

최소 모션 기반 감정 표현과 HRI

Minimal Motion for Emotional Expression in HRI

박효상, 홍익대학교 디자인학 / 박기철, 홍익대학교 기계시스템디자인공학

Pak, Hyo Sang _Design Studies, IDAS, Hongik University /

Pak, Ki Cheol _Dept. of MSDE, Hongik University

차례

1. 서론

1.1. 연구 배경

1.2. 연구 목적

2. 설계

2.1. 요인

2.2. 분류

2.3. 설문지

3. 실험

3.1. 환경

3.2. 절차

3.3. 가설

3.4. 분석 방법

4. 결과

4.1. 응답 경향

4.2. 회귀 분석

4.3. 빈도 분석

4.4. 정서 차원 공간

5. 결론

5.1. 연구 요약

5.2. 후속 연구

References

최소 모션 기반 감정 표현과 HRI

Minimal Motion for Emotional Expression in HRI

박효상, 홍익대학교 디자인학 / 박기철, 홍익대학교 기계시스템디자인공학

Pak, Hyo Sang _Design Studies, IDAS, Hongik University /

Pak, Ki Cheol _Dept. of MSDE, Hongik University

요약

중심어

비언어 커뮤니케이션
사용자-로봇 인터랙션
감성적 인터랙션
정서 차원 공간
최소 모션

최근 사용자-로봇 인터랙션은 로봇의 기능 수행 외 사용자와 정서적으로 소통하는 능력을 중요하게 다루고 있다. 이를 ‘감성적 인터랙션’이라 하며, 로봇의 감정 표현과 사용자 인식에 관한 연구가 활발하다. 설계의 핵심은 로봇이 감정을 어떻게 표현하고, 사용자가 이를 어떻게 이해하는가에 있다. 그러나 선행 연구는 주로 로봇의 복잡한 움직임이나 외형 중심의 설계에 집중하였으며, 최소한의 움직임만으로 감정을 명확하게 전달할 수 있는 연구는 미진하였다. 이에 본 연구는 로봇 모션의 최소 단위를 ‘단일 요인’으로 규정하고 이를 ‘최소 모션’으로 정의하였다. 또한 눈(E), 머리(H), 팔(A), 조명(L) 네 가지 요인을 기반으로 단일 요인만을 사용하는 유니모달 조건과 단일 요인의 조합인 복합 요인을 활용한 멀티모달 조건을 구성하였다. 실험 결과, 모든 감정 유형에서 $p < .05$ 수준으로 유의미한 인식이 확인되었으며, 상관관계(Cramér’s V)의 평균은 약 .30 범위로 소-중간 수준의 영향력을 보였다. 이는 사전 설명 없이도 최소 모션만으로 감정 전달이 가능함을 입증한다. 이는 응답의 우연성과 동일 경향을 보기 위한 A/B 테스트를 통해 검증되었다. 따라서, 설계된 모션은 감정을 표현하고 인식하기에 적합함을 시사한다. 또한, 단일 요인(눈, 팔, 머리 등)만을 사용한 유니모달 조건은 참가자가 기쁨, 슬픔, 놀라움, 분노의 감정으로 각각 구분하여 인식하였다. 멀티모달 조건 또한 참가자가 각각의 특정 감정으로 구분하여 인식하였다. 또한 서로 다른 요인 조합이라도 동일한 감정 표현으로 인식될 수 있었다. 선행 연구와 파일럿 테스트를 통해 세부 감정으로 구분한 놀라움(긍정/부정)과 분노(능동/수동)는 실험을 통해 세부 감정이 각각 다른 요인으로 표현되는 것을 확인하였다. 본 연구는 감정 표현에서 복잡한 모션 없이 참가자가 충분히 인식할 수 있는 정도의 표현력을 가지고 있음을 실증하였으며, 향후 정서적 소통 목적을 위한 소셜 로봇의 모션 설계를 위한 기준을 제시한다. 후속 연구로는 감정 표현 간 강도 비교, 실질적인 의사소통력의 검증, 그리고 다양한 사용자를 폭넓게 이해하기 위한 나이와 맥락을 고려한 연구가 필요하다. 본 연구는 정서적 소통을 위한 소셜 로봇 디자인의 실용화에 기여할 기초 연구로서 활용되기를 기대한다.

ABSTRACT

Background : In contemporary Human-Robot Interaction (HRI), emotional engagement between users and robots is gaining increasing attention beyond functional task execution. This study focuses on Affective Interaction, emphasizing how robots express emotions and how users perceive these expressions. While prior research has predominantly addressed emotion expression through complex movements or visual appearance, few studies have examined how emotions can be effectively communicated through minimal motion.

Keywords

Non-verbal Communication
HRI
Affective Interaction
Valence-Arousal Space
Minimal Motion

Methods : To address this gap, this study explores four expressive modalities—Eye (E), Head (H), Arm (A), and Light (L)—and constructs two experimental conditions: Unimodal (using a single modality) and Multimodal (combining multiple modalities). Each condition was evaluated for its ability to convey discrete emotional states. Participants successfully identified emotional expressions without prior instruction, with recognition patterns confirmed through A/B testing to eliminate random response effects.

Results: The experiment revealed that Unimodal expressions—utilizing only one expressive factor such as eye, head, or arm movement—enabled users to accurately distinguish between joy, sadness, surprise, and anger. Multimodal combinations also supported reliable emotion recognition. Notably, the same emotion could be conveyed through different modality combinations, indicating expressive redundancy and design flexibility. Furthermore, nuanced emotional variants, including positive/negative surprise and active/passive anger, were successfully differentiated using distinct configurations, reflecting findings from prior pilot studies. Across all conditions, recognition was statistically significant ($p < .05$), with an average effect size (Cramér’s V) of approximately .30, indicating a small to moderate correlation.

Conclusion : The study demonstrates that minimal motion can suffice for clear emotional communication, providing practical implications for the design of expressive yet efficient social robots. Future work should investigate the intensity of emotional expressions, communicative effectiveness in interaction contexts, and user diversity across age and situational settings. This research offers a foundational basis for designing emotionally communicative social robots with minimal complexity.

1. 서론

1.1. 연구 배경

최근 소셜 로봇과 사용자 간의 Affective Interaction(감성적 인터랙션)의 중요성이 부각되고 있다. 이는 단순한 기능 수행을 넘어 정서적 유대 형성을 위한 사용자-로봇 인터랙션(Human-robot Interaction, HRI)이다. 따라서 로봇이 감정을 표현하고, 사용자가 이를 사회적 신호로 인식하고 해석하는 과정은 인터랙션의 품질을 결정하는 핵심 요소로 간주된다(Rossi & Ruocco, 2019). 따라서, 해당 배경을 바탕으로 다양한 표현 전략이 제안되었으며 특히 비언어적 커뮤니케이션은 감정 표현에서 중요한 설계 요인으로 고려되고 있다. 상기 내용을 포함한 선행 연구를 정리하여 다음과 같이 표로 나타냈다.

<Table 1> A Study on the Background of Nonverbal Communication

개요	연구 내용	검증 지표	연구자(년도)
비언어적 커뮤니케이션을 통한 감정 표현	비언어적 표현은 인터랙션에서 직관성과 몰입감을 높이며, Affective Interaction 설계에서 중요한 역할	감정 인식률, 사용자 몰입 평가	Dautenhahn, K.(1998)
다채널 감정 표현	여러 개의 채널을 사용하는 멀티모달 방식은 단일 채널만 사용하는 유니모달 방식보다 감정 인식률과 사용자 만족도를 높이는 데 유리	인식률 비교, 만족도 평가	Andronas, D.(2021)
추상적인 모션을 통한 감정 표현	단순하고 추상적인 움직임만으로 감정 표현을 효과적으로 전달 가능. 이를 통해 명료성과 기술 구현의 효율성 동시에 확보	감정 구분 정확도, 구현 효율성 평가	Breazeal, C.(2003)
단순 모션의 감정 표현 가능성	의인화 형태 없이 단순 모션으로 감정 표현 가능	인식 정확도, 형태 의존성 평가	Leite, L. et al.(2014)
비 의인화 기반 표현 전략	행동 기반 신호는 특정 형태를 갖추지 않아도 사용자 반응을 유도 가능	사용자 반응률, 사회적 수용성 평가	Miklósi, Á.(2017)
신뢰감을 증진하는 표현	시선, 거리 등을 고려한 표현은 인터랙션의 자연스러움과 사용자에게 신뢰감을 증진	신뢰도 평가	Walters, M. et al.(2009)
비언어적 감정 표현 적절성	언어보다 비언어적 표현이 감정 표현에 더 적합함. 적정 형태와 조합 시 감정 표현력 향상	적합성 평가, 표현력 비교 평가	Pak, H. & Pak, K.(2025)
사회적 신호로서의 감정 표현	로봇의 감정 표현은 단순한 정보 전달을 넘어 사회적 맥락을 고려. 감정 표현은 사용자 반응과 인터랙션 흐름을 끌어냄	사회적 반응, 맥락 적합성 평가	Rossi, A. & Ruocco, M.(2019)
단순화 표현의 설계 효율성	단순화한 감정 표현 구현은 기술 개발에 필요한 자원 소모를 줄이고 동시에 구현 가능성을 높임. 최소 모션은 감정 전달의 명확성과 설계 실현성 모두에서 효과적	구현 효율성, 설계 명확성 평가	Wang, X. et al.(2024)

