

# 디지털 트윈 전시 공간의 가상-물리 동기화 및 공간 확장

## Virtual-Physical Synchronization and Spatial Extension of Digital Twin Exhibition Spaces

강동완<sup>1</sup>

Dongwann Kang<sup>1</sup>

요약

본 연구는 디지털 트윈 전시를 위한 기술적 접근으로서, CAVE 기반 가상현실 환경에서 현실 공간과 가상 전시 공간을 실시간으로 동기화·확장하는 전시 공간 구성 방법을 제안한다. 기존의 가상 전시는 시각적 재현에 치중되어, 실제 전시 관람에서 중요한 공간적 연속성, 신체 이동 경험, 현존감 유지에 한계를 보여왔다. 본 연구는 비전 기반 사용자 추적, Unreal Engine 5와 nDisplay를 활용한 가상-물리 공간 동기화, 그리고 사용자 위치 기반 전시 공간 확장 메커니즘을 결합한 디지털 트윈 전시 시스템을 설계·구현하였다. 제안한 시스템은 제한된 CAVE 물리 공간을 다수의 가상 전시 공간에 순차적으로 매핑하여, 관람자가 실제 보행 기반의 연속적인 전시 동선을 유지하며 가상 전시 공간을 관람할 수 있도록 한다. 사례 기반 실험을 통해 시스템의 구현 가능성과 안정적인 동작 특성을 확인하였고, 사용자 위치 기반 시점 제어와 다중 프로젝터 클러스터 렌더링이 전시 관람의 공간적 연속성 유지에 기여함을 관찰하였다. 본 연구는 디지털 트윈 전시 환경 구성을 위한 CAVE 기반 공간 컴퓨팅 시스템의 설계 방향을 제시함으로써, 향후 몰입형 콘텐츠 연구의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

핵심어 : 디지털 트윈, CAVE, 공간 컴퓨팅, 공간 동기화, 전시 공간 확장

### Abstract

This study proposes a technical approach for digital twin exhibitions by presenting a method for real-time synchronization and extension of physical and virtual exhibition spaces in a CAVE-based virtual reality environment. Existing virtual exhibitions have focused on visual representation, limiting spatial continuity, embodied movement, and the maintenance of presence in on-site exhibition experiences. This study designs and implements a digital twin exhibition system integrating vision-based user tracking, virtual-physical space synchronization using Unreal Engine 5 and nDisplay, and a user position-based exhibition space expansion mechanism. The proposed system sequentially maps multiple virtual exhibition spaces onto a limited physical CAVE environment, enabling continuous exhibition paths through natural walking-based navigation. A case-based experiment confirms the system's feasibility and stable operation,

<sup>1</sup> Dept. of Computer Science and Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea  
e-mail: dongwann@seoultech.ac.kr

\* 이 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

Received(December 28, 2025), Review Result(1st: January 22, 2026), Accepted(February 13, 2026), Published(February 28, 2026)



© 2026 The Authors. Published by NCISS.  
This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.  
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

and shows that user position-based viewpoint control and multi-projector cluster rendering support spatial continuity during exhibition viewing. This study presents design directions for a CAVE-based spatial computing system for digital twin exhibitions, providing a basis for future immersive content research.

Keyword : Digital Twin, CAVE, Spatial Computing, Space Synchronization, Exhibition Space Expansion

## 1. 서론

최근 문화예술 분야에서는 VR, AR, MR 및 메타버스 기술을 활용한 전시가 빠르게 확산되고 있으며, 특히 현실 공간을 가상으로 재현하는 수준을 넘어 현실과 가상이 실시간으로 대응·동기화되는 환경으로서의 디지털 트윈(digital twin)에 대한 관심이 증가하고 있다. 디지털 트윈은 제조, 도시, 교통 분야를 중심으로 먼저 확산되어 왔으나, 최근에는 전시 시뮬레이션, 관람 동선 설계, 작품 배치 검증, 안전 관리, 원격 관람 등 문화예술 영역에서도 다양한 활용 가능성이 논의되고 있다. 그러나 전시 맥락에서의 디지털 트윈은 여전히 시각적 재현에 초점을 둔 구현이 주를 이루고 있으며, 관람자가 실제 전시에서 경험하는 공간적 연속성, 신체적 이동 경험, 현존감(presence)과 몰입감(immersion)을 충분히 반영하지 못하는 한계가 지적되고 있다.

