

다중 사용자 HMD 기반 VR 환경의 가상-현실 공간 위치 오차 거리 분석

박건길¹, 김서영^{2*}

¹(주)인프라엑스 팀장, ²호남대학교 만화애니메이션 교수

Analysis of Virtual-Reality Spatial Position Error Rates in Multi-User HMD-Based VR Environments

Geongil Park¹, SeoYoung Kim^{2*}

¹Manager, Infracx Inc.

²Professor, Dept. of Comic&Animation, Honam University

요약 본 연구는 다중 사용자 HMD 기반 VR 환경에서 발생하는 가상-현실 공간의 위치 불일치 문제를 해결하기 위해, 각 단말의 트래킹 데이터를 통해 관리하고 기존 좌표계를 실시간으로 동기화하는 '스마트 HMD 허브' 시스템을 기반으로 위치 정확도를 실증 분석하였다. 227.02m² 공간에서 8명의 동시 사용자가 자유롭게 이동하는 환경을 구축하고, '스마트 HMD 허브' 시스템을 기반으로 Inside-Out 트래킹 HMD의 물리적 이동 거리와 가상공간 좌표값을 정밀하게 측정하여 위치 오차 거리를 산출하였다. 측정 결과, 가상-현실 간 위치 오차의 평균값은 19.2mm로 산출되어 사용자가 인지하기 어려운 시지각적 임계치인 2cm 미만의 높은 정확도를, 오차는 이동 거리에 비례하여 누적되는 드리프트 현상 대신 최대 32mm 이내에서 안정적으로 변동하는 특성을, 시스템은 다수 HMD의 좌표계를 효과적으로 보정하고 동기화하고 있음을 확인하였다. 또한 8명의 사용자가 동시 접속한 상태에서도 평균 82.04fps의 안정적인 프레임레이트를 유지하는 시스템 성능을 확인하였다.

주제어 : 다중 사용자 VR, 위치 오류, HMD, 동기화, VR e스포츠, 동시 접속

Abstract This study empirically analyzed positional accuracy based on a 'smart HMD hub' system that manages tracking data from each terminal and synchronizes the existing coordinate system in real time to solve the problem of positional mismatch in virtual-reality space that occurs in a multi-user HMD-based VR environment. An environment was created in which eight simultaneous users could move freely in a 227.02m² space, and based on the 'Smart HMD Hub' system, the physical movement distance and virtual space coordinate values of the Inside-Out Tracking HMD were precisely measured to calculate the position error distance. The measurement results showed that the average positional error between virtual and reality was 19.2 mm, demonstrating high accuracy below 2 cm, a visual threshold difficult for users to perceive. The error fluctuated stably within a maximum of 32 mm instead of drifting in proportion to the movement distance, confirming that the system effectively compensates and synchronizes the coordinate systems of multiple HMDs. In addition, the system performance was confirmed to maintain a stable frame rate of 82.04 fps on average even when 8 users were connected simultaneously.

Key Words : Multi-User, VR, Positional Error, HMD, Synchronization, VR E-Sports, Simultaneous connection

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 광주광역시의 재원으로 광주RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(2025-RISE-05-016)

*교신저자 : 김서영(sykim@honam.ac.kr)

접수일 2025년 12월 31일 수정일 2025년 02월 09일 심사완료일 2025년 02월 16일

1. 서론

가상현실(Virtual Reality, VR) 기술은 하드웨어의 발전과 콘텐츠의 다양화에 힘입어 엔터테인먼트를 넘어 교육, 훈련, 의료, 제조 등 다양한 산업 분야로 빠르게 확산하고 있다. 초기의 VR 경험이 단일 사용자의 몰입형 체험에 중점을 두었다면, 최근 기술 동향은 다수의 사용자가 동일한 가상 공간에 동시 접속하여 상호작용하는 '다중 사용자(Multi-User) VR' 환경으로 진화하고 있다. 특히 VR E-Sports, 가상 협업 플랫폼, 대규모 합동 군사 훈련 등이 다중 사용자 환경을 필수로 요구한다.

다중 사용자 VR 환경에서 사용자 경험의 질을 결정하는 핵심 요소는 '몰입감(Immersion)'과 '현실감(Presence)'이다. 사용자가 가상 공간을 실제처럼 느끼기 위해서는 자신의 물리적 움직임이 가상 세계의 아바타를 통해 지연이나 왜곡 없이 즉각적이고 정확하게 반영되어야 하며, 다중 사용자 환경에서는 '상호작용의 정확성'이 추가로 요구된다. 가상 아바타의 위치뿐 아니라, 동일 공간에 존재하는 타인의 가상 아바타 위치 또한 실제 물리적 위치와 동기화되어 정확하게 표현되어야 한다.