상기 언급된 표와 같이, 비언어적 표현을 통한 감정 전달의 적절성이나 추상화와 단순화를 활용한 감정 표현 및 인식의 효과성에 관한 연구는 존재한다. 그러나 소셜 로봇의 설계는 여전히 외형적 요소나 복합 요인의 조합인 멀티모달 조건에 치우쳐 있다. 그 결과, 감정을 명확히 전달할 수 있는 ‘최소 모션 기반 비언어적 표현’에 대한 이론적 정리와 실증은 여전히 부족하다(Matsumaru, 2022).

1.2. 연구 목적

본 연구는 ‘최소 모션’을 로봇 모션의 가장 작은 단위인 ‘단일 요인’으로 규정한다. 이를 통해 실험 참가자(이하 참가자)의 감정 인식 효과를 검증하며 로봇의 감정 표현 전략을 도출하는 것을 목적으로 한다. 분석 대상은 네 가지 감정(기쁨, 슬픔, 놀라움, 분노)이며, 이를 위해 유니모달(Unimodal)과 멀티모달(Multimodal)의 조건을 설정하였다. 유니모달 조건에서는 단일 요인의 감정 표현 가능성을, 멀티모달 조건에서는 단일 요인의 조합에 따른 복합 요인을 통해 감정 표현 차이와 동일 감정의 다양한 표현 경로를 검토한다. 연구 결과는 데이터 테이블과 정서 차원(Valence-Arousal) 공간으로 각각 시각화하여, HRI에서 감정 전달의 명확성과 기술적 실현 가능성을 고려한 최적화 설계 기준을 제안한다.

<Table 2> Core Hypothesis Formulation

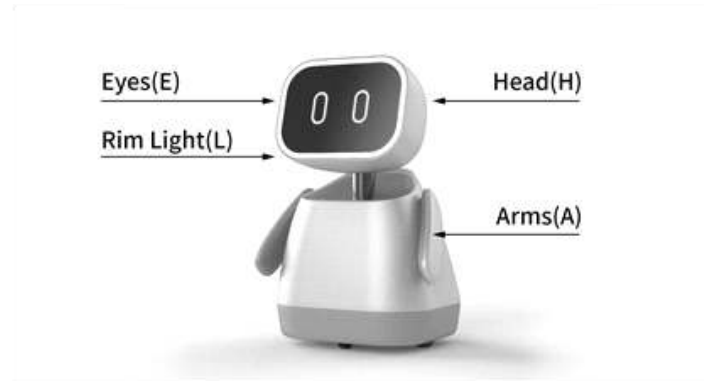
No.	핵심 가설	목표
1	최소 모션으로 감정 표현이 가능한가?	단일 요인만으로 실험 참가자가 감정을 구분 가능한지 검증 필요
2	복합 요인은 요인 조합에 따라 감정 인식이 달라지는가?	요인 조합에 따라 감정 인식이 달라지는지 검증 필요
3	하나의 감정을 다양한 요인으로 표현할 수 있는가?	동일한 감정에 대해 서로 다른 요인 조합으로 표현되는지 검증 필요

상기 표는 본 논문에서 밝히고자 하는 핵심 가설을 정리하여 나타낸 것이다.

2. 설계

2.1. 요인

본 연구는 최소 모션이 실험 참가자에게 특정 감정으로 일관되게 인식되는지, 그리고 해당 표현이 감정 전달에서 적절성과 명확성을 확보할 수 있는지를 검증하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 선행 연구를 토대로 로봇 형상 설계와 정량 분석에 적합한 모션을 구성하였다. 감정 표현에 영향을 미치는 요인으로 눈(E), 림라이트(L), 팔(A), 머리(H)의 네 가지를 선정하였으며, 제작된 로봇 형상은 다음과 같이 그림으로 나타내었다.



<Fig 1> Form and Motion Design of a Social Robot

각 요인은 혼동 변수를 최소화하기 위해 속도, 반복 빈도, 유지 시간을 동일하게 설정하였다. 또한, 데이터 처리 및 해석을 위해 자연어가 아닌 이진 코드(1=활성, 0=비활성)로 변수를 정리하였으며, 머리 움직임은 별도로 숙임(-1), 정지(0), 들기(1)로 구분하였다. 본 요인 설계에 따라 통해 실험은 모션 대기 상태를 기준으로 시작하여, 요인 활성화 전후의 반응 차이를 명확히 비교할 수 있도록 하였다. 정리된 요인과 변수를 다음과 같이 표로 나타내었다.

<Table 3> Motion Factors and Variables of the Robot

요인(기호)	변수(0:꺼짐 / 1:켜짐)	표현 예시
눈(E)	0, 1	요인 코드화 0 0 0 0 ↑ ↑ ↑ ↑ E L A H
림라이트(L)	0, 1	
팔(A)	0, 1	
머리(H)	-1, 0, 1(*머리의 경우 -1 숙이기, 0 가만히 있기, 1 들기)	

또한, 본 연구의 형상 설계, 모션 구성, 감정 표현에 영향을 미치는 요인 선정을 위해 참고한 선행 연구를 정리하여 다음과 같이 표로 나타내었다.

<Table 4> Related Prior Studies on Emotion Expression Design

기준	연구 내용	연구자(년도)
감정	협오와 공포는 사용자에게 부정적 반응 유발, 감정 인식에서 혼선을 초래할 수 있어 제외. 따라서 기쁨, 슬픔, 놀라움, 분노의 네 가지 기본 감정을 실험에 활용	Ekman, P.(1992); Ko, S. et al.(2023)
모션	최소한의 움직임으로도 감정 전달 가능성이 입증된 눈, 림라이트, 팔, 머리를 선정	Wei, H. & Zhao, L.(2016); Kang, B. & Jun, S.(2022)

움직임 각도	팔과 머리는 30도 이상 움직일 때 감정 인식이 높아짐. 따라서 모든 각도 조건을 통일하여 실험 변수로 활용	Endo, N. et al.(2008); Cárdenas, P. et al.(2024)
형상(머리)	직각 사각형에 가까운 타원형 머리 형상은 정보 전달력과 긍정적인 인식에 유리. 정면 응시 시 감정 중립 표현이 가능하다는 장점	Kim, S. & Oh, D.(2018);
형상(눈)	눈은 감정 해석에 가장 큰 영향을 주는 부위. 시각적 일관성을 유지하고 혼선을 방지하기 위해 타원형의 중립적 형태로 제한. 조명은 백색광만 사용	DiSalvo, C.(2002)
위치(립라이트)	감정 표현이 직관적으로 전달되도록 머리 주변에 배치. 사용자의 시선이 얼굴 부위에 집중된다는 경향 반영	Kim, S. & Oh, D.(2018)
색상(빛)	표현의 중립성을 유지하기 위해 형상과 조명은 흰색(또는 회색) 계열로 설정	Wilms, L. & Oberfeld, D.(2018)
부위별 크기 비율	시각적 친화성을 높이기 위해 머리와 몸통, 몸통과 팔의 비율을 각각 1:1.25로 설정. 머리 크기가 1등신에 가까울수록 사용자에게 긍정적인 인상 유도 가능	DiSalvo, C.(2002); Kang, B. & Jun, S.(2022)
유지 시간	변수 통제를 위하여 모든 동작의 사용자 인식 시간을 최대 허용 값인 2.0초로 일괄 설정	Wittmann, M.(1999); Chanseau, A. et al.(2015)
시퀀스	인식률을 높이기 위해 동일 모션 2회 반복. 전체 시퀀스 길이는 사용자 실험 집중도 유지를 위해 10초로 제한	Yang, E. & Dorneich, M.(2017)

2.2. 분류

2.2.1. 유니모달(Unimodal)

유니모달(이하 U)조건은 각 단일 요인의 특정 변수를 활성화/비활성화하여, 로봇의 감정 표현이 참가자에게 어떻게 인식되는지를 평가하기 위해 설계되었다. 모든 요인은 각각 하나의 자유도(1 DOF) 내에서 변수로 구현되었으며, 각 조건은 요인별 감정 인식 특성을 비교·분석하기 위한 기준으로 설정하였다. 해당 구성을 다음과 같이 표로 정리하였다.

