

가상환경 동작 시나리오에 따른 Vive Tracker 비교

최현빈*, 유선진**

Comparison by Vive Tracker Model According to Virtual Environment Behavior Scenario

HuynBin Choi*, Sunjin Yu**

이 논문은 2023-2024년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임

요 약

모션 트래커는 가상현실 콘텐츠 제작 등 다양한 산업 분야에서 중요한 도구로 활용되지만, 상용 모델 간 성능 차이와 사용자 경험을 비교한 연구는 부족하다. 본 연구는 HTC Vive Tracker 2.0, 3.0, Ultimate 모델의 성능과 사용자 경험을 환경 조건에 따라 비교하였다. 3m × 3m 크기의 실내 환경에서 응답 속도와 데이터 누락을 측정하고, 사용자 설문을 통해 움직임 정확성, 반응 속도, 안정성, 피로감을 평가하였다. 실험 결과, Vive Tracker Ultimate는 평균 9.2ms의 응답 속도로 가장 우수한 성능을 보였으며, 복잡한 환경에서도 안정적으로 작동하였다. 반면, 2.0과 3.0 모델은 장애물 환경에서 데이터 누락이 빈번하였고, 3.0 모델은 비용 대비 성능이 우수하여 일반적인 VR 콘텐츠에 적합한 대안으로 평가되었다.

Abstract

Motion trackers are used as important tools in various industries such as virtual reality content production, but studies comparing performance differences and user experiences between commercial models are insufficient. This study compared the performance and user experience of the HTC Vive Tracker 2.0, 3.0, and Ultimate models according to environmental conditions. Response speed and data omission were measured in an indoor environment with a size of 3m x 3m, and movement accuracy, response speed, stability, and fatigue were evaluated through a user survey. As a result of the experiment, the Vive Tracker Ultimate showed the best performance with an average response speed of 9.2ms and operated stably even in complex environments. On the other hand, the 2.0 and 3.0 models frequently missed data in obstacle environments, and the 3.0 model was evaluated as an alternative suitable for general VR content because of its excellent cost-effectiveness.

Keywords

vive tracker, response speed, virtual reality, user experience, metaverse, Real-virtual fusion

* 국립창원대학교 문화융합기술협동과정 석사과정
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4300-5859>
** 국립창원대학교 문화테크노학과 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9292-4099>

• Received: Dec. 30, 2024, Revised: Jan. 17, 2025, Accepted: Jan. 20, 2025
• Corresponding Author: Sunjin Yu
Dept. of Culture Technology, Changwon National University, 20
Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do,
51140, Korea
Tel.: +82-55-213-3098, Email: sjyu@changwon.ac.kr

1. 서론

모션캡처(Motion capture) 기술은 인간의 움직임을 정밀하게 기록하고 이를 디지털 데이터로 변환하는 중요한 기술로 다양한 산업에서 활용되고 있다[1][2]. 게임, 영화, VR/AR 콘텐츠 제작뿐만 아니라 스포츠 분석, 의료 재활 등 정밀한 신체 데이터가 필요한 분야에서도 모션캡처 기술의 응용은 점점 확대되어 가고 있다[2]. 특히, 실시간 모션캡처는 사용자의 움직임을 즉각적으로 반영할 수 있어 몰입감과 상호작용을 극대화할 수 있는 핵심 기술로서 주목받고 있다[3].

전통적으로 모션캡처 시스템은 광학식(Optical)과 비광학식(Non-optical)으로 나뉘며, 각 방식은 장단점을 가지고 있다. 광학식 시스템은 카메라와 마커를 활용해 정밀한 데이터를 제공하지만 높은 비용과 환경적 제약이 따르며, 비광학식 시스템인 관성 측정 장치(IMU) 기반의 트래커는 상대적으로 저렴하고 다양한 환경에서의 활용이 가능하다는 장점이 있다[4]. 특히, 최근에는 IMU 기반의 실시간 트래킹 기술이 발전함에 따라 Vive Tracker와 같은 상용 트래커가 주목받고 있으며, 게임 개발과 연구 환경에서 널리 사용되고 있다.

Vive Tracker는 HTC에서 개발한 장치로, VR 환경에서의 오브젝트 트래킹 및 신체 모션 추적을 위해 설계되었다. Vive Tracker는 비교적 저렴한 비용, 쉬운 접근성, 설치의 간편함 등으로 학술 연구 및 상업적 목적으로 많이 활용되고 있다[4]. 그러나 동일한 Vive Tracker 라인업 내에서도 모델별(2.0, 3.0, Ultimate)의 성능 차이가 존재할 가능성이 있으며, 이는 실험 환경이나 사용 목적에 따라 중요한 영향을 미칠 수 있다. 특히, 데이터의 정확성, 응답 속도, 지터(진동)의 정도 등은 사용자 경험과 직결되기 때문에 이러한 요소들에 대한 세부적인 비교 분석이 필요하다[5].