하지만 상용 HMD(Head-Mounted Display) 시스템은 필연적으로 추적 오류(Tracking Error)를 내포한다. HMD의 Inside-Out 트래킹 센서나 외부 라이트하우스(Lighthouse)와 같은 광학 추적 시스템은 시스템 지연(Latency), 센서 노이즈(Noise), 지터(Jitter) 등으로 인해 미세한 위치 오류를 발생시킨다. 이러한 오류가 누적되거나 다중 사용자 간의 동기화가 틀어질 경우, 사용자의 실제 위치와 가상 아바타(Avatar) 위치 간의 '위치 불일치(Positional Mismatch)'가 발생한다. 이는 사용자에게 VR 멀미(VR Sickness)를 유발할 뿐만 아니라, 가상 객체 조작의 정확도를 떨어뜨리고 사용자 간의 상호작용을 방해하는 심각한 문제로 이어진다.

VR 환경과 관련한 선행 연구들은 이러한 위치 오류가 사용자 경험에 미치는 영향을 다방면으로 분석해왔다. 일부 연구는 아바타 추적 오류가 사용자의 작업 수행 능력과 정확도에 부정적인 영향을 미친다고 보고하였으며 [1], 박정현, 이광훈의 「VR HMD의 추적 센서 유형에 따른 위치 오차 분석」에서는 상용 HMD의 기술적 한계(예: GPS 부재)로 인해 발생하는 실외 환경에서의 구체적인 위치 오차 값을 제시하기도 하였다[2]. 또한, 김수정, 김형곤의 「가상현실에서의 3D 드로잉 피드백 설계 및 효과 분석」과 같은 연구는 다중 사용자 협업 환경에서 사용자의 '상대적 위치 배열'이 작업 성과에 중요한 변수가 됨

을 밝히기도 하였다.[3] 이들 연구는 위치 정확성의 중요성을 강조하지만, 대부분 단일 사용자의 정확도를 다루거나 AR 환경에서의 정합 오류(Registration Error)[4]에 초점을 맞추는 경향이 있었다.

이에 반해, 다수의 사용자가 동일한 물리적 공간(Co-located)에서 HMD를 착용하고 상호작용할 때 발생하는 '가상-현실 공간의 동기화 및 오차 거리'를 구체적인 시스템을 통해 실증적으로 측정하는 연구는 상대적으로 부족하다. 특히 8명 이상의 다인원이 200㎡가 넘는 대규모 공간에서 동시에 상호작용하는 VR E-Sports와 같은 환경에서는, 개별 HMD의 정확도뿐만 아니라 모든 사용자의 위치 값을 하나의 좌표계로 통합하고 실시간 동기화하는 '다중 사용자 위치 공유기술'의 성능이 핵심적인 기술적 과제이다.

본 연구에서는 다중 사용자 HMD 기반 VR 환경, 특히 VR E-Sports를 위해 개발된 '스마트 HMD 허브' 시스템을 대상으로 가상-현실 공간 간의 위치 오차 거리를 실증적으로 분석하고자 한다. 본 연구에서는 8명의 동시 체험자가 227.02㎡의 물리적 공간에서 HMD를 착용하고 VR 콘텐츠를 체험하는 환경을 구축하였다. 이 환경에서 HMD의 물리적 이동 거리(95mm 간격, 20회 반복)와 가상공간 내 아바타의 좌표 이동 값을 정밀하게 측정하여, 두 공간 사이의 평균 위치 오차 거리를 정량적으로 산출하였다.

본 연구의 결과는 다중 사용자 VR 시스템의 위치 정확도를 평가하는 실증적 데이터를 제공하며, 특히 가상 위치 오차가 평균 19.2mm(2cm 미만) 수준으로 안정적으로 관리될 수 있음을 입증한다. 이는 향후 대규모 다인원 VR 콘텐츠의 품질을 보증하고, 사용자에게 끊임 없는 몰입형 경험을 제공하기 위한 시스템 개발의 중요한 기초 자료로 활용될 것이다.

