

일반논문 (Regular Paper)

방송공학회논문지 제31권 제5호, 2026년 9월 (JBE Vol.31, No.5, September 2026)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2026.31.5.1040>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

몰입형 전시의 미디어 접근성 향상을 위한 AI 기반 폐루프 시스템의 개념 설계: 2025 DDP HERITAGE 전시 적용 사례를 중심으로

최 성 미^{a)*}

Conceptual Design of an Edge AI-Based Closed Loop System for Improving Media Accessibility in Immersive Exhibitions: Application Scenarios for the 2025 DDP HERITAGE Exhibition

Seongmi Choi^{a)*}

요 약

최근 문화유산 전시는 정적인 관람 환경에서 벗어나 디지털 몰입형 전시로 확장되고 있다. 그러나 사전에 설정된 시청각 콘텐츠를 일방적으로 송출하는 전시 시스템은 관람객의 신체적 조건과 공간 밀집도 변화에 능동적으로 대응하기 어렵다는 한계가 있다. 이에 본 연구는 관람객의 관람 고도와 공간 밀집도를 입력 변수로 활용하여 투사 중심점과 음향 초점을 조정하는 엣지 AI 기반 폐루프 전시 시스템의 개념 모델을 제안한다. 2025 DDP HERITAGE 전시를 사례로 전시 공간의 구조적 특성을 관찰하고, 동적 정합성 부족, 제어 로직의 비 적응성, 정보 전달 과정의 인지적 부담이라는 관점에서 발생 가능한 미디어 접근성의 제약을 탐색적으로 분석하였다. 이를 바탕으로 신체 조건 대응형 시청각 제어, 체류 시간 기반 서사 심화, 밀집도 대응형 환경 제어의 세 가지 적용 시나리오를 구성하였다. 또한 규칙 기반의 초기 제어 정책과 관람객 반응 데이터를 향후 정책 갱신에 활용할 수 있는 강화학습 확장 구조를 개념적으로 제시하였다. 본 연구는 실제 시스템 구현이나 사용자 실험을 수행한 연구가 아니라, 몰입형 전시의 미디어 접근성을 향상하기 위한 시스템 구성 요소와 제어 관계를 정립한 개념 설계 연구이다. 이를 통해 향후 프로토타입 구현과 사용자 평가를 위한 기초 설계 방향을 제공한다.

Abstract

This study presents a conceptual system design rather than an implemented or experimentally validated system. To this end, an inclusive, multi-sensor and edge AI-based closed-loop system is proposed, which adjusts the projection focal point and the audio focal point in real time based on a visitor's viewing height and the spatial density of the exhibition space. Using the 2025 DDP HERITAGE exhibition as a case study, this study analyses the limitations of conventional one-directional exhibition environments and derives three tailored media control scenarios. Furthermore, the initial control policy is continuously refined through reinforcement learning based on visitor response data, enabling the system to evolve beyond its initial rule-based design. By shifting exhibition design from a system-centred, one-directional model to a user-centred, responsive control architecture, this study contributes to the engineering realisation of open museum values and offers design guidelines for inclusive digital cultural spaces.

Keyword : Inclusive Design, Closed-loop System, Edge AI, Multisensory Feedback, Digital Cultural Heritage Exhibition

Copyright © 2026 Korean Institute of Broadcast and Media Engineers. All rights reserved.

“This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and not altered.”

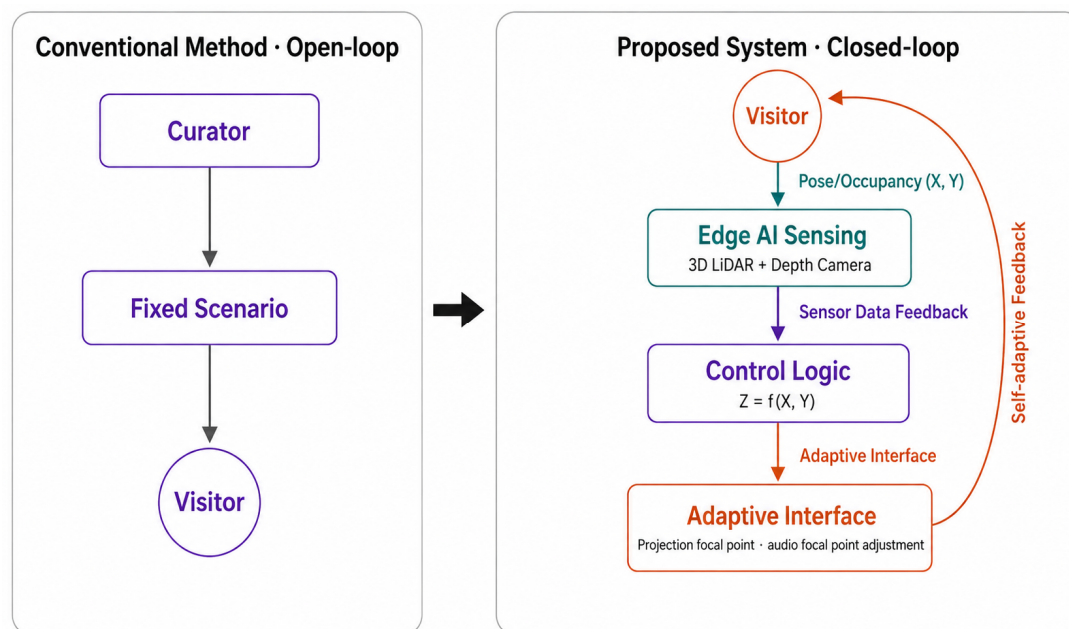


그림 1. 기존 단방향(Open-loop) 전시 연출 구조와 제안하는 페루프(Closed-loop) 적응형 전시 인터페이스 구조 비교
Fig. 1. Comparison between the conventional open-loop exhibition presentation structure and the proposed closed-loop adaptive exhibition interface structure

1. 서론

디지털 몰입형 전시 환경에서 관람객의 경험을 최적화하기 위해서는 전시 매체의 동적 제어와 사용자 환경 간의 실시간 피드백 루프 구축이 필수적이다^[1]. 최근 많이 도입된 몰입형 전시 시스템은 대부분 담당 학예사의 시나리오에 의존하는 단방향(Open-loop) 연출에 머물러 있어, 변화하는 관람객의 이동 경로, 시선의 방향, 공간 내 밀집도와 같은 외부 환경의 변수에 능동적으로 대응하지 못한다. 이러한 시스템의 비 적응성은 불필요한 시·청각적 자극을 유발하여 관람객의 인지적 과부하(Cognitive Overload)를 가중하고, 결과적으로 전시 매체의 접근성을 심각하게 저해

하는 기술적 한계를 드러낸다^[2].

