

EEG 기반 감정 반응 정량화와 설계 적용을 위한 실험 설계

- 전시 공간 몰입도를 중심으로 -

Experimental Design for EEG-Based Emotional Quantification in Architecture

- Focusing on the immersion in exhibition spaces -

○박 세 호*

Park, Se-Ho

전 한 종**

Jun, Han-Jong

Abstract

Neuroarchitecture research has shown that spatial elements affect human emotions, with EEG offering a method to quantify such responses. Yet most studies stop at analysis, without applying emotional data to design. This study proposes an experimental design to translate EEG-based affective data into architectural input. Sixteen VR exhibition spaces, modeled on Hangaram Art Museum, varied wall openness and closure as independent variables. Participants' EEG signals and SAM ratings were collected and interpreted through Russell's circumplex model to evaluate immersion. Findings establish a framework for integrating quantified emotions into exhibition space design, bridging affective neuroscience and architectural practice.

키워드 : EEG, 감정 차원 모델, 전시 공간, 몰입도

Keywords : EEG, Circumplex model, Exhibition space, Immersion

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 신경 건축(Neuroarchitecture) 연구는 건축 공간이 인간의 정서적·인지적 반응에 실질적인 영향을 미친다는 사실을 다수의 실험을 통해 확인되었다(Cruz-Garza et al., 2022). EEG(Electroencephalography)는 이러한 맥락에서 핵심적인 측정 지표로 활용되며, 인간의 감정 상태를 정량화하는 방법 중 하나이다(Castiblanco Jimenez et al., 2023). 이를 통해 건축 분야에서 색채, 조도, 형태와 같은 공간적 요인이 인간의 감정 반응에 어떠한 영향을 미치는지를 과학적으로 규명할 수 있게 되었다.

그러나 기존 연구들은 대부분 EEG 데이터를 활용하여 감정과 공간 경험의 상관관계를 분석하는 수준에 머물러 있으며, 측정된 감정 데이터를 설계에 활용하는 체계적 전략이나 방법론은 논의되지 않고 있다(Taherysayah et al., 2024). 다시 말해, “어떻게 감정을 측정할 것인가”라는 질문에 대한 연구는 지속되고 있으나, “측정된 감정을 어떻게 설계 과정에 반영할 것인가”에 대한 구체적인 연구는 부족하다.

이에 본 연구는 EEG 기반 데이터를 활용하여 공간 요소가 사용자의 감정에 미치는 영향을 정량적으로 규명하는 실험을 설계한다. 더 나아가, 감정 데이터를 단순한 분석 대상이 아닌 설계 과정의 입력값으로 반영할 수 있는 방법을 탐구하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

단계	주요 내용	방법 및 도구	기대 결과
1. 선행연구 학습	EEG와 건축 연구, 감정-공간 상호작용 사례 검토	문헌 고찰, 기존 EEG 데이터셋(DEAP, AMIGOS) 분석	연구 방향 설정 및 이론적 토대 마련
2. 가설 설정	공간 조건에 따른 감정 반응에 대한 가설 제시	선행연구 결과 종합	명확한 연구 질문 및 검증 가능한 실험 가설 확립
3. 실험 설계	공간 요소와 감정의 관계 양상을 위한 실험 설계	기존 선행 연구	체계적인 실험 과정 마련, 가설 검증이 가능한 연구 환경 구축
4. 파일럿 실험	본 실험 전, 실험의 타당성 검증	Revit, Twinmotion, Oculus Quest2, Enobio, SAM 설문지	본 실험 설계의 보완점 도출, 신뢰성 높은 실험 기반 확립
4. 본 실험	파일럿 검증 결과를 바탕으로 정교한 조건을 대상으로 실험	Revit, Twinmotion, Oculus Quest2, Enobio, SAM 설문지	공간-감정 상관관계에 대한 일반화 가능한 근거 확립
5. 데이터 수집 및 분석	데이터 수집, 전처리, 통계 분석, 감정 지표 도출	Python, ICA, 멀티링, Z-score, mANOVA 등	공간 조건과 감정 간 상관관계 규명, 영향력 지표 확보
6. 향후 연구	감정 기반 디자인 도출	Valence/Arousal 기반 몰입도 지표를 중수화하여 공간 요소와 연결	감정 데이터가 직접 설계 결정 요인으로 기능하는 조직 마련

그림 1. 연구 단계

본 연구는 EEG 기반 감정 데이터를 설계 과정에 반영하기 위한 기초 단계로서, 특히 전시 공간의 몰입도를 정량적으로 분석하는 실험 설계로 연구의 범위를 한정한다. 구체적으로, 공간 구성 요소 중 벽 배치 방식이 사용자의 감정 반응에 미치는 영향을 규명하는 데 초점을 맞추었다.