2. 이론적 배경 및 관련 연구

2.1 다중 사용자 VR 환경과 동기화

다중 사용자 VR 환경(Multi-User VR Environment)은 둘 이상의 사용자가 네트워크를 통해 동일한 가상 공간을 공유하며 실시간으로 상호작용하는 시스템을 의미하며, 이는 단일 사용자 VR과 구별된다. 이러한 다중 사용자 환경의 정의와 필요성은 안상모 등의 선행 연구[1]를 통해 중요하게 다루어진 바 있으며, 최근에는 대규모 협업을 위한 시스템 아키텍처 및 콘텐츠 개발 방안이 활발

히 제시되고 있다[6, 11]. 다중 사용자 VR의 핵심 기술 과제는 참여자의 위치, 회전값, 상호작용 이벤트 등 시시각각 변하는 데이터를 모든 참여자에게 일관되게 유지하는 '상태 동기화(State Synchronization)'이다[8,15].

실시간으로 여러 사용자의 상태를 동기화 하는 기술은 협업 환경의 작업 성과에 중요한 변수가 됨이 김수정 등의 연구[3]에서도 강조 되었다. 또한 다중 사용자 환경에서 지연 시간(Latency)은 정합 오류뿐만 아니라 상호작용 일관성을 저해하는 치명적인 요소이므로[4, 15], 최근 연구에서는 엣지 클라우드 컴퓨팅 및 네트워크 최적화 알고리즘을 통해 이를 해결하려는 시도가 이어지고 있다 [10, 14]. 특히 Yu 등은 왕복 지연 시간(RTT)이 75ms를 초과할 경우 사용자의 체감 품질(QoE)과 가상 객체 조작 정밀도가 급격히 저하됨을 실증하였다[12]. 이러한 동기화 품질은 사용자의 '현실감(Presence)'에 직접적인 영향을 미치며, 가상 세계에서의 아바타 위치와 현실 세계에서의 실제 사용자 위치가 불일치할 경우 사용자는 즉각적으로 이질감을 느끼고 심한 VR 멀미를 경험하게 된다[7,11].

2.2 HMD 위치 추적 기술과 오차 요인

HMD(Head-Mounted Display)의 위치 추적 기술은 Inside-Out 트래킹과 Outside-In 트래킹 방식으로 구분된다. Inside-Out 트래킹은 현재 상용 HMD의 주류를 이루며, SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 기반 기술을 통해 외부 센서 없이 자유로운 이동을 보장하지만[8,14], 추적 과정에서 필연적으로 오차(Error)가 발생한다. 이러한 오차는 크게 두 가지 요인으로 구분할 수 있다.

첫째, 센서의 물리적 한계 및 기술적 오차이다. 박정현, 이광훈[2]의 연구에서 분석했듯이, HMD에 사용되는 추적 센서의 종류에 따라 오차의 특성이나 크기가 달라지며, 센서 데이터 통합 과정에서 발생하는 누적 오차(Drift)나 잡음(Noise)은 위치 정확도를 저해하는 주된 요인이 된다. 특히 지터(jitter) 값이 가상 객체 크기의 일정 비율을 초과할 때 사용자의 작업 수행 능력이 현저히 감소한다는 지표가 제시되었다[2]. 또한 다중 사용자 밀집 환경에서는 특징점 인지 방해로 인한 드리프트가 심화될 수 있으므로 실시간 보정 기술이 필수적이다[9,11]. 둘째, 가상-현실 공간의 정합 오류(Registration Error)이다. 홀러웨이(Holloway)의 선행 연구[4]와 같이 AR 환경에서 논의되었던 이 오류는 VR 환경, 특히 다중 사용자 Co-located 환경에서도 동기화 실패와 지연으로 인해 더욱 심화될 수 있다.

2.3 가상-현실 공간의 정합 오류

'정합 오류(Registration Error)'는 가상 객체가 현실 공간의 의도한 위치에 정확히 정합(Overlay)되지 못하는 현상을 의미한다[4]. Holloway(1997)는 시스템 지연이 정합 오류에 미치는 가장 큰 단일 요인임을 분석하며, 트래커의 정확도와 광학적 왜곡이 복합적으로 작용함을 밝혔다[4]. 이는 VR 환경에서 '위치 불일치(Positional Mismatch)'로 동일하게 적용된다.

