

다양한 누운 자세가 혼합현실(MR)에서의 3차원 조작 성능에 미치는 영향 분석*

이지원⁰¹, 고혁주⁰¹, 변은아⁰¹, 정유진², 정재엽², 오지연², 정진우^{1,2}

서울과학기술대학교 ¹산업공학과, ²데이터사이언스학과

orieeasy1@seoultech.ac.kr, stevenko0329@seoultech.ac.kr, hello124@seoultech.ac.kr,
yujin0331@seoultech.ac.kr, jaey.jeong@seoultech.ac.kr, jiyeon.oh@seoultech.ac.kr,
jinw.jeong@seoultech.ac.kr

Effects of Different Lying-Down Postures on 3D Manipulation Performance in Mixed Reality

LeeJiwon Lee⁰¹, Hyuk-ju Go⁰¹, Eun Byeong⁰¹, Yujin Jeong², Jaeyeop Jeong², Jiyeon Oh²,
Jin-Woo Jeong^{1,2},

¹Dept. of Industrial Engineering, ²Dept. of Data Science
Seoul National University of Science and Technology

요약

컴퓨팅 디바이스의 휴대성과 성능이 발전하면서, 사용자들은 더 이상 책상에 암매이지 않고 소파나 침대에 눕는 등 다양하고 편안한 자세에서 기기를 사용해 왔다. 혼합환경(MR) HMD(Head Mounted Display) 사용에서 있어서도 사용자들은 자연스럽게 소파나 침대에 눕는 등 기존의 편안한 기기 사용 습관을 그대로 이어가고 있다. 하지만 기존 HMD 사용에 대한 연구는 대부분 정자세(supine)만을 고려하여, 사용자가 옆으로 눕는 다양한 실제 사용 환경에 대한 이해는 부족한 실정이다. 본 연구는 다양한 누운 자세가 HMD 환경에서의 사용자 기본 조작 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다. 이를 위해, 정자세, 왼쪽으로 누운 자세, 오른쪽으로 누운 자세에서 사용자가 오른손만으로 Rotation, Translation, Fitts' Law의 세 가지 기본 과제를 수행하는 사용자 연구를 진행했다. 결과는 향후 사용자의 자세를 고려한 인터페이스 설계 및 자세 기반 상호작용 최적화 기술 개발에 필요한 기초 데이터로 활용될 것이다.

1. 서 론

컴퓨팅 디바이스는 고정된 데스크톱 환경에서 점차 모바일 및 웨어러블 기기로 진화해왔다. 이러한 변화는 사용자를 책상이라는 공간적 제약에서 벗어나, 소파나 침대 등 다양한 장소와 자세에서 자유롭게 디지털 콘텐츠와 상호작용할 수 있는 가능성을 열었다. 최근 이러한 흐름은 혼합현실(MR) HMD로 이어지고 있으며, 특히 현실 공간을 그대로 투과해 보여주는 패스스루(Passthrough) 기술은 MR HMD를 완전 몰입형 기기를 넘어 일상에서 자연스럽게 사용하는 도구로 변화시키고 있다. 그 결과, 사용자들

은 거실이나 침실과 같은 사적인 공간에서 편안히 누워 MR 콘텐츠를 소비하는 새로운 사용 사례를 만들어가고 있으며, 실제로 HMD는 이미 휴식 및 건강 관리 분야에서도 적극적으로 활용되고 있다 [1, 2].

사용자의 물리적 자세가 디지털 상호작용에 영향을 미친다는 것은 잘 알려진 원칙이다. VR 환경에서는 서 있는 자세와 앉은 자세가 몰입감이나 사이버 멀미 등에 다른 영향을 미친다는 점이 꾸준히 연구되어 왔다 [3]. 스마트 폰 연구에서는 한 걸음 더 나아가, 똑바로 눕는 자세와 옆으로 눕는 자세가 근육 피로도나 기기 파지(device holding) 안정성에 각기 다른 영향을 준다는 것이 밝혀졌다 [4]. 이는 눕는다는 상태가 단일한 개념으로 취급될 수 없음을 명확히 보여준다.