그림 1과 같이, 본 연구는 관람객의 행동 데이터와 전시 환경의 변수를 실시간으로 통합하여 매체의 출력값을 제어하는 AI 기반 페루프(Closed-loop) 제어 시스템 아키텍처를 제안한다. 기존의 단방향 구조와 달리 본 시스템은 엣지 AI(Edge AI)를 통해 관람객의 실시간 포즈 데이터 및 객체 인지 데이터를 수집하고, 이를 기반으로 매체 제어 로직을 실시간으로 업데이트한다. 이를 통해 관람객의 개별적 상태에 최적화된 동적 적응형 인터페이스(Adaptive interface)를 구현하며, 기존의 시스템 중심 전시 연출을 사용자 중심의 자율 적응형(Self-adaptive) 연출로 전환하는 것을 공학적 방법으로 삼는다. 본 연구에서 미디어 접근성이란 관람객의 신체적 위치 및 공간 좌표와 매체 투사점 간의 동적 정합성이 확보되는 물리적·인지적 수준을 의미한다.

본 연구의 목적은 크게 세 가지로 요약된다. 첫째, 전시 공간에서의 관람객 행동 데이터를 정량적으로 수집 및 분석하여 페루프 시스템의 제어 변수(관람 고도, 공간 밀집도 등)를 도출한다. 둘째, 엣지 AI를 활용하여 관람객의 골격 추적(Skeletal tracking) 및 제스처 인식 결과가 전시 매체의

a) 한국유교문화진흥원 교육연구부(Department of Education & Training, Institute of Korean Cultural Heritage)

✉ Corresponding Author : 최성미(Seongmi Choi)

E-mail: thumbalina0805@gmail.com

Tel: +82-41-981-9928

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1936-2023>

· Manuscript received July 18, 2026; Revised August 10, 2026; Accepted August 10, 2026.

렌더링 엔진과 낮은 지연시간으로 연동되는 기술적 아키텍처를 설계한다. 셋째, 2025 DDP HERITAGE 전시를 사례로 삼아, 물리적 제약과 밀집도 변화에 따른 투사 매핑 고도 및 음향 파라미터 제어 시나리오를 제시하여 제안 시스템의 적용 가능성을 검토한다^[3]. 나아가 본 연구는 초기 제어 규칙을 고정된 해법이 아니라, 관람객의 반응 데이터를 통해 지속적으로 개선되는 강화학습 기반 정책의 출발점으로 설계하여, 시스템이 운영 과정에서 스스로 진화할 수 있는 여지를 남겨둔다.

이를 통해 본 연구는 몰입형 전시에서 획일화된 매체 투사 방식을 벗어나, 데이터 기반의 지능형 제어 모델을 도입함으로써 디지털 문화유산 전시의 정보 전달 정확도와 미디어 접근성을 공학적으로 개선하는 것을 목표로 한다. 나아가 이는 대규모 공간 컴퓨팅 환경에서 다중 센서 융합 및 엣지 AI를 활용한 지속 가능한 지능형 미디어 시스템의 구축을 위한 이론적이고 방법론적 토대를 제공할 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 디지털 전시 환경의 미디어 접근성 현황과 문제점을 분석하고, III장에서는 이를 해결하기 위한 AI 기반 페루프 시스템의 설계와 적용 시나리오를 제시하며, IV장에서 결론 및 향후 연구 방

향을 논의한다.

II. 디지털 전시 환경의 미디어 접근성 현황과 분석

1. 동적 환경에서의 미디어 융합과 감각적 과부하

디지털 몰입형 전시 환경의 고도화는 공간의 시각적 범위가 관람객을 완전히 감싸는 ‘몰입형 프로젝션(Immersive Projection)’ 기반 연출을 가능하게 하였다. 이러한 전시는 다감각 통합(Multisensory Integration)을 통해 관람객의 신경 인지적 몰입을 유도하며, 신경 미학적 관점에서는 이러한 몰입이 심미적 즐거움과도 연관되는 것으로 보고된다^[4]. 그러나 공간적 제약이 없는 동적 연출의 환경일수록 전시 매체와 관람객의 신체 좌표 간의 동기화(Synchronization) 문제는 몰입형 프로젝션 시스템의 동적 정합 제어에서 가장 큰 어려움이다^[5].

앞서 언급한 단방향 전시 연출이 겪는 구조적 한계의 핵심은 사용자 행동 데이터가 전시 시스템으로 피드백되지 못한 채 매체의 출력값만 일방적으로 송출되는 데이터의

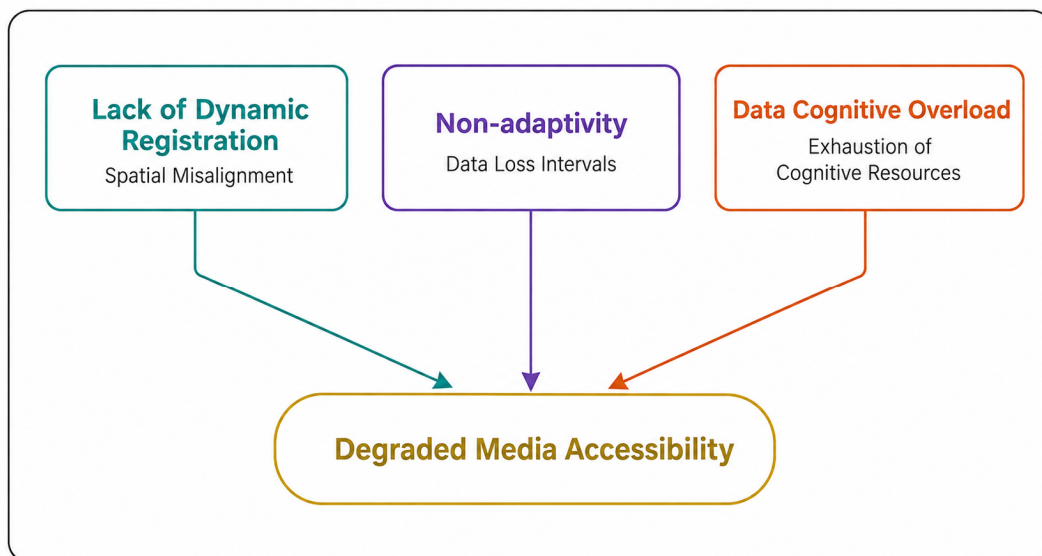


그림 2. 기존 단방향 전시 시스템에서 나타나는 세 가지 구조적 한계와 미디어 접근성 저해 요인

Fig. 2. Three structural limitations and factors hindering media accessibility in existing one-way exhibition systems

비대칭성에 있다. 관람객은 개인 공간(Personal Space)에서 소셜 전망 공간(Social Vista Space)까지 유동적으로 이동하며 전시 매체와 시각·공간적으로 상호작용을 한다. 그러나 현재의 오픈 루프(Open-loop) 전시 시스템은 관람객의 신체적 조건(관람 고도)과 위치 정보(공간적 밀집도)를 연산 변수에서 배제한다. 이러한 미디어 접근성 저해로 이어지는 문제점을 요약하면 그림 2와 같다.