기존 연구들에서는 특정 모션캡처 장치의 성능 평가나 단일 모델에 대한 데이터 분석이 주를 이루었으며, 모델 간 비교 분석에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 또한 대부분의 연구는 실험 환경이 제한적이며, 실제 사용자가 경험하는 체감적 성능을 충분히 반영하지 못하는 경우가

많다. 따라서 Vive Tracker 모델별(2.0, 3.0, Ultimate)로 다양한 환경과 동작 시나리오를 설정하여 실험을 진행하고, 체계적으로 데이터를 분석하는 연구가 필요하다.

본 연구는 HTC Vive Tracker의 2.0, 3.0, Ultimate 모델을 비교하여, 각 모델의 응답 속도, 환경 조건에서의 성능 및 사용자 경험을 체계적으로 분석하였다. Vive Tracker 라인업 내 모델별 성능 차이가 이미 알려져 있지만, 본 연구는 이를 실제 사용자 환경에서 정량적·정성적으로 평가함으로써 각 모델의 응용 가능성과 특정 환경에 적합한 활용 방안을 제시하는 데 목적이 있다. 이를 통해 기존 스펙 비교를 넘어, 사용자 경험과 산업적 응용 가능성을 반영한 실질적인 데이터를 제공하고자 하였다. 이를 통해 상용화된 제품이 실제 사용자 환경에서 어떻게 작동하는지 평가하고, 특정 사용 목적에 따라 적합한 모델을 제안하였다. 상용 제품의 성능은 일반적으로 개발사가 제공하는 스펙 문서를 통해 확인할 수 있지만, 본 연구는 실제 환경에서 발생하는 성능 차이와 사용자 경험에 초점을 맞추어 공학적 응용 가능성을 탐구한 데 의의를 둔다. 또한, 본 연구의 결과를 기반으로 차후 연구에서는 특정 환경(예: 장애물이 존재하는 복잡한 환경)에서의 모션 캡처 및 모션 트래킹 기술 활용 방안을 제안하고, 이러한 환경에서의 트래커 성능을 더욱 심층적으로 분석하여 실질적인 기술 응용 방안을 도출할 계획이다.

본 연구의 결과는 트래커 시스템을 연구하거나 활용하고자 하는 사용자들에게 적절한 트래커 모델을 선택할 수 있는 실질적인 지침을 제공하며, 나아가 트래커 데이터의 질적 개선에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 다양한 산업 분야에서 더욱 정밀하고 정밀하고 안정적인 트래커 시스템 구현과 실시간 상호작용 기술 발전을 위한 기초 자료를 제공하는 것을 목표로 한다.

II. 관련 연구

2.1 트래커를 성능 평가 연구

모션 트래킹 기술은 가상 현실의 몰입감과 사용

자 경험을 크게 향상시키기 때문에 다양한 연구가 진행되어 왔다. 특히, VR에서의 추적 기술은 응답 속도와 정확도가 중요한 요소로 간주된다. Vive Tracker와 같은 상업용 모션 트래커에 대한 연구는 이러한 요소를 중점적으로 분석하고 있다.

G. Byeon et al.[6]은 Vive 트래커와 3D 프린팅 기술을 결합하여 VR 핸드 툴 사고 방지 콘텐츠를 개발하고 성능을 평가하였다. 연구에서는 Vive 트래커의 정확한 위치 추적을 통해 VR 환경에서 핸드 툴 사용자의 움직임을 정밀하게 재현하였으며, 이를 활용하여 사고 예방 교육의 실효성을 높였다.

J. Kulozik and N. Jarrassé[7]는 다양한 환경 조건(조명 변화 및 장애물 유무)에서 Vive Ultimate 트래커의 정확도를 평가하였다. 연구 결과, Ultimate 모델은 로봇 및 인간의 움직임 모두에서 뛰어난 위치 추적 정밀도를 보였으며, 기존 모델보다 환경 변화에 강한 내구성을 보여주었다.

S. Merker et al.[8]은 Vive Tracker 3.0과 Vicon 시스템의 정확도를 비교하였다. 연구 결과, Vive 트래커는 Vicon과 비교하여 상대적으로 저렴한 비용에도 불구하고 높은 위치 정확도를 제공하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 VR 콘텐츠 개발 및 상업적 응용에 있어 Vive 트래커가 실용적 대안이 될 수 있음을 시사하였다.

J. Lwowski et al.[9]은 HTC Vive 트래커의 실내 위치 추적 정확도를 평가하였다. 연구 결과, Vive 트래커는 실내 환경에서 높은 정밀도의 위치 데이터를 제공하였으며, 다양한 실험 조건에서도 안정적인 성능을 유지하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 기존의 성능 평가 연구를 기반으로 Vive Tracker 모델 간 성능 비교를 진행하며, 추가적으로 사용자 평가를 통해 트래커 사용 과정에서의 착용감, 피로도, 반응 속도 체감 등 체험적 요소를 종합적으로 분석한다. 이를 통해 기술적 성능과 더불어 사용자 경험(User experience)을 반영한 실질적인 평가를 수행하고자 한다. 사용자 평가는 리커트 척도와 개방형 질문을 활용하여 진행되며, 이를 통해 각 트래커 모델의 강점과 개선점을 도출할 예정이다.

