

자율주행차 가변형 편의장치를 위한 NUI 제스처 매핑 연구

NUI-Based Gesture Mapping Strategies for Controlling

Movable In-Vehicle Devices in Autonomous Vehicles

신승혁

Seonghyuk Shin

홍익대학교

Hongik University

hyak9708@naver.com

최성수

Seongsu Choi

홍익대학교

Hongik University

accomplish2400@gmail.co

m

황석영

Seokyoung Hwang

홍익대학교

Hongik University

y0ung@g.hongik.ac.kr

김주성

Juseong Kim

홍익대학교

Hongik University

joe21cv@naver.com

이동운

Dongwoon Lee

홍익대학교

Hongik University

aiden7170@gmail.com

차재훈

Jaehoon Cha

홍익대학교

Hongik University

chjhn1006@gmail.com

노우석

Wooseok Noh

홍익대학교

Hongik University

yes_wooseok@g.hongi

박기철

Kicheol Pak

홍익대학교

Hongik University

hide@hongik.ac.kr

요약문

본 연구는 자율주행차 환경에서 가변형 편의장치의 직관적 제어를 위한 손 제스처 기반 NUI(Natural User Interface) 시스템을 제안한다. MediaPipe 기반 제스처 인식과 물리적 구동 장치를 결합하여 콘솔, 디스플레이, 에어컨 시스템을 제어하는 NUI(Natural User Interface)를 구현하였다. 이를 통해 기존 터치·음성 중심 인터페이스의 접근성 한계를 극복하고, 자율주행차 환경에 적합한 멀티모달 인터페이스의 기술적 기반을 제시한다.

주제어

Natural User Interface(NUI), User Interface(UI), User Experience(UX), Human-Factors, 자율주행차량

1. 서 론

자율주행 Level 4, 5 이상에서는 운전자의 개입 없이 자동 운전 시스템이 모든 운전 작업을 수행하게 되면서, 운전석을 없애고 공간 활용의 자유도를 제공하게 되었다[1]. 스케이트보드 플랫폼(skateboard platform) 설계의 도입으로 배터리, 모터, 제어 시스템 등 주요 구동 부품들이 차량 하부에 평평하게 배치되면서, 전통적인 엔진 룸과 변속기 터널의 제약을 제거하여 실내 공간을 최대화하고 상부 공간의 활용도가 획기적으로 향상되었다[2]. 이러한 구조 및 차량 내 인테리어의 변화로 인해 인터페이스 설계에도 큰 영향을 미치고 있다[3]. 따라서 자연스럽게

자율주행차 내부의 새로운 상호작용 개념의 필요성이 증가하고 있으며, 특히 차량 내 편의장치들을 물리적으로 이동하기 위해서는 탑승자의 제어권에 대한 높은 접근성이 필수적이다[3, 4, 5, 6]. 그러나 이러한 변화와 필요성에도 불구하고 각 편의 장치들에 대한 탑승자의 제어 인터페이스 연구는 아직 부족한 실정이다. 현재 개발 상황에서는 여전히 디스플레이 기반 제어가 가장 주도적인 방식이지만, 이는 디스플레이와 가장 가까운 앞 좌석 승객에게만 높은 접근성을 제공하며, 2,3 열 탑승자들의 접근성을 현저히 떨어진다는 문제점을 내포한다[7]. 이러한 차량 내 인포테인먼트 시스템의 복잡성 증가는 운전자와 차량 간의 상호작용 방식(HMI)에 혁신적인 변화를 요구하고 있다. 기존의 물리적 버튼이나 단순 터치 방식으로는 운전자의 안전과 직관적인 조작에 한계가 있어, 다양한 입력 방식을 통합한 다중 모달리티(Multimodal) 인터페이스가 핵심 트렌드로 자리 잡고 있다[8]. 또한, 음성과 같은 NUI(Natural User Interface)의 또 다른 형태인 제스처 기반 제어가 대안으로 주목받고 있다. 이미 주행 관련 제스처 기반 인터페이스의 가능성이 입증된 바 있으며, SDV 차량의 특성과 차량 내부에는 모니터링을 위한 카메라 시스템이 구축되어 있어 하드웨어 설치에서 접근성의 제약을 크게 줄일 수 있을 것으로 예상된다[9]. 따라서 본 연구에서는 손 제스처를 활용한 NUI 시스템 설계 및 차량 내 편의장치 제어 구현을 목적으로 한다. 손 제스처 기반 시스템은 모든 탑승자에게 동등한 제어 기회를 제공하면서도 직관적이고 자연스러운 손동작을 통한 제어가 가능하며, 추가적인 하드웨어 설치를 최소화하고 소음이나 언어적 제약 없이 환경 독립적인 제어 방식을 제공할 수 있기 때문이다.