선행 연구는 가상 아바타와 사용자 실제 움직임 간의 불일치가 사용자의 작업 수행 능력과 정확도를 현저히 저하시킨다고 보고했다[1]. 또한 이러한 정합 오류를 정밀하게 측정하기 위해 고정밀 로봇 팔을 사용하여 6자유도(6DoF) 움직임을 반복 측정함으로써 트래킹 정확도를 서브 밀리미터 단위로 검증하는 방식이 제안되기도 하였다[13, 4]. 사용자는 이러한 오차에 무의식적으로 적응하려 하지만, 이는 인지적 부하를 가중시키고 전반적인 경험의 질을 떨어뜨리는 결과를 초래한다.

2.4 선행 연구의 한계 및 본 연구의 차별점

기존의 HMD 위치 정확도에 관한 연구들은 몇 가지 명확한 한계를 지닌다.

첫째, 단일 사용자의 트래킹 정확도나 실외 GPS 기반의 AR 위치 오차[2], 또는 일반적인 실내 측위 시스템 연구[5]에 집중하는 경향이 있었다.

둘째, 다중 사용자를 다루더라도, 서로 다른 물리적 공간(Remote)에서 네트워크를 통해 협업하는 시나리오가 주를 이루었다.

하지만 VR E-Sports나 대규모 실감형 콘텐츠(LBE, Location-Based Entertainment)와 같이, 동일한 물리적 공간(Co-located)에서 다수의 사용자(8명 이상)가 대규모 영역(200m² 이상)을 자유롭게 이동(Free-roam)하는 환경에 대한 실증적 오차 오차 거리 데이터는 매우 부족한 실정이다. 이러한 환경은 개별 HMD의 추적 성능뿐만 아니라, ① 모든 HMD의 좌표계를 하나의 기준 좌표계로 통일하는 '공간 정렬(Spatial Alignment)' 기술과, ② 이 정렬 상태를 실시간으로 유지하는 '다중 사용자 위치 공유 및 동기화' 기술의 성능이 동시에 요구되는 복합적인 시나리오이다. 특히 Medeiros 등(2022)은 대규모 공간에서의 위치 추적 성능에 영향을 미치는 물리적 환경 변수의 중요성을 입증한 바 있다[9]. 또한 기존의 공유 앵커(Shared Anchor) 방식은 환경의 특징점 변화에 따라 누적 오차가 발생할 가능성이 크다는 한계가 지적되어 왔다.

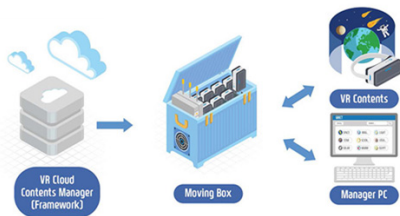
따라서 본 연구는 VR E-Sports를 위해 특수하게 설계된 '스마트 HMD 허브' 시스템을 도입하여, 227.02m²의 대규모 공간에서 8명의 동시 사용자를 대상으로 가상-현실 간의 위치 오차 거리를 정밀하게 측정하였다. 특히 본 시스템은 개별 단말의 데이터를 중앙 서버에서 통합 관리하는 실시간 좌표 동기화 알고리즘을 통해, 8인 동시 접속 시에도 평균 82.04fps의 안정적인 성능을 유지하며 평균 오차 19.2mm라는 공인 시험 성격의 정밀한 수치를 실증적으로 검증했다는 점에서 명확한 차별성을 가진다.

3. 연구 방법 및 실험 설계

본 연구는 다중 사용자 VR 환경에서 HMD의 물리적 위치와 가상 공간 좌표 간의 오차 거리를 실증적으로 측정하기 위해 구체적인 시스템 환경을 구축하고 정밀한 측정을 수행하였다.

3.1 실험 시스템 구성 : 스마트 HMD 허브

본 실험을 위해 다수의 HMD를 안정적으로 동기화하고 관리하도록 설계된 '스마트 HMD 허브 for VR E-Sports (모델명: SHH-MCE8-VF3-01)' 시스템을 사용하였다. 이는 대규모 공간에서 다인원의 위치 값을 실시간으로 처리하기 위한 핵심 시스템이다. 전체 시스템 구성은 [Fig. 1]과 같으며, 주요 하드웨어 사양은 <Table 1>과 같다.