<Table 5> Factor Design - Unimodal Condition

요인 (기호)	분류 코드	이미지	표현 방식	모션 (변수)	모션 수행 시간	모션 설계이유
P	0000		—	모션대기	—	모션 대기상태에서 감정 표현으로 이동하는 것을 보여주기 위함
U1	1000		시각	백색, 세로 타원 형태의 그래픽이 화면에 커짐 → (E) 활성화(1)	2.0s	눈이 특정 감정 판단에 영향을 주는지 확인하기 위함
U2	0100		시각(발광)	백색광이 머리 테두리에 커짐 → (L) 활성화(1)		빛이 특정 감정 판단에 영향을 주는지 확인하기 위함
U3	0010		모션	0도(수직, 가만히) → +30도 (전면, 들기)로 변화 → (A) 활성화(1)		팔이 특정 감정 판단에 영향을 주는지 확인하기 위함
U4	000-1		모션	0도(전면, 가만히) → -30도(숙임)로 변화 → (H) 활성화(-1)		머리가 특정 감정 판단에 영향을 주는지 확인하기 위함
U5	0001		모션	0도(전면, 가만히) → 30도(들기)로 변화 → (H) 활성화(1)		머리가 특정 감정 판단에 영향을 주는지 확인하기 위함

2.2.2. 멀티모달(Multimodal)

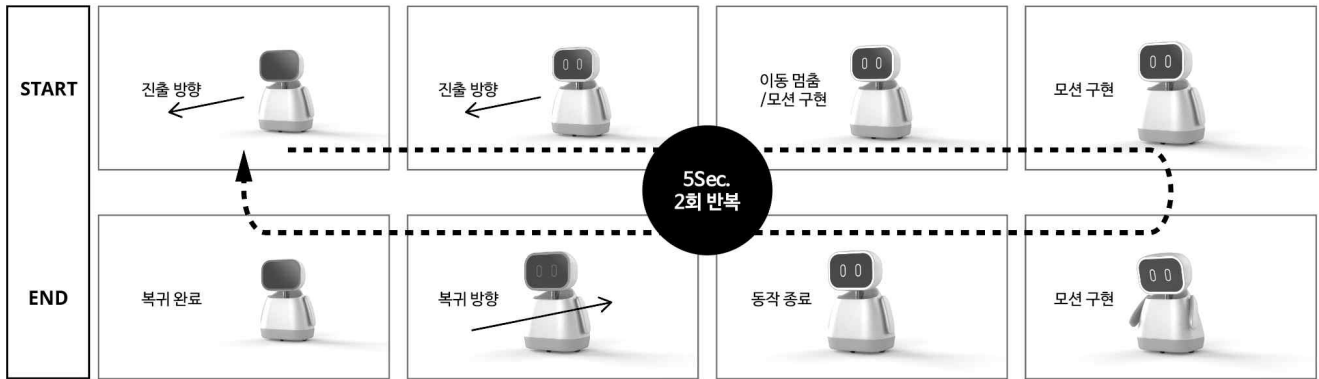
멀티모달(이하 M) 조건은 단일 요인의 조합을 통해 구성된 로봇의 감정 표현이 참가자 인식에 미치는 영향을 평가하기 위해 설계되었다. Frijda(1986)는 동일한 자극도 사용자의 판단에 따라 감정 해석이 달라 반응이나 태도가 달라질 수 있다고 보았다. 따라서 본 연구는 감정 표현을 구성하는 요인들의 조합에 따라 참가자의 인식이 달라질 수 있다는 가설을 바탕으로 멀티모달을 설계하였다. 조합에서 E, L, A는 각각 두 가지의 활성화 상태(0, 1), H는 세 가지의 활성화 상태(-1, 0, 1)를 가지므로, 변수에 따라 조합 가능한 수는 $2(E) \times 2(L) \times 2(A) \times 3(H) = 24$ 가지이다. 이 중 모션 대기(P)와 유니모달(U1-U5)의 6가지를 제외하면, 멀티모달은 총 18가지의 경우의 수로 분류된다. 그러나 조합 가능한 수를 모두 실험하는 것은 현실적으로 한계가 있으므로, ‘신체 부위 중 머리와 얼굴 부위의 감정 표현이 사용자의 인식에 가장 큰 영향을 미친다’라는 선행 연구(Russell & Fehr, 1987)를 바탕으로, 머리-얼굴 부위에 중점을 둔 네 가지 조합(M1-M4)을 실험 조건으로 선정하였다. 각 구성은 요인 간 조합에 따른 감정 인식 차이를 검증하기 위한 기준으로 설정되었으며, 해당 구성을 다음과 같이 표로 정리하였다.

<Table 6> Factor Design – Multimodal Condition

요인 (기호)	분류 코드	이미지	표현 방식	모션 (변수)	모션 수행 시간	모션 설계 이유
P	0000		—	모션대기	—	모션 대기상태에서 감정 표현으로 이동하는 것을 보여주기 위함
M1	111-1		복합	눈 껴짐(1) / 빛 껴짐(1) / 팔 들기(1) / 머리 숙이기(-1)	2.0s	모든 변수 활성화에서 머리를 숙일 때의 영향 평가 가능
M2	1111		복합	눈 껴짐(1) / 빛 껴짐(1) / 팔 들기(1) / 머리 들기(1)		모든 변수 활성화에서 머리를 들었을 때의 영향 평가 가능
M3	1010		복합	눈 껴짐(1) / 빛 껴짐(0) / 팔 들기(1) / 머리 가만히(0)		빛의 유무가 감정 표현에 미치는 영향 평가 가능
M4	0101		복합	눈 껴짐(0) / 빛 껴짐(1) / 팔 가만히(0) / 머리 들기(1)		눈이 꺼진 상태에서 다른 변수의 영향 평가 가능

2.2.3. 모션 시퀀스

본 연구에서 모든 모션은 대기 상태(P)에서 시작하여 특정 요인을 표현하기 위해 전진, 동작, 후퇴하여 대기 위치로 돌아오는 일련의 과정을 거치며, 이를 1사이클(Cycle)로 정의하였다. 이때, 참가자가 로봇의 모션을 충분히 인식할 수 있도록 각 사이클은 10초 동안 2회 반복하였으며, 이를 통해 모션의 시작-진행-종료의 단계가 명확히 드러나도록 하였다. 모션 시퀀스의 구성은 다음과 같이 그림으로 나타내었다.



<Fig 2> Motion Sequence Composition

2.3. 설문지

2.3.1. 다지선다형 선택

본 연구는 감정이 감정의 강도·맥락·표현 요인의 조합에 따라 다양하게 구현될 수 있다고 주장한 Plutchik(1980)의 감정 이론과, 동일한 감정도 다양한 표현을 통해 인식될 수 있어야 한다고 주장한 Spiro와 Jehng(1990)의 인지적 유연성 이론에 근거하여 설문을 설계하였다. 이에 따라 선정된 참가자는 제시된 모션 중 특정 감정을 가장 잘 표현한다고 판단되는 하나를 선택하도록 하였으며, 이를 통해 감정 표현 방식에 따른 인식 차이를 정량적으로 분석하고자 하였다. 또한, 차순위 응답 역시 유의미한 데이터로 사용할 수 있을 것으로 판단하고, 2순위까지 선택하도록 하였다. 해당 내역은 <Table 7>에 나타내었다.

