Methodology

1. 서론

건축 설계 시뮬레이션은 설계 단계에서부터 건축물의 성능과 거주자의 사용 행태를 예측·검증할 수 있다는 점에서 중요한 역할을 한다(Jia et al., 2021). 이를 통해 에너지 효율, 구조적 안정성, 동선의 효율성 등 핵심 성능 지표를 사전에 평가함으로써 잠재적 문제를 예방하고 설계 품질을 향상시킬 수 있다(Uddin et al., 2021). 특히, 에이전트 기반 시뮬레이션은 보행자, 방문객, 사용자와 같은 개별 주체들의 이동 패턴과 상호작용을 분석함으로써, 공항·병원·상업시설 등 복잡한 건축 환경의 안전성과 운영 효율을 높이는 핵심 도구로 활용된다(Ziabari et al., 2021).

그러나 현행 건축 시뮬레이션 결과는 에이전트의 세부 속성이나 행동 특성을 명료하게 드러내지 못하는 경우가 빈번하다(Galán, 2009). 기존 연구와 실무 적용 사례들은 주로 시뮬레이션의 정확도 향상, 연산 최적화, 또는 시나리오 검증에 초점을 두었으며, 그 결과 개별 에이전트의

이질성을 직관적으로 식별할 수 있는 시각적 표현 체계는 부차적인 요소로 간주되어 왔다. 이러한 한계는 속성 간 비교 분석을 어렵게 하고, 특정 상황에서 에이전트 상호작용의 맥락적 의미를 해석하는 데 제약을 초래한다.

이에 본 연구는 시뮬레이션 결과에 내재된 에이전트 정보를 효과적으로 드러내기 위한 시각화 방법론을 제안한다. 제안된 방법론은 다양한 출력 매체 전반에 걸쳐 일관된 시각 인코딩 전략을 적용함으로써, 에이전트 속성과 상태 변화의 의미적 연결성을 강화하고, 건축 시뮬레이션의 해석 가능성과 활용 가치를 동시에 향상시키는 것을 목표로 한다.

2. 설계 제안

다양한 시각화 매체 간 일관된 에이전트 표현 방식을 수립하기 위해서는, 각 매체의 특성과 전달 방식에 적합한 시각 인코딩 규칙을 체계적으로 정리하고 비교할 필요가 있다. 따라서, 본 연구는 기존 시뮬레이션 도구들의 출력 사례를 조사하여 결과 유형을 세 가지로 분류하고, 각 유형에서 에이전트의 특성과 상태를 효과적으로 시각화할 수 있도록 지원하는 시각 인코딩 프레임워크를 제안한다. 이를 위해 (1) 3D 시뮬레이션 애니메이션, (2) 2D 히트맵, (3) 데이터 리포트라는 세 가지 매체 유형을 중심으로 개선 방안을 제시하며, 정보의 공간성, 상호작용성, 해석의 추상도에 따른 차이를 고려하여 이들 간 표현 방식의 의미적 연결성을 확보하는 것을 목표로 한다.

* 한국과학기술원 메타버스대학원 석사과정

** 한국과학기술원 문화기술대학원 박사과정

*** 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)

2.1 정보 계층화

에이전트 시각화에서 중요한 것은 어떤 속성 정보를 우선적으로 노출할지, 그리고 어떤 정보를 후속적으로 탐색할 수 있도록 배치할지를 단계적으로 정의하는 것이다. 즉, 에이전트의 속성은 중요도와 활용 목적에 따라 계층적으로 구조화될 필요가 있다. 이를 통해 사용자는 인터페이스 상에서 필요한 수준의 정보를 선택적으로 접근할 수 있으며, 불필요한 시각적 복잡성을 줄일 수 있다.

본 연구는 에이전트 이질성 속성을 네 항목으로 구분하여 제안한다. (1) 성별, 연령, 신체적 특성, 장애 여부와 같이 기본적으로 정적인 속성. (2) 에이전트의 최종 목적지와 같은 목표 지향적 속성. (3) 부여된 과업, 이동 경로 패턴 등 공간 상호작용과 관련된 동적 속성. (4) 특정 상황 발생 시 의사결정 자유도. 이러한 계층적 속성 표상은 각 항목에 접근할 수 있는 단계적 접근 방식이 필요하며, 팝업, 툴팁, 클릭 기반 인터랙션 등을 통해 구현될 수 있다. 결론적으로, 에이전트의 정보는 일괄적으로 제시되기보다 계층적으로 제시되어야 한다는 점이며, 세부 구현 방식은 인터페이스 맥락에 따라 유연하게 적용 가능하다.