특히 HMD 기반 가상현실 전시는 개인 단위의 몰입형 경험을 제공할 수 있다는 장점이 있으나, 전시가 갖는 공공적·공유적 특성, 즉 동시 관람이나 동행 관람, 큐레이터의 안내, 공간 자체가 형성하는 분위기와 결합에는 한계를 보인다. 또한 컨트롤러 조작이나 텔레포트 방식에 의존한 이동은 실제 전시 관람에서 중요한 요소인 보행 기반의 동선 경험과 괴리를 발생시킨다. 전시 공간을 단순한 시각 정보의 집합이 아니라, 걷고 멈추며 시선을 이동시키는 연속적인 지각 과정으로 이해할 때, 이동 방식의 단절과 공간 연속성의 붕괴는 전시 관람 경험의 질 저하로 직결될 수 있다.

본 연구는 이러한 문제의식에 기반하여, CAVE(Cave Automatic Virtual Environment) 기반 가상현실 환경을 디지털 트윈 전시를 위한 기술적 플랫폼으로 채택하고, 비전 기반 사용자 추적, 가상-물리 공간 동기화, 그리고 사용자 위치에 기반한 전시 공간 확장 기법을 결합한 전시 공간 구성 방법을 제안한다. 특히 Unreal Engine 5와 nDisplay를 활용한 다중 프로젝터 클러스터 렌더링을 통해, 제한된 물리 공간에서도 여러 개의 가상 전시 방을 연속적으로 관람할 수 있는 구현 구조를 제시한다. 본 논문의 기여는 고난이도 알고리즘의 성능을 비교·검증하는 데 있기보다는, 디지털 트윈 전시를 위한 구현 가능한 시스템 설계와 운영 가능한 기술 파이프라인을 실제 구현 관점에서 정리하고, CAVE 기반 공간 컴퓨팅이 전시 경험 확장에 적합한 기술적 기반이 될 수 있음을 사례 중심으로 제시하는 데 있다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 가상현실 기반 전시 연구

가상 전시는 문화유산/박물관 콘텐츠를 중심으로 발전해 왔으며, 초기에는 3차원 스캔·모델링 기반의 공간 재현과 탐색성 제공에 초점을 두었다 [1-3]. 이후 사용자 경험 관점에서 현존감과 몰입이 중요한 평가 요소로 부각되었다 [4][5]. Slater와 Wilbur는 현존감을 사용자가 가상 환경을 실제하는 공간으로 경험하는 정도로 정의하고, 시스템의 감각 피드백/상호작용 특성이 현존감에 영향을 준다고 논의하였다 [6]. 전시 맥락에서는 현존감이 단지 ‘실감’을 의미하는 것이 아니라, 관람자가 공간 속에서 작품과 관계 맺는 방식(거리감, 시점 이동, 동선 흐름)에 밀접하게 연결된다 [7][8].

## 2.2 CAVE 기반 가상현실 환경

CAVE는 다면(벽·바닥) 투영을 통해 사용자를 둘러싸는 몰입형 환경으로, HMD 대비 물리 공간 인지와 공유 관람에 유리한 특성을 가진다. Cruz-Neira 등 [9][10]이 제안한 CAVE 개념 이후, 시뮬레이션/교육/과학 시각화 등에서 활용되었으며, 다중 사용자가 동일 공간에서 콘텐츠를 경험할 수 있다는 점에서 전시·퍼포먼스 등 공공적 콘텐츠에 적합한 플랫폼으로 논의되어 왔다 [11]. 다만 CAVE는 물리적 제약(면적·장비·캘리브레이션·운영 난이도)을 갖기 때문에, 콘텐츠 측면에서 제한된 공간을 어떻게 ‘확장된 가상 공간’으로 경험하게 할 것인가가 핵심 과제로 남는다 [12].

