
인간이 신체 위에 가하는 압력 입력의 이해

팔의 세 부위에서 편안한 최대 힘 및 압력 입력 성능의 비교

Understanding how Humans Perform Pressure Input on the Body

김민서, Minseo Kim*, Aditya Shekhar Nittala**, 이재연, Jaeyeon Lee***

요약 본 논문은 UIST'25 에서 발표한 동 제목의 포스터 [1] 를 기반으로 작성되었다. 피부는 압력 기반 입력을 위한 표면으로 점점 더 널리 활용되고 있으나, 신체 부위에 따라 입력 성능이 달라진다. 본 연구는 해부학적 차이가 압력 입력에 어떠한 영향을 미치는지 조사하였다. 첫 번째 실험에서는 전완, 손등, 주먹결절에서 최대 편안한 힘을 측정하였다. 두 번째 실험에서는 타겟 크기와 부위가 입력 정확도 및 제어에 미치는 영향을 살펴보았다. 그 결과, 타겟이 클수록 과제의 난이도가 낮아졌으며, 주먹결절과 같이 뼈가 두드러진 부위가 전완과 같은 연조직 부위보다 더 안정적인 제어를 지원함을 확인하였다.

Abstract This paper is based on the paper presented at UIST Adjunct '25 [1]. The skin is an increasingly popular surface for pressure-based input, but input performance varies across different body locations. This study investigated how anatomical differences affect pressure interaction. In the first experiment, we measured the maximum comfortable force at the forearm, the back of the hand, and the knuckle. In the second experiment, we examined how target size and body location influence input accuracy and control. We found that larger targets reduced task difficulty, while bony areas, such as the knuckle, supported more stable control than soft tissue regions, such as the forearm.

핵심어: *On-skin interfaces, Pressure input, Self-haptics*

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구 결과임 (IITP-RS-2025-02214780, 유연소재 촉각 인터페이스에 대한 지능적 촉각 생성과 미세 반응 추론 기술).

*주저자 : UNIST 컴퓨터공학과 4학년

**공동저자 : University of Calgary Department of Computer Science 교수

***교신저자 : UNIST 컴퓨터공학과 교수; e-mail: jaeyeonlee@unist.ac.kr

1. 서론

HCI 분야에서 피부를 입력 표면으로 활용하는 연구는 점점 더 많은 관심을 받고 있으며 [2, 3], 피부 상호작용을 위해 터치, 탭, 압력입력 등 다양한 방식이 탐구되어 왔다. 이 가운데 사용자가 피부에 제어된 힘을 가하는 압력 기반 입력은 유망한 장점을 지니지만, 신체 전반에 걸쳐서는 아직 충분히 연구되지 않았다. 선행 연구에서 실현 가능성을 검토한 바 있으나 [4-6], 특히 해부학적 차이를 고려할 때 사용자가 가할 수 있는 최대의 편안한 힘에 대해서는 알려진 바가 거의 없다. 이러한 문제를 이해하기 위해 Kim et al. [7] 은 피부 압력 입력 시 신체 부위에 따른 최대 편안한 힘을 측정하고, 이를 기반으로 각 부위에서의 압력 입력 성능을 알아보았다. 실험 결과, 태스크 난이도에 따른 성능 차이가 있을 뿐, 신체 위치에 따른 차이를 볼 수 없었으나, 기존의 풋페달 기반 응답 제출 방식이 (1) 기존 연구에서 사용되는 dwell 기반 방식 [6] 에 비해 압력 입력 정확도를 크게 해했을 것, 그리고 (2) 신체 부위는 조직 구조와 기계수용체 분포가 서로 다르므로, 우리는 압력 수용 능력과 제어가 부위에 따라 달라질 것을 가정하고, 새로운 실험을 설계, 수행하였다. 본 연구는 다음 두 가지 연구 질문을 중심으로 한다.

RQ 1: 서로 다른 세 신체 부위에서 사용자가 가할 수 있는 최대 편안한 힘은 얼마인가?

RQ 2: 압력 입력 성능은 신체 부위와 타깃 스케일에 따라 어떻게 달라지는가?