III. Vive Tracker 비교 실험 환경 구성

연구에 사용된 트래커는 그림 1과 같이 Vive Tracker 2.0, 3.0, Ultimate가 사용되었으며 모델 간의 성능을 비교하기 위해 실험 환경을 설계하고, 다양한 조건에서 실험을 수행하였다. 성능 비교 항목은 응답 속도(Latency), 환경 조건(Environmental Conditions), 그리고 사용 편의성(User convenience)으로 나누어 평가하였다. 각 모델의 주요 사양은 다음과 같다. Vive Tracker 2.0은 베이스 스테이션 기반 트래킹 방식을 사용하며, 60Hz의 트래킹 주파수와 약 90g의 무게를 갖추고 있다. 배터리 수명은 약 5시간으로, 단순한 환경에서 안정적으로 작동하지만, 장애물 환경에서 데이터 누락이 빈번하게 발생하는 한계가 있다.

Vive Tracker 3.0은 개선된 베이스 스테이션 트래킹 방식을 사용하며, 75Hz의 트래킹 주파수와 약 85g의 경량화된 설계를 제공한다. 배터리 수명은 약 7시간으로, 2.0 모델 대비 성능과 사용 시간이 개선되었다.

Vive Tracker Ultimate는 독립형 트래킹 방식을 채택하여 베이스 스테이션 의존성을 제거하였으며, 120Hz의 높은 트래킹 주파수와 약 80g의 경량 설계를 갖추고 있다. 또한, 비전 트래킹 기술과 IMU 센서를 통해 복잡한 환경에서도 데이터 누락 없이 안정적으로 작동할 수 있다.



그림 1. Vive tracker 3종
Fig. 1. Three types of vive tracker

실험 환경은 그림 2와 같다. 본 연구는 3m x 3m 크기의 실내 공간에서 장애물(책상, 의자 등)과 조명 조건(밝은 환경, 어두운 환경)을 조절하여 실험을 진행하였다.



그림 2. 실험 환경
Fig. 2. Experimental environment

실험에 사용된 컴퓨터는 Windows 10 운영체제를 기반으로, Intel Core i7-9700K 프로세서, 16GB RAM, NVIDIA GeForce RTX 3060 GPU를 탑재하였다. 이러한 사양은 Unity 엔진에서 Vive Tracker 데이터를 실시간으로 처리하고, 응답 속도 및 데이터 누락 측정을 안정적으로 수행하기에 충분한 성능을 제공하였다. 또한, Vive Tracker의 동작 데이터를 기록하고 분석하기 위해 USB 3.0 인터페이스를 활용하였으며, 높은 데이터 전송 속도를 유지하였다.

응답 속도(Latency) 측정은 그림3과 같이 진행되었다. 각 트래커 모델을 사용자가 특정 위치로 이동시키는 동작을 반복적으로 수행하게 하고, 이때 시스템이 해당 동작을 반영하는 데 걸리는 시간을 Unity에서 기록하였다. 데이터를 프레임 단위로 수집하고, 동일한 동작을 1인당 5회 반복하여(Vive Tracker가 부착된 물체를 들고 2m 전방으로 이동 후 180도 돌아 원래 위치로 2m 이동) 평균 응답 시간을 계산하였다. 이를 통해 각 트래커 모델의 움직임 반영 속도와 실시간 성능을 비교 분석하였다.

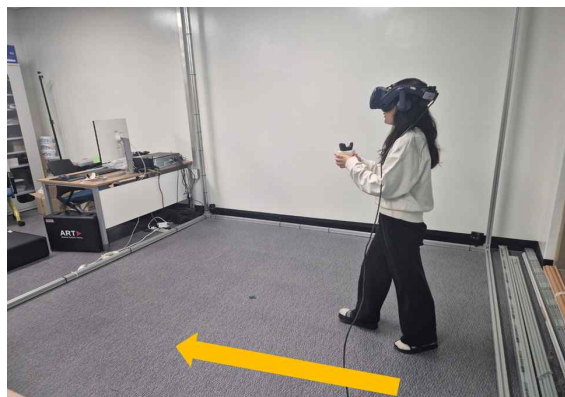


그림 3. 응답 속도 실험 환경
Fig. 3. Response for speed experiment environment

환경 조건(Environmental Conditions)에 따른 성능 평가는 그림 4와 같이 장애물 유무에 따라 수행되었다. 실험자는 동일한 동작을 두 가지 환경(장애물 있는 환경, 장애물 없는 환경)에서 반복하였으며, 트래커의 데이터 누락, 지연, 정확도 감소 여부를 관찰하였다. 이를 통해 각 트래커 모델이 환경 변화에 얼마나 민감하게 반응하는지를 분석하였다.



