

석사학위논문

몰입형 가상환경을 위한
모션 캡처 기반의 가상 아바타 응용

2024년

한 성 대 학 교 대 학 원

컴 퓨 터 공 학 과

컴 퓨 터 공 학 전 공

박 명 석

석사학위논문
지도교수 김진모

몰입형 가상환경을 위한
모션 캡처 기반의 가상 아바타 응용

Motion Capture-Based Virtual Avatar Applications
for Immersive Virtual Environments

2023년 12월 일

한성대학교 대학원

컴퓨터공학과

컴퓨터공학전공

박명석

석사학위논문
지도교수 김진모

몰입형 가상환경을 위한
모션 캡처 기반의 가상 아바타 응용

Motion Capture-Based Virtual Avatar Applications
for Immersive Virtual Environments

위 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2023년 12월 일

한성대학교 대학원

컴퓨터공학과

컴퓨터공학전공

박명석

박명석의 공학 석사학위 논문을 인준함

2023년 12월 일

심사위원장 계 희 원 (인)

심 사 위 원 이 지 은 (인)

심 사 위 원 김 진 모 (인)

국 문 초 록

몰입형 가상환경을 위한 모션 캡처 기반의 가상 아바타 응용

한 성 대 학 교 대 학 원
컴 퓨 터 공 학 과
컴 퓨 터 공 학 전 공
박 명 석

본 연구는 몰입형 가상환경에서 가상현실 사용자의 몰입감을 높이고 다양한 경험을 제공하기 위한 방법으로 모션 캡처 기반의 가상 아바타를 응용하는 방법을 제안한다. 이를 위해 PC, 모바일과 같은 비몰입형 사용자와 VR HMD를 사용하는 몰입형 사용자가 함께 참여하여 실시간으로 스트리밍된 모션 캡처 데이터를 통해 가상공간에서 생성된 모션 캡처 기반의 가상 아바타와 상호작용할 수 있는 통합 개발 환경을 구축하였다. 먼저 제안하는 배우 기반 모션 캡처 아바타가 가상현실 사용자에게 주는 긍정적인 효과를 분석하기 위해 사전에 정해진 패턴에 따라 동작하는 비사용자(NPC) 아바타와 같은 가상환경에서 순서대로 사용자와 상호작용한다. 이를 기반으로 수행한 사용자 설문 실험 결과 모션 캡처를 활용한 배우 기반 아바타를 통해 사용자에게 불규칙하며 예측할 수 없는 다양한 경험을 제공하며 이를 통해 높은 몰입과 긍정적인 경험을 제공하는 것을 확인하였다. 배우 기반 아바타는 사용자에게 높은 몰입감을 제공할 수 있지만 마커를 부착한 배우와 캡처 장소 및 캡처 장비를 필요로 하며 이는 높은 비용을 요구한다. 이를 완화하면서 가상환경 사

용자에게 높은 몰입감을 제공하기 위한 방법으로 추가적으로 강제 추적 기반 아바타를 제안한다. 이를 위해 보다 적은 비용으로 배우의 신체 정보를 추적, 기록하는 방식이 아닌 실시간 강제 추적 기반 역운동학을 통해 가상 아바타의 현실적인 동작을 추정한다. 제안하는 강제 추적 기반 아바타를 사용하여 몰입형 가상환경에 관한 응용을 실험 및 분석하기 위해 과학실험 교육 콘텐츠를 제작하고 제안하는 강제 추적 방법과 시청각 교육, 전신 추적 방법과 사용자 설문을 통해 몰입과 교육 효과를 비교 분석하였다. 결과적으로 강제 추적 기반의 가상 아바타를 활용하여 전통적인 시청각 교육보다 높은 몰입과 교육 효과를 얻을 수 있으며 전신 추적을 위한 많은 작업이 없이 긍정적인 경험을 제공할 수 있음을 확인하였다.