2.2 시간 시각화

에이전트의 속성은 정적이지 않고 시간의 흐름에 따라 변화한다(Macal & North, 2010). 특히, 의사결정의 변동으로 인해 동선이 변경되거나 상태가 전환되는 경우, 이를 시각적으로 드러내는 것은 분석적·해석적 가치가 크다. 따라서, 에이전트의 상태 변화는 반드시 시간 축을 반영한 시각적 단서와 함께 표현되어야 한다.

본 연구는 시간에 따른 에이전트의 속성 표기를 두 가지 차원으로 구분하여 시각화한다. (1) 현재 시점의 속성 변화 시각화. (2) 전체 시간 흐름에 따른 속성 변화 시각화. 시간에 따른 에이전트 속성 변화는 색상 그라데이션, 투명도 변화, 패턴 밀도, 선의 굵기 또는 텍스처 변화로 나타낼 수 있다. 이러한 시각적 단서는 시간의 흐름에 따른 속성 변화를 직관적으로 파악할 수 있도록 지원하며, 사용자가 특정 시점에서 에이전트의 상태 변화를 해석할 수 있는 기초를 제공한다.

3. 매체 별 시각화 방법론

3.1 3D 시뮬레이션 애니메이션

3D 시뮬레이션 애니메이션은 보행자 시뮬레이션 결과를 가상 3차원 환경에서 시간의 흐름에 따라 동적으로 재현하는 매체로, 실제와 유사한 깊이감과 원근감을 제공하며 공간 구조와 에이전트의 이동 궤적을 사실적이고 몰입감 있게 전달한다(Brandle et al., 2014). 이를 통해 관찰자는 다양한 시점과 경로에서 시뮬레이션 공간을 탐색하며, 에이전트의 움직임과 상호작용을 직관적으로 이해할 수 있다(Crooks et al., 2011).

시중에서 널리 활용되는 대표적 보행자 시뮬레이션 도구인 Pathfinder의 3D 시각화 기능은 여러 가지 제약을 지닌다(그림1). 첫째, 시뮬레이션 결과는 주로 컬러맵 기반의

물리량 표현에 의존하여, 밀도·속도·잔여 시간 등 단일 지표를 강조하는 데 효과적이거나, 개별 에이전트의 속성 변화를 복합적으로 드러내는 데는 한계가 있다. 둘째, Occupant Coloring 기능은 속도, 그룹, 행동 유형 등 다양한 기준에 따라 색상 구분을 제공하지만, 이는 기본적으로 단일 속성만을 반영하는 방식이어서 복수의 속성을 동시에 표현하거나 이질성의 다층성을 시각적으로 전달하기 어렵다. 셋째, 점유자 경로 시각화 기능은 이동 경로를 추적하는 데 유용하나, 해당 경로 역시 선택된 단일 속성에 따라 색이 입혀지므로, 속성 변화와 경로 정보를 통합적으로 해석하는 데 제약이 있다. 결과적으로 Pathfinder의 3D 시뮬레이션 애니메이션은 정량적 지표를 직관적으로 전달하는 데 강점을 가지지만, 에이전트 단위의 세부 속성 탐색이나 시간적 변화를 다층적으로 표현하는 데 있어 상호작용성과 해석 가능성 측면에서 한계가 존재한다.

본 연구는 제안한 두 가지 핵심 요소인 정보 계층화와 시간적 가변성을 3D 환경에 적용하기 위한 구체적 방안을 제시한다(그림2). 정보 계층화는 에이전트를 선택했을 때 상부에 나타나는 소형 말풍선 툴팁으로 제공되며, 이를 통해 성별·연령 등 기본 속성에서부터 이동 경로 패턴, 의사결정 자유도와 같은 심층 속성까지 단계적으로 확인할 수 있다. 시간적 가변성은 두 가지 방식으로 반영된다. 첫째, 현 시점에서의 상태는 에이전트의 투명도 변화로 나타난다. 3D 시뮬레이션 환경은 본질적으로 복합적이고 풍부한 시각 정보를 포함하므로, 에이전트 표현에 과도한 색상 변화를 적용할 경우 시각적 혼란을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구는 색상 구분 대신 투명도를 주요 시각 인코딩 요소로 활용하는 방안을 제안한다. 이벤트 발생 정도에 따라 에이전트를 세 단계의 투명도로 차등 표현하며, 이벤트가 발생한 에이전트는 불투명도 100%로 표시된다. 둘째, 시간에 따른 속성 변화 추이는 인터페이스 하단에 생성되는 막대형 그라데이션 차트를 통해 시각화된다. 이러한 설계는 불필요한 시각적 과부하를 최소화하면서도 에이전트의 상태와 변화 과정을 직관적으로 드러내어, 사용자가 시뮬레이션 결과를 보다 정교하고 맥락적으로 해석할 수 있도록 지원한다.