그림 4. 환경 조건 실험
Fig. 4. Environmental conditions experiment

사용 편의성 평가는 가상환경 체험 후 사용자 설문문을 통해 진행되었다. 실험 참여자들은 각 Vive Tracker 모델을 착용한 상태에서 설정된 동작을 수행하고, 착용감, 무게, 설정의 용이성, 피로도 등을 평가하였다. 설문문은 리커트 척도를 활용하여 각 항목에 대한 체감적 경험을 점수화하도록 하였으며, 추가적으로 개방형 질문을 통해 가장 만족스러웠던 트래커와 그 이유, 개선이 필요한 부분에 대한 의견을 작성하도록 하였다.

설문 항목은 다음과 같이 구성되었다. 첫째, 정확도는 트래커가 사용자의 움직임을 얼마나 정확하게 반영하는지를 평가하는 항목으로, 가상환경 내 동작의 일치 정도를 중심으로 점수를 매기도록 하였다. 둘째, 반응 속도는 움직임이 실시간으로 반영되는 속도의 적절성을 평가하였으며, 즉각적인 반응 속도는 사용자 몰입감에 중요한 요소로 다뤄졌다. 셋째, 지터 체감은 가상환경 내 물체의 미세한 흔들림이나 진동의 체감 정도를 평가하였으며, 이는 트래커의 정밀도와 직결되는 항목이었다. 마지막으로 피로도는 트래커를 착용한 상태에서 동작을 반복 수행하면서 시간이 지남에 따라 발생하는 신체적 피로감을 평가하였다.

실험에는 총 30명의 참여자가 참여하였으며, 연령대별로 10대 10명, 대학생 14명, 30~40대 성인 6명으로 구성하였다. 이는 가상현실 콘텐츠 및 기술 사용 경험이 다양한 사용자 그룹을 대표하기 위한 목적에서 선정된 것이다. 참여자 구성은 연령뿐 아니라 성별(남성 16명, 여성 14명), 직업(학생 24명, 사무직 4명, 자영업 2명), 학력 수준(고등학교 졸업 10명, 대학교 재학/졸업 14명, 대학원 재학/졸업 6명), 그리고 VR 사용 경험 여부를 기준으로 나누어 진행되었다. VR 사용 경험자와 비경험자를 각각 절반(15명씩)으로 구성하여, 사용 숙련도에 따른 결과의 편향성을 최소화하고 객관성을 확보하고자 하였다. 참여자들은 각 트래커 모델에 대한 동작 체험과 설문을 완료하였으며, 이를 통해 기술적 성능뿐만 아니라 사용자 경험(User Experience)을 정성적 및 정량적으로 종합 평가할 수 있도록 설계되었다

이와 같은 실험 설계를 통해 Vive Tracker 모델 간의 성능 차이와 사용자 경험을 체계적으로 비교 분석하고, 각 모델의 특성 및 한계를 명확히 규명하는 데 중점을 두었다.

IV. 실험 결과

본 연구에서는 Unity 환경에서 Vive Tracker 2.0, 3.0, Ultimate 모델 간의 성능을 비교하기 위해 응답 속도(Latency)를 측정하였고 각 실험에서 동작이 입력되고 시스템이 이를 인식하는 시간 차이를 ms 단위로 기록하였으며, 5회 측정한 값을 평균하여 최종 수치를 도출하였다. 결과는 표 1과 같다. 실험 결과, Vive Tracker 2.0의 평균 응답 속도는 18.5ms(± 0.8)로 가장 느린 것으로 나타났다.

표 1. 응답 속도 비교

Table 1. Response speed comparison

model	Latency (ms)
Vive tracker 2.0	18.5 \pm 0.8
Vive tracker 3.0	11.8 \pm 0.6
Ultimate tracker	9.2 \pm 0.5

반면, Vive Tracker 3.0은 평균 11.8ms(± 0.6)로 2.0 모델에 비해 약 36% 개선된 결과를 보였다. Ultimate 모델은 평균 9.2ms(± 0.5)로 가장 빠른 응답 속도를 기록하였으며, 2.0 모델에 비해 약 50% 이상, 3.0 모델에 비해 약 22% 더 빠른 성능을 나타냈다.

본 연구의 모든 실험은 동일한 조건의 실내 환경에서 진행되었으며, 3m x 3m 크기의 공간에서 장애물(책상, 의자 등)을 배치하고 조명 조건(밝은 환경, 어두운 환경)을 조절하여 진행되었다. 이러한 환경은 가상현실 및 모션 캡처 시스템의 일반적인 사용 환경을 모사한 것으로, 실험 결과는 동일한 공간과 조건에서 수행된 데이터를 기반으로 도출되었다.