【주요어】 모션 캡처, 가상 아바타, 강제 추적, 몰입형 가상환경, 가상현실

목 차

I. 서 론	1
II. 관련 연구	3
2.1 가상환경	3
2.2 모션 캡처	5
2.3 아바타와 에이전트	6
III. 몰입형 가상환경을 위한 모션 캡처 응용	8
3.1 통합개발환경	8
3.1.1 구성	8
3.1.2 크로스 플랫폼 기반 가상환경	10
3.1.3 모션 캡처 기반 가상 아바타	12
3.1.4 실시간 스트리밍	13
3.2 몰입형 콘텐츠 제작	15
3.3 실험 및 분석	20
3.3.1 실험환경 구성	20
3.3.2 사용자 설문 분석	22
IV. 몰입형 가상환경을 위한 강제 추적 기반 아바타 응용	31
4.1 강제 추적 기반의 가상 아바타 구현	31
4.1.1 강제 추적	31
4.1.2 가상 아바타 동작 추정	32
4.2 몰입형 가상환경 구성 및 응용	36
4.3 실험 및 분석	39
4.3.1 실험환경 구성	39
4.3.2 사용자 설문 분석	41
V. 결론	43
참 고 문 헌	44
ABSTRACT	52

표 목 차

[표 1] 통합 개발 환경과 시스템 설정	9
[표 2] 모션 캡처를 기반으로 한 실시간 스트리밍 성능의 비교 측정 결과	22
[표 3] 모션 캡처 장비를 사용한 제안하는 배우 기반 아바타와 NPC간의 현실감 비교 분석 결과	24
[표 4] 모션 캡처 장비를 사용한 제안하는 배우 기반 아바타와 PC 플랫폼 기반 NPC 간의 경험 비교 분석 결과	27
[표 5] 모션 캡처 장비를 사용한 제안하는 배우 기반 아바타와 모바일 플랫폼 기반 NPC 간의 경험 비교 분석 결과	28
[표 6] 모션 캡처 장비를 사용한 제안하는 배우 기반 아바타와 가상현실 플랫폼 기반 NPC 간의 경험 비교 분석 결과	29
[표 7] 제안하는 모션 캡처 장비를 사용한 배우 기반 아바타와 NPC 간의 시간 측정 비교 결과	30
[표 8] 제안하는 가상 아바타 애플리케이션의 분석 결과	42

그 립 목 차

[그림 1] 제안하는 통합 개발 환경의 구조	9
[그림 2] 유니터 3D 엔진의 핵심 구성 요소, 기능 및 패키지를 활용한 크로스 플랫폼 가상 환경 구현	11
[그림 3] 배우 기반 아바타 응용을 위한 모션 캡처 장비 설정 및 공간 구성	13
[그림 4] Motive 소프트웨어 및 유니터 3D 엔진의 실시간 스트리밍 프로세스	15
[그림 5] 모션 캡처를 사용하는 배우 기반 아바타 및 NPC의 사용자 경험을 비교 분석하기 위한 몰입형 콘텐츠 장면 구성	17
[그림 6] 정의된 NPC의 동적 경로 변경 및 사용자 추적 과정을 보여주는 웨이포인트 네비게이션 구조의 예시	19
[그림 7] 제안하는 몰입형 콘텐츠에 적용된 사용자의 진행 흐름	20
[그림 8] 체험 환경 구성 예시	21
[그림 9] 제안하는 몰입형 가상 환경 구축 과정	32
[그림 10] 가상 아바타 동작 추정을 위한 애니메이션 리깅 사용 개발 환경 설정	34
[그림 11] 가상 아바타 동작 추정 결과의 예	34
[그림 12] 제안하는 가상 아바타 동작 추정의 과정	35
[그림 13] 제안하는 몰입형 가상 환경에서의 과학 실험 콘텐츠 및 실험 결과	38
[그림 14] 가상 아바타의 시선 처리 결과	39
[그림 15] 비교 실험을 위한 세 가지 교육 환경 구성	41