[Fig. 1] System configuration

<Table 1> Key experimental system specifications

Division	System Specifications
HMD	CPU: Qualcomm® Snapdragon™ XR2 Display: 2448 x 2448 (dual 2.88" LCD), 90Hz Tracking: Inside-Out, 6DOF (4 tracking cameras) Network: Wi-Fi 6
Built-in content server	OS: Windows 10 Pro CPU: Intel Core i3-10110U RAM: DDR4 16 GB
wireless AP	Wireless Speed: AC1200 (2.4 GHz, 5 GHz) Antennas: 4
manager SW	Tablet Manager S/W (based on Android 9.0)

본 시스템은 HMD의 Inside-Out 트래킹을 기반으로 하며, 각 HMD에서 수집된 위치 정보는 Wi-Fi 6 및 5GHz 대역의 무선 AP를 통해 내장 콘텐츠 서버로 전송된다. 서버는 8명에 이르는 모든 사용자의 위치 데이터를 실시간으로 동기화하고, 관리자 S/W는 이 과정을 모니터링 및 제어한다.

3.2 물리적 실험 공간 구축

다중 사용자가 HMD를 착용하고 자유롭게 이동 (Free-roam)하는 환경을 구현하기 위해, 물리적 실감체험공간을 구축하였다. 레이저 거리 측정기를 이용한 실측 결과, 실험 공간의 크기는 가로 14.050m, 세로 16.158m로 총 227.02m² 면적을 확보하였다. 이는 8명의 동시 체험자가 서로 충돌 없이 콘텐츠를 체험하기에 충분한 공간이다. 모든 HMD는 이 동일한 물리적 공간 내에서 '공간 정렬(Spatial Alignment)' 과정을 거쳐 동일한 가상 공간 좌표계를 공유하도록 설정되었다.

3.3 가상 현실 위치 오차 측정 방법

본 연구의 핵심 목표인 가상 현실 간 위치 오차를 측정하기 위해 '가상위치 최대 오차거리' 시험 항목을 다음과 같이 설계하였다.

$$E_d = |D_p - D_v|$$

- * E_d : 위치 오차 거리(mm)
- * D_p : 기준점으로부터의 실제 물리적 이동거리(mm)
- * D_v : 시스템 로그에 기록된 가상 공간 내 x축 좌표 값(mm)

원점으로부터 95mm 간격으로 설정된 총 19개 구간 (최대 이동 거리 1,805mm)에 대해 HMD를 이동시키며 가상 좌표를 기록하였다. 이 과정은 원점을 포함하여 총 20회 반복 측정되었으며, 각 측정값의 절대적 차이를 통해 시스템의 정확도를 정량적으로 검증하였다.

- ① 기준점 설정: 물리적 체험 공간 내의 특정 지점을 원점으로 설정한다.
- ② 측정 지점 표시: 원점으로부터 일직선상(x축)으로 95mm 간격의 물리적 위치를 정밀하게 표시한다. 이는 총 19개 구간(총 이동 거리 1,805mm)을 대상으로 한다.
- ③ HMD 물리적 이동: HMD를 원점에 배치한 후, 표시된 95mm 간격 지점으로 순차적으로 정밀하게 이동시킨다.

- ④ 가상 좌표 기록: HMD가 각 물리적 지점에 도달했을 때, 스마트 HMD 허브 시스템의 로그 데이터를 통해 해당 HMD의 가상 공간 내 x축 좌표 값을 미터 단위로 기록한다.
- ⑤ 오차 거리 계산: 이 과정은 원점을 포함하여 총 20회 반복 측정되었다. 각 측정에서 '물리적 이동 거리(mm)'와 시스템 로그에 기록된 '가상 좌표 값(mm로 환산)' 사이의 절대적 차이를 '오차 거리(Error Distance)'로 계산하였다.

3.4 시스템 성능 보조 지표 측정

다중 사용자 환경의 품질은 위치 정확도뿐만 아니라 시스템의 전반적인 안정성에 좌우된다. 이에 따라 다음과 같은 보조 지표를 함께 측정하여 시스템의 유효성을 검증하였다.

- ① 동시 체험자 수: 8대의 HMD가 체험 공간 내에서 임의로 움직일 때, 관리자 S/W가 모든 HMD의 연결을 유지하고 실시간 동작을 정상적으로 모니터링하는지 확인하였다.
- ② 평균 프레임레이트(FPS): 8대의 HMD가 모두 콘텐츠를 실행하는 상태에서 3분간의 평균 FPS를 측정하였다. 이는 다중 접속으로 인한 서버 및 네트워크 부하가 HMD의 렌더링 성능에 미치는 영향을 확인하기 위함이다.
- ③ 가상공간 자동생성 시간: 관리자가 태블릿 S/W에서 '게임 시작' 명령을 내린 순간부터 사용자의 HMD에 가상공간(Scene)이 로드 완료되기까지 소요된 시간을 측정하였다.