그림 2에서 보듯이, 이러한 단방향 전시의 구조적 한계는 전시 미디어와 관람객 간의 정합 실패(Lack of Dynamic Registration), 제어 로직의 비 적응(Non-adaptivity), 그리고 관람객의 인지적 부담(Data Cognitive Load)이라는 세 가지 양상으로 구체화되며, 결국 관람객의 전시 매체 접근성을 저해한다⁶⁾. 각각의 한계를 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 동적 정합성이 떨어진다. 고정된 파라미터로 매체를 투사하는 연출 방식은 이동 중인 관람객의 신체 좌표와 투사 영상 간의 공간적 정합성을 보장하지 못한다. 대부분의 기존 시스템은 설치 시점에 성인 평균 눈높이를 기준으로 투사 파라미터를 고정해두기 때문에, 아동이나 휠체어 이용자처럼 관람 고도가 다르거나 이동 중인 관람객에게는 투사된 영상이 실제 시선과 어긋나게 된다. 이러한 예시와 같이 시공간적 데이터의 불일치가 발생하여, 관람객에게 시각적 부조화를 유발하고 시각적 피로도를 높인다.

둘째, 제어 로직의 비 적응 구간이 생긴다. 고 밀집 상황이나 관람객의 신체적 제약이 발생할 때, 기존 시스템은 렌더링 파라미터를 실시간으로 튜닝하지 못한다. 예를 들어 다수의 관람객이 한 지점에 몰려 앞쪽 관람객이 투사 화면을 가리는 경우, 기존 시스템은 이러한 밀집 상황을 인지하지 못한 채 동일한 파라미터로 매체를 계속 송출한다. 결과적으로 투사 미디어가 특정 관람객의 실제 시야에서 벗어나게 되어 전시 정보에 전혀 접근하지 못하는 실질적 손실 구간에 놓이게 된다.

셋째, 데이터의 인지적 과부하가 발생한다. 하나의 전시 공간에 여러 채널의 영상·음향이 동시에 송출되는 경우, 시스템은 관람객이 지금 무엇에 주목하고 있는지 판단하지 못한 채 모든 정보를 동일한 비중으로 내보낸다. 이러한 시스템이 사용자의 의도와 상태를 인지하지 못한 채 송출하는 방대한 시청각 정보는 관람객에게 매체 조작을 위한 불

필요한 정보의 과부하라는 부담을 강제한다. 이는 능동적인 탐색을 방해하고, 전시 경험을 위해 많은 정신적 에너지를 사용하게 한다¹⁾.

이처럼 정합 실패, 비 적응, 인지 부하라는 세 가지 한계는 결국 전시 시스템이 관람객 개개인의 신체적·맥락적 차이에 실시간으로 대응하지 못하는 데서 비롯된다. 따라서 기존의 몰입형 전시의 미디어 접근성을 확보하는 해법은 단순한 매체의 확장이 아니다. 관람객의 신체 좌표(관람 고도)와 맥락 정보(밀집도)를 시스템의 입력 변수로 수용하고, 이를 즉각적으로 피드백하는 자율 적응형 페루프의 연출 전환이 필요하다.

2. 사례 연구: DDP HERITAGE 전시 환경 분석

본 연구는 기존의 몰입형 프로젝션 전시가 제공하는 시각적 화려한 이면의 물리적·매체적 한계를 파악하기 위해 2025년 DDP HERITAGE 전시를 핵심 사례로 삼아 살펴보고자 한다. 해당 전시는 2025년 8월 23일부터 9월 17일까지 동대문디자인플라자(DDP)에서 국가 유산 진흥원 주최로 열린 《HERITAGE: THE FUTURE FANTASY》로, 의궤·산수화·장인정신이라는 세 개 섹션을 통해 국가 유산을 미디어아트로 재해석한 몰입형 전시였다.

본 사례 분석은 2025 DDP HERITAGE 전시 공간에 대한 현장 관찰, 연구자가 촬영한 전시 환경 이미지, 전시 구성 및 매체 배치에 대한 기록을 바탕으로 수행하였다. 분석 항목은 투사 화면과 관람객 시선 위치의 정합성, 공간 밀집에 따른 시야 간섭 가능성, 다채널 정보의 맥락적 연결 구조로 설정하였다. 본 연구는 관람객 인터뷰나 설문조사를 수행하지 않았으므로 개별 관람객의 실제 몰입도나 만족도를 직접 평가하지 않는다. 따라서 사례 분석 결과는 해당 전시의 전체 관람 경험을 일반화하기보다, 전시 환경에서 발생할 수 있는 잠재적인 미디어 접근성 제약을 식별하는 탐색적 분석으로 한정한다. 전시물에 대한 시각적 노출과 공간적 위치는 관람객의 접촉 및 이동 행동과 연관될 수 있으므로, 본 연구는 투사 매체의 배치, 관람 위치와의 시각적 관계, 동선상 시야 중첩 가능성을 분석 단위로 설정하였다⁷⁾.

해당 전시 환경은 대규모 미디어 파사드와 다채널 음향 시스템이 구축된 공간으로, 관람객의 위치와 동선에 따라



그림 3. 미디어 파사드가 유도하는 몰입과 접근성 격차
Fig 3. Immersion and Alienation Induced by Media Facades



그림 4. 관람객 밀집에 따른 몰입 공간의 제약
Fig 4. Limitations on immersive spaces due to visitor density

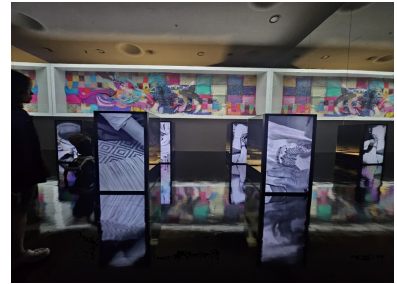


그림 5. 맥락적 서사가 부재한 데이터 전시 존
Fig 5. Data exhibition zone lacking contextual narrative

정보 전달의 물리적 조건이 급격히 변화하는 공간이었다. 그림 3~5는 각각 미디어 파사드 중심의 서라운드 프로젝션 공간, 관람객이 밀집하는 이동 동선, 그리고 개별 스크린이 나열된 데이터 전시 존을 촬영한 것으로, 이어지는 세 가지 한계를 전시 현장에서 뒷받침하는 근거이다. 그러나 본 연구에서 확인한 대부분의 선행연구는 가상 전시의 효과를 평가할 때 문헌 기반 평가척도와 이용자 인터뷰를 결합하고 있다. 반면 본 연구는 이용자 조사를 수행하지 않았으므로, 관람객의 실제 만족도나 몰입도를 평가하기보다 환경에서 발생 가능한 접근성 제약을 식별하는 데 분석 범위를 한정한다^[8].

첫째, 그림 3에서의 사례와 같이 몰입과 접근성 격차가 동시에 이루어지는 환경이었다. 이는 II장 1절에서 지적인 동적 정합성 저하가 실제 현장에서 드러난 사례이다. DDP의 대규모 파사드는 관람객에게 시각적 압도감을 제공하며 몰입을 유도했다. 하지만 박물관학적 관점에서 볼 때 이는 ‘균일한 시각적 경험’만을 강요하는 환경이다. 전시의 중심 동선에서 벗어나거나 평균적인 관람 고도와 다른 위치에 있는 관람객의 경우, 일부 투사 콘텐츠가 시야 중심에서 벗

어날 가능성이 관찰되었다. 이는 관람객의 위치와 관람 고도가 실시간 제어 변수에 포함되지 않을 경우 정보 접근 조건에 차이가 발생할 수 있음을 시사한다. 해당 전시가 ‘모두를 위한 전시’를 표방하면서도 실제로는 표준적인 신체 를 가진 관람객만을 위한 단일 눈높이 기준의 일방적인 서사 구조에 머물러 있다.