2. 선행 연구

2.1 Hand Gesture Based PUI

손 제스처 기반 상호작용 연구는 차량 내 환경을 포함하여 다양한 분야에서 활발하게 수행되어 왔다. 손 제스처를 활용한 HCI(Human-Computer Interaction)에 대한 문헌 고찰 연구에서는 다양한 제스처 유형 및 적용 분야가 분석되어 왔다[10]. 특히 제스처 어휘 설계를 위한 반복적 디자인 과정과 모범 사례들이 HCI 문헌을 통해 체계적으로 정리되어 왔다[11]. 제스처 분류 체계에서는 가리키기를 통한 직시적(Deictic) 제스처, 객체를 조작하는 조작적(Manipulative) 제스처, 특정 의미를 전달하는 신호적(Semaphoric) 제스처, 말과 함께 사용되는 자연스러운 몸짓적(Gesticulative) 제스처, 그리고 수화와 같은 언어적(Linguistic) 제스처 등으로 세분화되어 연구되고 있다[12]. 제스처의 구성 요소를 보다 체계적으로 분석하기 위해, 3D 손 제스처를 손 모양, 위치, 방향, 움직임의 4 가지 핵심 매개변수로 이해하는 접근법을 제안하였으며[13], HCI를 위한 손 제스처를 정적(static) 제스처와 동적(dynamic) 제스처로 구분하는 기본 분류 체계를 확립하였다[14].

표 1. 손 제스처 기본 분류 체계

분류	정적(Static)	동적(Dynamic)
형태	고정된 손 자세	지속적으로 변화하는 손
위치	고정된 특정 지점에서의 정적 배치	공간적 이동 궤적 및 연속적 위치 변화 패턴
방향	고정된 손 방향 및 각도 유지	지속적인 회전 및 방향 전환

그러나 서론에서 언급한 바와 같이 대부분의 연구는 디지털 적인 제어에 그쳤으며 물리적인 편의장치의 제어에 대한 접근은 부족했다. 또한 직관적인 제스처에 대한 체계적인 접근법이 여전히 부족한 실정이다. 본 연구에서는 보다 더 직관적인 제스처의 종류와 디자인 접근법에 근거하여, 물리적 세계의 자연스러운 동작을 디지털 인터페이스에 매핑하는 Natural mapping 개념을 핵심적으로 적용한다[15, 16, 17]. 이는 실제 물리적 조작과 동일한 끌기, 들기, 밀기, 잡기 등의 인체공학적 동작을 디지털 환경에서 구현하는 접근법으로, 학습 부담을 최소화하고 직관적인 상호작용을 구현할 수 있다.