이와 같은 결과는 Unity 환경에서의 실시간 데이터 처리를 기반으로 도출되었으며, Vive Tracker 모델 간 하드웨어와 소프트웨어 기술 발전에 기인하는 것으로 분석된다. Vive Tracker Ultimate 모델은 독립형 트래킹 방식과 추가적인 센서 기술을 활용하여, 장애물 및 조명 변화가 포함된 환경에서도 안정적인 데이터를 제공한 결과를 보였다. 반면, Vive Tracker 2.0과 3.0 모델은 베이스 스테이션 기반의 트래킹 방식을 사용함에 따라 장애물이 있는 상황에서 데이터 누락이 관찰되었으며, 이는 사용 환경에 따른 성능 차이를 유발한 요인 중 하나였다. 이러한 결과는 동일한 실험 조건에서도 모델별 설계와 기술적 차이가 성능에 미치는 영향을 확인할 수 있음을 보여준다.

실험 결과, Vive Tracker Ultimate 모델은 최신 IMU 센서를 탑재하고 데이터 처리 알고리즘을 최적화하여 움직임보다 빠르게 감지하고 반영할 수 있었다. 또한, 개선된 무선 통신 기술을 적용해 Unity 엔진에서의 데이터 전송 지연을 최소화하였다.

응답 속도의 차이는 사용자 경험에도 직접적인 영향을 미쳤다. 추가적으로 수행된 사용자 평가에서는 Ultimate 모델이 가장 높은 만족도를 기록하였다. 참여자들은 Unity 환경에서의 실시간 상호작용이 더욱 자연스럽게 즉각적으로 반영된다고 평가하였으며, Ultimate 모델의 빠른 반응 속도가 몰입감 있는 사용자 경험을 제공한다고 응답하였다.

반면, 2.0 모델은 응답 지연이 체감되어 일부 참여자들이 동작이 "부자연스럽고 불편하다"고 평가하였다.

장애물 유무에 따른 Vive Tracker 모델 간 성능 차이를 분석은 장애물로 인해 트래커 신호가 손실된 횟수를 기록한 후, 모든 참여자의 결과를 종합하여 평균을 계산하였다. 결과적으로, Vive Tracker 2.0과 3.0 모델은 베이스 스테이션과의 신호를 기반으로 작동하기 때문에 책상과 의자와 같은 장애물을 피해서 목표 지점까지 이동하는 과정에서 5~9회 정도의 데이터 누락이 발생하였다. 이는 베이스 스테이션의 신호가 장애물에 가려지거나 사용자의 움직임에 따라 트래커가 베이스 스테이션에 가려지는 상황에서 수신율이 저하되었기 때문으로 분석된다.

반면, Ultimate 모델은 베이스 스테이션이 불필요한 독립형 트래커로, 내장 카메라와 비전 트래킹 기술을 통해 실내 환경에서도 안정적으로 움직임을 감지하였다. 그 결과, 데이터 누락이 거의 없거나 최대 1회 정도만 발생하였다. Ultimate은 베이스 스테이션의 시야와 관계없이 독립적으로 작동하기 때문에 장애물의 영향을 최소화하며, 복잡한 환경에서도 안정적인 트래킹 성능을 제공하였다.

이러한 결과는 Vive Tracker Ultimate가 환경 변화와 장애물에 강한 내구성과 신뢰성을 갖추고 있으며, 베이스 스테이션 의존성을 제거함으로써 더 유연하고 안정적인 실험 환경을 제공한다는 점을 입증한다. 반면, Vive Tracker 2.0과 3.0은 베이스 스테이션 기반의 트래킹 방식을 사용하기 때문에 물체가 시야를 가리는 환경에서는 상대적으로 성능이 저하되는 한계가 나타났다. 종합적으로, 환경 변화에 민감한 작업이나 제약이 많은 공간에서의 사용을 고려할 때 Ultimate는 가장 적합한 선택으로 평가된다.

마지막으로 사용성 평가 결과는 그림 5와 같다.

첫 번째 질문인 “트래커가 움직임을 정확하게 추적한다고 느꼈나요?”에 대한 결과로 Vive Tracker 2.0은 3점이 17명(57%)으로 가장 많았으며, 2점이 6명(20%), 4점이 4명(13%), 1점이 3명(10%)으로 나타났다. 이는 사용자들이 대체로 중간 정도의 정확도를 체감했으나 일부 사용자는 불만족을 나타냈다. Vive Tracker 3.0의 경우 3점이 21명(70%)으로 다수를 차지했지만, 4점이 3명(10%), 5점이 1명(3%)으로 나타나 정확도 면에서 약간 개선된 성능을 보여주었다.