하지만 기존의 HMD 환경 연구는 대부분 누운 자세를 단일한 정자세(supine)로 간주하거나 [5], 정자세와 앉은 자세에서의 타이핑 및 포인팅 성능을 비교하는 수준에 그쳐 [6] 다양한 누운 자세에 대한 논의가 부족했다. 이에 본 연구는 선행 연구들이 다루지 않은 다양한 누운 자세(정자세, 측면 자세 등)가 사용자의 기본 상호작용 성능에 미치

* 0본 저자들은 이 연구에 동등하게 기여했습니다.

- 본 논문은 2025년도 정부 재원(과학기술정보통신부) 대학원생 공학연구팀제 지원사업)으로 과학기술정보통신부와 한국여성과학기술인육성재단의 지원을 받아 수행되었습니다.

- 본 논문은 한국 정부(과학기술정보통신부)의 지원을 받아 한국연구재단(NRF) 과제로 수행되었습니다.

는 영향을 체계적으로 정량 분석하고자 한다. 이를 통해 향후 자세 기반 상호작용 최적화 기술 개발에 필요한 실증적 데이터를 제공하는 것을 목표로 한다.

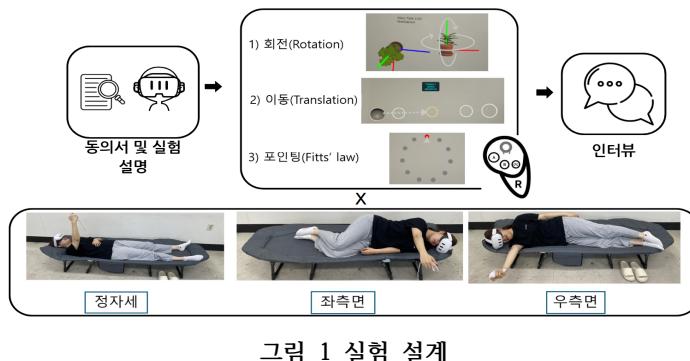


그림 1 실험 설계

2. 실험 방법

2.1. 실험 설계 및 절차

총 24명(여성 14, 남성 10; 평균 연령 22.54세)의 대학생이 MR HMD인 Meta Quest 3를 착용하고 실험에 참가했으며, 이 중 18명은 VR/MR 기기 사용 경험이 있었다. 또한, 참가자들은 하루 평균 스마트폰 사용 시간의 약 2.79시간을 누워서 사용한다고 보고하였으며, 누운 자세에서의 기기 사용이 매우 일상적임을 알수 있었다.

본 연구는 3가지 누운 자세(정자세, 좌측면, 우측면)가 3가지 조작 과제(3D 회전, 3D 이동, 3D Fitts' Law 포인팅) 수행에 미치는 영향을 분석하는 3×3 피험자 내 설계(within-subjects design)를 따랐다. 참가자는 연구 설명을 듣고 동의서를 작성한 뒤, 연습 세션을 통해 각 과제에 익숙해지는 시간을 제공했다. 본 실험에서는 총 9개의 블록(3개 자세 \times 3개 과제)을 수행했으며, 자세의 순서는 라틴 방격(Latin Square)으로 균형화하고 자세 내 과제 순서는 무작위화하였다. 전체 세션은 사후 인터뷰를 포함하여 약 90분이 소요되었다.

2.2 Task 설계

참가자는 오른손 컨트롤러를 사용하여 세 가지 과제를 수행했다. 모든 과제에서 조작 대상 및 목표물은 참가자의 머리 위치를 기준으로 약 49cm 전방에 고정되어 제시되었다. 각 과제의 구체적인 설계는 다음과 같다.

2.2.1 회전 (Rotation) 과제

이 과제는 Unity 2022.3.6.f1 버전으로 설계되었으며, 참가자는 조작 가능한 가상 객체를 목표 객체와 동일한 방향으로 회전시켜야 했다. 조작 객체의 방향이 목표와의 오차 허용 범위 내로 진입하면 성공으로 판정되었고, 자세마다 총 15회 시행되었다. 측정 지표로는 과제 완료 시간, 최종 각도 오차, 컨트롤러 누적 회전량 등이 측정되었다.