## 2.3 공간 확장 및 Redirected Walking

제한된 물리 공간에서 더 큰 가상 공간을 경험하게 하는 대표적 접근으로 Redirected Walking이 있으며, 사용자의 회전/이동을 미세하게 유도하여 물리 공간 내에 머무르게 한다 [13]. Steinicke 등은 사용자의 방향 인지 한계를 기반으로 감지되지 않는 범위의 회전/이동 조작이 가능함을 보였다 [14]. 그러나 많은 연구가 HMD 기반 개인 VR에 집중되어 있고, CAVE처럼 다면 투영 및 공유 관람 환경에서의 적용은 상대적으로 제한적이다. 또한 전시 관람의 경우 ‘공간 확장’은 단순히 넓은 공간을 보여주는 것이 아니라, 전시 방의 전환(doorway), 동선의 흐름, 전시 시퀀스(관람 순서)의 유지와 결합되어야 한다.

# 3. CAVE 기반 디지털 트윈 전시 공간의 설계 및 구현

본 연구에서 제안하는 디지털 트윈 전시 시스템은 CAVE 환경에서 현실 공간과 가상 전시 공간을 실시간으로 동기화하고, 제한된 물리 공간을 확장된 가상 전시 공간으로 활용하기 위한 공간 컴퓨팅 기반 시스템이다. 시스템 설계의 핵심은 사용자 위치에 기반한 시점 일관성 유지, 다중 프로젝터 환경에서의 안정적인 클러스터 렌더링, 그리고 사용자 인지 부담을 최소화하는 전시 공간 전환 메커니즘을 하나의 통합 아키텍처로 구성하는 데 있다. 이를 위해 본 시스템은 사용자 추적 계층, 렌더링 및 동기화 계층, 프로젝션 출력 계층, 그리고 전시 경험 제어 계층으로 구성된다.

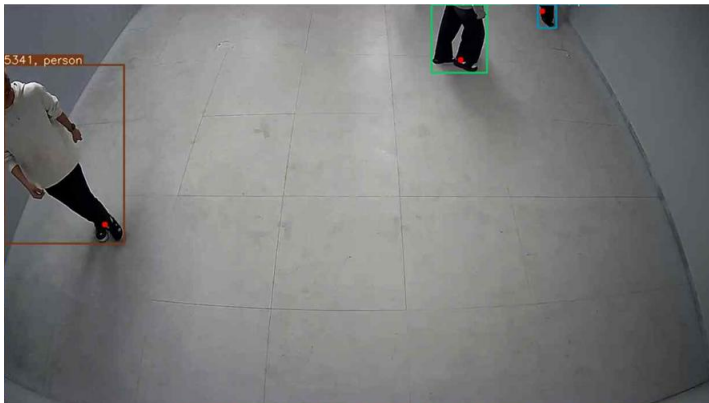
### 3.1 시스템 전체 아키텍처

시스템은 크게 입력-처리-출력의 세 단계로 구성된다. 입력 단계에서는 비전 기반 사용자 추적 모듈을 통해 사용자의 위치와 방향 정보가 실시간으로 획득된다. 처리 단계에서는 해당 정보가 Unreal Engine 5 기반 가상 공간에 반영되어 사용자 시점에 맞는 가상 전시 장면이 생성된다. 출력 단계에서는 nDisplay 기반 클러스터 렌더링을 통해 생성된 가상 장면이 다중 프로젝터 환경에 동기화되어 투영된다. 이 과정 전반에서 모든 렌더 노드는 동일한 시점과 장면 상태를 공유하도록 구성되며, 프레임 단위의 동기화가 유지된다.

이러한 구조는 개별 기술 요소의 단순한 병렬 결합이 아니라, CAVE 환경에서 요구되는 공간적 일관성과 전시 운영 가능성을 고려하여 설계되었다. 특히 전시 콘텐츠 교체, 공간 구성 변경, 사용자 동선 수정과 같은 운영 시나리오에서도 시스템 구조가 유지되도록 모듈 간 결합도를 낮추고, 엔진 내부 설정을 중심으로 제어가 가능하도록 구성하였다.

### 3.2 비전 기반 사용자 추적 및 시점 데이터 파이프라인

사용자 추적은 가상 공간 시점 계산의 기준이 되므로 시스템 전체의 안정성을 좌우한다. 본 연구에서는 사용자가 별도의 장비를 착용하지 않고 전시를 관람할 수 있도록 [그림 1]과 같이 다중 RGB 카메라를 이용한 비전 기반 추적 방식을 적용하였다. CAVE 공간의 크기와 구조에 따라 복수의 카메라를 설치하고, 각 카메라에서 획득된 영상으로부터 사용자의 머리 또는 상체 위치를 검출하여 3차원 공간상의 위치와 방향을 추정하였다.