알 고 리 즘 목 차

[알고리즘 1] NPC 캐릭터의 행동 패턴 정의	18
[알고리즘 2] 강체 추적을 기반으로 한 가상 아바타 동작 추정 과정	36

I. 서론

가상환경에서 현실과 유사한 경험을 제공하는 가상현실(Virtual Reality) 기술은 HMD(Head Mounted Display)와 같은 장비를 토대로 입체적인 시각 정보를 제공함과 더불어 청각, 촉각 등 여러 감각을 기반으로 가상과 현실의 경계를 허물어 보다 몰입감 높은 경험을 제공하는 기술로 발전하고 있다. 이러한 가상현실 기술의 발전으로 많은 관심을 받고 있는 메타버스(Metaverse)라는 용어는 Neal Stephenson의 과학 소설 "Snow Crash" (Stephenson, 1992)에서 유래되었으며 이는 물리적 세계에 연결된 확장된 가상 세계를 나타낸다. 초월의 의미를 가진 'meta'와 세계, 우주를 의미하는 'universe'의 조합이며 이러한 메타버스에 대한 관심이 높아지는 상황에서 가상현실 기술은 경제, 사회, 문화 전반으로 폭넓게 활용 및 발전되고 있다(Sweeney, 2019). 이와 관련하여, 몰입형 콘텐츠와 메타버스 콘텐츠를 제작하고 응용하는 연구들이 게임, 엔터테인먼트와 같은 분야는 물론 사회 기반시설, 생태계를 포함하는 거시적 관점에서 메타버스 구조를 제안하고 있으며 대학 캠퍼스 프로토타입을 고찰하는 연구(Duan et al., 2021)나 건축 전공 학생과 강이자 사이의 상호작용 관계를 제안하는 등의 연구들이 수행되었다(Gaafar, 2021). 또한, 메타버스 환경에서 쇼핑과 같은 일상적인 작업 수행에 있어 가상현실과 증강현실 등의 실감형 기술이 업무 수행에 미치는 영향을 분석하는 연구도 수행되었다(Xi et al., 2023).

가상환경에서 사용자는 키보드, 마우스와 같은 전통적 입력 방법에서 WIMP(Window, Icon, Menu, Pointer)으로 대표되는 인터페이스에서 음성이나 제스처 인식을 기반으로 하는 post-WIMP 인터페이스까지 발전되고 있다(van Dam, 1997). 가상현실, 증강현실 등 실감형 기술을 활용한 몰입형 가상환경에서 사용자의 몰입을 높이고 다양한 행동을 직관적이고 사실적으로 표현할 수 있는 연구들로, 시선, 손, 다리 등 신체를 직접 활용하거나(김민규, 이지원, 전찬규, 김진모, 2017) 햅틱 시스템 등을 응용하는 연구들이 진행되고 있다(김진모, 2019). 몰입형 가상환경에서 사용자의 사회적 현존감을 높이

는 요소로 인간을 모방하거나 인간의 행동, 표정 등을 유사하게 표현하는 가상 아바타 또는 에이전트를 응용하기도 한다(Pelechano et al., 2008). 이러한 인간과 유사한 아바타나 에이전트는 가상환경에서 사용자와의 자연스럽고 직관적인 상호작용을 제공하여 시스템 인터페이스의 역할을 담당하기도 한다.

본 연구는 몰입형 가상환경에서 사용자의 몰입감을 높이는 요소로 모션 캡처를 사용한 배우 기반 아바타와 강체 추적 기반 아바타를 응용하는 방법을 제안한다. 먼저 모션 캡처를 사용한 배우 기반 아바타와 유한 상태 기계(FSM, Finite-State Machine) 기반 NPC를 토대로 사용자가 콘텐츠로부터 느끼는 현존감과 몰입감을 비교분석한다. 동일한 체험환경에서 사용자들은 PC, 모바일, VR로 나뉘어 NPC와 배우 기반 아바타와 상호작용하면서 상호작용에 따른 현실감과 경험을 플랫폼 별로 세분화하여 분석하였다.

다음으로 사전에 정의된 현실 객체에 마커를 부착하고 마커를 통해 객체의 움직임을 계산한다. 그리고 현실 세계의 객체의 모습과 움직임과 대응되는 가상 객체를 설정하여 이를 기반으로 하여 가상 아바타의 동작 추정 과정을 정의한다. 최종적으로 전신 슈트를 착용한 배우가 없어도 현실 세계와 유사한 가상 아바타를 표현할 수 있는 강체 추적을 기반으로 한 동작 추정 방법을 제안한다. 그리고 이를 기반으로 하여 현실 세계에서 전달하기 어렵거나 위험할 수 있는 상황을 현실에 기반하여 모사할 수 있는 몰입형 가상환경에서의 응용을 제안한다. 이를 위해, 강체 추적 기반의 가상 아바타의 동작 추정 방법을 설계하고 현실 세계에서 저연령의 학생들이 직접 실험하여 수업하는 데에 위험성이 있는 과학실험을 교육하는 것을 주제로 하는 몰입형 가상환경 콘텐츠를 제작한다. 설계한 추정 방법과 콘텐츠를 사용하여 실험에 참여한 사용자를 대상으로 교육과 경험의 수준을 파악하는 설문 실험을 진행하여 본 연구에서 제안하는 강체 추적 기반 아바타가 몰입형 가상환경에서 주는 효과에 대해 분석한다.