2.2.2 이동 (Translation) 과제

이 과제는 Unity 6000.2.0f1 버전으로 설계되었다. 참가자는 지정된 시작 지점에 생성되는 가상 구체(Sphere)를 고정된 목표 지점으로 이동시켜야 했다. 구체는 목표를 중

심으로 네 개의 다른 시작 지점에서 무작위로 나타났으며, 중심이 목표로부터 15cm 이내에 도달하면 성공으로 판정되었다. 자세마다 총 40회 시행이 반복되었고, 총 조작 시간, 컨트롤러 이동 거리, 성공 여부 등이 측정되었다.

2.2.3 포인팅 (Fitts' Law) 과제

이 과제는 Unity 6000.0.58f1 버전으로 설계된 링 형태의 포인팅 과제로, 참가자는 활성화된 목표 타겟으로 커서를 이동시킨 뒤 트리거 버튼을 눌러 선택해야 했다. 하나의 라운드는 6개의 다른 난이도 지수(ID)로 구성되었으며, 각 ID마다 11개의 타겟을 선택해야 했다. 총 3라운드를 수행했으며, 이동 시간, 머리 움직임, 처리율 등이 측정되었다.

3. 실험 결과

3.1 Task 결과

데이터 분석에 앞서, 모든 과제에서 수집된 데이터는 각 참가자별로 평균값을 중심으로 IQR(Interquartile Range) 기반의 이상치 제거를 진행했다. 본 분석에서는 평균값(M)만을 사용해서 자세별 성능 비교를 진행했다.

3.1.1 회전 (Rotation) 과제 결과

표 1 Rotation 측정 결과 (평균)

분석 지표	정자세	좌측면	우측면
과제 완료 시간 (s)	14.165	12.977	16.964
최종 각도 오차 (°)	19.03	18.73	18.469
컨트롤러 누적 회전량 (°)	861.295	769.891	917.038
물체 누적 회전량 (°)	604.279	535.939	653.509

과제 수행의 정확도를 나타내는 최종 각도 오차는 세 자세 간 평균 차이가 미미했다($M=18.47\sim19.03^{\circ}$). 하지만 [표 1]에서 보듯이 과제 수행 시간($M=12.98s$)과 컨트롤러 누적 회전량($M=769.89^{\circ}$)은 모두 좌측면 자세에서 가장 낮은 경향을 보였다. 이는 오른손잡이 사용자가 좌측면 자세에서 조작 효율성이 가장 높았을 가능성을 시사한다.

3.1.2 이동 (Translation) 과제 결과

표 2 Translation 측정 결과 (평균)

분석 지표	정자세	좌측면	우측면
총 조작 시간 (s)	0.979	1.001	1.004
대략적 이동 시간 (s)	0.398	0.421	0.385
재배치 시간 (s)	0.582	0.580	0.620
손 이동 거리 (m)	0.378	0.377	0.372
손 회전 각도 (°)	71.616	75.116	85.602
머리 이동 거리 (m)	0.071	0.061	0.072

분석 결과, [표 2]에서처럼 총 조작 시간과 손 이동 거리는 세 자세 간 평균값의 차이가 근소했다. 하지만 손 회전 각도는 정자세($M=71.62^\circ$) 대비 우측면 자세($M=85.60^\circ$)에서 증가하는 경향을 보였으며, 머리 이동 거리 또한 우측면 자세($M=0.76m$)에서 다른 자세(정자세 $M=0.07m$, 좌측면 $M=0.06m$) 대비 가장 높게 나타났다. 이는 유사한 성능을 위해, 우측면 자세에서 더 많은 보상적 움직임이 요구되었을 가능성을 시사한다.

3.1.3 포인팅 (Fitts' Law) 과제 결과

표 3 Fitts' Law 측정 결과 (평균)

분석 지표	정자세	좌측면	우측면
움직임 시간 (ms)	1257.98	1212.26	1374.34
머리 움직임 (cm)	1.32	1.21	1.23
처리율 (bits/s)	3.39	3.55	3.15

분석 결과는 [표 3]과 같다. 좌측면 자세는 평균 움직임 시간($M=1212.26ms$)과 머리 움직임($M=1.21cm$) 모두 가장 낮았으며, 처리율($M=3.55 \text{ bits/s}$)은 가장 높아 가장 효율적이고 안정적인 경향을 보였다. 반면, 우측면 자세는 움직임 시간($M=1374.34ms$)이 가장 길고 처리율($M=3.15 \text{ bits/s}$)이 가장 낮아 가장 비효율적인 경향이 관찰되었다. 이는 자세가 포인팅 과제의 속도와 효율성에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