[그림 1] 비전 기반 사용자 위치 및 방향 추적  
[Fig. 1] Vision-based user position and orientation tracking

다중 카메라 환경에서는 각 카메라의 프레임 타이밍 불일치로 인해 추정 오차가 발생할 수 있으므로, 본 시스템에서는 타임스탬프 기반 프레임 정렬과 추정 결과의 공간적 융합을 수행하였다. 이후 추정된 사용자 포즈는 필터링 과정을 거쳐 노이즈를 완화하고, 실시간 렌더링에 적합한 형태로 보정된다. 이러한 추적 결과는 네트워크를 통해 Unreal Engine 5로 전달되며, 엔진 내부에서는 Live Link를 통해 카메라 시점 제어 모듈과 연동된다.

시점 데이터 파이프라인에서 중요한 요소는 지연(latency)의 누적을 최소화하는 것이다. 사용자 이동과 화면 반응 간 지연이 커질 경우, 공간적 일관성이 깨지고 전시 관람 몰입도가 저하될 수 있다. 이를 완화하기 위해 추적 데이터는 엔진 렌더링 프레임과 정렬되어 사용되며, 필요 시 이전 프레임 데이터를 기반으로 한 보간을 통해 시점 변화를 부드럽게 유지하였다.

### 3.3 Unreal Engine 5 기반 가상 공간 구성 및 시점 계산

가상 전시 공간은 Unreal Engine 5 상에서 구성되며, 모든 전시 방은 동일한 월드 좌표계 내에서 관리된다. 사용자의 위치는 이 월드 좌표계 기준으로 반영되며, 각 스크린 면(벽 및 바닥)에 대해 사용자 위치에 맞는 오프-액시스 투영이 계산된다. 이는 사용자가 스크린의 중심에 위치하지 않더라도 올바른 원근감을 유지하기 위한 필수 요소이다.

시점 계산 결과는 nDisplay 카메라 또는 뷰포트 설정에 반영되며, 클러스터에 속한 모든 렌더 노드가 동일한 시점 정보를 공유하도록 구성된다. 이를 통해 사용자가 물리 공간을 이동할 때, 모든 투영 면에서 일관된 시점 변화가 발생하도록 한다. 가상 공간 내 조명, 그림자, 오브젝트 배치는 전시 관람에 적합하도록 단순화된 설정을 사용하였으며, 실시간 렌더링 성능과 시각적 안정성을 우선적으로 고려하였다.

### 3.4 nDisplay 기반 다중 프로젝터 클러스터 렌더링

CAVE 환경에서는 다수의 프로젝터가 하나의 가상 공간을 분할하여 투영하므로, 렌더링 동기화가 필수적이다. 본 시스템에서는 [그림 2]와 같이 Unreal Engine의 nDisplay 프레임워크를 활용하여 다중 렌더 노드를 클러스터로 구성하고, 각 프로젝터 출력에 대응하는 뷰포트를 정의하였다. 각 노드는 동일한 가상 장면 상태와 시점 정보를 공유하며, 프레임 단위로 동기화된 렌더링을 수행한다.

다중 프로젝터 환경에서 발생하는 이음매 문제를 최소화하기 위해, 프로젝터 간 오버랩 영역에 대한 블렌딩과 기하 보정을 적용하였다. 또한 프로젝터 간 밝기와 색상 차이를 완화하기 위한 색 보정 과정을 거쳐, 관람자가 화면 경계를 인지하지 않고 하나의 연속된 공간으로 가상 전시를 경험할 수 있도록 하였다. 클러스터 렌더링 과정에서는 프레임 동기화 지점을 명확히 설정하여 화면 찢김이나 시점 불일치를 방지하였다.