2. 연구 방법

피부 인터페이스에 관한 선행 연구 [2, 3, 8-11] 에 근거하여 해부학적 및 촉각적 특성을 바탕으로 전완, 손등, 주먹결절의 세 신체 부위를 선정하였다. 전완에는 상완요골근 (brachioradialis) 과 척측수근굴근 (flexor carpi ulnaris) 같은 근육이 있어 안정적인 심부 압력을 지지한다. 손등은 배측 골간근 (dorsal interossei) 위에 위치하여 중간 정도의 강성과 압입 깊이를 제공한다. 주먹결절은 제 3 중수골 머리 (third metacarpa head) 에 위치한, 연조직이 거의 없는 뼈 부위로 날카로운 촉각 피드백을 가능하게 한다.

그림 1 (a)는 선정한 세가지 신체 부위를 보여준다. 변동성을 줄이기 위해 비우세 팔에서 타깃 지점을 표준화하였다. (1) 전완: 팔꿈치에서 5cm 아래, 손등과 수평으로 정렬된 지점. (2) 손등: 검지와 중지 사이 틈에서 1cm 아래 지점. (3) 주먹결절: 손등에 가장 가까운 중지 주먹결절의 중심. 모든 측정은 비우세 팔에서 이루어졌으며, 참가자는 우세손 검지손가락을 입력에 사용하였다.

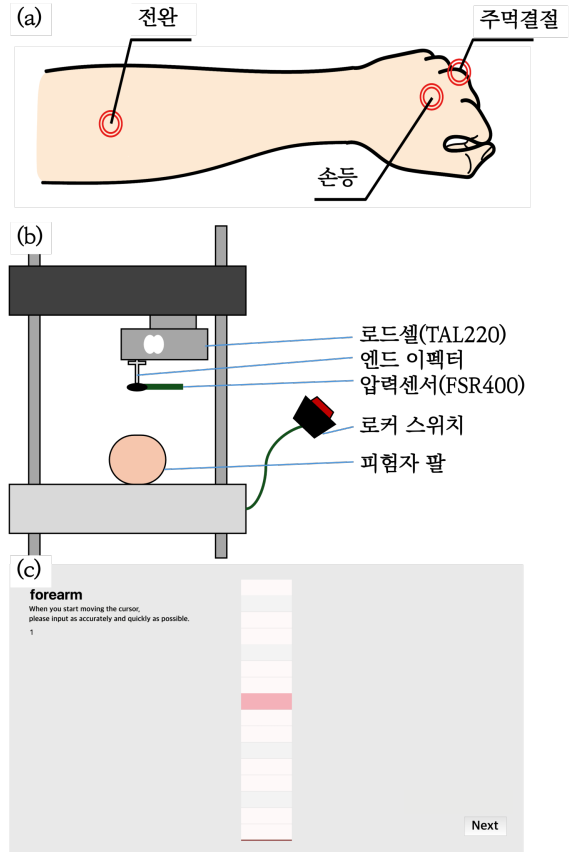


그림 1. (a) 실험 부위, (b) 실험 장치, (c) 실험 프로그램의 모습.

그림 1 (b)에 제시된 보정 장치는 기준값 측정용 로드셀 (TAL220) 과 압력센서 (FSR400) 로 구성되었다. 로거 스위치를 통해 사용자가 장치를 직접 제어할 수 있도록 하여, 실험자와의 의사소통 오류로 인한 문제를 방지하였다.

참가자 6명 (남 4명, 여 2명, 연령 19-25세, 전원 오른손잡이) 을 모집하였다. 모든 참가자에게는 보상이 지급되었다.

실험 1: 최대 편안한 힘 편안함의 역치는 개인마다 다르므로, 우리는 최대 편안한 힘을 불편함 또는 통증이 처음 느껴진 힘의 80%로 정의하였다. 데이터 수집에 앞서, 피부의 순응도와 탄성을 반영하기 위해 각 부위별로 FSR 값을 보정하였다. 참가자는 로거 스위치를 사용해 전동 센서를 타깃 영역으로 하강시켰고, 하강 버튼에서 손을 떼 뒤, 불편함이 느껴지면 상승 버튼을 눌렀다. 그 시점의 최대 힘을 기록하였고, 그 값의 80%를 최대 편안한 힘으로 설정하였다.