2.3.2. 시나리오

본 실험 이전에 실시된 파일럿 테스트와 사후 인터뷰 분석 결과, 참가자는 놀라움과 분노를 단일 감정으로 제시받았음에도 불구하고, 여기서 다시 세분화하려는 경향을 보였다.(예 : ‘놀라움 / 분노’를 이야기하시는데 어떤 ‘놀라움 / 분노’를 이야기 하는 건가요?) 이를 반영하여 본 연구는 놀라움이 긍정적/부정적 감정가(Valence)로 구분될 수 있으며, 분노가 부정적 감정가와 낮은 각성도(Arousal)를 지닌 수동적 감정(Unpleasant-Deactivated)으로 인식될 수 있다고 제시한 Russell(1980)의 연구와, 분노의 인식 정확도가 낮아 다른 감정과 혼동되는 경향이 있어 단일 감정으로 명확히 구분되기 어렵다고 보고한 Giambattista et al.(2016)의 연구를 참고하였다. 따라서, 본 연구는 상기 선행 연구를 바탕으로 분노가 능동·수동적 차원으로 구분될 수 있으며, 특히 수동적 분노가 슬픔과 유사한 정서 차원으로 인식될 수 있다는 가설을 설정하였다. 이에 따라, 본 실험에서는 놀라움을 긍정/부정 차원으로, 분노를 능동/수동 차원으로 재구성하여 시나리오를 수정하였다. 상기 내용을 반영하여 최종 설계된 설문지 구성을 다음과 같이 표로 정리하였다.

<Table 7> Emotion Expression Scenario

U, M 실험 설문지 요약	감정	감정 표현 시나리오	1순위 감정표현	2순위 감정표현
	1.기쁨	로봇 앞을 가로막고 있던 의자를 치워주었다	감정 - 요인 선택	
	2.슬픔	로봇이 주행하다 벽에 부딪혔다		
	3.놀라움(차원-긍정/부정)	3.1. 로봇에게 갑자기 예기치 못한 선물을 주었다 3.2. 뒷걸음질 중에 건드려서 로봇을 휘청거리게 했다		
	4.분노(차원 - 능동 / 수동)	공통 시나리오 - 로봇의 행동을 오작동으로 오인하여 정상 작동을 위해 로봇의 뒤통수를 가격하였다 (4.1. 만일 로봇이 적극적으로 화낸다면? / 4.2. 분노 삭인다면?)		
	5. 사후인터뷰 - E, L, A, H 요인 중 감정평가에 가장 영향을 많이 미친 요인을 순서대로 작성 / 선택 이유 서술			

3. 실험

3.1. 환경

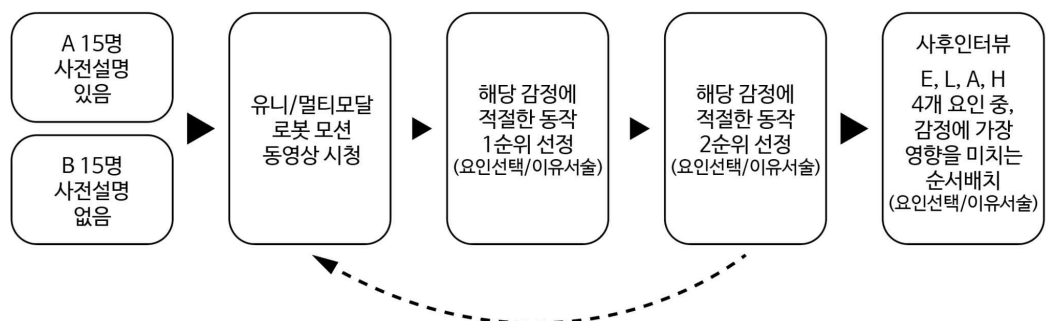
본 실험은 감정 동요와 주의 분산을 최소화하기 위해 평균 소음 55dB 이하의 환경에서 진행되었으며(Astuti et al., 2024), 소음은 Noise Level 앱을 활용해 10분 간격으로 측정되었다. 참가자의 시선 집중을 확보하기 위해 양측에 가림막을 설치하였고, 로봇의 실제 크기(500mm)에 해당하는 시각 정보를 제공하기 위해 65인치 S전자 BE65C-H 모니터를 사용하였다. 이는 모니터 기반 자극 제시가 실제 로봇과 유사한 반응을 유도할 수 있다는 선행 연구(Giambattista et al., 2016)를 근거로 한다. 본 연구는 참가자가 눈을 통한 시각적 수용을 기반으로 비언어적 모션을 인식하는데, 이는 시각 정보가 주요 감각 채널로 작동한다는 선행 연구(Urakami, 2023)를 근거로 한다. 본 실험은 프로토타입 구현 이전에 모션 표현의 적절성을 사전 검증하기 위한 단계로서 모니터 기반 방식을 채택하였다. 실제 실험 사진은 다음과 같다.



<Fig 3> Experimental Environment Using a Monitor

3.2. 절차

본 실험은 U와 M 조건 모두 동일한 절차로 진행되었으며, ‘사전 설명 여부’에 따른 응답 차이를 확인하기 위해 A/B 테스트를 진행하였다. 이를 통해 응답 경향이 단순한 우연인지를 검증하기 위한 ‘우연성’, 그리고 두 그룹 간에 응답 경향이 동일하게 나타나는지를 확인하는 ‘동질성’을 검증하였다. A그룹(설명 있음)에는 <Table 7>에 명시한 감정 표현 시나리오를 설명하였고, B그룹(설명 없음)에는 감정 단어만 간단하게 제시하여 외부 정보의 영향을 최소화하였다. 모든 실험은 타인의 영향을 차단하기 위해 1인 단독 환경에서 실시되었다. 실험에 참여한 인원은 총 30명이며, 모두 20대 대학생으로 구성되었다. 성별 균형을 고려해 남녀 각각 7명/8명, 8명/7명으로 A/B 그룹에 무선 배정하였다. 실험 설계는 1차 파일럿 테스트 결과와 인터뷰 분석을 토대로 구조화되었으며, 전체 절차는 다음 그림과 같이 제시하였다.



<Fig 4> Diagram of Experimental Procedure

3.3. 가설

상기 실험 구성을 통해 검증하고자 하는 가설은 구체적으로 다음과 같으며, 이를 표로 나타내었다.

<Table 8> Hypothesis Formulation

No.	검증 항목	H ₀ (영가설)	H ₁ (대립가설)
1	참가자는 사전 설명 없이도 로봇의 감정 표현을 인식할 수 있는가?	사전 설명이 없으면 모션만으로 감정 인식이 일어나지 않음	사전 설명 없이 모션만으로 감정 인식이 일어남
2	최소 모션으로 감정 표현이 가능한가?	단일 요인만으로는 감정 구분이 불가능	단일 요인만으로도 감정 구분이 가능함
3	복합 요인은 요인 조합에 따라 감정 인식이 달라지는가?	요인 조합에 따른 감정 인식 차이는 없음	요인 조합에 따라 감정 인식 결과가 달라짐
4	하나의 감정을 다양한 요인으로 표현할 수 있는가?	동일 감정은 다양한 요인으로 표현 불가능	동일 감정을 다양한 요인 조합으로도 표현 가능
5	놀라움과 분노는 정서 차원에서 이중으로 구분되는가?	놀라움과 분노는 정서 차원에서 구분되지 않음	놀라움과 분노는 정서 차원에서 각각 구분됨

3.4. 분석 방법

본 실험은 참가자가 로봇의 다양한 모션을 시각적으로 확인한 뒤 느낀 감정을 분석하기 위해 통계 프로그램 SPSS 29.0을 사용하였다. 먼저, 실험 조건에 따라 응답에 차이가 있는지를 확인하기 위해 교차분석을 실시하였다. 또한, 응답 요인의 중요도를 반영하기 위해 1순위뿐만 아니라 2순위에도 가중치를 부여하여 분석하였다. 이는 후순위 응답의 의미가 배제되는 문제를 보완하기 위함이다. 가중치 기준은 Heo(2008), Fowler(1995)의 방식을 따랐다. 또한, 복합 요인으로 구성된 조건에서 각 요인이 감정 인식에 미치는 개별 영향력을 검토하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 검증 목표와 분석 방법을 포함해 다음과 같이 표로 정리하였다.