연구 방법은 실험 설계에 중점을 두고 있으며, EEG 데이터를 활용하여 사용자의 Valence-Arousal 반응을 정량적으로 측정하고, SAM(Self-Assessment Manikin) 설문을 병행하여 주관적 감정 평가를 수집한다. 이를 통해 객관적(EEG), 주관적

* 한양대학교 건축학과 석사과정

** 한양대학교 건축학부 교수, 건축학 박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Hanyang University, hanjong@hanyang.ac.kr)

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2022R1A2C3011796).

(SAM) 지표를 통합한 감정 데이터셋을 구축하고, 공간 구성과 감정 반응 간의 상관관계를 분석하기 위한 틀을 마련한다.

2. 이론적 배경

2.1 신경 건축(Neuroarchitecture)

신경 건축은 건축 환경이 인간의 감정과 인지 과정에 미치는 영향을 신경과학적으로 탐구하는 접근이다. 기존 건축 연구가 기능적·심미적 요소에 초점을 두었다면, 신경 건축은 뇌와 감정 반응을 측정·분석하여 사용자의 경험을 정량적으로 이해하고자 한다. 이는 건축 공간을 단순한 배경이 아니라 인간의 뇌와 직접 상호작용하는 환경으로 해석하는 관점을 제공한다(Eberhard, 2008).

본 연구는 이러한 신경 건축적 틀을 전시 공간에 적용한다. 특히 벽의 개방성과 폐쇄성을 조작하여 EEG 기반 감정 반응과 몰입도의 변화를 검증함으로써, 공간-감정의 상호작용을 실험적으로 확인하고 정량적 데이터의 설계 활용 가능성을 모색한다.

2.2 Russell의 감정 차원 모델(Circumplex Model)

Russell(1980)의 감정 차원 모델은 인간의 감정을 Valence(쾌-불쾌)와 Arousal(각성-이완)이라는 두 축으로 설명한다. 개별 감정 상태는 이 좌표계 상에 위치하며, 공간 경험 역시 쾌-불쾌와 각성-이완의 연속선상에서 해석될 수 있다.

본 연구에서는 EEG로부터 Valence와 Arousal 값을 추정하고, SAM 설문을 병행하여 전시 공간에서 벽 배치가 몰입도에 미치는 영향을 분석한다. 이를 통해 전시 공간의 몰입도를 단순히 주관적으로 평가하는 것이 아니라, 과학적·정량적 지표로 변환하는 데 핵심적인 이론적 근거가 된다.

2.3 분산 인지 이론(Distributed Cognition Theory)

분산 인지 이론은 인지가 한 개인의 내부에서만 이루어지는 것이 아니라, 사람, 도구, 환경 간의 상호작용 속에서 분산되어 형성된다고 설명한다(Hollan et al., 2000). 즉, 이러한 관점에서 설계 과정은 개인의 고립된 사고가 아닌, 외부 도구와 많은 사람들의 지식·경험, 환경적 요인과 결합하여 이루어지는 협력적 산물로 이해된다.

본 연구에서는 EEG 데이터 측정 장치, VR 환경, 데이터 분석 알고리즘이 모두 인지 체계의 일부로 작용하여, 참가자들의 감정 데이터를 통합·해석하고 이를 설계 의사결정에 직접 반영하는 구조를 구현한다.