표 2. Natural Mapping의 컨셉 및 특징

핵심 특징	
Norman (1988, 2013)	- 실제 물리적 행동을 디지털 인터페이스에 매핑 (예: 페이지 넘기기 → 스와이프, 확대/축소 → 펜치)
	- 공간적 유추 사용
	- 문화적 표준 고려
	- 의미론적 제약 적용

2.2 Real-time Gesture Recognition Systems

실시간 제스처 인식 시스템은 컴퓨터 비전 기술의 발전과 함께 급속히 발전해왔다. OpenCV(Open Source Computer Vision Library)는 컴퓨터 비전 애플리케이션 개발을 위한 핵심 오픈소스 라이브러리로, 실시간 이미지 처리와 객체 인식 기능을 제공한다[18]. 최근에는 딥러닝 기반의 손 추적 기술이 발전하면서 더욱 정확하고 강건한 실시간 제스처 인식이 가능해졌다. 특히 Google의 MediaPipe 프레임워크는 실시간 지각 파이프라인 구축을 위한 강력한 도구로 자리잡았다[19]. MediaPipe Hands는 기기 내(on-device) 실시간 손 추적 기술을 제공하며, 21 개의 3D 손 랜드마크를 실시간으로 검출할 수 있다[20]. 이러한 기술은 모바일 기기와 임베디드 시스템에서도 효율적으로 작동하여, 차량 내부와 같은 자동 제어 환경에서도 활용 가능하다. 실시간 제스처 인식 시스템의 핵심 과제는 낮은 지연시간(latency)과 높은 인식률을 동시에 달성하는 것이다. 이를 위해 효율적인 데이터 처리 파이프라인과 최적화된 통신 아키텍처가 필요하다. ZeroMQ와 같은 라이브러리는 분산 시스템에서 실시간 데이터 통신을 위한 효과적인 솔루션을 제공한다[21].

3. 연구 목표

본 연구의 시스템 설계는 자율주행차 환경에서 물리적 이동성을 갖춘 편의장치들을 직관적이고 효율적으로 제어할 수 있는 제스처 기반 NUI를 구현하는 것을 목표로 한다. 구체적인 설계 목표는 다음과 같다:

목표 1: 실시간 제스처-장치 구동 시스템 구축

- MediaPipe 기반 실시간 손 추적 및 제스처 분류
- 제스처 입력과 모터 제어 간 100ms 이하의 응답 지연시간 달성
- 안정적이고 부드러운 물리적 장치 구동

목표 2: 직관적인 제스처 매핑 전략 구현

- Natural Mapping: 물리적 조작과 유사한 직관적 제스처 설계
- Index Mapping: 시스템 일관성을 위한 표준화된 제스처 설계

목표 3: 다양한 편의장치 특성 지원

- 1 DoF 선형 운동 (콘솔: 전후 300mm Surge)
- 1 DoF 회전 운동 (디스플레이: 0~90° Pitch)
- 2 DoF 평면 운동 (에어 벤트: 상하좌우 방향 제어)계

4. 시스템 설계 및 구현

4.1 시스템 아키텍처

본 시스템은 제스처 인식 모듈(Gesture Recognition Module)과 모터 제어 모듈(Motor Control Module)로 구성된 Publisher-Subscriber 아키텍처를 기반으로 설계되었다. ZeroMQ(ZMQ) 메시지 큐를 통해 실시간 데이터 통신을 수행하며[21], 시스템은 제스처 인식 모듈(Publisher)과 모터 제어 모듈(Subscriber)로 구성되어 각 모듈 간의 데이터 교환을 통해 실시간 응답성을 보장한다.

4.2 하드웨어 구현

4.2.1 물리적 장치 구성

실제 자율주행차량 공간을 모사하기 위해 각복과 폼보드, 3D Print 를 활용한 lo-fi 프로토타입을 제작하였다. 실험 환경은 사용자의 좌석을 기준으로 우측에 콘솔, 전면에 회전형 디스플레이, 좌측 전방 B 필러에 에어 벤트가 위치하도록 배치되었다.

콘솔 시스템: 사용자의 행위 특성에 따라 수납공간 및 편의 기능이 탑재된 박스가 이동성을 확보하기 위해 좌석에 착석한 사용자를 기준으로 전후 300mm 의 Surge 움직임을 구현하였다. 이를 통해 차량에 탑승한 사용자가 원하는 위치로 콘솔을 이동시킬 수 있다.