[그림 2] 언리얼 엔진의 nDisplay 모듈을 통해 구현된 CAVE에서의 다중 프로젝터 클러스터 렌더링  
 [Fig. 2] Multi-projector cluster rendering in a CAVE implemented using the nDisplay module of Unreal Engine

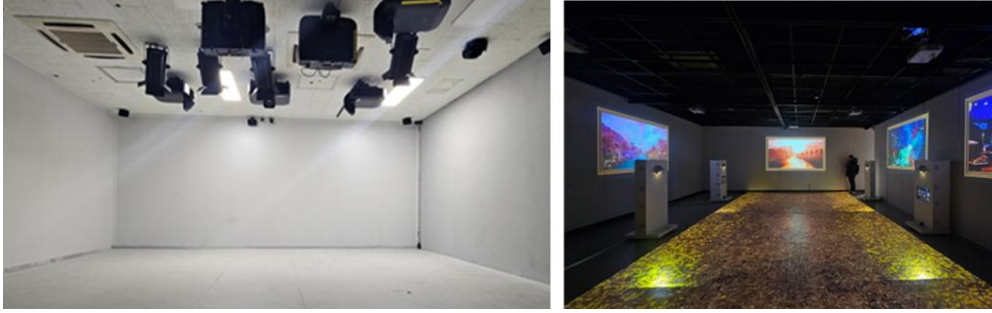
### 3.5 사용자 위치 기반 전시 공간 확장 메커니즘

가상 전시 공간은 여러 개의 방으로 구성된 시퀀스로 정의되며, 각 방은 작품 배치, 조명 설정, 출입구 위치를 포함한다. 사용자가 가상 출입구로 설정된 영역에 도달하면, 시스템은 전시 공간 전환을 수행하여 다음 방을 동일한 물리 공간에 매핑한다. 이 과정에서 물리 공간은 유지되지만, 가상 공간의 내용과 구성만이 교체된다.

공간 전환은 즉각적인 장면 교체가 아니라, 사용자 인지를 최소화하기 위한 점진적 전환 방식으로 수행된다. 예를 들어 사용자의 시야 반대편부터 가상 공간을 갱신하거나, 조명 변화와 시선 유도 요소를 활용하여 전환 시점을 자연스럽게 흡수하도록 설계하였다. 또한 사용자의 방향 전환을 유도함으로써, 물리 공간의 경계를 인식하지 않고 다음 전시 공간으로 이동한 것으로 인식하도록 한다. 이러한 메커니즘은 제한된 CAVE 물리 공간을 다수의 가상 전시 공간으로 활용할 수 있게 하며, 전시 관람의 연속성을 유지하는 데 기여한다.

## 4. 실험 및 결과

본 연구에서는 제안한 CAVE 기반 디지털 트윈 전시 시스템이 실제 전시 환경에서 안정적으로 동작하는지, 그리고 전시 관람의 흐름과 공간적 연속성 측면에서 어떠한 특성이 나타나는지를 검토하기 위해 사례 기반 실험을 수행하였다. 실험은 [그림 3]의 하나의 CAVE 물리 공간에 세 개의 가상 전시 방을 순차적으로 매핑하는 시나리오로 구성되었다. 사용자는 별도의 조작 없이 실제 보행을 통해 전시를 관람하였으며, 가상 출입구 영역에 도달하면 전시 공간이 전환되는 구조를 경험하였다. 이 과정에서 사용자의 이동 속도, 시선 방향, 관람 순서는 사전에 제한하지 않았으며, 시스템이 이러한 변동성을 어느 정도 수용할 수 있는지를 관찰하였다.



[그림 3] CAVE 기반 가상현실(좌)을 통해 본 연구에서 구현한 디지털 트윈 전시 공간(우)

[Fig. 3] CAVE-based VR environment (left) and the digital twin exhibition space implemented in this study (right)

먼저, 사용자 위치 기반 시점 갱신과 다중 프로젝터 클러스터 렌더링의 동작 특성을 확인하였다. 실험 과정에서 사용자의 이동에 따라 시점이 갱신될 때, 벽면과 바닥 투영 전반에서 시점 불일치나 프레임 단위의 비동기 현상은 관찰되지 않았다. 특히 사용자가 스크린 중심에서 벗어난 위치를 이동하더라도, 오프-액시스 투영이 안정적으로 유지되어 공간 왜곡이나 급격한 원근 변화 없이 전시 공간이 인식되는 경향을 보였다. 이는 nDisplay 기반 클러스터 렌더링 환경에서 사용자 추적 데이터가 모든 렌더 노드에 일관되게 반영되고 있음을 시사한다.