<Table 9> Analytical Methods for the Experiment

No.	구분	검증 목표	분석 방법
1	가중 선택비율 분석 (데이터 공통)	모션 요인과 감정 인식간의 연관 선택의 1순위 및 2순위 응답을 고려해 참가자의 선택 경향 분석	순위 가중치 기반 선택 비율
	응답 우연성 검증	A/B 그룹 각각의 응답이 우연에 의해 나타난 분포인지 확인	단일 표본 이항검정
	동질성 검증 (교차분석)	A/B 그룹 간 응답 경향이 통계적으로 유사한지 확인	카이제곱
	요인-감정 상관 강도	선택된 모션 요인과 감정 인식 간의 연관성 확인	Cramér's V 분석
2	회귀 분석	멀티모달 표현에서 각 요인이 감정 인식에 미치는 영향력 검토	다항 로지스틱
3	빈도분석 (사후 인터뷰)	참가자의 감정 인식 평가에 큰 영향을 주는 요인 중요도 순위 확인 및 응답 일관성 평가	Cohen의 가중 카파 계수

4. 결과

4.1. 응답 경향

먼저, 응답의 우연성 여부를 검증하기 위해 단일 표본 이항검정을 실시하였다. 이를 통해 각 그룹(A/B)의 응답 분포가 단순한 확률에 따른 무작위 결과인지, 혹은 특정 경향이 존재하는지를 확인하였다. 이항검정에서 p값이 기준값($p < .05$)보다 작게 나타나면, 응답은 우연에 의한 것이 아니라 통계적으로 유의미한 선택 경향으로 해석하였다.

다음으로, 두 그룹 간 응답 경향의 동질성을 검토하기 위해 카이제곱 검정을 수행하였다. 유의확률(p-value)이 기준값($p > .05$)보다 크면, 두 그룹의 응답은 통계적으로 유사한 것으로 해석하였다. 다만 본 연구에서는 참가자가 각 감정 표현에 대해 1순위와 2순위를 복수 선택할 수 있도록 하였기 때문에 응답 수가 증가하였고, 이에 따라 실제 차이가 크지 않음에도 유의하게 나타날 가능성이 있었다. 따라서 상기 언급된 우연성, 동질성 검증의 결과 해석은 단순히 p값에만 의존하지 않고 전체 응답 분포를 함께 고려하였다. 특히 특정 요인의 선택 비율이 50%를 초과하는 경우, 이를 유의미한 경향으로 간주하였다(Wasserstein,

2019). 마지막으로, 집단 간 응답 경향의 실제 차이를 더욱 정밀하게 분석하기 위해 변수 간 상관관계의 강도를 볼 수 있는 Cramér's V를 병행하여 사용하였다. 일반적으로 V값이 0.3 미만이면 거의 무시 가능한 수준, 0.3~0.5는 낮음, 0.5~0.7은 중간, 0.7 이상은 강한 관련성으로 해석된다(Hinkle et al., 2003). 주요 결과는 다음과 같이 표로 정리하였다.

<Table 10> Cross-Analysis Results of Unimodal and Multimodal Conditions

유형	감정 유형	단일 표본 이항검정		교차분석				요인-감정인식 관계 해석	분류 코드	해석 요약
		p-value (A/B)	우연성 (A/B)	카이 제곱	p-value	상관강도 (Cramér's V)	A/B 동질성 검증			
U	기쁨	0.00/0.00	유효	—	—	—	완전일치	완전 일치	1000	A/B 동질성 및 상관관계 유의, 응답 일치
	슬픔	0.03/0.00	유효	3.333	.07**	.333	유의함**	**유의함	000-1	
	놀라움(긍정)	0.03/0.02	유효	7.286	.07**	.442	유의함**		1000	
	놀라움(부정)	0.02/0.00	유효	6.273	.18	.457	유효	유효	0001	
	분노(능동)	0.01/0.00	유효	3.359	.34	.32	유효	유효	0010	
	분노(수동)	0.01/0.02	유효	1.325	.52	.021*	유효	*유의함	000-1	
M	기쁨	0.00/0.00	유효	—	—	—	완전일치	완전 일치	1111	A/B 동질성 및 상관관계 유의, 응답 일치
	슬픔	0.04/0.04	유효	1.040	.60	.186*	유효	*유의함	111-1	
	놀라움(긍정)	0.04/0.01	유효	6.000	.05**	.447	유의함**	**유의함	1111	
	놀라움(부정)	0.01/0.04	유효	2.373	.31	.281*	유효		0101	
	분노(능동)	0.01/0.00	유효	.240	.62	.088*	유효		0101	
	분노(수동)	0.61/0.12*	유효*	6.200	.10	.455	유효		111-1	

* 동일 요인에 대한 응답이 A/B에서 50% 이상 일치함.

** 응답 수 증가로 인한 민감한 p값 반응에 대한 해석은 본문 4.1절 참조.

4.2. 회귀분석

M 조건에 대한 단일 표본 이항검정과 교차분석 결과, 모든 모션 요인과 감정 간 관계에서 통계적으로 유의한 경향이 확인되었다. 이에 따라 본 연구는 복합 요인 전체의 효과가 아닌, 각 요인이 개별적으로 참가자의 감정 반응에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 각 요인을 독립변수로, 감정 반응을 종속변수로 설정하여 다항 로지스틱 회귀분석을 실시하였다. 분석 결과, 요인별 회귀계수(β)와 p-value등을 통해 감정 표현에 대한 영향도가 도출되었다. 주요 결과는 다음과 같이 표로 정리하였다.

<Table 11> Results of Logistic Regression Analysis (Multinomial Logistic Model)

멀티 모달 (M)	감정 유형	요인별 회귀계수 β				p-value	z-value	Intercept	단독영향 요인
		E	L	A	H				
(M)	놀라움(부정)	-1.00	0.00	-1.00	0.00	0.046	-1.996	2.40	E, A
	분노(능동)	0.00	0.00	-1.67	-1.67	0.013	-2.494	2.64	A, H
	분노(수동)	0.73	0.17	0.73	-1.57	0.046	-1.996	-.11	H

회귀계수(β)는 각 요인이 감정 인식에 미치는 영향의 방향성과 크기를 나타낸다. 유의성은 일반적으로 z값의 절댓값이 1.96 이상이고, 이에 대응하는 p값이 .05 미만일 때 인정된다. 절편(intercept)은 모든 요인값이 모두 0일 때 특정 감정이 선택될 기준 확률을 의미하며, 본 연구에서는 보조 지표로만 참고하였다. 분석 결과, 놀라움(부정)과 분노(능동/수동) 감정을 제외하면 개별 요인의 영향은 통계적으로 확인하기 어려웠다. 이는 모든 변수가 동시에 활성화된 조건(예 : M2- 1111)에서 다중공선성(Multicollinearity)이 발생하여 각 요인의 독립적 기여도를 파악하기 어려웠다고 해석한다. 특히 요인 L은 어떤 감정 유형에서도 통계적으로 유의한 영향력을 보이지 않아, 단독 기여도를 검증할 수 없다고 판단하였다.

4.3. 빈도분석

사후 인터뷰 응답을 바탕으로, 감정 인식에 영향을 미친 요인의 상대적 중요도를 1순위부터 4순위까지 구분하여 빈도 분석을 실시하였다. 분석 결과, 1순위를 제외한 경우에는 1순위와 하위 순위 간의 가중 카과 계수가 음수로 나타났으며, 이는 평가자 간 일관된 판단이 1순위까지만 유지되었음을 시사한다. 따라서, 감정 평가에 영향을 주는 요인의 상대적 중요

도는 1순위를 기준으로만 신뢰할 수 있으며, 최종적으로 $H > E > L = A$ 의 순으로 나타났다. 상기 분석 결과는 감정 인식에서 얼굴 부위 정보에 대한 의존도가 높다는 기존 연구 (Russell & Fehr, 1987)와 일치한다. 동시에, L 요인이 통계적으로 유의한 영향력을 보이지 않았다는 본 연구의 회귀분석 결과와도 일관성을 보였다. 주요 분석 결과는 다음과 같이 표로 정리하였다.