4. 연구 결과 및 분석

다중 사용자 VR 환경의 위치 오차 거리 및 시스템 성능을 측정한 결과는 다음과 같다.

4.1 가상-현실 위치 오차 분석

본 연구의 핵심 지표인 HMD의 물리적 위치와 가상 공간 좌표 간의 오차 거리를 20회에 걸쳐 측정할 상세 결과는 <Table 2>와 같다. 측정은 물리적 기준점(0mm)으로부터 HMD를 95mm 간격으로 최대 1,805mm까지 이동시키며, 각 지점에서의 물리적 이동 거리와 가상 좌표(mm 환산값) 간의 차이를 '오차 거리'로 산출하였다.

<Table 2> Measurement results of virtual-reality position error according to physical movement distance

order	physical target travel distance (mm)	virtual coordinate value(m)	virtual coordinate value (mm)	error distance (mm)
1	0	0.000	0	0
2	95	0.115	115	20
3	190	0.211	211	21
4	285	0.299	299	14
5	380	0.393	393	13
6	475	0.501	501	26
7	570	0.599	599	29
8	665	0.671	671	6
9	760	0.783	783	23
10	855	0.872	872	17
11	950	0.965	965	15
12	1,045	1.074	1,074	29
13	1,140	1.151	1,151	11
14	1,235	1.251	1,251	16
15	1,330	1.348	1,348	18
16	1,425	1.451	1,451	26
17	1,520	1.543	1,543	23
18	1,615	1.639	1,639	24
19	1,710	1.742	1,742	32
20	1,805	1.826	1,826	21
평균	-	-	-	19.2
최대	-	-	-	32.0

측정 결과, 총 20회에 걸친 오차 거리의 평균값은 19.2mm로 산출되었다. 이는 본래 시스템의 목표 기준치였던 95mm보다 현저히 낮은 값이며, 사용자가 인지하기 어려운 2cm 미만의 평균 오차 거리를 보여준다.

더욱 주목할 점은 오차 값이 이동 거리에 비례하여 누적(Drift 현상)되지 않고, 일정 범위 내에서 변동(Fluctuation)한다는 것이다. 측정된 오차의 최솟값은 6mm, 최댓값은 32mm로, 이동 거리가 1,805mm에 달하는 마지막 구간에서도 오차는 21mm로 안정적인 수준을 유지했다. 이는 '스마트 HMD 허브' 시스템이 개별 HMD의 위치 값을 효과적으로 보정하고 다중 사용자 간의 좌표계를 강건하게 동기화하고 있음을 시사한다.

4.2 시스템 성능 보조 지표 분석

다중 사용자 환경의 안정성을 검증하기 위한 보조 지표 측정 결과는 <Table 3>과 같다.

〈Table 3〉 System performance auxiliary indicator measurement results

Items	Standard	Results	Evaluation
Number of simultaneous users	8 HMDs can be connected simultaneously and operate in real time	8 people	satisfied
Virtual space automatic creation time	HMD loading complete from the manager software start command	37.5s	satisfied
Average frame rate	Average FPS for 3 minutes with 8 concurrent machines running	82.04fps	satisfied

분석 결과, 모든 보조 지표는 목표 기준치를 만족시켰다. 첫째, 227.02㎡의 공간에서 8명의 동시 체험자가 오류 없이 실시간으로 동작함을 확인하였다. 이는 서버가 8대의 HMD로부터 발생하는 대용량 위치 데이터를 지연 없이 처리하고 동기화할 수 있음을 의미한다. 둘째, 평균 프레임레이트는 82.04fps로 측정되었다. 이는 VR 멀미를 유발하지 않는 안정적인 주사율(일반적으로 72~90Hz)을 다중 사용자 환경에서도 유지함을 보여준다. 셋째, 가상공간 자동생성 시간은 37.5초로, 사용자가 HMD를 착용하고 대기하는 시간을 최소화하여 신속한 콘텐츠 시작이 가능함을 확인하였다.

종합적으로, 본 시스템은 8명의 다중 사용자가 대규모 공간에서 상호작용하는 환경에서도 평균 19.2mm의 높은 위치 정확도를 유지하며, 동시에 안정적인 프레임레이트와 빠른 로딩 속도를 제공함을 실증적으로 입증하였다.