디스플레이 시스템: 자율주행 차량 내 취미 활동 및 사교 기능을 고려하여 각도 및 위치 조절이 가능한 구조로 구현하였다. 사용자는 천장에 고정된 디스플레이의 0~90 도의 Pitch 회전 기능을 통해 각도를 조절하여 개인의 시야 및 사용 목적에 맞게 설정할 수 있다.

에어 벤트 시스템: 기존 시스템의 상·하·좌·우 방향 제어 기능을 유지하면서, 사용자의 오른손 제스처를 기준으로 직관적인 제어가 가능하도록 설계하였다.

콘솔, 디스플레이, 공조장치는 아래 [표 3]과 같은 DOF, 구동 방식을 가진다.

표 3. 편의장치 구동 메커니즘 및 자유도

장치	이미지	DoF
콘솔		1
디스플레이		1
에어 벤트		2

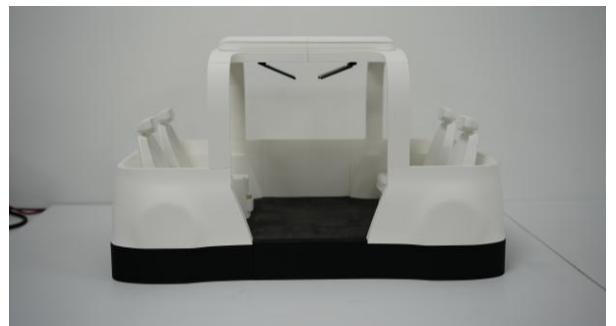


그림 1. 하드웨어 프로토타입

4.2.2 카메라 배치

제스처 인식을 위한 카메라는 각 편의장치의 특성에 맞게 최적 위치에 배치하였다. 콘솔 제어를 위한 카메라는 차량 공간 내 천정부에 Top View 로, 디스플레이 제어를 위한 카메라는 승객석 윈드쉴드에 Side View 로, 에어 벤트 제어를 위한 카메라는 차량 전면부에 Front View 로 배치하였다.

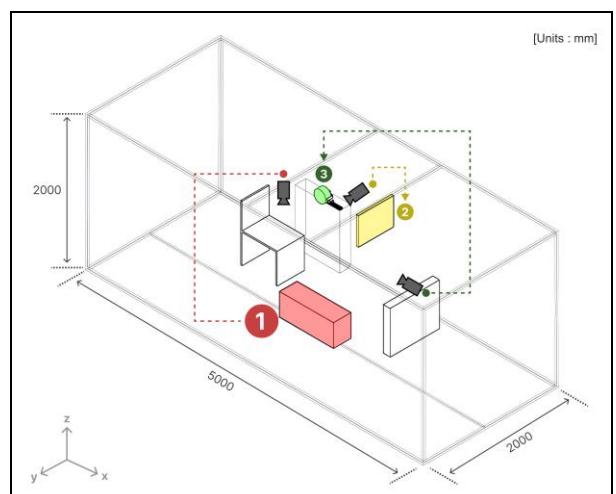


그림 2. 카메라 배치 및 편의장치 구성

4.3 제스처 디자인

본 연구는 세 가지 차량 내 편의 장치를 제어하기 위한 제스처를 Natural Mapping 방식과 Index Mapping 방식으로 분류하여 설계하였다.

4.3.1 Natural Mapping

Natural Mapping 기반의 제스처는 제어 장치의 물리적 특성과 작동 방식을 제스처의 움직임에 직관적으로 연관시켜 디자인되었다. 콘솔의 경우 주먹을 쥐고 가상 손잡이를 끌어당기거나 밀어내는 제스처(Fist + 전후 이동), 디스플레이에는 핀치로 가상 지점을 잡아 끌거나 미는 제스처(Pinch + 상하 이동), 에어 벤트는 핀치로 특정 지점을 잡고 제어하는 제스처(Pinch + 상하좌우 이동)를 사용하였다.