다만 사용자 추적 과정에서 노이즈가 증가하거나 추적 지연이 누적되는 경우, 시점의 미세한 흔들림이 발생할 수 있음을 확인하였다. 이러한 현상은 빠른 방향 전환이나 카메라 시야가 일시적으로 가려지는 상황에서 두드러졌으며, 전시 관람 중 작품 감상에 방해 요인으로 작용할 가능성이 있음을 보여준다. 이는 디지털 트윈 전시 환경에서 사용자 추적의 안정성과 지연 관리가 전시 경험의 질에 직접적인 영향을 미친다는 점을 결과적으로 드러낸다.

공간 전환 과정에서는 사용자 인지 측면에서의 특성과 함께 기술적 연출 요소의 영향을 관찰하였다. 전시 방 전환이 발생할 때, 장면이 즉각적으로 교체되는 경우보다 시야 반대편부터 점진적으로 갱신되거나 조명 변화와 결합된 경우에 공간 전환이 덜 인지되는 경향을 보였다. 기술적으로는 이 과정에서 프레임 드롭이나 일시적인 렌더링 불안정은 관찰되지 않았으며, 전환 연출이 렌더링 부하를 급격히 증가시키지 않는 범위 내에서 안정적으로 수행되었다. 이는 전시 공간 확장 메커니즘이 시각적 연출뿐 아니라 실시간 렌더링 관점에서도 실용적인 방식으로 구현될 수 있음을 보여준다.

다중 프로젝터 환경에서의 이음매 처리 역시 결과적으로 중요한 요소로 관찰되었다. 오버랩 영역의 블렌딩과 색 보정이 충분히 이루어진 경우, 관람자는 투영된 화면을 개별 프로젝터의 조합으로 인식하기보다는 하나의 연속된 공간으로 지각하는 경향을 보였다. 반면 밝기나 색상 보정이 미흡한 경우, 전시 내용과 무관하게 화면 경계가 주의를 끄는 요소로 작용하였다. 이러한 결과는 디지털 트윈 전시 환경에서 시스템 설계뿐 아니라 초기 캘리브레이션과 운영 과정이 전시 경험의 완

성도에 중요한 영향을 미친다는 점을 시사한다.

종합적으로, 본 절의 사례 기반 실험을 통해 CAVE 기반 공간 컴퓨팅과 Unreal Engine 기반 다중 프로젝터 렌더링을 결합한 디지털 트윈 전시 시스템이 기술적으로 안정적으로 동작하며, 전시 관람의 공간적 연속성을 유지하는 데 활용될 수 있음을 확인하였다. 특히 사용자 위치 기반 시점 제어와 전시 공간 확장 메커니즘이 실제 전시 환경에서도 무리 없이 작동한다는 점은, 본 연구에서 제안한 시스템 설계가 실질적인 전시 응용 가능성을 가진다는 점을 뒷받침한다.

## 5. 결론

본 연구는 CAVE 기반 디지털 트윈 전시를 위한 기술적 접근으로서, 비전 기반 사용자 추적, Unreal Engine 5와 nDisplay를 활용한 가상-물리 공간 동기화, 그리고 사용자 위치에 기반한 전시 공간 확장(방 전환) 메커니즘을 결합한 시스템 설계를 제안하였다. 사례 기반 실험을 통해, 제안한 시스템이 제한된 물리 공간에서도 연속적인 전시 동선과 공간적 현존감을 유지할 수 있는 전시 환경을 구성하는 데 활용될 수 있음을 확인하였다. 특히 실제 보행을 기반으로 한 관람 경험을 유지하면서 가상 전시 공간을 확장할 수 있다는 점에서, 디지털 트윈 전시의 구현 가능성을 구체적으로 제시하였다.

본 논문의 의의는 새로운 알고리즘이나 성능 지표의 우위를 제시하는 데 있기보다는, 전시라는 문화적 맥락에 적합한 CAVE 기반 공간 컴퓨팅 시스템을 실제 구현 관점에서 정리하고, 디지털 트윈 전시 환경을 구성하기 위한 기술적 설계 방향을 제시했다는 데 있다. 이는 디지털 전시를 현실 공간과 분리된 가상 체험이 아닌, 현실과 가상이 연속적으로 연결된 공간 경험으로 확장하고자 하는 시도라는 점에서 의미를 가진다. 또한 다중 프로젝터 환경에서의 동기화, 사용자 위치 기반 시점 제어, 전시 공간 전환 연출을 하나의 통합 구조로 제시함으로써, 향후 유사한 전시 시스템을 설계하는 데 참고 가능한 기술적 사례를 제공한다.