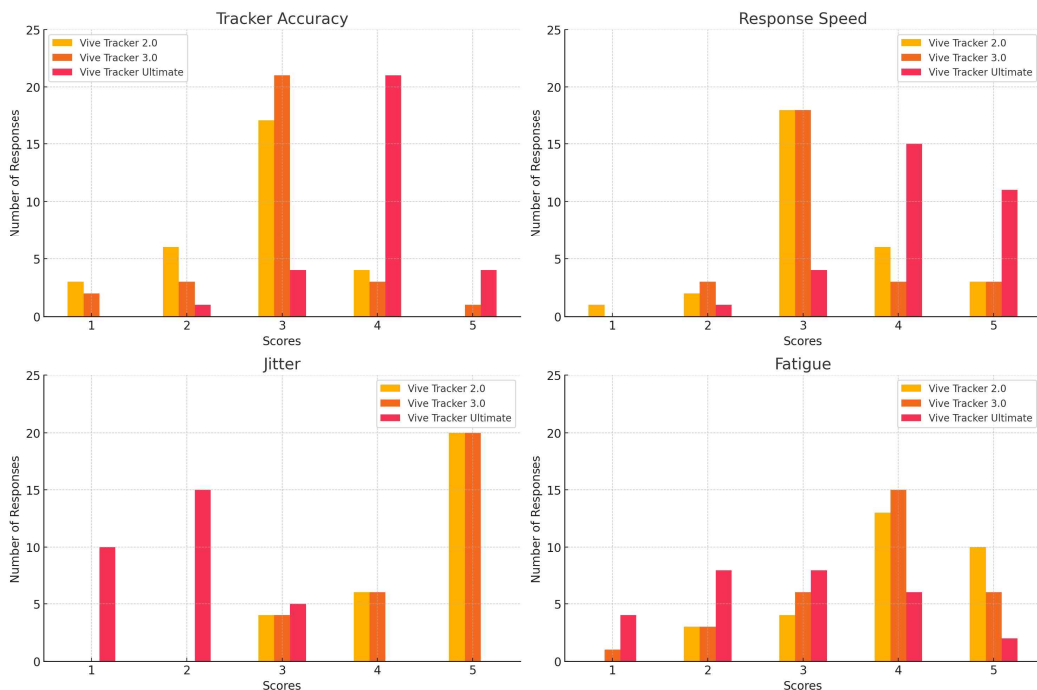


그림 5. 사용성 평가 그래프

Fig. 5. Usability evaluation graph

반면 Vive Tracker Ultimate는 4점이 21명(70%), 5점이 4명(13%)으로 대부분의 사용자가 높은 정확도에 만족했으며, 3점 이하의 점수는 극히 적어 움직임 추적 정확도에서 가장 우수한 평가를 받았다.

두 번째 질문인 “움직임이 반영되는 속도는 적절했나요?”에서는 Vive Tracker 2.0이 3점이 18명(60%)으로 가장 많았고, 4점이 6명(20%), 5점이 3명(10%)에 불과했다. 특히 1점과 2점이 각각 1명(3%), 2명(7%)으로 나타나 반응 속도에서 일부 사용자 불편이 확인되었다. Vive Tracker 3.0은 3점이 18명(60%)으로 여전히 비슷한 경향을 보였지만, 4점과 5점이 각각 3명(10%)으로 나타나 반응 속도가 다소 개선되었음을 확인할 수 있었다. Vive Tracker Ultimate는 4점이 15명(50%), 5점이 11명(37%)으로 대부분의 응답자가 높은 점수를 주었으며, 이는 즉각적인 반응 속도에서 Ultimate 모델이 뛰어난 성능을 제공했음을 나타낸다.

세 번째 질문인 “가상환경 내 물체의 미세한 흔들림이나 진동이 느껴졌는가?”에 대한 결과로 Vive Tracker 2.0은 5점이 20명(67%), 4점이 6명(20%)으로 대부분의 사용자가 흔들림을 체감했다고 응답하였다. Vive Tracker 3.0 역시 5점이 20명(67%), 4점이 6명(20%)으로 지터 현상이 여전히 존재하였으나 개선된 결과를 보였다. 반면 Vive Tracker Ultimate는 1점이 10명(33%), 2점이 15명(50%), 3점이 5명(17%)으로 지터나 흔들림을 거의 체감하지 않았다는 응답이 다수였으며, 다른 모델 대비 확연히 낮은 진동을 보여주었다.

네 번째 질문인 “트래커를 사용할 때 피로감을 느꼈나요?”에 대한 결과로 Vive Tracker 2.0은 5점이 10명(33%), 4점이 13명(43%)으로 많은 사용자가 높은 피로감을 느꼈으며, 이는 무게와 착용감의 한계 때문으로 해석된다. Vive Tracker 3.0은 4점이 15명(50%), 5점이 6명(20%)으로 2.0 모델에 비해 개선되었으나 여전히 피로감을 체감하는 응답자가 다수였다. 반면 Vive Tracker Ultimate는 3점과 2점이 각각 8명(27%)으로 분포되었고, 5점과 4점이 각각 2명(7%)과 6명(20%)으로 나타나 상대적으로 낮은 피로감을 제공하는 것으로 평가되었다.