2.4 선행연구 분석

본 연구는 전시 공간의 벽 구성에 따른 몰입도를 EEG 기반 감정 데이터로 정량화하기 위한 실험 설계를 제안한다. 이를 위해 선행연구 분석을 통해 실험 설계의 정당성과 연구 방법의 기반을 마련하고자 한다. 본 연구는 전시 공간의 벽 배치에 따른 몰입도를 EEG 기반 감정 데이터로 정량화하기 위한 실험 설계를 제안하며, 이를 위해 세 가지 범주의 선행연구를 검토하였다. 선행연구 분석을 통해 본 연구에서 도출된 실험 설계가 기존 연구들과의 연속성과 차별성을 동시에 확보

하도록 하며, EEG 기반 감정 데이터가 공간 설계 변수로 전환될 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

2.4.1 EEG 기반 사용자 중심 설계 연구

이 범주에 속하는 연구들은 실험 조건을 어떻게 설정하여 공간이 뇌와 반응에 미치는 영향을 검증했는가에 초점을 둔다. EEG를 활용한 건축 연구는 특정 공간 요소를 조작하고 이에 따른 뇌와 반응 차이를 실험적으로 검증하는 방식으로 이루어져 왔다. Cruz-Garza et al. (2022)은 가상 교실을 대상으로 창문 위치(없음, 측면, 정면)와 방 크기(좁음, 넓음)를 조절하고, 인지 과제 수행 중 EEG 데이터를 수집하여 공간 설계가 인지 반응에 미치는 영향을 분석하였다. 결과적으로 α 및 θ 대역에서 조건별 차이가 나타났으며, 이는 공간의 개방성과 밀폐성이 학습자의 신경 반응을 달리 유발함을 보여준다. Kim, Park, and Choo (2021) 역시 산후조리원 1인실을 VR로 재현하여 천장 높이, 창 비율, 중형비를 변화시키고 EEG α/β 비율(RAB)을 측정하였다. 그 결과 높은 천장과 넓은 중형비는 각성을 낮추고, 낮은 천장과 좁은 중형비는 각성을 높이는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 건축 요소의 세부적인 변화가 사용자의 감정을 조절할 수 있음을 실험적으로 입증한다. 이는 감정 데이터를 단순한 사후 평가가 아닌 설계의 입력 변수로 활용할 수 있는 근거를 제시한다.

2.4.2 Russell의 감정 차원 모델 기반 감정 분석 연구

이 범주의 연구들은 Russell의 감정 차원 모델을 활용하여 어떻게 EEG 데이터를 Valence-Arousal 좌표계로 해석하는가에 주안점을 둔다.

Presti et al. (2022)은 가상 건축 환경에서 벽 간격, 천장 높이, 창 위치를 변화시켜 참가자의 감정 반응을 측정하고 이를 Valence-Arousal 좌표계에 매핑하였다. 좁은 공간과 낮은 천장은 불쾌와 높은 각성을, 개방된 공간과 높은 천장은 쾌적함과 이완을 유발하는 것으로 나타났다. Igdałova et al. (2025)는 Manchester Art Gallery의 Room to Breathe 전시 공간에서 Mindful Design이 관람자의 Valence를 높이고 Arousal을 낮추는 효과를 실험적으로 입증하였다. 이러한 선행연구들은 Valence-Arousal 모델이 건축 경험을 설명하는 보편적 좌표계임을 보여주며, 본 연구가 EEG와 SAM 데이터를 Valence-Arousal 값으로 분석하여 감정 반응을 해석하는 것이 타당함을 보여준다. 즉, Russell 모델은 EEG 기반 감정 데이터를 단순한 뇌파 수치가 아니라 정량적으로 해석할 수 있도록 하는 이론적 근거가 된다.

2.4.3 전시 공간 관련 연구

이 범주에서는 전시 공간에서의 주요 감정과 이를 판별하는 방식에 중점을 둔다.

전시 공간에서의 감정은 특정 공간 요소와 밀접하게 연관되는 것을 다음 선행연구를 통해 살펴볼 수 있다. Igdałova et al. (2025)는 Room to Breathe 전시 공간에서 Mindful Design이 Valence를 높이고 Arousal을 낮추며, 결과적으로 관람자의 몰입도를 향상시키는 효과를 보고하였다. Castiblanco et al. (2023)은 MAV 공예박물관에서 EEG 기반 지표(Valence,