둘째, 그림 4에서의 사례와 같이 관람객이 밀집하는 이동 동선에서는 물리적 공간의 제약과 심리적 몰입이 제한되어 몰입도를 떨어뜨리는 전시였다. 이는 II장 1절에서 지적한 제어 로직의 비 적응 구간이 실제 현장에서 드러난 사례이다. 전시실 안에 관람객이 많은 현상은 관람객 간의 물리적 거리감을 좁히고 개인의 심리적 몰입 공간을 방해한다. 박물관은 유물과 관람객이 대화를 나누는 사유의 공간이 되어야 한다. 그러나 기존의 전시 환경은 밀집도에 따라 투사 초점이나 음향 범위를 재조정하는 장치 없이 연출적 몰입에만 집중하였고, 시야가 가려진 관람객은 전시물과 대면할 기회 자체를 얻지 못한 채 관람객의 전시 공간에서 사유의 흐름이 단절되었다.

셋째, 그림 5에서의 사례와 같이 특정 전시 존의 경우 데

이터 기반 소통의 단절과 맥락적 서사가 부족한 공간이었다. 이는 II장 1절에서 지적한 데이터 인지 부하가 실제 현장에서 드러난 사례이다. 몰입형 전시는 기술적 화려함을 통해 관람객의 관심 집중에 성공하기도 한다. 그러나 해당 전시 존에서는 개별 스크린에 다양한 이미지 데이터만 나열할 뿐, 각각의 정보가 어떤 맥락으로 연결되는지 설명하는 서사적 장치가 부재해 중요한 문화유산의 역사적 맥락이나 전시의 서사를 전달하는데 한계가 있다. 관람객이 전시물과 소통하며 스스로 의미를 채워나가는 ‘열린 결말’의 개방형 공간이 되어야 하지만, 기술적으로만 연결된 전시 시스템은 전시물을 단순한 정보의 파편으로 전락시켜 관람객에게 파편화된 이미지들 사이의 관계를 스스로 추론해야 하는 부담을 떠안긴다. 이는 관람객을 능동적 주체로서 역할을 하지 못하고, 매체에 의해 수동적으로 자극받는 객체로 머물게 했다.

결과적으로 해당 전시는 큰 관심을 받았음에도, 관람객 맞춤형 서사를 능동적으로 반영하지 못하는 전시 시스템의 구조적 한계를 보여준다. 이는 II장 1절에서 살펴본 정합 실패·비 적응·인지 부하라는 이론적 한계가, 실제 전시 현장에서 소외·단절·몰입 저하라는 구체적 현상으로 나타난 것이다. 따라서 디지털 기술의 도입 자체가 포용적 접근성을 보장하는 것은 아니며, 기술의 기능이 다양한 이용자 조건과 실제 이용 맥락에 어떻게 대응하는지를 함께 검토해야 한다⁹⁾. 단순히 매체를 크게 펼치는 것만으로는 개방형 박물관의 철학을 구현할 수 없으며, 관람객의 물리적 상태와 서사적 요구를 실시간으로 인지하여 미디어의 연출을 조율하는 AI 기반 페루프 시스템으로의 전환이 요구되며, 본 연구는 다음 장에서 이를 위한 구체적인 전시 시스템 설계를 제안한다.

III. 포용적 전시 환경을 위한 엣지 AI 기반 페루프 시스템 설계

1. 실시간 반응형 페루프 시스템 개념 모델

단방향 전시의 동적 정합성 결여, 비 적응, 그리고 인지 부하 문제를 극복하기 위해 관람객의 관람 고도와 공간 밀

집도 데이터를 전시 매체의 렌더링 파라미터로 즉각 환류하는 ‘실시간 반응형 페루프 시스템’ 개념 모델을 제안하고자 한다. 최근 많이 사용되고 있는 유니버설 디자인은 가능한 한 많은 사용자가 별도의 조정 없이 이용할 수 있는 보편적 환경 설계를 지향한다. 반면 포용적 디자인은 사용자의 신체적·인지적·상황적 차이를 전제로 하며, 서로 다른 요구에 대응할 수 있는 복수의 이용 경로와 적응 방식을 설계하는 데 초점을 둔다. 그러나 본 연구의 시스템은 모든 관람객에게 동일한 출력을 제공하는 방식이 아니라, 관람 고도와 공간 밀집도에 따라 출력 조건을 조정한다는 점에서 포용적 디자인의 적응적 접근에 가깝다.

따라서 해당 모델은 포용적 디자인(Inclusive Design) 관점을 적용하여 다양한 관람객의 신체적 조건이나 전시장 안에서의 밀집도 변화와 무관하게 관람객 누구도 전시물에 관한 정보로부터 접근성 격차가 나지 않도록 설계된 자율 적응형 아키텍처(Self-adaptive Architecture)이다. 이 시스템의 핵심은 엣지 AI를 통해 실시간 수집되는 관람객의 관람 고도와 공간 밀집도를 상태로 하여, 전시 미디어의 시청각적 초점을 결정하는 제어 정책의 강화학습(Reinforcement Learning)을 통해 지속적으로 개선하는 것이다. 엣지 AI는 데이터를 발생 지점과 가까운 위치에서 처리하여 네트워크의 왕복 지연을 줄이고, 클라우드 전송량과 원시 데이터의 외부 노출을 제한하는 구조적 가능성을 제공한다¹⁰⁾. 본 절에서는 이를 구현하기 위해 이 정책의 초기값이 되는 규칙 기반 수학적 정식화를 제시하고, 이를 시각적으로 검증한 뒤, 관람객 반응 데이터를 통한 정책 갱신 매커니즘을 설명한다.

해당 시스템의 최종 목적은 전시물에 대한 관람객의 시야 확보와 정보 왜곡 방지를 위한 최적의 투사 중심점 고도를 산출하는 것이다. 먼저, 강화학습 정책이 학습을 시작하는 초기값(π_0)으로 동적 투사 고도 산출 모델을 수학적으로 정식화하면 다음과 같다. 엣지 AI가 추론한 특정 구역의 실시간 공간 밀집도를 X , 관람객의 유효 관람 고도를 Y , 투사 중심점 고도를 Z 로 정의한다. 기본 투사 고도는 관람객의 눈높이(Y)에 비례하여 식 (1)과 같이 산출하며, 공간 밀집도(X)가 일정 임계점을 초과하는 경우는 시야 간섭을 방지하기 위한 보상 항을 추가하여 식 (2)와 같이 최종 출력인 투사 고도 $Z = \pi_0(X, Y)$ 를 결정한다. 그림의 시각화를 위해