사용성 평가는 착용감, 무게, 설정의 용이성, 피로도의 4가지 항목으로 구성되었으며, 이는 VR 기

기와 모션 캡처 시스템 평가에서 널리 사용되는 기준을 참고하여 선정되었다[10]. 착용감과 무게는 사용 중 발생하는 신체적 불편함을 측정하기 위해, 설정의 용이성은 초기 설치 과정에서의 직관성과 접근성을 평가하기 위해 포함되었다. 마지막으로 피로도는 장시간 사용 시 사용자에게 미치는 신체적, 정신적 부담을 측정하는 핵심 항목으로 선정되었다. 이러한 항목들은 사용자 경험에 직접적인 영향을 미치는 요소로, 기존 연구에서 자주 활용된 평가 지표에 기반하여 구성되었다.

종합적으로 분석한 결과, Vive Tracker Ultimate 모델이 정확도, 반응 속도, 지터 체감, 피로도의 모든 항목에서 가장 높은 사용자 만족도를 기록하였으며, 기술적 성능과 사용자 경험 모두에서 우수한 평가를 받았다. Vive Tracker 3.0은 2.0 모델에 비해 전반적으로 개선된 성능을 제공했으나 Ultimate 모델과의 성능 격차는 여전히 존재하였다. Vive Tracker 2.0은 상대적으로 낮은 평가를 받았으며, 특히 피로도와 지터 항목에서 개선이 필요한 것으로 나타났다.

이와 같은 결과는 Vive Tracker Ultimate가 최신 하드웨어와 소프트웨어를 통해 사용자 경험을 크게 향상시켰음을 시사하며, 환경에 따라 트래커 선택 시 성능과 사용 목적을 고려해야 함을 보여준다.

V. 결 론

본 연구에서는 Vive Tracker 2.0, 3.0, Ultimate 모델의 성능을 비교하여 각 모델이 어떤 가상환경에 적합한지를 분석하였다. 응답 속도, 환경 조건, 사용자 경험을 중심으로 평가한 결과, 모델 간의 성능 차이가 명확하게 나타났다.

응답 속도 측정 결과, Vive Tracker 2.0은 평균 18.5ms로 가장 느린 응답 속도를 보였으며, Vive Tracker 3.0은 평균 11.8ms로 2.0 모델 대비 약 36% 더 빠른 성능을 기록하였다. 반면, Vive Tracker Ultimate는 평균 9.2ms로 가장 우수한 성능을 기록하며, 2.0 모델 대비 약 50%, 3.0 모델 대비 약 22% 개선된 응답 속도를 보였다. 이는 실시간 상호작용이 중요한 가상환경에서 Ultimate 모델의 활용 가능성을 뒷받침한다.

환경 조건에 따른 평가에서는 Vive Tracker 2.0과 3.0 모델이 베이스 스테이션 기반 트래킹 방식을 사용하기 때문에 장애물이 있는 상황에서 신호 누락이 자주 발생하였다. 특히, 책상이나 의자와 같은 장애물로 인해 데이터 누락이 평균 5~9회 관찰되었으며, 이는 베이스 스테이션의 시야 가림에 취약하다는 한계를 드러낸다. 반면, Vive Tracker Ultimate는 베이스 스테이션이 필요 없는 독립형 트래커로 내장된 비전 트래킹 기술을 통해 장애물의 영향을 최소화하였으며, 데이터 누락이 거의 없거나 최대 1회 이하로 유지되는 높은 안정성을 보였다. 이러한 결과는 Ultimate 모델이 복잡한 환경이나 제약이 많은 실내 공간에서도 신뢰할 수 있는 성능을 제공함을 입증한다.

사용자 평가 결과에서도 Vive Tracker Ultimate의 우수성이 두드러졌다. 움직임 추적 정확도에 대한 질문에서 Ultimate 모델은 83%의 응답자가 4점 이상을 기록하며 높은 만족도를 보였으며, 3.0 모델은 70%, 2.0 모델은 57%로 상대적으로 낮은 평가를 받았다. 움직임 반영 속도에서도 Ultimate 모델은 즉각적이고 자연스러운 반응을 제공한 반면, 2.0 모델은 응답 지연이 체감되었고 3.0 모델은 개선된 성능을 보였으나 일부 사용자는 여전히 불편함을 느꼈다.

가상환경 내 흔들림이나 진동(지터)에 대한 체감 평가에서도 Ultimate 모델은 가장 안정적인 성능을 제공하였으며, 사용자들은 지터가 거의 느껴지지 않는다고 응답하였다. 반면, 2.0과 3.0 모델은 각각 87%가 흔들림을 경험했다고 응답했다.