실험 2: 압력 입력 성능 그림 1 (c)와 같이, 참가자는 안정적인 앉은 자세를 유지한 채 표시된 각 부위에서 우세손 검지손가락으로 FSR 센서에 압력을 가하였다. 각 부위에서 참가자는 20회 시행으로 구성된 4개 블록 (총 80회) 을 수행하였으며, 이와 별도로 20회의 튜토리얼 시행이 있었다. 최종 데이터 셋에는 60회의 유효 시행 (스케일 당 20회) 이 포함되었다. 타깃 영역이 1초 동안 유지되면 확인 버튼을 작동시키는 자동

시스템을 사용하였으며, 그 작동 시각을 완료 시간으로 기록하였다. 완료로 인식이 되어야 다음 시행으로 진행하도록 하여, 참가자의 수행 정확도는 모두 100%이다. 참가자는 블록 사이에 2분 간 휴식하였고, 부위 간에는 더 긴 휴식을 취하였다. 각 부위를 마친 후에는 짧은 인터뷰와 NASA-TLX 설문을 진행하였다.

3. 결과

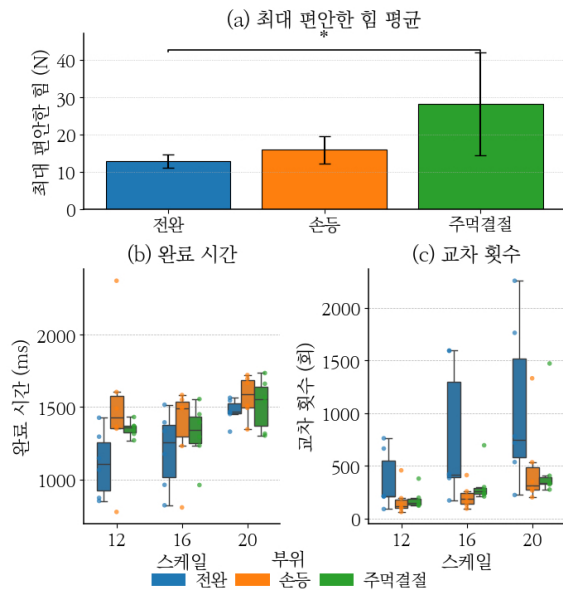


그림 2. 실험 결과

최대 편안한 힘 그림 2 (a)는 세 부위의 최대 편안한 힘의 평균을 표준편차 오차 막대와 함께 보여준다. 주먹결절 28.3 N, 손등 15.9 N, 전완 13.0 N이었다. 일원 반복측정 분산분석 결과 부위의 주효과가 유의하였으며 ($F(2,10) = 5.76, p = .014$), 사후 검정에서는 전완과 주먹결절 사이에 유의미한 차이가 나타났다 ($p = .041$). 이러한 결과는 주먹결절과 같은 뼈 부위가 구조적 강성과 낮은 조직 순응도로 인해 더 높은 편안 힘을 지지함을 시사한다. 이와 대조적으로, 전완의 연조직은 압력을 분산시켜 지각되는 편안함을 감소시킨다. 손등은 중간 정도의 값을 보였다. 이러한 변동성은 순응도와 민감도의 자연스러운 해부학적 차이를 반영하며, 이는 기존 고유수용성 연구들과 일치한다.

완료 시간 그림 2 (b)는 세 가지 타깃 스케일 (12, 16, 20)과 신체 부위별 과제 완료 시간을 보여준다. 완료 시간은 스케일이 커질수록 증가하였으며, 이는 선행 연구와 일치한다. 일원 반복측정 분산분석 결과 스케일의 주효과는 유의하였으나 ($p < .01$), 부위의 주효과는 유의하지 않았다. 다만 시각적 경향에서는 차이가 드러났다. 전완이 가장 빠른 시간과 가장 가파른 증가를 보여 정밀도에 대한 높은 민감성을 나타냈다

(전완 단독 ANOVA: $p = .025$). 손등과 주먹결절은 더 완만한 경향과 더 느린 시간을 보였는데, 이는 접촉이 덜 안정적이고 압력 피드백이 약한 데 따른 신중한 전략을 반영한 것으로 보인다. 전완에서는 빠른 입력을 지원했지만, 특히 작은 스케일에서 더 큰 변동성을 보여 일관되지 않은 제어를 시사하였다. 따라서 스케일이 난이도를 좌우한 반면, 신체 부위는 속도-정확도 트레이드오프에 영향을 미쳤다.