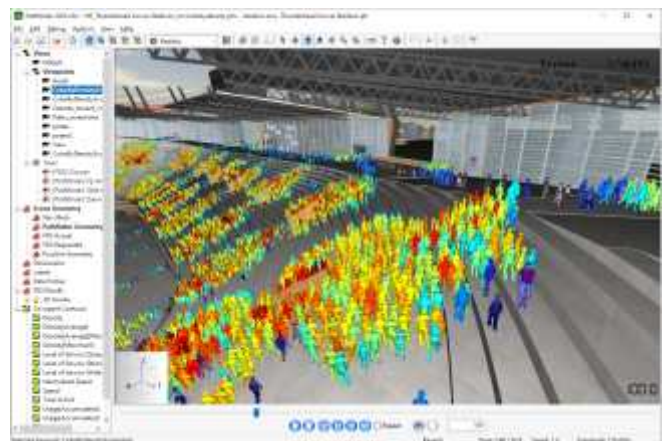


그림1. 상업용 툴(패스파인더)의 3D 시뮬레이션 기반 보행자 시각화 예시



그림2. 3D 시뮬레이션 기반 보행자 이질성 시각화 방식 예시

3.2 히트맵

히트맵은 보행자 시뮬레이션에서 특정 변수의 공간적 분포를 색상 그라데이션으로 표현하는 매체로, 특정 상황에서 전체 공간의 패턴과 집중 영역을 상부 시점에서 직관적으로 파악할 수 있게 한다(Crociani et al., 2019). 상부 평면 시점에서는 복잡한 형태보다 단순한 기호적 표현이 공간적 해석에 유리하기 때문에 에이전트의 시각적 표현은 단순화된 원형 아이콘으로 설계하는 것을 제안한다.

시중에서 널리 사용되는 도구인 Pathfinder의 히트맵 인터페이스는 여러 가지 한계를 지닌다(그림3). 첫째, Pathfinder의 히트맵은 공간 내 집단적 혼잡 양상이나 밀도 분포를 효과적으로 드러내지만, 시각화 초점이 집단 단위에 치우쳐 있어 개별 에이전트 수준의 세부 속성이나 미세한 상태 변화를 구분하기에는 한계가 있다. 둘째, 시각화 결과가 주로 색상 그라데이션 기반의 정적 표현으로 제공되기 때문에, 시간 축에 따른 속성 변화를 직관적으로 연속 추적하거나 특정 에이전트의 변화를 심층적으로 파악하기 어렵다. 셋째, 색상 구분 방식은 다양하지만 동시에 복수의 속성을 병렬적으로 표현할 수 없으며, 이로 인해 속성 간 상호작용이나 이질성의 다층성을 해석하는 데 제약이 발생한다. 이러한 한계는 결과적으로 사용자가 원하는 속성을 계층적으로 탐색하거나 맥락적으로 해석하는 데 불충분하며, 본 연구에서 제안하는 웹 기반 인터페이스가 제공하는 시간적 가변성과 정보 계층화 기능의 필요성을 뒷받침한다.

본 연구는 히트맵을 위한 시간적 가변성과 정보 계층화 방안을 제시한다(그림4). 시간적 가변성은 두 가지 방식으로 반영된다. 첫째, 현 시점에서의 상태는 원 아이콘 내부의 색상 표시로 나타낸다. 히트맵은 이미 강한 색상 정보를 포함하므로, 에이전트를 두 가지 이상의 색상으로 구분할 경우 시각적 간섭과 혼란이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구는 히트맵의 고유 색상 체계를 유지하면서 에이전트 속성 상태를 구분하기 위해, 히트맵에서 사용되지 않는 단일 보조 색상을 선정하고, 그 내부에서 명도 차를 활용하는 전략을 제안한다. 이벤트 발생 현황에 따라 에이전트는 세 단계의 명도로 차등 표현되며, 변화가 발생한 에이전트

는 해당 색상의 가장 진한 명도로 강조된다. 둘째, 시간에 따른 속성 변화는 인터페이스 하단에 배치된 그라데이션 막대를 통해 시각화된다. 정보 계층화는 기본적으로 단순화된 원형 아이콘을 유지하되, 특정 에이전트를 클릭했을 때 화면 하단에 팝업 창을 띄워 속성 정보의 세부 사항을 단계적으로 확인할 수 있도록 한다. 기존 히트맵은 단일 이미지 형태로 제공되지만, 제안하는 시스템에서는 에이전트 아이콘 클릭 시 정보 팝업이 생성되어야 하므로 정적 이미지가 아닌 웹 기반 인터페이스로 구현되는 것이 요구된다.