3.2 인터뷰 주제 분석

참가자들의 심층 인터뷰 데이터에 대해 세 명의 코더는 각각 LLM(GPT-4o, Gemini, Claude)을 활용하여 주제 분석(Thematic Analysis)을 수행했으며, 코더 간 신뢰도 (Cohen's Kappa)는 $\kappa=0.75$ 로 높은 일치도를 보였다. 분석 결과, 참가자 경험의 핵심을 요약하는 5개의 주요 주제가 최종적으로 도출되었다: (1) 자세에 따른 신체적·인체공학적 경험, (2) 과업 수행 및 상호작용 전략, (3) 주관적 경험 및 선호도, (4) HMD와 스마트폰의 비교 경험, (5) 미래 수용성을 위한 제언.

분석의 핵심적인 발견은 자세에 따른 신체적 편안함과 조작 효율성 간의 명확한 상충 관계(trade-off)였다. 많은 참가자들은 특정 자세가 신체적으로는 편안하지만, 오히려 조작을 더 어렵게 만든다고 일관적으로 보고했다.

"오른쪽 자세는 팔이 받쳐져 피로감은 덜했지만, 활동 반경이 좁아지는 단점이 있었다." (P13)

반면, 조작 자체는 용이했던 자세가 신체적으로는 덜 편하다는 의견도 있었다. 이는 사용자의 최적 자세가 과제와 상황에 따라 달라질 수 있음을 의미한다.

"왼쪽 자세는 팔이 자유로워 조작은 편했지만, 계속 들고 있느라 피로감이 많이 누적되었다." (P9)

4. 결론 및 향후 연구

가 아니며, 자세별 물리적 제약이 사용자의 상호작용 전략과 성능에 차이를 유발할 수 있음을 보인다. 평균값 분석 결과, 각 자세별 차별화된 경향이 과제 전반에서 관찰되었다. 예를 들어, 이동 과제에서는 우측면 자세가 더 많은 보상적 움직임을 요구하는 경향을 보였으며, 회전 및 포인팅 과제에서는 좌측면 자세가 효율성에서 우위를 보이는 경향이 나타났다. 이러한 정량적 경향은 참가자들이 심층 인터뷰에서 일괄적으로 답한 신체적 편안함과 조작 효율성 간의 상충 관계와도 일치하는 경향을 보였다. 결론적으로, 본 연구는 사용자의 자세가 물리적 제약 조건을 나타내는 중요한 단서가 될 수 있음을 보였다.

향후 연구는 본 연구에서 관찰된 경향성을 통계적으로 검증하기 위해 유의성 분석(ANOVA 등)을 수행하고, 이를 바탕으로 사용자의 자세를 인지하여 UI 위치나 입력 방식을 최적화하는 자세 적응형 인터페이스 개발로 나아가야 할 것이다. 또한, 반쯤 기대거나 엎드린 자세 등 연구 범위를 다양한 실제 사용 환경으로 확장하여, 어떤 자세에서든 최적의 경험을 제공하는 차세대 MR 인터페이스의 토대를 마련해야 할 것이다.

5. 참고 문헌

- [1] Lee, Soon Young, and Jiyeon Kang. "Effect of virtual reality meditation on sleep quality of intensive care unit patients: a randomised controlled trial." *Intensive and Critical Care Nursing* (2020).
- [2] van Gemert, Thomas, et al. "Towards a Bedder Future: A Study of Using Virtual Reality while Lying Down." *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2023.
- [3] Koeshandika, Eldiaz Salman, Hironori Ishikawa, and Hiroyuki Manabe. "Effects of Different Postures on User Experience in Virtual Reality." *International Conference on Human-Computer Interaction*. 2023.
- [4] Fu, Guo, et al. "Effects of lying posture and task type on muscle fatigue, visual fatigue, and discomfort while using a smartphone on the bed." *Work* 76.2 (2023).
- [5] Marengo, Julien, Phil Lopes, and Ronan Boulic. "On the Influence of the Supine Posture on Simulation Sickness in Virtual Reality." *2019 IEEE Conference on Games (CoG)*. 2019.
- [6] Ma, Shanpeng, and Fabrice Matulic. "Typing and Pointing in Virtual Reality while Lying Down." *Proceedings of the Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2025.