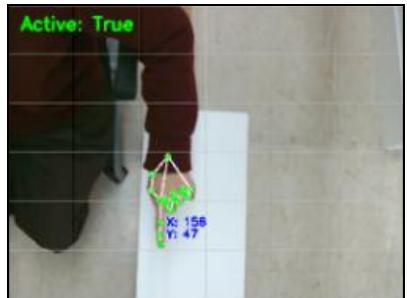
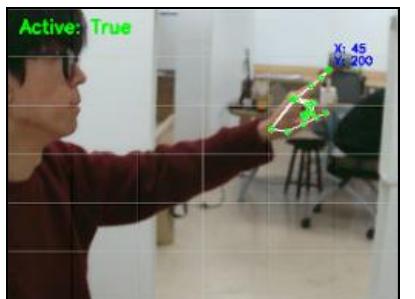
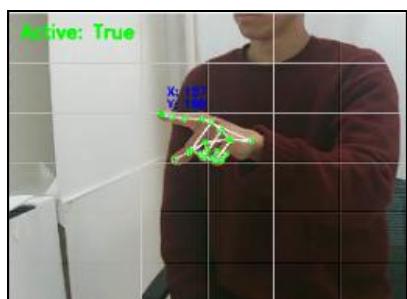
표 4. 편의장치 유형 별 Natural Mapping Gesture 디자인



4.3.2 Index Mapping

Index Mapping은 세 가지 편의 장치 모두에 대해 표준화된 제스처인 검지손가락으로 가리키는 제스처를 통일하여 사용하였다. 이는 시스템 전체의 일관성을 높이고 학습 부담을 줄이는 데 초점을 맞춘 디자인 전략이다.

표 5. 편의장치 유형 별 Index Mapping Gesture 디자인

장치	Index Mapping
콘솔	
	검지손가락으로 장치의 이동 방향을 가리키는 제스처
디스플레이	
	검지손가락으로 장치의 이동 방향을 가리키는 제스처
에어 벤트	
	검지손가락으로 장치의 이동 방향을 가리키는 제스처

4.4 소프트웨어 구현

제스처 인식 모듈은 MediaPipe Hands 라이브러리를 활용하여 실시간 손 추적 및 제스처 인식을 수행한다[19, 20]. 시스템은 세 가지 인식 모드를 지원한다: Pinch-and-Hold(엄지와 검지의 연속 터치 감지), Pinch-to-Toggle(핀치

제스처를 통한 토글 방식 터치 상태 변경), Fist-and-Hold(주먹 쥐기를 통한 연속 터치 감지). 데이터 처리 파이프라인은 웹캠 입력 → MediaPipe 손 인식 → 좌표 정규화 → 제스처 분류 → ZMQ 전송의 순서로 진행되며, 각 프레임에서 정규화된 X,Y 좌표(0~255), 터치 상태(0/1), 타임스탬프를 포함하는 JSON 구조의 데이터가 생성된다.

본 시스템은 Weber-Fechner 법칙에 따라 사용자의 지각적 균등성을 보장하기 위해 반응성이 0.25 배씩 감소하는 5 단계 부드러움 레벨을 설계하였다. Weber-Fechner 법칙($S = k \times \log(I)$)의 심리물리학적 원리에 따르면, 자극의 강도가 기하급수적으로 변할 때 인간은 동일한 지각적 차이를 경험한다. 이를 적용하여 각 레벨 간 반응성이 1/4 배씩 감소하도록 설계함으로써, 사용자가 각 단계에서 균등한 부드러움의 변화를 인지할 수 있도록 하였다. 시스템의 핵심 알고리즘은 1 차 지수 평활(exponential smoothing)을 사용하며, 이는 $\text{smooth_target} += (\text{raw_target} - \text{smooth_target}) \times a$ 로 정의된다. 여기서 a 는 smoothing factor로, 시스템의 반응성을 결정하는 핵심 매개변수이다. 반응성은 99% 수렴시간의 역수로 정의되며, $T_{99} = \log(100) / |\log(1-a)| \times \Delta t$ 로 계산된다.