5. 결론 및 제언

본 연구는 최근 VR E-Sports 및 LBE 분야의 핵심 기술로 부상하고 있는 '다중 사용자 HMD 기반 VR 환경'의 성능을 실증적으로 검증하는 것을 목표로 하였다. 특히 기존 연구에서 데이터가 부족했던 '동일 물리적 공간 (Co-located)', '대규모(227.02㎡)', '다수(8명)'의 사용자가 동시에 상호작용하는 환경에 초점을 맞추었다.

이를 위해 '스마트 HMD Hub' 시스템을 기반으로 Inside-Out 트래킹 HMD를 사용하는 실험 환경을 구축하였으며, 물리적 이동 거리에 따른 가상현실 좌표 간의 위치 오차 거리를 정밀하게 측정하였다.

연구 결과 첫째, 총 20회에 걸쳐 측정된 가상-현실 간 위치 오차의 평균값은 19.2mm로, 목표 기준치였던 95mm에 비해 현저히 낮은 정확도를 나타냈다. 이는 사용자가 거의 인지하기 힘든 임계치인 2cm 미만의 정밀

한 수준임을 시사한다. 둘째, 오차는 이동 거리에 비례하여 누적되는 '드리프트(Drift)' 현상 대신, 최대 32mm 이내의 안정적인 범위에서 변동(Fluctuation)하는 특성을 보였다. 이는 시스템이 중앙 서버를 통해 다수 HMD의 좌표계를 효과적으로 보정하고 동기화하고 있음을 입증한다. 셋째, 8명의 사용자가 동시 접속한 상태에서도 평균 82.04fps의 안정적인 프레임레이트를 유지하였으며, 37.5초의 빠른 가상공간 로딩 속도를 확인하였다.

결론적으로, 본 연구는 중앙 집중식 좌표 동기화 알고리즘이 적용된 특수 설계 시스템(스마트 HMD 허브)을 활용할 경우, 상용 Inside-Out HMD를 사용하더라도 대규모 다중 사용자 환경에서 매우 낮은 위치 오차거리와 안정적인 시스템 성능을 확보할 수 있음을 실증적으로 입증하였다. 첫째, 학술적으로는 대규모 동일 공간 (Co-located)에서의 다중 사용자 VR 위치 정확도에 대한 구체적인 정량적 데이터(평균 19.2mm)를 제시함으로써, 관련 분야의 후속 연구를 위한 중요한 기초 자료 (Baseline)를 제공한다. 둘째, 실용적으로는 VR E-Sports, 대규모 VR 훈련, 몰입형 교육 콘텐츠 등 높은 수준의 위치 정확도와 안정성을 요구하는 상용 서비스의 구현 가능성을 기술적으로 검증하였다. 본 연구에서 검증된 낮은 오차 거리는 사용자 간의 정밀한 상호작용을 보장하고 VR 멀미를 최소화하여 고품질의 몰입 경험을 제공하는 핵심 근거가 된다.

본 연구는 명확한 성과에도 불구하고 다음과 같은 한계점을 가지며, 이를 보완하기 위한 후속 연구를 진행하고자 한다. 첫째, 본 실험은 통제된 실내 실험실 환경에서 95mm 간격의 단계적 직선 이동을 중심으로 진행되었다. 따라서 실제 VR 콘텐츠 구동 시 발생하는 빠른 회전이나 급격한 가속이 수반되는 역동적인 움직임 상황에서의 오차 변화에 대한 추가 검증이 필요하다. 둘째, 공간 규모 대비 8명의 사용자 접속은 네트워크 임계 부하를 확인하기에 다소 낮은 사용자 밀도일 수 있다. 향후 연구에서는 사용자 수 확대 및 밀도 증가에 따른 네트워크 트래픽 분석과 데이터 손실이 위치 정합성에 미치는 영향을 심도 있게 다룰 예정이다. 셋째, 본 연구는 '평균 19.2mm'라는 객관적(Objective) 데이터를 확보하였으나, 이 오차 수준이 사용자의 '현실감(Presence)'이나 'VR 멀미'와 같은 주관적(Subjective) 경험에 구체적으로 어떤 영향을 미치는지에 대한 상관관계 분석은 향후 과제로 남는다.