$\alpha=0.85$, $\beta=0.5$, $\Theta=0.40$ 을 예시값으로 적용하였다. 해당 값은 모델의 작동 방향을 설명하기 위한 시뮬레이션용 가정값이며, 사용자 실험을 통해 검증된 최적값을 의미하지 않는다. 이때 계수(0.85, 0.5)와 임계값(Θ)은 사전 설계 단계에서 설정한 초기 근사치이며, 이후 3절에서 설명할 강화학습 절차를 통해 실제 관람객 반응 데이터를 기반으로 갱신된다.

$$Z_{\text{base}} = 0.85 \times Y, \quad (1)$$

$$\pi_0(X, Y) = \begin{cases} Z_{\text{base}} + 0.5 \times (X - \theta), & X > \theta \\ Z_{\text{base}}, & X \leq \theta \end{cases} \quad (2)$$

초기 정책(식 (1)·(2))이 매개변수 공간에서 어떻게 작동하는지 예시로 보이기 위해, 임계값 $\Theta=40\%$ 인 경우를 3차원 표면 그래프로 나타내면 그림 6과 같다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 휠체어 이용자 또는 아동과 같이 유효 관람 고도(Y) 값이 낮아지는 구간에서는 투사 고도(Z) 축의 중심점 역시 선형적 하향 경사를 나타낸다. 또한 공간 밀집도(X) 값이 40%의 임계점을 초과하여 우측으로 이동할 경우, Z축의 투사 중심점이 밀집도 초과분에 비례하여 단계적으로 상향 조정된다. 이는 다수의 관람객이 있는 상황에서도 앞쪽 관람객으로 인한 시야 차단 영향을 완화하여, 뒤쪽 관람객까지 전시 콘텐츠에 안정적으로 접근할 수 있도록 하는 초기 정책의 작동 방식을 보여주는 예시이다. 초기 정책은 고정된 해법이 아니라, 운영 과정에서 수집되는 관람객 반응 데이터를 통해 지속적으로 개선되는 출발점이다. 이를 위해 본 연구는 제어 문제를 강화학습 틀로 정식화한다.

상태(State)는 엣지 AI가 추출한 관람 고도(Y)와 공간 밀집도(X)이며, 행동(Action)은 투사 고도(Z)이며, 음향 패닝 각도는 Z에 연동되는 정성적 메커니즘으로 함께 조정된다. 보상(Reward)은 관람 종료 시점에 수집되는 만족도 설문 응답과, 체류 시간·시선 이탈 여부 등 센서로 추출되는 간접 반응 데이터를 결합하여 구성한다. 정책은 식 (1), (2)로 정의되는 초기값에서 출발하여, 누적되는 보상 신호를 바탕으로 갱신되며, 이를 통해 시스템은 특정 설계자가 사전에 정한 규칙을 넘어 실제 관람객 집단의 반응에 맞추어 스스로 진화하는 자율 적응형 구조를 갖추게 된다. 물론 실제

전시 환경에 강화학습을 적용하기 위해서는 보상 신호의 신뢰성, 안전한 탐색, 비정상적 관람 환경, 제한된 학습 데이터 등의 현실적 조건을 검토해야 한다. 따라서 본 연구는 상태·행동·보상의 관계만을 개념적으로 제시하며 정책 학습이나 성능 검증은 수행하지 않는다^[11].

결과적으로 제안한 모델은 관람객의 자연스러운 움직임과 신체적 조건을 시스템이 인지할 수 있는 입력 데이터로 전환한다. 그림 6의 그래프에 나타난 유연한 표면은 전시 시스템이 이러한 입력 데이터를 스스로 판단하여 투사 고도를 재배열함으로써 관람객 누구나 평등하게 디지털 문화 유산을 경험할 수 있는 포용적 기반을 마련할 수 있다는 것을 보여준다.

2. 관람객 인지·시각 제어·청각 동기화 기반 구현 기술

III장 1절의 실시간 반응형 페루프 시스템 개념 모델을 실제 전시 공간에 구현하기 위해서는, 관람객의 관람 고도와 공간 밀집도를 인지하고 이를 투사 고도 및 음향 초점으로 환류하는 동시에, 정책 갱신에 필요한 관람객 반응 데이터를 수집하는 유기적인 기술 및 메커니즘이 필요하다. 본 절에서는 관람객이 전시실 환경에서 느끼는 미디어 정보의 접근성 격차를 방지하고 접근성을 높이기 위한 기술적 핵심 환경을 관람객 인지, 시각적 제어, 청각 동기화의 세 단계로 나누어 살펴보고, 마지막으로 정책 갱신을 위한 보상 신호 수집 방식을 설명한다.

먼저 관람객 인지 단계에서는, 포용적 전시 환경을 위해 관람객의 개인정보를 침해하지 않으면서도 다양한 관람객의 신체 조건을 파악하는 것이 중요하다. 이를 위해 몰입형 전시물이 설치된 공간에는 LiDAR 등의 Depth 카메라로 구성된 센서 네트워크 구축이 필요하다. 해당 장치를 통해 수집된 공간 데이터는 외부 서버로 전송되지 않고 전시실 내부의 엣지 AI에서 바로 처리되어 실시간 반응이 가능하다. 이 과정에서 관람객의 형태적 특징을 분석하여 전시 공간의 밀집도(X)와 관람객의 유효 관람 고도(Y)를 실시간 데이터로 추출한다. 아울러 동일한 센서 네트워크는 개별 관람객의 체류 시간과 시선 방향의 변화를 함께 추적하여, 정책 갱신에 필요한 간접 반응 데이터로 활용한다.

다음으로 시각적 제어 단계에서는, 엣지 AI를 통해 추출된 공간 데이터(X, Y)가 제어 정책 π_0 로 즉시 전달되어 투사 중심점을 결정하는 자율 적응의 기준이 된다. 휠체어 이용자나 아동과 같은 관람객의 유효 관람 고도(Y)가 낮게 입력되면, 정책 π_0 는 투사 중심점(Z)을 관람객의 눈높이에 맞추어 물리적으로 하향 조정한다. 반대로 공간 밀집도(X)가 θ 를 초과하여 관람객 사이의 시야 간섭이 발생할 경우, 시스템은 투사 중심점(Z)을 상향 조정하여 전시물을 재배열함으로써 뒤편에 있는 관람객의 전시 정보 누락을 방지한다.

몰입형 미디어 전시 접근성의 완성은 시각적 변화에 이어 청각적 피드백이 자연스럽게 연결될 때 이루어진다. 이를 고려하여 마지막인 음향 동기화 단계에서는, 정책 π_0 가 투사 중심점(Z)에 연동하여 산출한 음향 패닝 각도에 따라, 전시실에 구축된 다채널 공간 음향 시스템이 객체 기반 오디오 패닝(Panning) 기술을 통해 소리의 진원지를 동기화한다. 특정 전시물의 시각적 서사가 관람객의 눈높이에 맞추어 이동할 때, 해당 유물의 설명 음성이나 효과음의 방향 역시 정책의 판단에 따라 함께 움직여 관람객의 시청각 정보의 공간적 불일치를 완화할 가능성이 있다^[12].