<Table 12> Results of Frequency Analysis

빈도분석 결과 (n=30)	1순위 평가					Cohen의 가중 카파						
						등급	가중 카파a	근사			95% 근사 신뢰구간	
								표준 오차b	zc	p-value	하한	상한
	분류	빈도	퍼센트	유효 퍼센트	누적 퍼센트	1순위 - 2순위	-0.463	0.123	-2.592	0.01	-0.705	-0.222
	E	12	40	40	40	1순위 - 3순위	-0.652	0.086	-3.788	<.001	-0.82	-0.484
L	2	6.7	6.7	46.7	1순위 - 4순위	-0.133	0.099	-1.116	0.264	-0.327	0.061	
A	2	6.7	6.7	53.3	2순위 - 3순위	-0.19	0.106	-1.062	0.288	-0.399	0.018	
H	14	46.7	46.7	100	2순위 - 4순위	-0.145	0.11	-1.097	0.272	-0.36	0.069	
전체	30	100	100		3순위 - 4순위	0.083	0.128	0.665	0.506	-0.168	0.333	

4.4. 정서 차원 공간

본 실험에서 도출된 ‘요인-감정’ 선택 결과를 Russell(1997)의 정서차원 모델에 적용하고자 하였다. 이외 선행 연구로 참고한 요인 - 감정을 정서 차원과 함께 고려한 선행 연구는 다음과 같이 표로 정리하였다.

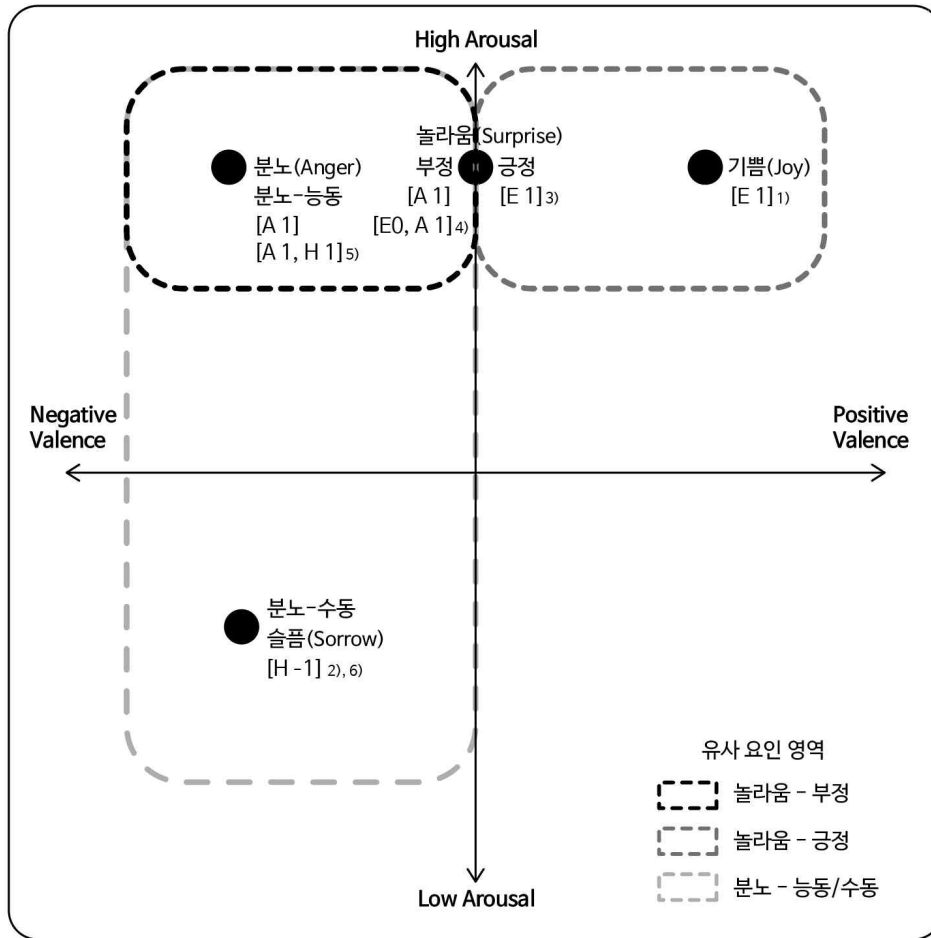
<Table 13> Related Works on Expression Factors and Affective Dimensions

연구 영역	연구 목적	연구자(년도)
정서차원 기반 감정 해석	Valence와 Arousal로 감정이 어떻게 설명 되는지, 정서적 반응이 어떻게 다양화되는지를 분석	Russell, J.(1997)
컨텍스트 기반 감정 해석	HRI에서 맥락에 따른 감정 표현의 변화와 피험자가 이를 이해하는 방식 분석	Coulson, M.(2008); Barrett, L.(2012)
감정 유발 요인 효과 분석	로봇 모션이 피험자의 감정 반응을 어떻게 유발하는지 탐구	Yohanan, S. & MacLean, K.(2011); Yan, F. et al.(2021)

상기 선행 연구를 참고하여, 본 연구는 연구 목적에서 제시한 바와 같이 실험 결과를 정서 차원(Valence-Arousal) 공간에 시각화하였다. 이를 통해 HRI 맥락에서 감정 전달의 명확성과 기술적 실현 가능성을 함께 고려한 최적화 설계 기준을 도출하고자 하였다. 시각화된 분석 결과는 <Figure 5>에 제시하였다. 감정 차원 공간은 Russell(1997)의 정서 차원 모델에 나타난 기쁨, 슬픔, 놀라움, 분노 등의 감정 위치를 기준으로 하였다. 본 연구는 실험 결과가 동일 좌표계에 배치될 수 있는지를 사전 분석으로 검증하였으며, 나아가 각 감정에 대응하는 U·M조건의 값을 함께 시각화하였다. 이를 통해 모션 요인이 특정 감정으로 인식되는지 여부뿐만 아니라, 검증 내용을 시각적으로 확인할 수 있다. 특히 본 연구에서 놀라움과 분노가 각각 긍정-부정, 능동-수동 차원으로 구분되어 나타났다. 이는 선행 연구에서 제시된 놀라움과 분노가 감정가-각성도로 구분되는 경향성을 재확인한 결과이다. 또한 이해를 돕기 위한 감정가와 각성도의 용어 설명을 다음과 같이 <Table 14>로 나타내었다.

<Table 14> Definition of Valence and Arousal

용어	설명	요약	연구자(년도)
Valence (감정가)	감정의 긍정적 또는 부정적 방향을 나타내는 평가 차원. 기쁨, 만족 등은 긍정적(+)이고, 슬픔, 분노 등은 부정적(-) 감정에 해당	감정의 방향성(쾌-불쾌)을 나타내는 차원	Barrett, L. (1998)
Arousal (각성도)	감정이 유발하는 생리적 또는 심리적 각성 수준을 나타내는 강도 차원. 공포, 분노는 높은 각성(High), 우울, 평온은 낮은 각성(Low)에 해당	감정의 강도(활성화 수준)를 나타내는 차원	



<Fig 5> Experimental Result - Valence-Arousal Space

본 실험의 결과를 요약하여 나타낸 표는 아래와 같으며, 이는 <Figure 5>에 언급된 주석 1)~6)의 감정 유형과 대응 가능하다.

<Table 15> Concluding Summary

감정 유형	세부 감정유형	개별 요인 영향력 (유니/멀티모달)	코드(유니모달)	코드(멀티모달)	정서차원공간 <Figure 5>
기쁨	—	E(1) / 확인불가	1000	1111	1)
슬픔	—	H(-1) / 확인불가	000-1	111-1	2)
놀라움	긍정	E(1) / 확인불가	1000	1111	3)
	부정	H(1) / E(0), A(1)	0001	0101	4)
분노	능동	A(1) / A(1), H(1)	0010	0101	5)
	수동	H(-1) / H(-1)	000-1	111-1	6)

또한, 상기 결과들을 통해 검증된 가설은 다음과 같이 요약하여 표로 정리하였다.