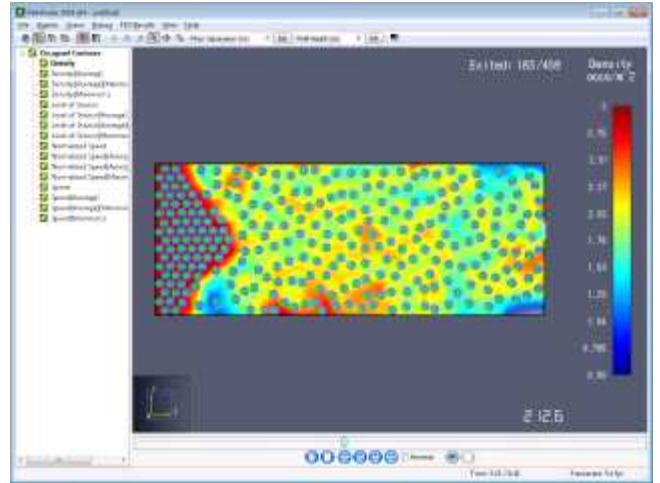


그림3. 상업용 툴(패스파인더)의 히트맵 기반 보행자 시각화 예시

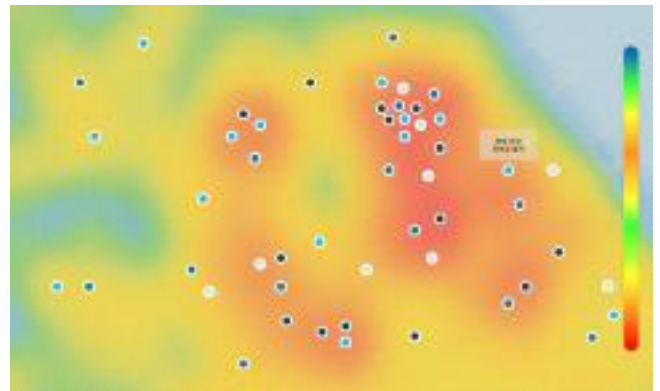


그림4. 히트맵 기반 보행자 이질성 시각화 방식 예시

3.3 데이터 리포트

데이터 리포트는 시뮬레이션 결과를 정량적 수치와 요약 지표의 형태로 제공하는 분석 문서로, 통계 및 공간 분석 결과를 체계적으로 제시한다. 대기 시간, 이동 시간, 지연 발생 구간, 탑승·하차 횟수, 특정 구간의 인원 누적 변화 등 다양한 항목을 포함할 수 있다(Alam et al., 2022).

기존 시뮬레이션 도구들이 제공하는 데이터 리포트는 몇 가지 한계를 지닌다. 첫째, 결과가 주로 평균값이나 총합과 같은 집계 지표 중심으로 제시되기 때문에, 에이전트 개별의 이질성을 세부적으로 드러내는 데 제약이 있다. 둘째, 보고서 형식이 고정적이고 비상호작용적이어서 사용자가 분석 목적에 따라 정보를 선택적으로 탐색하거나 심화된 비교 분석을 수행하기 어렵다. 이러한 한계는 본 연구

에서 제안하는 계층적 정보 구조를 통해 속성을 단계적으로 분리·표현하는 방식과 비교할 때, 해석 가능성과 활용성 측면에서 미흡하다.

데이터 리포트는 본질적으로 정적 문서 형식으로 작성되며, 수치와 그래프를 중심으로 결과를 제시하기 때문에 본 연구는 데이터 리포트에서는 시간적 가변성을 배제하고, 정보 계층화만을 반영한다. 시뮬레이션의 시계열적 변화를 실시간으로 표현하기보다는, 특정 시점이나 누적 결과를 요약하는 데 초점이 맞춰지기 때문에 가변성의 시각화는 제외하고 표현한다. 제안하는 정보 계층화와 이에 따른 표현 방식은 다음과 같다. (1) 기본 속성(성별, 나이, 키, 몸무게, 장애 여부): 표와 텍스트 기반 요약으로 제시한다. 전체 분포는 막대그래프 또는 파이차트를 활용하여 집단별 비율을 시각적으로 제공한다. (2) 목적지: 목적지별 인원 수와 이동 경로 빈도를 막대그래프 또는 Sankey 다이어그램으로 제시한다. 이를 통해 전체 에이전트 집단의 목적지 분포를 직관적으로 이해할 수 있다. (3) 부여받은 과업, 이동 패턴: 이동 경로와 과업 할당은 경로 빈도분석 표 및 누적 선그래프를 활용해 표현한다. 이를 통해 특정 구간을 거치는 빈도나 과업 수행의 분포를 비교할 수 있다. (4) 의사결정 자유도: 상황 발생 시 경로 변경 빈도와 의사결정 수준은 박스 플롯, 히스토그램 등을 활용하여 통계적 분포로 표현한다. 이를 통해 집단 내 의사결정 다양성과 편차를 분석할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 건축 시뮬레이션에서 에이전트 이질성을 효과적으로 시각화하기 위해, 3D 시뮬레이션 애니메이션, 2D 히트맵, 데이터 리포트라는 세 가지 상이한 출력 매체에 적용 가능한 일관된 시각 인코딩 방법론을 제안하였다. 제안된 접근은 각 매체의 특성과 정보 전달 방식에 적합한 시각적 인코딩 체계를 설계함으로써, 속성과 상태 변화 간의 의미적 연결성을 강화하고, 해석 가능성과 활용 가치를 동시에 향상시키는 것을 목표로 한다.