마지막으로, 정책 π_0 를 갱신하기 위한 보상 신호는 두 가지 경로로 수집된다. 관람 종료 지점에 설치된 출구 키오스크 또는 QR 연동 모바일 설문 등의 인터페이스를 통해 관

람객의 만족도를 직접 응답받으며, 응답이 없는 관람객에 대해서는 관람객에 대해서는 관람객 인지 단계에서 함께 추출되는 체류 시간과 시선 이탈 여부를 간접 보상 신호로 보완한다. 두 신호를 결합한 보상은 누적되어 정책을 갱신하며, 이를 통해 초기값 π_0 는 실제 관람객 집단의 반응에 맞추어 지속적으로 개선된다.

이 세 단계가 완성된 페루프 구조로 통합되는 과정을 3차원으로 개념화하여 표현하면 그림 6과 같다. 그림에 나타난 수직 화살표의 흐름과 같이, 가장 하단의 관람객 인지 단계(Stage1)에서 수집한 관람객의 관람 고도와 밀집도 데이터는 바로 중간 레이어의 정책 π_0 (Stage2)으로 전달되어 투사 중심점을 조정하는 기준이 되고, 이는 다시 음향 초점을 동기화(Stage3)의 기준이 된다. 아울러 그림 6의 점선 화살표와 같이, Stage1에서 함께 추출된 관람객의 체류 시간·시선 이탈 데이터와 관람 종료 지점에서 수집되는 만족도 응답은 보상 신호로 통합되어 정책 π_0 로 환류되며, 이를 통해 Stage1 - Stage3의 순방향 처리 흐름과 보상 기반 정책 갱신이 하나의 페루프로 완결된다. 결과적으로 이러한 순환적 데이터의 흐름은 기존 고정형 매체의 일방향적 한계를 해체하고, 관람객의 자연스러운 움직임과 신체적 조건을 전시 시스템이 능동적으로 반영하여 누구에게나 차별 없는 몰입형 공간을 제공하는 포용적 기반으로 기능한다.

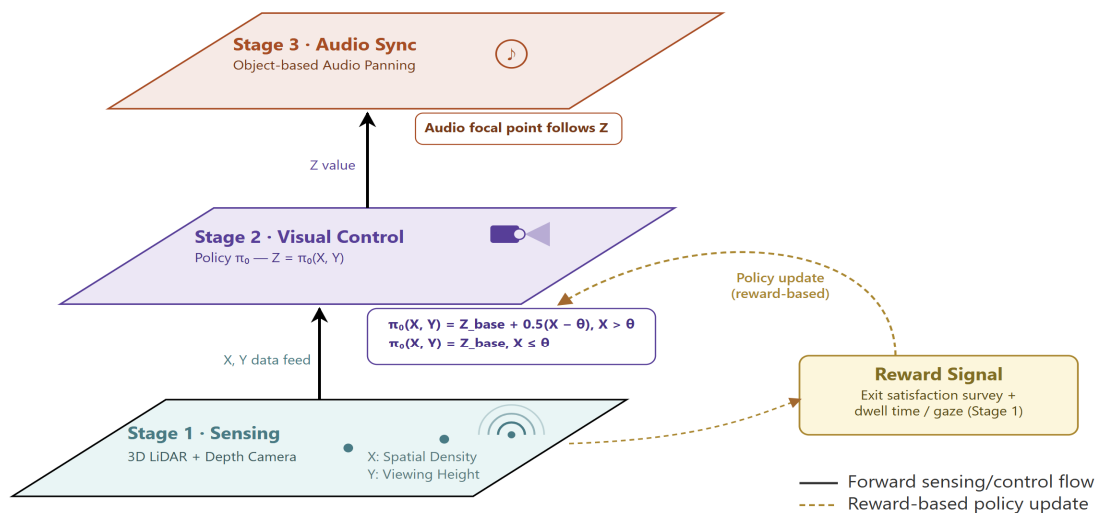


그림 6. 관람객 인지·시각 제어·청각 동기화의 3단계 처리 흐름과 보상 기반 정책 갱신 루프를 포함한 페루프 통합 모델
Fig. 6. A closed-loop integrated model comprising a three-stage processing flow—involving viewer perception, visual control, and auditory synchronization—and a reward-based policy update loop.

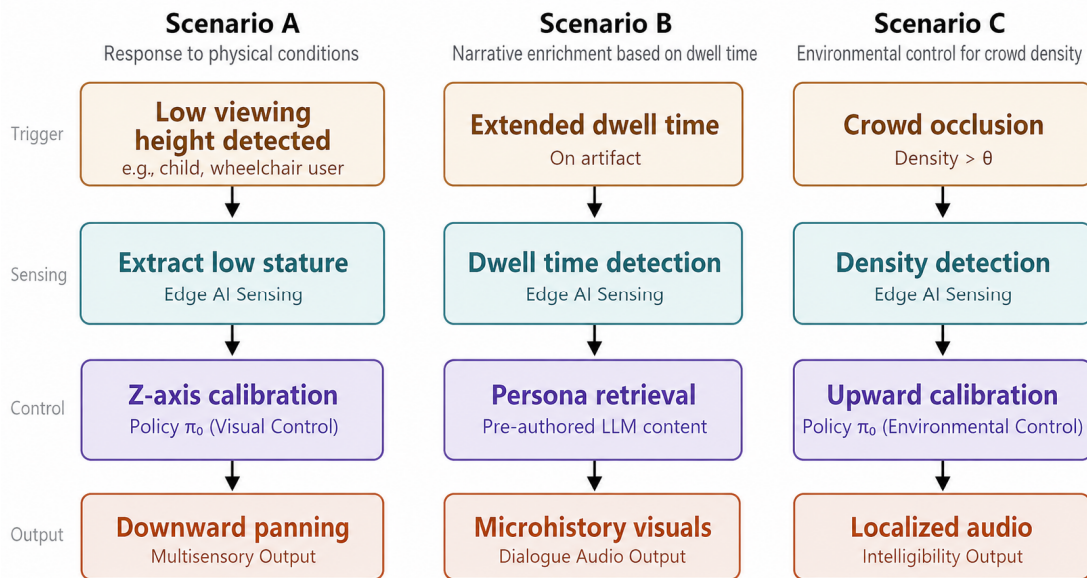


그림 7. DDP HERITAGE 전시에 적용한 세 가지 맞춤형 미디어 제어 시나리오

Fig. 7. Three customized media control scenarios applied to the DDP HERITAGE exhibition

3. 2025 DDP 전시의 맞춤형 미디어 시나리오

실시간 반응형 페루프 시스템을 2025년 DDP HERITAGE 전시에 적용할 경우, 기존의 공간은 관람객의 맥락에 반응하는 능동적 공간으로 전환될 수 있다. 기존 몰입형 전시의 세 가지 한계점은 본 시스템의 작동 메커니즘인 관람객 인지(Stage 1), 정책 π_0 에 의한 시각적 제어(Stage 2), 청각 동기화(Stage 3)와 인문학적 스토리텔링의 결합을 통해 어떻게 극복되는지 그림 7의 구체적인 시나리오로 검토한다. 본 연구를 통해 제안하는 물리적, 인지적, 환경적 제어 시나리오의 3단계 작동 흐름을 종합한 통합 모델을 살펴보면 그림 7과 같다.