사용 피로도 면에서도 Ultimate 모델은 상대적으로 가벼운 무게와 개선된 착용감 덕분에 낮은 피로도를 기록하였다. 사용자 응답 중 54%가 3점 이하의 피로도를 보고하였으며, 이는 3.0 모델(35%) 및 2.0 모델(20%)에 비해 크게 개선된 결과이다. 특히, 2.0 모델의 경우 많은 사용자가 무게로 인한 불편함을 호소하였다.

종합적으로, Vive Tracker Ultimate는 정확도, 반응 속도, 안정성, 그리고 사용자 편의성에서 가장 우수한 결과를 보였다. 이러한 특성으로 Ultimate 모델은 정밀한 동작 추적이 필요한 VR 콘텐츠나 복잡한 환경에서의 모션 캡처와 같은 전문적인 가

상환경에 가장 적합하다. 반면, Vive Tracker 3.0은 비용 대비 성능이 우수하여 일반적인 VR 콘텐츠 개발이나 중간 수준의 가상환경에 활용하기 적합하다. Vive Tracker 2.0은 성능이 상대적으로 낮았지만, 비용이 중요한 단순한 가상환경에서는 여전히 사용될 수 있는 선택지로 볼 수 있다.

References

- [1] A. Menache, "Understanding Motion Capture for Computer Animation and Video Games", Morgan Kaufmann, 2000.
- [2] T. B. Moeslund, A. Hilton, and V. Krüger, "A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis", *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 104, No. 2-3, pp. 90-126, Nov.-Dec. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2006.08.002>.
- [3] J. Chai and J. K. Hodgins, "Performance animation from low-dimensional control signals", *ACM Siggraph 2005 Papers*, Los Angeles California, Vol. 24, No. 3, pp. 686-696, Jul. 2005. <https://doi.org/10.1145/1186822.1073248>.
- [4] HTC Vive, "Vive Tracker User Guide", <https://www.vive.com> [accessed: Jan. 08, 2025].
- [5] J. Tautges, et al., "Motion reconstruction using sparse accelerometer data", *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 30, No. 3, May 2011. <https://doi.org/10.1145/1966394.1966397>.
- [6] G. Byeon, K. Choi, and S. Yu, "VR Hand Tool Accident Prevention Contents using Vive Trackers and 3D Printing", *Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 22, No. 1, pp. 245-254, Jan. 2024. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2024.22.1.245>.
- [7] J. Kulozik and N. Jarrassé, "Evaluating the Precision of the HTC VIVE Ultimate Tracker with Robotic and Human Movements under Varied Environmental Conditions", *arXiv preprint, arXiv:2409.01947*, Sep. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.01947>.

- [8] S. Merker, S. Pastel, D. Bürger, A. Schwadtke, and K. Witte, "Measurement Accuracy of the HTC VIVE Tracker 3.0 Compared to Vicon System for Generating Valid Positional Feedback in Virtual Reality", *Sensors*, Vol. 23, No. 17, pp. 7371, Aug. 2023. <https://doi.org/10.3390/s23177371>.
- [9] J. Lwowski, A. Majumdat, P. Benavidez, J. J. Prevost, and M. Jamshidi, "HTC Vive Tracker: Accuracy for Indoor Localization", *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, Vol. 6, No. 4, pp. 15-22, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1109/msmc.2020.2969031>.
- [10] ISO, "Ergonomics of human-system interaction — Part 11: Usability: Definitions and concepts", BS EN ISO 9241-11:2018 - TC, International Organization for Standardization, Jun. 2018. <https://doi.org/10.3403/30319071>.
- 2016년 9월 ~ 2019년 8월 : 동명대학교
디지털미디어공학부 부교수
2019년 9월 ~ 2024년 9월 : 국립창원대학교
문화테크노학과 부교수
2024년 10월 ~ 현재 : 국립창원대학교 문화테크노학과
정교수
관심분야 : 컴퓨터비전, 증강/가상현실, HCI분야 :
컴퓨터비전, 증강/가상현실, HCI

저자소개

최 현 빈 (HyunBin Choi)



2021년 8월 : 국립창원대학교
문화테크노학과(학사)
2021년 8월 ~ 현재 :
국립창원대학교
문화융합기술협동과정 석사과정
관심분야 : 가상현실, 모션캡처,
실감 콘텐츠, 메타버스

유 선 진 (Sunjin Yu)



2003년 8월 : 고려대학교
전자정보공학(공학사)
2006년 2월 : 연세대학교
생체인식공학(공학석사)
2011년 2월 : 연세대학교
전기전자공학(공학박사)
2011년 1월 ~ 2012년 5월 :
LG전자기술원 미래IT융합연구소 선임연구원
2012년 5월 ~ 2013년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과
연구교수
2013년 3월 ~ 2016년 8월 : 제주한라대학교
방송영상학과 조교수