표 1. 선행연구 분류 및 본 연구와의 관련성

분류	연구(저자, 연도)	연구 목적 및 방법	주요 결과	관련성
(1) EEG 기반 사용자 중심 설계 연구	Cruz-Garza et al. (2022)	VR 교실의 창문 위치 및 방 크기 조작 후 EEG 측정	공간 물리 요소 변화가 α , θ 대역 차이를 유발	공간 개방성/밀폐성 조작의 EEG 검증 가능성
	Kim, Park & Choo (2021)	산후조리원 VR에서 천장 높이, 창 비율 및 중형비 조절	RAB 지표로 Valence, Arousal 반응 차이 확인	세부 건축 요소가 정서 반응에 직접 작용
(2) Russell 감정 차원 모델 기반 연구	Presti et al. (2022)	VR 공간 요소 조작 후 Valence-Arousal 매핑	좁은 공간은 불쾌·각성, 개방 공간은 쾌적·이완	Russell 모델의 건축 경험 해석 타당성
	Kim, Park & Choo (2021)	EEG(RAB)와 설문 병행	EEG+Arousal, 설문+Valence를 좌표계로 해석	EEG+자가보고 설문지 결합의 해석 근거
	Igdalova et al. (2025)	Room to Breathe 전시, Affect Grid-AEQ 활용	Mindful Design → Valence ↑, Arousal ↓, 몰입 ↑	전시 공간의 정서적 효과를 Russell 모델로 설명
(3) 전시 공간 관련 연구	Igdalova et al. (2025)	Manchester Art Gallery 전시 비교	Mindful Design → Valence ↑, Arousal ↓, 몰입 ↑	전시 공간에서 공간 요소가 몰입 감정에 영향을 준다는 사실을 확인
	Castiblanco et al. (2023)	MAV 공예박물관(실물·VR) EEG+설문	Engagement 지표가 핵심 감정 지표로 확인	전시 공간에서 몰입 지표가 핵심 감정 지표임을 확인

Arousal, Engagement)를 활용해 관람자의 감정 반응을 정량적으로 분석하였으며, 특히 Engagement(몰입)가 전시 경험에서 핵심적임을 확인하였다. 이러한 연구들은 전시 공간의 특정 요소가 관람자의 정서적 반응을 직접적으로 유발한다는 근거를 제공한다. 따라서 전시실 벽 배치를 조작 변수로 설정하는 것은 전시 공간의 실험 설계 전략으로 타당하며, 몰입도라는 전시공간에서의 핵심 감정을 EEG와 SAM을 통해 정량화할 수 있다는 기반을 마련한다.

2.4.4 선행 연구 평가

기존 연구들은 (1) 공간 물리 요소의 조작을 통해 EEG로 사용자 반응을 측정할 수 있음을 보여주었고, (2) Russell의 감정 차원 모델이 건축 경험을 정량화하는 보편적 해석 좌표임을 제시했으며, (3) Engagement(몰입)이 전시 공간에서의 주요 감정임을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구는 전시실의 벽 배치(공간 요소)를 중심 변수로 설정하고 EEG 및 SAM 데이터를 Russell 모델 좌표계로 해석함으로써, 벽의 개방성/폐쇄성이 관람자의 감정 경험에 미치는 효과를 규명하는 실험 설계를 진행하고자 한다.

2.5 연구 가설

선행연구 분석 결과, 건축 공간의 물리적 요소는 사용자의 정서적 반응에 직접적인 영향을 미치며, Russell의 감정 차원 모델은 EEG 기반 정서 데이터를 해석할 수 있는 정량적 좌표로 사용되며, 특히 전시 공간에서는 Engagement(몰입)가 핵심 감정 지표임이 확인되었다. 이러한 이론적 근거에 따라 본 연구에서는 다음과 같은 연구 가설을 설정하였다.

가설 1: 전시 공간의 벽 개방성이 높을수록 참가자의 EEG 기반 Valence 값은 유의미하게 증가할 것이다.

가설 2: 전시 공간의 벽 폐쇄성이 높을수록 참가자의 EEG 기반 Arousal 값은 유의미하게 증가할 것이다.

가설 3: EEG 기반 몰입도 지표는 벽 배치 방식(개방/폐쇄)에 따라 유의미하게 달라지며, 이는 전시 공간 경험에서 감정의 정량적 지표로 활용될 수 있음을 입증할 것이다.