신체 조건에 반응하는 포용적 시나리오 A를 살펴보면, 물리적 소외를 극복할 수 있다. 기존의 전시는 표준적인 신체를 가진 관람객만을 위한 ‘동일한 시각적 경험’을 강요하여 일부 관람객에게 몰입과 소외를 동시에 경험하도록 했다. 이를 극복하기 위해 유효 관람 고도(Y) 중심의 물리적 제어 시나리오를 적용한다. 구체적으로 대형 미디어 파사드 구역에 어린이와 같은 관람객이 진입하면 시스템은 관람객 인지를 통해 유효 관람 고도가 낮음을 즉각 추출한다. 이후 정책 π_0 가 투사 중심점(Z)을 해당 관람객의 눈높이에

맞추어 하향 조정하며, 서사 음향 역시 하향 패닝된다. 시공간적 정보의 외곽으로 밀려났던 관람객의 시선 위치로 디지털 문화유산이 펼쳐지며, 몰입형 매체가 관람객의 신체적 다름을 포용하여 누구에게나 평등한 관람의 주체성을 부여한다.

데이터 기반의 인지적 스토리텔링이 적용된 시나리오 B를 살펴보면, 정보의 파편화로 인한 소통 단절을 극복할 수 있다. 단순히 화려한 다수의 전시 영상을 일방적으로 보여주면 유물의 정보를 파편화하여 소통을 단절시킨다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 관람객의 체류 시간이 일정 기준을 초과하는 경우 전시 서사를 심화하는 콘텐츠 전환 메커니즘을 적용한다. 구체적으로, 조선 왕실의 기록 문화유산인 의궤 반차도 미디어 전시의 경우, 관람객이 특정 인물 영상 앞에 머무는 시간이 길어지면 전시 시스템은 국가 의례를 이미지로만 송출하던 기존의 서사에서 벗어나, 관람객이 주목하는 행렬 속 특정 인물을 중심으로 시각적 레이어를 전환한다. 이때 제공되는 인물별 서사와 음성은 거대 언어모델(LLM)을 활용해 사전에 저장된 페르소나 콘텐츠로, 체류 시간 기준에 따라 호출되어 대화하듯 들려준다. 이를 통해 파편화되었던 정보들은 관람객 개인의 서사로 연결되며, 관람객 스스로 의미를 채워나가는 열린 결말의

소통 공간을 완성한다.

공간 밀집도(X) 중심의 환경 제어 시나리오 C를 살펴보면, 관람객의 심리적 몰입 공간을 확보할 수 있다. 관람객이 과도하게 밀집될 때 발생하는 물리적 간섭과 사유의 단절 문제는 밀집도 기반 환경 제어를 통해 해결된다. 전시 구역의 밀집도(X)가 임계값 Θ 를 초과하면, 정책 π_0 는 앞서 언급한 시야 차단을 막기 위해 투사 중심점(Z)을 점진적으로 상향 조정한다. 동시에 투사 중심점의 이동에 연동하여 국소적 오디오 초점도 함께 조정되어, 주변의 군집 소음 속에서도 핵심 서사가 명확하게 전달되도록 한다. 이러한 시나리오의 적용은 복잡한 인과 속에서도 관람객 간의 물리적 간섭을 완화하여, 전시물과 온전히 대면할 수 있는 개인의 ‘심리적 몰입 공간’을 마련한다.

IV. 결 론

오늘날 몰입형 프로젝션 전시는 다양한 디지털 기술을 통해 시각적 화려함을 극대화하며 관람객의 참여와 관심을 이끄는 데 성공했지만, 역설적으로 그 거대한 매체 안에서 개별 관람객의 고유한 신체성과 사유는 소외되는 한계를 드러냈다. 따라서 본 연구는 이러한 문제의식에서 출발하여, 전시 기술의 지향점이 단방향의 ‘정보 송출’에서 관람객의 맥락에 반응하는 ‘상호작용형 환류’로 전환되어야 함을 논증하였다. 이를 해결하기 위해 포용적 디자인의 관점을 바탕으로, 관람객의 물리적 조건과 환경적 변수를 실시간으로 인지하고 매체의 시청각적 초점을 자율적으로 재배열하는 실시간 반응형 페루프 시스템을 제안하였다.

본 연구의 핵심적인 기술적 기여는 기존의 고정형 전시 제어 로직을 다중 센서 융합 및 엣지 AI 기반의 동적 제어 아키텍처로 전환한 데 있다. 구체적으로 제안한 시스템은 관람객 인지(Stage 1), 정책 π_0 에 의한 시각적 제어(Stage 2), 청각 동기화(Stage 3)로 이어지는 3단계 처리 흐름과 관람 종료 시점의 만족도 응답 및 체류 시간·시선 데이터를 보상 신호로 삼아 정책 π_0 자체를 지속적으로 개선하는 갱신 루프로 구성된다. 이와 같은 3단계 처리 흐름을 정립하였으며, 체류 시간 및 시선 이탈 데이터와 관람 종료 시점의 만족도 응답을 보상 신호로 삼아 초기 제어 규칙을 지속적

으로 개선하는 갱신 루프를 설계함으로써, 사전에 고정된 규칙을 넘어 실제 관람객 집단의 반응에 맞추어 스스로 진화하는 사용자 중심의 자율 적응형 전시 기술의 토대를 마련하였다. 이를 통해 시스템은 설계 시점에 고정된 규칙이 아니라 실제 관람객 집단의 반응을 반영하여 스스로 진화하는 페루프 구조를 갖춘다.

본 연구는 실제 시스템을 구현한 실증 연구가 아닌 개념 설계 연구로서, 제안된 시스템을 2025 DDP HERITAGE 전시에 가상 적용하여 세 가지 맞춤형 미디어 제어 시나리오를 도출하였다. 유효 관람 고도가 낮은 관람객에게 투사 고도를 하향 조정하는 포용적 시나리오(A), 체류 시간에 따라 서사를 단계적으로 심화하는 인지적 스토리텔링 시나리오(B), 그리고 공간 밀집도 초과 시 투사 고도와 음향 초점을 상향 조정하여 시야 차단 및 소음 간섭을 완화하는 환경 제어 시나리오(C)를 구성하였다. 이를 통해 복잡한 인과 속에서도 관람객이 유물과 내밀하게 대화할 수 있는 심리적 몰입 공간을 지켜낼 수 있다는 개념적 타당성을 확인하였다.

그러나 본 연구가 제안한 실시간 반응형 페루프 시스템은 완성된 해답이라기보다는, 미래 박물관이 나아가야 할 새로운 대화의 시작점이다. 현재의 정책 π_0 는 관람 고도, 밀집도, 체류 시간 등 관찰 가능한 행동 데이터를 상태와 보상으로 삼아 개선되지만, 관람객의 미세한 감정선이나 다양한 문화적 배경까지 포괄하는 다차원적이고 감성적인 페루프로 확장하는 것은 여전히 남은 과제이다. 본 연구가 제안한 실시간 반응형 페루프 시스템은 개념적 설계 단계로, 실제 하드웨어 및 소프트웨어로 구현하여 현장 적용을 거치지 않았다는 명확한 한계가 있다. 또한 현재의 정책은 관람 고도와 밀집도 등 관찰 가능한 물리적 행동 데이터에 의존하고 있어, 관람객의 다차원적이고 감성적인 맥락까지 포괄하지는 못한다.