교차 횟수 그림 2 (c)는 스케일과 신체 부위별 타깃 교차 횟수를 보여준다. 일원 반복측정 분산분석 결과 스케일 ($p = .007$), 부위 ($p = 0.026$), 그리고 상호작용 ($p = .003$)의 효과가 모두 유의하였으며, 이는 과제 난이도와 해부학적 부위가 모두 입력 안정성에 영향을 미침을 나타낸다. 전완은 특히 큰 스케일에서 가장 많은 교차 횟수를 보였는데, 이는 잦은 보정을 요구하는 연조직 때문일 가능성이 높다. 이와 대조적으로 주먹결절과 손등은 교차 횟수가 더 적었다. 주먹결절의 단단한 표면은 힘의 직접적인 전달을 가능하게 하며, 손등은 전완보다 더 정밀한 피드백을 제공한다. 주먹결절과 마찬가지로, 순응도가 낮은 부위는 높은 과제 요구 상황에서 더 안정적인 입력을 지지한다.

주관적 작업부하 (NASA-TLX) 지각된 작업부하를 평가하기 위해 쌍대 가중 (pairwise-weighted) NASA-TLX를 실시하였다. 최종 점수는 27.78에서 61.11 사이 ($M = 41.85$)로, 중간 수준의 작업부하를 나타냈다. 노력, 수행, 신체적 요구도가 가장 빈번하게 높은 가중치를 받았으며, 이는 과제의 운동 정밀성과 지속적인 집중을 반영한다.

4. 결론

본 연구는 해부학적 구조가 압력 기반 입력에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. 전완은 더 빠르지만 덜 안정적인 입력을 가능하게 한 반면, 주먹결절은 더 느리지만 더 정밀한 제어를 지원하였다. 손등은 조직 순응도와 피드백에 의해 결정되는 중간 수준의 성능을 보였다. 타깃 스케일은 속도와 안정성에 강한 영향을 미쳤고, 신체 부위는 보정 행동에 영향을 주었다. 전완에서 나타난 높은 변동성은 연조직 역학에 대한 민감성을 시사한다. 본 연구는 세 부위에 한정되었으나, 향후 연구에서는 더 다양한 신체 부위와 자세를 탐구할 필요가 있다. 이러한 발견은 해부학적 정보를 반영한 피부 위 입력을 위한 적응형 보정과 멀티모달 웨어러블 인터페이스를 뒷받침한다.

참고문헌

- [1] KIM, Minseo; NITTALA, Aditya Shekhar; LEE, Jaeyeon. Understanding how Humans perform Pressure Input on the Body. In: Adjunct Proceedings of the 38th Annual ACM Symposium

- on User Interface Software and Technology. 2025. p. 1-3.
- [2] BERGSTROM-LEHTOVIRTA, Joanna; BORING, Sebastian; Hornbæk, Kasper. Placing and recalling virtual items on the skin. In: Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2017. p. 1497-1507.
- [3] WEIGEL, Martin; MEHTA, Vikram; STEIMLE, Jürgen. More than touch: understanding how people use skin as an input surface for mobile computing. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2014. p. 179-188.
- [4] FRUCHARD, Bruno, et al. Squish this: Force input on soft surfaces for visual targeting tasks. In: Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2021. p. 1-9.
- [5] STROHMEIER, Paul, et al. zPatch: Hybrid resistive/capacitive e-textile input. In: Proceedings of the twelfth international conference on tangible, embedded, and embodied interaction. 2018. p. 188-198.
- [6] WEIGEL, Martin; STEIMLE, Jürgen. Deformwear: Deformation input on tiny wearable devices. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2017, 1.2: 1-23.
- [7] 김지성, 백두산, NITTALA, Aditya Shekhar; 이재연. 자신의 피부를 누르는 힘을 입력으로 사용하는 인터페이스에서의 사용자 힘 입력 성능 이해. 한국 햅틱스 학술대회. 2024. p. 1-4.
- [8] NITTALA, Aditya Shekhar, et al. Like a second skin: Understanding how epidermal devices affect human tactile perception. In: Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2019. p. 1-16.
- [9] TRAN, Peter Khoa Duc, et al. Augmenting on-body touch input with tactile feedback through fingernail haptics. In: Proceedings of the 2023 CHI conference on human factors in computing systems. 2023. p. 1-13.
- [10] WEIGEL, Martin, et al. Skinmarks: Enabling interactions on body landmarks using conformal skin electronics. In: proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2017. p. 3095-3105.
- [11] YOON, Sang Ho, et al. HapSense: A soft haptic I/O device with uninterrupted dual functionalities of force sensing and vibrotactile actuation. In: Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. 2019. p. 949-961.