<Table 16> Hypothesis Testing Results

No.	H ₀ (영가설)	H ₁ (대립가설)	검증 결과
1	사전 설명이 없으면 모션만으로 감정 인식이 일어나지 않음	사전 설명 없이 모션만으로 감정 인식이 일어남	기각 - A/B 테스트 결과, 설명 유무에 따른 유의한 차이가 없어 모션만으로도 감정 인식이 가능함
2	단일 요인만으로는 감정 구분이 불가능	단일 요인만으로도 감정 구분이 가능함	기각 - 유니모달(U1-U5) 조건에서 기쁨·슬픔·놀라움·분노 구분 가능함
3	요인 조합에 따른 감정 인식 차이는 없음	요인 조합에 따라 감정 인식 결과가 달라짐	기각 - 멀티모달(M1-M4) 조건에서 요인 조합에 따라 감정 인식 결과가 유의하게 달라짐
4	동일 감정은 다양한 요인으로 표현 불가능	동일 감정을 다양한 요인 조합으로도 표현 가능	기각 - 동일 감정이 서로 다른 요인 조합에서도 표현·인식되는 사례 확인됨
5	놀라움과 분노는 정서 차원에서 구분되지 않음	놀라움과 분노는 정서 차원에서 각각 구분됨	기각 - 놀라움은 긍정/부정으로, 분노는 능동/수동으로 구분되어 정서 차원에서 뚜렷하게 분리됨

5. 결론

5.1. 연구 요약

본 연구는 ‘최소 모션’을 로봇 모션의 가장 작은 단위인 ‘단일 요인’으로 규정하고, 이를 통해 감정 표현 가능성을 검증하였다. 분석을 위해 단일 요인에 의한 감정 표현의 유효성을 확인하고, 단일 요인의 조합으로 형성된 복합 요인에 따른 감정 해석의 다양성을 검토하였다. 또한 참가자의 감정 인식을 정서 차원에서 종합적으로 분석하고 이를 시각화된 공간으로 제시하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 실험 설계의 타당성을 확인하기 위해 실시한 A/B 테스트를 실시했고 이에 따른 응답 동질성 검증 결과, 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다. 이는 본 실험에서 제시된 모션이 별도의 설명 없이도 감정 인식에 충분한 정보를 제공하고 있음을 의미한다. 또한 파일럿 테스트에서 확인된 놀라움과 분노의 분리 해석 경향이 모션 설계에 적절하게 반영하였음을 시사한다. 둘째, 기쁨, 슬픔, 놀라움, 분노의 기본 감정은 단일 요인인 유니모달(U1-U5) 조건만으로도 표현할 수 있음이 확인되었다. 셋째, 복합 요인인 멀티모달(M1-M4) 조건에서는 활성화/비활성화된 요인 조합에 따라 감정 인식 결과에 유의한 차이가 나타났다. 따라서, 요인 조합의 특성에 따라 감정 인식이 달라지는 경향이 확인되었다. 넷째, 특정 요인은 추가적인 조합을 통해 다른 감정으로도 인식될 수 있었다. 이는 특정 요인과 특정 감정이 일대일 대응 관계에 있지 않으며, 서로 다른 요인이 동일한 감정으로 인식될 수 있음을 시사한다. 다섯째, 놀라움은 긍정/부정으로 그리고 분노는 능동/수동으로 구분되어 인식되는 경향이 나타났다. 이는 유니/멀티모달 조건에서 모두 확인되었으며, 정서 차원 공간에서도 서로 다른 위치로 분리되는 양상이 관찰되었다. 상기 내용을 종합하면, 단일 요인으로도 감정 전달이 충분히 가능함을 입증하였다. 나아가, 감정 인식 구조가 단일 요인과 복합 요인, 그리고 정서 차원 분포라는 여러 층위에서 동시에 작동한다는 점을 확인하였다. 이는 요인 조합과 인식 맥락에 따라 사용자가 동일한 모션을 서로 다른 감정으로 해석하거나, 하나의 감정이 다양한 방식으로 표현·인식될 수 있음을 보여준다. 또한, 세부 검증된 가설은 <Table 17>로 다음 페이지에 정리하여 나타내었다.

5.2. 후속 연구

본 연구는 단일 요인으로도 감정 표현이 가능함을 확인했으나 몇 가지 한계로 인해 후속 연구가 요구된다. 첫째, 멀티모달 조건(M2)에서 다중공선성으로 개별 요인 기여도를 분리하기 어려웠으므로, 사용되지 않은 18개 조건의 정밀 검증을 통해 감정 강도의 차이와 요인 간 인터랙션 구조를 규명해야 한다. 둘째, 림라이트(L)는 회귀분석 및 빈도분석에서 단일 요인 설명력은 낮았으나 사후 인터뷰에서 다른 요인과 결합 시 감정 증폭 가능성이 제기되었기에 사실 확인을 위한 세부 실험 설계가 필요하다. 셋째, 동일 모션이 슬픔과 분노-수동으로 구분된 사례는 두 감정 간 차별적 특성을 시사한다. 다만 멀티모달 조건에서 단일 요인 효과를 검증한 결과, 머리(H) 요인은 분노-수동에서만 통계적으로 유의하게 나타나 이에 대한 추가 검증이 필요하다. 넷째, 빈도 분석 결과($H > E > L = A$)는 의미 있었으나 표본이 얼굴 요인에 편중되어 L, A의 분석 적합성이 낮았으므로, 더 많은 모수를 통한 요인별 감정 영향력 재확인 필요하다. 다섯째, 본 연구는 요인-감정 대응에 초점을 두었기에 실제 의사소통 맥락에서의 효과 검증이 필요하다. 여섯째, 유니모달과 멀티모달 조건 간 감정 인식 강도 차이를 직접 비교하지 못했으므로 조건 간 비교·분석이 필요하다. 일곱째, A/B 테스트 결과는 유효했으나 감정 종류와 모션 구성이 단순했기 때문일 수 있어, 복잡한 감정·모션 조건에 대한 추가 검증이 필요하다. 마지막으로, 본 실험은 모니터 기반으로 진행되었으므로 실제 로봇 프로토타입과의 인터랙션 맥락에서도 동일한 감정 전달 효과가 나타나는지 검증할 필요가 있다. 또한 참가자가 20대 대학생으로 한정된 점 역시 한계로, 나이·전공·문화적 배경을 확장한 후속 연구가 요구된다. 특히 정보 취약 계층을 포함한 연구는 HRI의 보편적 설계 가능성을 검증하는데 기여할 것이다.

<Table 17> Verified Hypothesis

No.	검증 항목	구분	분석 내용	설명 위치	가설 검증 여부
1	사용자는 사전 설명 없이도 로봇의 감정 표현을 인식할 수 있는가?	우연성, 동질성	예	<Table 10>	검증완료
1-1	사전 설명이 감정 명칭 선택에 영향을 주는가?	우연성	파일럿 테스트 이전에는 놀라움, 분노에서 해당 경향이 존재. 그러나 본 실험에서 세부 감정 유형을 각각 두 가지로 구분 반영하여 경향 사라짐		부분적으로 검증완료 (M의 분노-수동은 후속연구 필요)
1-2	사전 설명이 감정 인식의 일관성을 높이는가?	동질성	아니오		검증완료
2	최소한의 모션으로 감정 표현이 가능한가?	실험결과 종합	로봇의 기쁨, 슬픔, 놀라움(긍정/부정), 분노(능동, 수동)의 감정 표현을 피험자가 각각 구분하여 인식함을 확인		검증완료
2-1	눈(E)은 다른 요인보다 더 강한 영향력을 가지는가?	빈도분석	$H > E > L = A$ 순으로 요인의 개별 영향력을 확인하였으며 회귀분석과 빈도 기반 중요도 분석 결과 모두 이를 지지	<Table 12>	검증완료
3	복합 요인은 요인 조합에 따라 감정 인식이 달라지는가?	실험결과 종합	M1-M4 각각 감정표현 - 피험자 인식의 차이가 통계적으로 유의함. 요인 조합에 따라 다른 감정을 표현함을 확인	<Table 10>	검증완료
3-1	단일 요인으로 인식된 감정이 조합 조건에서는 다르게 해석되는가?		유니모달 조건에서 E 요인만 활성화된 기쁨(1000)이 멀티모달 조건에서는 요인의 조합을 통해 놀라움(1111), 분노(111-1)로 해석됨		검증완료
3-2	멀티모달 조합 내에서도 단일 요인의 영향력을 확인 가능한가?		H, E, A 요인 각각은 감정 인식에 영향력이 있음을 확인. 그러나 L은 통계적으로 유의미한 효과를 보이지 않음	<Table 11>; <Table 15>	부분적으로 검증완료 (L요인은 제외)
4	하나의 감정을 다양한 요인으로 표현할 수 있는가?	실험결과 종합, 정서차원	한 가지 감정 유형에 대해 유니모달 및 멀티모달 표현이 다양하게 대응됨. -따라서 감정 전달은 단일 표현만 가능한게 아님	<Table 10>; <Table 15>; <Figure 5>	검증완료
4-1	서로 다른 감정에 동일한 요인이 중복 선택되는가?	정서차원	동일 요인이 복수 감정에 걸쳐 반복 선택됨. 다중 대응 가능성이 확인됨		검증완료
5	놀라움과 분노는 정서 차원에서 이중으로 구분되는가?		놀라움은 긍정/부정, 분노는 능동/수동으로 분화되어 정서차원 공간에 상이한 위치로 분포됨		검증완료
5-1	놀라움은 긍정적/부정적으로 구분될 수 있는가?		동일 표현에서도 정반대 감정으로 해석되며, Valence차원에서 Pos./Neg.로 분리되어 인식됨		검증완료
5-2	분노는 능동/수동으로 구분될 수 있으며, 수동적 분노는 슬픔과 유사하게 인식되는가?		능동/수동은 Arousal 차원에서 High/Low로 분리되어 인식됨. 또한 수동적 분노는 정서차원 공간에서 슬픔과 인접하게 인식		검증완료