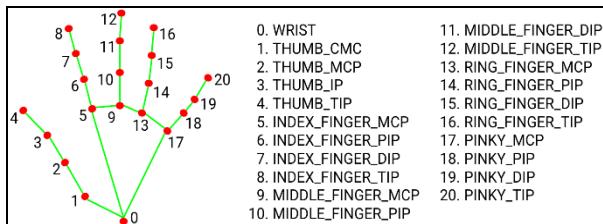


그림 3. Publisher - Subscriber 기반의 NUI 시스템 소프트웨어 구조

이러한 설계를 통해 SM1은 시스템 최대 반응성을, SM2는 그의 1/4, SM3는 1/16, SM4는 1/64, SM5는 1/256 수준의 반응성을 가지며, 연속된 레벨 간 비율이 정확히 0.25를 유지한다.

표 3. Level에 따른 Smoothing Factor (α)

Level	smoothing factor (α)
SM1	1.0
SM2	0.684
SM3	0.250
SM4	0.069
SM5	0.018

5. 결론

본 연구는 자율주행차 환경에서 물리적 이동성을 갖춘 편의장치 제어를 위한 제스처 기반 NUI 시스템을 설계하고 구현하였다. MediaPipe 기반 실시간 제스처 인식, ZeroMQ 메시징을 통한 모듈화 아키텍처, Weber-Fechner 법칙 기반 지수 평활 알고리즘을 통합하여 평균 80ms의 응답 지연시간과 30 FPS의 실시간 성능을 달성하였다. 시스템은 Natural Mapping과 Index Mapping이라는 두 가지 제스처 매핑 전략을 지원하며, 콘솔(1 DoF 선형), 디스플레이(1 DoF 회전), 에어 벤트(2 DoF 평면)의 서로 다른 물리적 특성을 가진 세 가지 편의장치를 성공적으로 제어한다. Natural Mapping은 물리적 조작과의 직관적 연결성을 제공하는 반면, Index Mapping은 시스템 일관성과 학습 용이성을 제공한다는 차별화된 설계 가치를 갖는다. 편의장치별 구현 특성을 살펴보면, 콘솔은 신체 중심에 가까운 배치와 1 차원 선형 움직임으로 직관적인 조작이 가능하며, 디스플레이에는 천장 고정 구조로 안정적인 회전 제어를 제공한다. 에어 벤트는 2 축 독립 제어로 복잡한 방향 조절이 가능하지만, 좌측 전방 배치로 인한 위치적 제약이 존재한다. 본 시스템은 기존 터치·음성 중심 인터페이스의 접근성 한계를 극복하고, 좌석 위치에 관계없이 모든 탑승자에게 동등한 제어권한을 제공하는 새로운 상호작용 패러다임을 제시한다. 또한, 확장 가능한 Publisher-Subscriber 아키텍처를 통해 향후 음성, 시선 추적 등 다른 입력 모달리티와의 통합 가능성을 제공한다. 향후 연구에서는 실제 차량 환경에서의 기술적 검증, 다양한 조명 조건 및 주행 상황에서의 강건성 테스트, 멀티모달 인터페이스 통합(제스처+음성, 제스처+시선), 그리고 ISO 26262 기능 안전 표준 준수를 위한 안전성 검증이 필요하다. 본 시스템은 자율주행차 UI/UX 설계의 새로운 방향을 제시하며, 향후 스마트 모빌리티 환경에서의 인간-기계 상호작용 연구에 기여할 것으로 기대된다.