특히, 3D 시뮬레이션 애니메이션과 2D 히트맵은 정적인 단일 이미지 제공 방식을 넘어서, 에이전트 선택 시 정보 팝업과 속성 변화를 동적으로 확인할 수 있는 웹 기반 인터페이스로 구현할 것을 제안하였다. 반면 데이터 리포트는 문서 및 그래프 기반의 분석 자료로, 시간적 가변성보다는 정보 계층화를 중심으로 정적 데이터를 단계적으로 제시하는 방식을 채택하였다.

향후 연구에서는 제안된 방법론을 실제 건축 시뮬레이션 환경에 적용하고, 다양한 사례를 통해 그 실효성을 평가할 예정이다. 특히 건축물의 용도와 목적(예: 터미널의 안전 관리, 병원의 환자 동선 효율화, 상업시설의 운영 계획 등)에 따라 제안된 인터페이스를 구현하고, 사용자 반응을 관찰하여 그 효과를 검증할 계획이다.

결과적으로 본 연구의 설계 제안은 에이전트의 정보가 계층적으로 구조화되고, 동시에 시간 축에 따라 동적으로 가시화될 수 있어야 함을 강조한다. 이를 통해 인터페이스 복잡성을 억제하면서도 분석적 심층성을 확보하는 균형

있는 시각화 체계를 마련할 수 있으며, 건축 시뮬레이션의 설계 검토, 안전 분석, 운영 계획 수립 등 다양한 활용 맥락에서 실질적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Jia, M., Srinivasan, R., Ries, R. J., Bharathy, G., & Weyer, N. (2021). Investigating the impact of actual and modeled occupant behavior information input to building performance simulation. *Buildings*, 11(1), 32.
1. Uddin, M. N., Wei, H. H., Chi, H. L., & Ni, M. (2021). Influence of occupant behavior for building energy conservation: a systematic review study of diverse modeling and simulation approach. *Buildings*, 11(2), 41.
2. Sanders, G., Mohammadi Ziabari, S. S., Mekic, A., & Sharpanskykh, A. (2021, September). Agent-based modelling and simulation of airport terminal operations under COVID-19-related restrictions. In *International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems* (pp. 214-228). Cham: Springer International Publishing.
3. Galán, J. M., Izquierdo, L. R., Izquierdo, S. S., Santos, J. I., Del Olmo, R., López-Paredes, A., & Edmonds, B. M. (2009). Errors and artefacts in agent-based modelling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12(1), 1-1.
4. Macal, C. M., & North, M. J. (2005, December). Tutorial on agent-based modeling and simulation. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2005. (pp. 14-pp). IEEE.
5. Brandle, N., Matyus, T., Brunnhuber, M., Hesina, G., Neuschmied, H., & Rosner, M. (2009, September). Realistic interactive pedestrian simulation and visualization for virtual 3D environments. In *2009 15th International Conference on Virtual Systems and Multimedia* (pp. 179-184). IEEE.
6. Crooks, A. T., Smith, A. H., & Patel, A. (2011). Advances and techniques for building 3D agent-based models for urban systems. In *Advanced Geosimulation Models* (pp. 49-65). Bentham Science Publishers.
7. Crociani, L., Vizzari, G., & Bandini, S. (2019). Calibrating Wayfinding Decisions in Pedestrian Simulation Models: The Entropy Map. *arXiv preprint arXiv:1909.03054*.
8. Alam, M. J., Habib, M. A., & Holmes, D. (2022). Pedestrian movement simulation for an airport considering social distancing strategy. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, 13, 100527.