References

- Andronas, D., Apostolopoulos, G., Fourtakas, N., & Makris, S. (2021). Multi-modal interfaces for natural Human-Robot Interaction. *Procedia Manufacturing*, 54, 197-202.
- Astuti, R. D., Suhardi, B., Laksono, P. W., & Susanto, N. (2024). Investigating the relationship between noise exposure and human cognitive performance: Attention, stress, and mental workload based on EEG signals using power spectrum density. *Applied Sciences*, 14(7), 2699.
- Barrett, L. F. (2012). Emotions are real. *Emotion*, 12(3), 413.
- Barrett, L. F. (1998). Discrete emotions or dimensions? The role of valence focus and arousal focus. *Cognition & Emotion*, 12(4), 579-599.
- Breazeal, C. (2003). Emotion and sociable humanoid robots, *Int. J. Human-Computer Studies*, vol.59, 119-155.
- Cañamero, L., & Fredslund, J. (2001). I show you how I like you-can you read it in my face?[robotics]. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A:*

- Systems and humans*, 31(5), 454–459.
- Chanseau, A., Lohan, K. S., & Aylett, R. (2015, August). How motor speed of a robot face can influence the "older" user's perception of facial expression?. In *2015 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)* (pp. 468–473). IEEE.
- Coulson, M. (2008). Expressing emotion through body movement. *Animating Expressive Characters for Social Interaction*, 71.
- Cárdenas, P., García, J., Begazo, R., Aguilera, A., Dongo, I., & Cardinale, Y. (2024). Evaluation of Robot Emotion Expressions for Human-Robot Interaction. *International Journal of Social Robotics*, 1–23.
- Dautenhahn, K. (1998, April). Embodiment and interaction in socially intelligent life-like agents. In *International Workshop on Computation for Metaphors, Analogy, and Agents* (pp. 102–141). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- DiSalvo, C. (2002). All Robots Are Not Created Equal: The Design and Perception of Humanoid Robot Heads. *Human Computer Interaction Institute and school of Design*, Carnegie Mellon University.
- Ekman, P. (1992). Are there basic emotions? *Psychological Review*, 99(3), 550–553.
- Endo, N., Takizawa, K., Yamane, K., & Takanishi, A. (2008). Development of Whole-Body Emotion Expression Humanoid Robot KOBIAN. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 2140–2145). IEEE.
- Fowler, F. J. (1995). Improving survey questions: Design and evaluation. Sage.
- Frijda, N. H. (1986). The Emotions. Cambridge University Press.
- Giambattista, A., Teixeira, L., Ayanoglu, H., Saraiva, M., & Duarte, E. (2016). Expression of emotions by a service robot: A pilot study. In *Proceedings of the 5th International Conference on Design, User Experience, and Usability, DUXU 2016* (pp. 328–336). Springer.
- Heo, S.-Y., Chang, D.-J., & Shin, J.-K. (2008). Ordering Items from Ranking Procedures in Survey Research. *KASR*, 9(2), 29–49.
- Hinkle, D. E., Wiersma, W., & Jurs, S. G. (2003). Applied Statistics for the Behavioral Sciences (5th ed). Houghton Mifflin.
- Kang, B., & Jun, S. (2022). User Perception of Social Robot's Emotional Expression and Forms of Anthropomorphism. *Archives of Design Research*, 35(2), 137–153.
- Kim, S., & Oh, D. (2018). The Kinesics for emotional expression in the household social robot Focus on the head movement of the robot. *The Korean Society of Science & Art*, 35, 69–82.
- Ko, S., Barnes, J., Dong, J., Park, C., Howard, A., & Jeon, M. (2023). The Effects of Robot Voices and Appearances on Users' Emotion Recognition and Subjective Perception. *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 20, No. 01, 2350001.
- Leite, I., Castellano, G., Pereira, A., Martinho, C., & Paiva, A. (2014). Empathic robots for long-term interaction: evaluating social presence, engagement and perceived support in children. *International Journal of Social Robotics*, 6, 329–341.
- Matsumaru, T. (2022). Methods of generating emotional movements and methods of transmitting behavioral intentions: A perspective on human-coexistence robots. *Sensors*, 22(12), 4587.
- Miklósi, Á., Korondi, P., Matellán, V., & Gácsi, M. (2017). Ethorobotics: A new approach to human-robot relationship. *Frontiers in psychology*, 8, 958.

- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1969). Nonverbal leakage and clues to deception. *Psychiatry* 32, 1, 88–106.
- Pak, Hyo Sang, & Pak, Ki Cheol (2025). Optimization of Robot's Morphological Configurations and Analysis of Nonverbal Signal Elements in way to Enhance Affection in Human–Robot Interaction(HRI). *Journal of Basic Design & Art*, 26(2), 191–206.
- Plutchik, R. (1980). Emotion: A psychoevolutionary synthesis. Harper & Row.
- Rossi, A., & Ruocco, M. (2019). Emotion recognition in human–robot interaction: Challenges and opportunities. *Frontiers in Robotics and AI*, 6, 139.
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39(6), 1161–1178.
- Russell, J. A. (1997). 13–reading emotion from and into faces: Resurrecting a dimensional–contextual perspective. *The psychology of facial expression*, 295–320.
- Russell, J. A., & Fehr, B. (1987). Relativity in the perception of emotion in facial expressions. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116(3), 223.
- Spiro, R. J., & Jehng, J.–C. (1990). Cognitive flexibility and hypertext: Theory and technology for the non–linear and multidimensional traversal of complex subject matter. In *Cognition, education, and multimedia: Exploring ideas in high technology* (pp. 163–205). Lawrence Erlbaum Associates.
- Urakami, J. & Seaborn, K. (2023). Nonverbal cues in human–robot interaction: A communication studies perspective. *ACM Transactions on Human–Robot Interaction (THRI)*, 12(2), 22–1 – 22–21.
- Walters, M. L., Koay, K. L., Syrdal, D. S., Dautenhahn, K., & Te Boekhorst, R. (2009). Preferences and perceptions of robot appearance and embodiment in human–robot interaction trials. Procs of New Frontiers in Human–Robot Interaction.
- Wang, X., Li, Z., Wang, S., Yang, Y., Peng, Y., & Fu, C. (2024). Enhancing emotional expression in cat–like robots: Strategies for utilizing tail movements with human–like gazes. *Frontiers in Robotics and AI*, 11, 1399012.
- Wasserstein, R. L., Schirm, A. L., & Lazar, N. A. (2019). Moving to a world beyond “ $p < 0.05$ ”. *The American Statistician*, 73(sup1), 1–19.
- Wei, H., & Zhao, L. (2016). Emotional expression in social robots: Conveying emotions through LED color and arm gestures. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 85, 78–85.
- Wilms, L., Oberfeld, D. (2018). Color and emotion: effects of hue, saturation, and brightness. *Psychological Research* 82, 896–914.
- Wittmann, M. (1999). Time perception and temporal processing levels of the brain. *Chronobiology International*, 16(1), 17–32.
- Yan, F., Iliyasa, A. M., & Hirota, K. (2021). Emotion space modelling for social robots. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 104, 104178.
- Yang, E., & Dorneich, M. C. (2017). The emotional, cognitive, physiological, and performance effects of variable time delay in robotic teleoperation. *International Journal of Social Robotics*, 9, 491–508.
- Yohanan, S., & MacLean, K. E. (2011, March). Design and assessment of the haptic creature's affect display. In *Proceedings of the 6th international conference on Human–robot interaction* (pp. 473–480).