II. 관련연구

2.1 가상환경

현재 확장현실(XR, eXtended Reality)에 대한 연구뿐만 아니라, 현실과 비현실이 경제, 사회, 문화를 관통하며 가상과 실제 간의 경계를 제거하는 기술을 활용하여 메타버스를 포함한 응용 연구가 진행되고 있다(Cho et al., 2023). 이러한 가상현실에서 사용자가 효과적으로 가상현실에 상호작용하는 연구가 진행되고 있다. 손에 들고 있는 컨트롤러를 사용하여 바느질에서 착안한 지속적인 목표 선택 방법을 제안하거나(Li et al., 2022), 사용자의 손이 객체 자체를 모방하여 손이 가상 환경과 더 직접적으로 상호 작용할 수 있도록 하는 새로운 상호 작용 기술을 제안하고(Pei et al., 2022), 시선과 손 움직임을 결합하여 상호 작용의 효율성과 조작의 편의성을 비교하고 분석한 연구가 있었다[(Mutasim et al., 2021), (Wagner et al., 2021)]. 그 외에도 실시간으로 호흡을 통제하는 AirRes 마스크를 개발함으로써 몰입적인 시나리오를 생성하는 가능성을 확인(Tatzgern et al., 2022)하는 등의 추가 장비를 사용하거나, 뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI, Brain-Computer Interface)를 사용하여 가상 객체의 무게에 대한 사용자의 지각을 감지하고 모방하는 방법을 통해 상호 작용에서 몰입과 존재감을 향상시키는 방법을 제안하거나(Ye & Long, 2022) 사용자의 행동 의도를 직관적인 구조를 통해 판별하기 위한 딥러닝을 사용하는 방법(Kang et al., 2020)도 제안되었다. 뿐만 아니라 시각-촉각(visuo-haptic) 인터페이스를 통해 시각 정보와 촉각을 함께 사용하거나(Yun et al., 2020) 전기근전센서를 기반으로 한 가상 객체를 손으로 잡는 과정에서 실감을 향상시키기 위한 의사-촉각(pseudo-haptic) 인터페이스(Kim et al., 2020)도 제안되었다. 이와 같이 가상 환경 및 객체와 상호작용하는 사용자에게 높은 몰입감을 제공하기 위한 다양한 조작법, 장비, 접근법 연구가 진행 중이다.

협업 가상환경(CVE, Collaborative Virtual Environments)에 대한 연구는

VR 및 AR과 같은 기술을 결합하여 몰입형 가상환경을 구축하기 위한 연구를 촉발시켰다(Chalil Madathil & Greenstein, 2017). 이러한 연구들을 통해 사용자 체험환경은 더욱 다양해지고 있다. PC와 모바일 기기, AR 사용자와 같은 비몰입형 사용자가 VR HMD를 착용한 몰입형 사용자와 효과적으로 상호작용하기 위한 여러 가지 방법들이 제안되었다[(Gugenheimer et al., 2017), (Jansen et al., 2020) (Lee et al., 2020)]. 또한 VR 및 AR 사용자가 함께 협업하는 비대칭 가상환경을 위해 독립적인 사용자 인터페이스를 설계하는 연구도 수행되었다(Cho et al., 2021). 이것과 유사하게, 공유된 가상 환경에서 움직임의 협업적으로 결정하는 과정에서 비대칭 가상환경의 효과를 분석한 연구도 있었다(Chakraborty, 2022). 웹캠을 통한 비몰입형 사용자와 VR 몰입형 사용자의 비대칭 소셜 VR 게임 QuarantivityVR를 설계하여 비대칭 가상 환경에서 즐거운 상호작용 방법을 제공하는 연구도 이루어졌다(Yassien et al., 2022).