3. 연구 방법

3.1 실험 도구

실험 도구는 생체 신호 측정 장치와 가상현실 구현 장비로 구성된다. 생체 신호 측정을 위해 Enobio EEG 장치를 사용하여 두피 전극에서 뇌파를 기록한다. 심리적 반응은 SAM 설문지를 통해 평가하며, 각 자극 제시 직후 참가자가 주관적 정서 차원인 Valence와 Arousal을 보고하도록 한다. 가상현실 환경을 통한 실험을 위해 VR 기기인 Oculus Quest 2를 사용하며, 실험 VR 영상은 Twinmotion을 활용하여 제작하였다. 이를 통해 참가자는 실제 공간 체험에 가까운 시각적·공간적 몰입감을 제공한다.

3.2 실험 환경

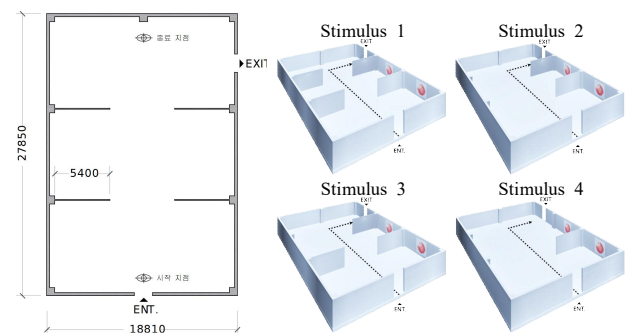


그림 2. 전시 공간 도면 및 SET 2 공간 렌더링

실험 자극은 예술의전당 한가람미술관 제3전시실의 일부 공간을 구현하였다. 실제 배포된 도면을 기반으로 전시실의 가로 폭과 파티션(벽) 배치를 참조하여 3차원 모델을 구현한 뒤, Twinmotion을 활용하여 가상현실 환경으로 렌더링하였다. 이를 통해 실제 전시 공간의 비례와 규모감을 유지하면서도 실험 목적에 맞게 벽의 개폐 조건을 조절할 수 있도록 하였다.

독립변수는 벽의 구성 방식으로 설정되었으며, 좌우의 정면·후면 개방 조건을 중심으로 총 4개의 세트(각 세트 4개 공간, 총 16개 공간)를 마련하였다.

본 연구에서는 총 16개 조건을 정면/후면 개방 여부에 따라 매우 개방-개방-중간-폐쇄-매우 폐쇄의 다섯 수준으로 분류하였다. 이후 각 수준이 모든 세트에 고르게 포함되도록 4개의 세트를 구성하였다. 결과적으로 각 세트는 개방성 및 폐쇄성

균형을 갖추도록 설계되었다. 세트 구성은 표 2와 같다.

표 2. 개방성/폐쇄성 기준 세트 구성

세트	매우 개방	개방	중간	폐쇄	매우 폐쇄
Set1	OOOO	OOC	OCC	COCC	
Set2		OCC	OCC	COCC	CCCC
Set3		OCC	OCC, CCO	OCC	
Set4		COO	COO, COO	CCO	

※ 표기: LF(좌-앞) / LB(좌-뒤) / RF(우-앞) / RB(우-뒤), O=open, C=closed

3.3 감성 반응 평가

본 연구에서는 참가자의 감정 반응을 정량화하기 위해 SAM 척도를 사용하였다. SAM은 Bradley와 Lang(1994)에 의해 개발된 비언어적 평가 도구로, Valence, Arousal, Dominance의 세 차원에서 개인의 주관적 정서를 측정할 수 있도록 설계되었다. 본 연구에서는 EEG 분석과 병행하여 SAM 결과를 비교·검증 지표로 활용한다.

4. 결론

본 연구는 EEG 기반 감정 데이터를 활용하여 전시 공간의 벽 배치가 관람자의 정서적 반응과 몰입도에 어떠한 영향을 미치는지를 규명하기 위한 실험 설계를 제안하였으며, 전체적인 프로세스는 그림 4와 같다.

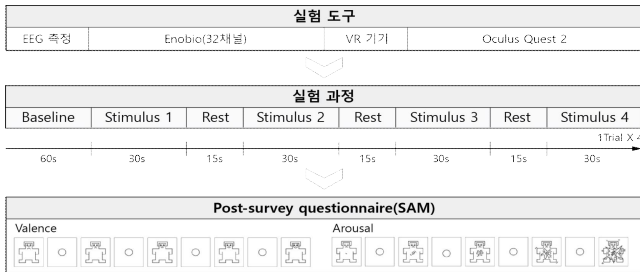


그림 3. 실험 프로세스

이를 기반으로 다음과 같은 연구 의의와 결론을 도출할 수 있다.