향후 연구에서는 본 연구에서 제안한 시스템을 기반으로 보다 다양한 전시 시나리오로의 확장이 가능할 것으로 기대된다. 예를 들어 다중 사용자가 동시에 관람하는 환경에서의 동행 관람이나 큐레이터 안내 시나리오를 고려할 수 있으며, 이러한 경우 사용자 간 시점 조율과 공간 공유 방식에 대한 추가적인 연구가 요구된다. 또한 전시 콘텐츠의 유형에 따라 공간 전환 연출과 관람 흐름이 달라질 수 있으므로, 평면 회화, 입체 조형물, 미디어아트 등 다양한 전시 형태를 대상으로 디지털 트윈 전시 공간의 설계 전략을 정교화하는 연구가 향후 과제로 남는다.

## References

- [1] A. C. Addison, "Emerging trends in virtual heritage", *IEEE MultiMedia*, vol. 7, no. 2, April-June 2000, pp. 22-25, doi: 10.1109/93.848421.
- [2] M. Roussou, "Virtual heritage: From the research lab to the broad public", *Proceedings of the VAST Euroconference on Virtual Archaeology*, November 24-25, 2000, Arezzo, Italy, pp. 93-100.
- [3] S. Styliani, L. Fotis, K. Kostas, P. Patias, "Virtual museums, a survey and some issues for consideration", *Journal of Cultural Heritage*, vol. 10, no. 4, October-December 2009, pp. 520-528, doi: 10.1016/j.culher.2009.03.003.
- [4] D. A. Bowman, R. P. McMahan, "Virtual reality: How much immersion is enough?", *Computer*, vol. 40, no. 7, July 2007, pp. 36-43, doi: 10.1109/MC.2007.257.
- [5] M. Carrozzino, M. Bergamasco, "Beyond virtual museums: Experiencing immersive virtual reality in real museums", *Journal of Cultural Heritage*, vol. 11, no. 4, October-December 2010, pp. 452-458, doi: 10.1016/j.culher.2010.04.001.
- [6] M. Slater, S. Wilbur, "A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments", *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, no. 6, December 1997, pp. 603-616, doi: 10.1162/pres.1997.6.6.603.
- [7] M. Economou, E. Meintani, "Promising beginnings? Evaluating museum mobile phone apps", *Proceedings of Rethinking Technology in Museums 2011: Emerging Experiences*, May 26-27, 2011, Limerick, Ireland, pp. 87-101.
- [8] L. Pujol, E. Champion, "Evaluating presence in cultural heritage projects", *International Journal of Heritage Studies*, vol. 18, no. 1, January 2012, pp. 83-102, doi: 10.1080/13527258.2011.577796.
- [9] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, T. A. DeFanti, "Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the CAVE", *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '93)*, August 1-6, 1993, Anaheim, CA, USA, pp. 135-142, doi: 10.1145/166117.166134.
- [10] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, T. A. DeFanti, R. V. Kenyon, J. C. Hart, "The CAVE: Audio visual experience automatic virtual environment", *Communications of the ACM*, vol. 35, no. 6, June 1992, pp. 64-72, doi: 10.1145/129888.129892.
- [11] B. Frohlich, S. Barrass, B. Zehner, J. Plate, M. Gobel, "Exploring geo-scientific data in virtual environments", *Proceedings of IEEE Visualization '99*, October 24-29, 1999, San Francisco, CA, USA, pp. 169-173, doi: 10.1109/VISUAL.1999.809884.
- [12] R. Raskar, G. Welch, M. Cutts, A. Lake, L. Stesin, H. Fuchs, "The office of the future: A unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays", *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '98)*, July 19-24, 1998, Orlando, FL, USA, pp. 179-188, doi: 10.1145/280814.280861.
- [13] S. Razzaque, Z. Kohn, M. C. Whitton, "Redirected walking", *Proceedings of Eurographics 2001 - Short*

Presentations, September 2001, Manchester, United Kingdom, pp. 105-106, doi: 10.2312/egs.20011036.

- [14] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz, M. Lappe, "Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 16, no. 1, January-February 2010, pp. 17-27, doi: 10.1109/TVCG.2009.62.