가상환경에서 사용자 간의 연구에서 그치지 않고, 메타버스와 같은 확장된 가상환경의 다양한 응용에 대한 연구가 수행되었다. 체험 환경을 기반으로 다양한 산업 분야에 적용 가능한 접근 방식을 제안하여 이를 통해 다양한 플랫폼과 장치의 사용자가 함께 참여할 수 있도록 하거나(Feld & Weyers, 2021), 메타버스에서의 VR 서비스를 위한 인센티브 매커니즘 프레임워크를 제안하였으며(Xu et al., 2022), 건축 교육에서 메타버스 가상 환경을 활용하여 건축 학생과 강의자 간의 상호 작용에 대한 대화형 관계 프레임워크를 제안하거나(Gaafarr, 2021), 메타버스 환경에서 쇼핑과 같은 일상적인 작업 수행에 대한 VR 및 AR과 같은 응용 기술의 영향을 분석하는 연구가 수행되었다(Xi et al., 2023).

또한 가상환경에 참여하는 사용자 참여 방법 및 플랫폼에 관한 연구뿐만 아니라 가상환경 내의 가상 존재들과의 상호작용 연구도 진행되었다. 가상 환경에서 다른 아바타 또는 에이전트와의 실제적인 움직임 상호 작용을 생성하는 대화형 알고리즘을 제안하거나(Narang et al., 2018), VR과 모션 캡처의 조합을 사용하여 공유된 협업 가상환경에서 다양한 비율의 가상 캐릭터를 생성하는 방법을 제안하는 등의(Kammerlander et al., 2021) 가상 아바타들이

사용자에게 미치는 영향을 분석하는 연구가 있었다. 그리고 모션 캡처를 사용하여 가상 아바타의 얼굴 및 몸의 표현 수준을 높이면 가상현실에서의 사회적 상호 작용의 현실감과 품질을 향상시킬 수 있음을 실험을 통해 확인하거나(Fraser et al., 2022), 대화 상대를 현실적인 동작 아바타로 표현하는 VR이 다른 사람들과의 사회적 상호 작용에 긍정적인 영향을 미치는 확인하는(Rogers et al., 2022) 등의 가상 아바타의 표현 정도에 따른 효과와 관련된 연구도 진행되었다. 위와 같은 관점에서 본 연구는 가상 환경이나 다른 사용자와의 상호 작용이 아닌 가상 캐릭터 또는 NPC와의 상호 작용을 제안하여 다양한 사용자 참여를 허용하는 새로운 체험 환경을 제시하고 몰입형 가상 환경 제작을 목표로 한다.

2.2 모션 캡처

모션 캡처는 몸이나 사물에 마커를 부착, 또는 적외선을 이용하는 등의 방법으로 인체나 사물의 움직임을 디지털 형태로 기록하는 작업을 의미한다. 최근에는 가상현실, 증강현실과 같은 실감형 기술과 더불어 영화산업과 같은 다양한 분야에서 응용 콘텐츠를 제작하는 데에 사용되고 있다. 모션 캡처는 광학식과 관성식으로 구분되며 광학식은 두 대 이상의 카메라를 통해 센서(마커)를 촬영하여 3차원 정보를 계산하는 방식으로 실시간에 가까운 결과물을 사실적으로 표현하는 이점을 가진다. 관성식은 가속도, 자이로, 지자기 센서 등이 조합된 관성 센서가 인체 관절 및 주요 부위에 부착된 전용 슈트를 착용하여 움직임을 계산하는 방식이다. 이는 광학식과 비교하여 상대적으로 저렴한 비용으로 움직임을 계산할 수 있다. 이외에도 신체에 부착하는 센서나 마커를 사용하지 않고 컴퓨터 비전이나 초음파 등을 통해 계산하는 방법 등도 있다. 사용하려는 환경, 요구사항, 예산 등을 고려하여 각 방식이 가지는 장단점을 토대로 구축하려는 시스템과 콘텐츠에 맞게 사용하는 것이 필요하다. 다만, 모션 캡처를 활용하기 위해서는 높은 비용의 장비가 필요하고 장비의 특성에 따라 충분한 공간이 요구되기도 한다. 이러한 기술적, 환경적 문제점을 해결하기 위한 연구들로 RGB 카메라를 이용하여 실시간 모션 캡처를