첫째, 선행연구 분석을 통해 공간 요소가 뇌파 반응에 영향을 미치며, Russell의 감정 차원 모델이 건축 경험을 정량화하는 보편적 해석 틀임을 확인하였다. 또한 전시 공간에서는 Engagement(몰입)가 핵심 감정 지표임이 밝혀져, 본 연구의 실험 설계의 타당성을 확보하였다.

둘째, 실험 설계는 실제 전시 공간을 VR 환경으로 구현하고, EEG 측정과 SAM 설문을 병행하여 객관적(EEG)·주관적(SAM) 지표를 통합적으로 수집할 수 있도록 구성되었다. 특히 벽의 개방성과 폐쇄성을 조작한 16개 조건을 마련하여, 전시 공간 경험에서 개방성과 몰입도의 상관관계를 정량적으로 분석할 수 있는 기반을 마련하였다.

이를 통해 “감정을 어떻게 측정할 것인가”를 넘어 “측정된 감정을 어떻게 설계에 반영할 것인가”라는 문제의식에 응답한다. 이는 EEG 기반 감정 데이터를 단순한 분석 지표가 아니라 설계 과정의 입력값으로 전환할 수 있는 가능성을 제시하며, 감정 기반 설계 방법을 구축할 수 있는 기초를 마련하였다.

향후 연구에서는 EEG 분석을 통해 벽의 배치와 개방성, 몰입도 간의 상관관계를 구체적으로 규명하고, 이를

사용자 중심 설계의 분석 자료로 활용할 예정이다. 이러한 분석은 감정 데이터를 실제 설계 의사결정 과정에 반영하는 것에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- Castiblanco Jimenez, I. A., Nonis, F., Olivetti, E. C., Ulrich, L., Moos, S., Monaci, M. G., Marcolin, F., & Vezzetti, E. (2023). Exploring user engagement in museum scenario with EEG—A case study in MAV craftsmanship museum in Valle d'Aosta Region, Italy. *Electronics*, 12(18), 3810.
- Coburn, A., Vartanian, O., & Chatterjee, A. (2017). Buildings, beauty, and the brain: A neuroscience of architectural experience. *Journal of cognitive neuroscience*, 29(9), 1521-1531.
- Cruz-Garza, J. G., Darfler, M., Rounds, J. D., Gao, E., & Kalantari, S. (2022). EEG-based investigation of the impact of room size and window placement on cognitive performance. *Journal of Building Engineering*, 53, 104540.
- Eberhard, J. P. (2008). *Brain landscape the coexistence of neuroscience and architecture*. Oxford University Press.
- Hollan, J., Hutchins, E., & Kirsh, D. (2000). Distributed cognition: toward a new foundation for human-computer interaction research. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 7(2), 174-196.
- Igdalova, A., Humphries, S., & Chamberlain, R. (2025). Room to Breathe: Testing the efficacy of mindful breathing and mindful design in enhancing museum experiences. *The Journal of Positive Psychology*, 1-18.
- Kim, S., Park, H., & Choo, S. (2021). Effects of changes to architectural elements on human relaxation-arousal responses: Based on VR and EEG. *International journal of environmental research and public health*, 18(8), 4305.
- Presti, P., Ruzzon, D., Avanzini, P., Caruana, F., Rizzolatti, G., & Vecchiato, G. (2022). Measuring arousal and valence generated by the dynamic experience of architectural forms in virtual environments. *Scientific reports*, 12(1), 13376.
- Taherysayah, F., Malathouni, C., Liang, H.-N., & Westermann, C. (2024). Virtual reality and electroencephalography in architectural design: A systematic review of empirical studies. *Journal of Building Engineering*, 85, 108611.
- Zhang, T., Qi, Z., Guan, W., Zhang, C., & Jin, D. (2023). Research on the measurement and characteristics of museum visitors' emotions under digital technology environment. *Frontiers in Human Neuroscience*, 17, 1251241.