이러한 한계점에도 불구하고, 본 연구는 다중 사용자 VR 환경의 위치 정확도에 대한 신뢰할 수 있는 데이터를

제공함으로써, 차세대 몰입형 콘텐츠 개발의 기술적 기반을 확립하는 데 기여할 것이다.

REFERENCES

- [1] S. M. An, J. Y. Lee, and D. H. Kim, "A Study on Space Calibration for Location-based Multi-user Collaboration in Virtual Reality Environment," Journal of the Korea Computer Graphics Society, Vol. 27, No. 1, pp. 45-53, 2021.
- [2] J. H. Park and K. H. Lee, "Analysis of Positional Error in VR HMD according to Tracking Sensor Types," KIPS Transactions on Software and Data Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 211-218, 2019.
- [3] S. J. Kim and H. G. Kim, "Design and Effect Analysis of Feedback for 3D Drawing in Virtual Reality," Journal of the HCI Society of Korea, Vol. 15, No. 2, pp. 12-20, 2020.
- [4] R. L. Holloway, "Registration Error Analysis for Augmented Reality," Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 6, No. 4, pp. 418-432, 1997.
- [5] H. S. Gang, "Design of Practical Indoor Positioning System for Location Based Service," Ph.D. dissertation, Dept. of Information and Communication Engineering, Chosun University, 2020.
- [6] W. S. Chae, H. L. Choi, B. S. Kim, J. H. Sang, and J. W. Lee, "An Approach to HMD-based Multiplayer VR Content Development," KIISE Transactions on Computing Practices, Vol. 24, No. 10, pp. 569-574, 2018.
- [7] R. Qiao and D. Han, "A Study on the Virtual Reality Sickness Measurement of HMD-based Contents Using SSQ," Journal of Korea Game Society, Vol. 18, No. 4, pp. 15-32, 2018.
- [8] A. S. Oh, "A Study on Motion and Position Recognition Considering VR Environments," Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 21, No. 12, pp. 2365-2370, 2017.
- [9] B. J. Medeiros, R. K. dos Anjos, and J. P. Jorge, "Evaluating Positional Tracking Accuracy for Multi-user Virtual Reality in Large Spaces," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 28, No. 11, pp. 3673-3683, 2022.
- [10] G. Li, H. Zhang, and J. Li, "MUVR: Supporting Multi-User Mobile Virtual Reality with Resource Constrained Edge Cloud," IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 26, No. 5, pp. 2110-2124, 2018.
- [11] Q. Feng, H. Luo, Z. Li, J. Liang, G. Li, and Y. Yi, "Creating an Immersive Virtual Reality Game Space for Multiuser, Synchronous Co-Located Collaboration: Design Considerations and Influencing Factors," Applied Sciences, Vol. 14, No. 5, pp. 2167, 2024.
- [12] G. Yu, J. Kim, and S. Lee, "Impact of Latency on QoE, Performance, and Collaboration in Interactive Multi-User Virtual Reality," Applied Sciences, Vol. 14, No. 6, pp. 2290, 2024.
- [13] D. Eger Passos and B. Jung, "Measuring the Accuracy of Inside-Out Tracking in XR Devices Using a High-Precision Robotic Arm." In: International Conference on Human-Computer Interaction (HCII 2020), LNCS 12185, pp. 19-26, 2020.
- [14] M. S. Kim, "Experimental Study on Spatial Recognition Precision of Inside-Out Tracking HMD," Journal of the Korea Contents Association, Vol. 21, No. 8, pp. 55-64, 2021.
- [15] S. Podkosova, I. Vasylevska, and H. Kaufmann, "Evaluation of Multi-user Position and Orientation Tracking for Shared Virtual Spaces," Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology (VRST '16), pp. 223-232, 2016.

박 건 길(Geongil Park)

[정회원]



- 2020년 2월 : 조선대학교 경제학과 (경제학사)
- 2026년 2월 : 전남대학교 지식재산융합학과 (박사 수료)
- 2025년 2월 ~ 현재 : ㈜인프라엑스 기획팀 팀장

<관심분야>

가상현실, 콘텐츠, 사물인터넷, 지식재산 산업

김 서 영(SeoYoung Kim)

[정회원]



- 1999년 8월 : Arizona State University, B.A, U.S.A
- 2000년 12월 : Texas A&M University-C. M.S, U.S.A
- 2003년 9월 ~ 현재 : 호남대학교 만화애니메이션학과

<관심분야>

콘텐츠, 실감미디어, 생성형 AI, 문화예술 융합