사사의 글

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20015218)

참고 문헌

- SAE International. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor

- Vehicles. SAE Standard J3016_202104. 2021.
2. Frizziero, L., Galiè, G., Leon-Cardenas, C., De Santis, M., Losito, M. S. and Tomaiauolo, A. Design of a concept vehicle for future-oriented urban mobility using design-driven methodologies. *Heliyon*, 9(3). 2023.
 3. Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B. and Winner, H. Effects of autonomous driving on the vehicle concept. *Autonomous Driving*. Springer, 213–232. 2016.
 4. Pfleging, B., Sadeghian, S. and Dey, D. User interfaces for automated vehicles. *it-Information Technology*, 63(2), 73–75. 2021.
 5. Kwon, J. Y. and Ju, D. Y. Spatial components guidelines in a face-to-face seating arrangement for flexible layout of autonomous vehicles. *Electronics*, 10(10). 2021.
 6. Cai, Y., Anjani, S., Withey, D., Vledder, G., Song, Y. and Vink, P. Changes in non-driving-related activities from conditional to full automation and their implications for interior design: A systematic review and meta-analysis. *Applied Sciences*, 14(20). 2024.
 7. Ma, J., Li, J., Wang, W., Huang, H., Zhang, X. and Zhao, J. Exploring the impact of the passenger's display on driver workload and driving performance. *Applied Ergonomics*, 114. 2024.
 8. Liu, A. and Tan, H. Research on the trend of automotive user experience. *Int. Conf. Human-Computer Interaction*, 180–201. 2022.
 9. Manawadu, U. E., Kamezaki, M., Ishikawa, M., Kawano, T. and Sugano, S. A hand gesture based driver-vehicle interface to control lateral and longitudinal motions of an autonomous vehicle. *IEEE Int. Conf. Systems, Man, and Cybernetics*, 1785–1790. 2016.
 10. Vuletic, T., Duffy, A., Hay, L., McTeague, C., Campbell, G. and Grealy, M. Systematic literature review of hand gestures used in human computer interaction interfaces. *Int. J. Human-Computer Studies*, 129, 74–94. 2019.
 11. Xia, H., Glueck, M., Annett, M., Wang, M. and Wigdor, D. Iteratively designing gesture vocabularies: A survey and analysis of best practices in the HCI literature. *ACM Trans. Computer-Human Interaction*, 29(4). 2022.
 12. Lee, S., Choi, J., Lee, D. and Yu, H. Assessing quality of experience in connected vehicle environments using hand gestures and voice interactions. *Sensors*, 23(3775), 1–14. 2023.
 13. Choi, E., Kim, H. and Chung, M. K. A taxonomy and notation method for three-dimensional hand gestures. *Int. J. Industrial Ergonomics*, 44(1), 171–188. 2014.
 14. Pavlovic, V. I., Sharma, R. and Huang, T. S. Visual interpretation of hand gestures for human-computer interaction: A review. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(7), 677–695. 1997.
 15. Norman, D. A. *The Psychology of Everyday Things*. Basic Books. New York. 1988.
 16. Norman, D. A. Natural user interfaces are not natural. *Interactions*, 17(3), 6–10. 2010.
 17. Norman, D. A. *The Design of Everyday Things: Revised and Expanded Edition*. Doubleday. New York. 2013.
 18. Bradski, G. The OpenCV library. *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1–. 2000.
 19. Lugaressi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M. and Grundmann, M. Mediapipe: A framework for building perception pipelines. *arXiv:1906.08172*. 2019.
 20. Zhang, F., Bazarevsky, V., Vakunov, A., Tkachenka, A., Sung, G., Chang, C. L. and Grundmann, M. Mediapipe hands: On-device real-time hand tracking. *arXiv:2006.10214*. 2020.
 21. Hintjens, P. *ZeroMQ: Messaging for Many Applications*. O'Reilly Media. Sebastopol. 2013.