따라서 후속 연구에서는 실제 프로토타입을 구축하고, 다양한 관람 고도와 밀집도 조건에서 투사 위치 및 음향 제어의 정확성, 시스템 지연시간, 정보 접근성, 사용자 만족도를 평가할 필요가 있다^[13]. 이와 함께 관람객 행동 데이터의 익명화, 센서 데이터의 현장 처리, 보상 신호의 구성 방법을 검토하여 페루프 시스템의 기술적 타당성과 윤리적 적절성을 함께 검증해야 한다.

박물관은 닫힌 공간에서 박제된 과거를 보여주는 곳이 아니라, 현재의 관람객과 교감하며 매 순간 새로운 서사가 탄생하는 열린 플랫폼이 되어야 한다. 본 연구가 제시한 데이터 기반의 실시간 반응형 페루프 시스템이 문화유산과 인간 사이의 장벽을 허물고, 누구나 평등하게 사유하고 소통할 수 있는 진정한 의미의 모두에게 열린 ‘개방형 박물관 (Open-ended Museum)’^[14]을 구현하는 데 실천적인 밑거름이 되기를 기대한다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] S. Choi, "Analysis and Recommendations for the Transformation of Korean Digital Cultural Heritage Archives into AI Training," *Journal of Multimedia Information System*, Vol.7, No.1, pp.221-228, March 2020.
doi: <http://dx.doi.org/10.33851/JMIS.2020.7.1.000>
- [2] S. Ahn, "AI-Driven Real-Virtual Responsive User Interface and Technology Requirements for Immersive AR Cultural Content," *Journal of Broadcast Engineering*, Vol.29, No.5, pp.606-615, September 2024.
doi: <http://dx.doi.org/10.5909/JBE.2024.29.5.606>
- [3] K. Kim and J. Yoon, "Design Method of Realistic Content Based on Kinect Sensor for Content Cognitive Immersion of Audience - Implementation of exhibition planning using user's real-time behavior data," *Journal of Broadcast Engineering*, Vol.30, No.4, pp.628-645, July 2025.
doi: <http://dx.doi.org/10.5909/JBE.2025.30.4.628>
- [4] J. L. Lao and T. Y. Cho, "Research on Aesthetic Awareness in Immersive Exhibitions Based on Neuroaesthetics," *Journal of the Korean Society of Design Culture*, Vol.31, No.1, pp.137-152, March 2025.
doi: <http://dx.doi.org/10.18208/ksdc.2025.31.1.137>
- [5] B. Milosevic and J. Schacher, "The Immersive Lab: An interactive audio-visual space for artistic exploration," *Emille, the Journal of Korean Electro-Acoustic Music Society*, Vol.13, pp.39-45, 2015.
- [6] Carrozzino, M., & Bergamasco, M., "Beyond virtual museums: Experiencing immersive virtual reality in real museums." *Journal of Cultural Heritage*, 11(4), 452 - 458, 2010.
doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2010.04.001>
- [7] Nubani, L., Puryear, A., & Kellom, K., "Measuring the Effect of Visual Exposure and Saliency of Museum Exhibits on Visitors' Level of Contact and Engagement." *Behavioral Sciences*, 8(11), 100, 2018.
doi: <http://dx.doi.org/10.3390/bs8110100>
- [8] Li, J., Nie, J.-W., & Ye, J., "Evaluation of virtual tour in an online museum: Exhibition of Architecture of the Forbidden City." *PLOS ONE*, 17(1), e0261607, 2022.
doi: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0261607>
- [9] Brischetto, A., Iacono, E., & Becchimanzi, C., "Digital technologies in museums: Critical issues and opportunities for equal access to cultural heritage." In *Usability and User Experience*, Vol. 110, pp. 32 - 41., 2023.
doi: <http://dx.doi.org/10.54941/ahfe1003175>
- [10] Zhou, Z., Chen, X., Li, E., Zeng, L., Luo, K., & Zhang, J., "Edge Intelligence: Paving the Last Mile of Artificial Intelligence With Edge Computing." *Proceedings of the IEEE*, 107(8), 1738 - 1762, 2019.
doi: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2019.2918951>
- [11] Dulac-Arnold, G., Levine, N., Mankowitz, D. J., Li, J., Paduraru, C., Goyal, S., & Hester, T., "Challenges of Real-World Reinforcement Learning: Definitions, Benchmarks and Analysis." *Machine Learning*, 110, 2419 - 2468, 2021.
doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10994-021-05961-4>
- [12] Anderson, C. S. W., & Thorogood, M., "A grounded study in user preference for immersive sound in extended reality environments." *Virtual Reality*, 30(2), Article 84, 2026.
doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10055-026-01348-9>
- [13] Tcha-Tokey, K., Christmann, O., Loup-Escande, E., & Richir, S., "Proposition and Validation of a Questionnaire to Measure the User Experience in Immersive Virtual Environments." *International Journal of Virtual Reality*, 16(1), 33 - 48, 2016.
doi: <http://dx.doi.org/10.20870/IJVR.2016.16.1.2880>
- [14] S. Choi, *Inclusive Exhibition and Open Museum*, Minsokwon, Seoul, 2026.
- [15] I. Choi, H. Jeong, Y. Cho, and C. Shin, "Design and Implementation of Space and Interaction-based Visual Guide for Spatial Immersive Content," *Journal of Digital Contents Society*, Vol.25, No.9, pp.2667-2675, September 2024.
doi: <http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2024.25.9.2667>
- [16] S. Choi, "Analysis and Expansion Strategies of Museum's Digital Archive for Cultural Heritage," *Journal of Digital Contents Society*, Vol.26, No.12, pp.1-7, December 2025.
doi: <http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2025.26.12.1>
- [17] S. Lee, "Analysis of experiential exhibition cases using media art -focus on 'teamLab: Life'-," *Cartoon and Animation Studies*, No.66, pp.389-412, 2022.
doi: <http://dx.doi.org/10.7230/KOSCAS.2022.66.389>

최성미: 몰입형 전시의 미디어 접근성 향상을 위한 AI 기반 페루프 시스템의 개념 설계: 2025 DDP HERITAGE 전시 적용 사례를 중심으로 1051
(Seongmi Choi: Conceptual Design of an Edge AI-Based Closed Loop System for Improving Media Accessibility in Immersive Exhibitions:
Application Scenarios for the 2025 DDP HERITAGE Exhibition)

저 자 소 개



최 성 미

- 2019년 ~ 2025년 : 고려대학교 문화유산학협동과정 졸업(박물관학)
- 2025년 : 한국전통문화대학교 디지털헤리티지학과 연구교수
- 2025년 ~ 현재 : 한국유교문화진흥원 책임연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0009-0001-1936-2023>
- 주관심분야 : 인클루시브디자인, 인공지능, 메타러닝