수행하거나(Metha et al., 2020), 저비용 소비자 등급의 센서 세트에 구성된 모션 캡처 시스템을 활용하여 관절 위치 추정의 정확성을 높이기 위한 연구(Chatzitofis et al., 2022)등이 진행되었다. 또한 필요한 센서의 개수를 줄이면서 고품질의 모션 데이터를 얻는 방법에 대한 연구들도 진행되었다(Yi et al., 2021). 그리고 이러한 모션 캡처를 활용하여 무형 문화유산인 춤을 디지털화하여 보존하고자 하는 등(Zhang et al., 2022)의 응용으로도 많은 연구가 이루어지고 있다. 최근에는, 저가형 모션 캡처 장비인 키넥트를 활용한 실시간 상호작용 애니메이션 시스템에 관한 연구로 사용자 캐릭터의 자세를 제어하고, 상대 캐릭터와의 상호작용을 자연스럽게 처리하는 방법을 제안하였다(김정호, 강다은, 이운상, 권태수, 2022). 또한, 사전에 제작된 소수의 애니메이션 데이터로부터 사용자의 자세와 유사한 캐릭터 자세를 검색하여 사용하는 기술을 제안하기도 하였다(배태성, 이은지, 김하은, 박민지, 최명걸, 2019). 본 연구에서는 이러한 모션 캡처를 활용하여 사용자의 몰입감을 높이기 위한 배우 기반 아바타를 응용하고, 효율적으로 가상 아바타의 동작을 추정하여 몰입형 가상환경에 응용할 수 있는 방법으로 강제 추적에 기반한 아바타를 연구하고자 한다.

2.3 아바타와 에이전트

가상현실, 증강현실을 포함한 몰입형 가상환경에서 사용자의 몰입을 높이기 위한 연구들로 가상 아바타 또는 에이전트에 관한 연구들이 진행되고 있다. 가상현실에서 가상 인간 (Virtual Human, VH)에 관한 연구로 현실 세계 인간의 행동을 반영하는 가상 인간인 아바타나 컴퓨터 알고리즘에 의해 행동이 결정되는 에이전트를 분류하기도 한다(Pütten et al., 2010). 이러한 가상 인간인 아바타나 에이전트는 현실과 가상의 경계를 허무는 요소로서 사용자와 상호작용함으로써 사용자의 몰입을 높이거나 가상환경에서 제공하고자 하는 바를 정확하게 전달하고 이해하도록 도움을 준다. 이러한 아바타를 통해 사용자에게 보다 높은 몰입감을 제공하기 위해 여러 환경적 조건에서 높은 수준의 애니메이션이 필요한지와 관련된 연구가 이루어졌다(Yun et al., 2023).

본 연구에서는 몰입형 가상환경에서 가상현실 사용자의 몰입감을 높이는 요소로서 가상 아바타를 활용하는 방법을 제안한다. 동시에 신체 정보를 추적하여 기록하는 방식이 아닌 현실의 객체에 부착된 마커를 추적하여 생성된 가상 객체를 기반으로 객체의 움직임에 대응되는 가상 아바타의 동작을 추정하는 방법을 제안한다.

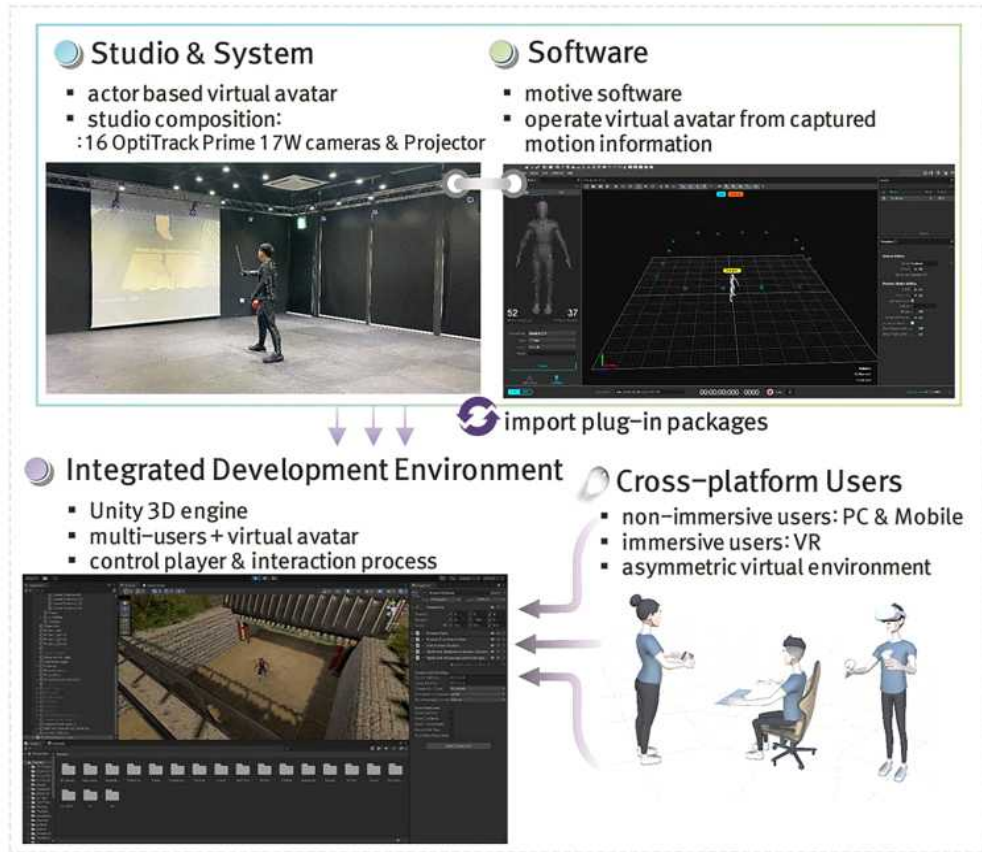
Ⅲ. 몰입형 가상환경을 위한 모션 캡처 응용

3.1 통합개발환경

본 연구에서는 먼저 가상 아바타를 활용한 몰입형 가상환경을 제안한다. 이는 PC와 모바일과 같은 비몰입형 사용자와 VR HMD 사용자와 같은 몰입형 사용자가 함께 참여할 수 있는 비대칭 가상환경을 기반으로 한다. 이 환경에서 사용자는 콘텐츠를 구성하는 가상요소들 중 사용자가 조작하는 플레이어가 아닌, 미리 정해진 패턴과 규칙에 따라 행동하는 아바타와 상호 작용할 수 있다. 이에 따라 다음과 같은 통합개발환경을 제작하였다.

3.1.1 구성

통합개발환경은 PC 및 모바일 기기와 같은 비몰입형 플랫폼과 오쿨러스 퀘스트 2 (Oculus Quest 2) HMD를 사용하는 몰입형 사용자들이 함께 참여할 수 있는 구조로 구성하였다. 여기에 핵심이 되는 모션 캡처를 사용한 배우 기반 아바타를 구현하기 위해 16개의 OptiTrack Prime 17W 카메라와 Motive 소프트웨어(NaturalPoint, 2023)로 구성된 스튜디오를 활용한다. [그림 1]은 유니티 3D 엔진을 핵심 도구로 사용하는 제안하는 통합 개발 환경의 구조를 요약하며, PC 및 모바일 기기를 기반으로 하는 비몰입형 및 오쿨러스 퀘스트 2와 같은 VR 몰입형 사용자가 참여할 수 있는 통합개발환경과 모션 캡처를 사용한 가상 아바타의 운용 방법을 보여준다. 더불어, 통합 개발 환경 및 시스템의 전반적인 구성은 [표 1]에 나타나 있다.



[그림 1] 제안하는 통합 개발 환경의 구조

Development Kit		
Tool	Unity 3D engine (ver. 2021.3.7f1)	
Network	Photon Unity Networking (PUN) package	
Virtual Avatar		
Software	Motive software	
System	16 OptiTrack Prime 17 W cameras & projector	
Users		
PC	Device	Device Intel Core i7-11800H, 16GB of RAM, and a Geforce RTX 3050 GPU
	Input	Keyboard and mouse
Mobile	Device	Samsung Galaxy S8
	Input	Screen touch and GUI (virtual joystick, button, etc.)
VR	Device	Oculus Quest 2 HMD and touch controller
	Input	Controller key button and thumbstick

[표 1] 통합 개발 환경과 시스템 설정

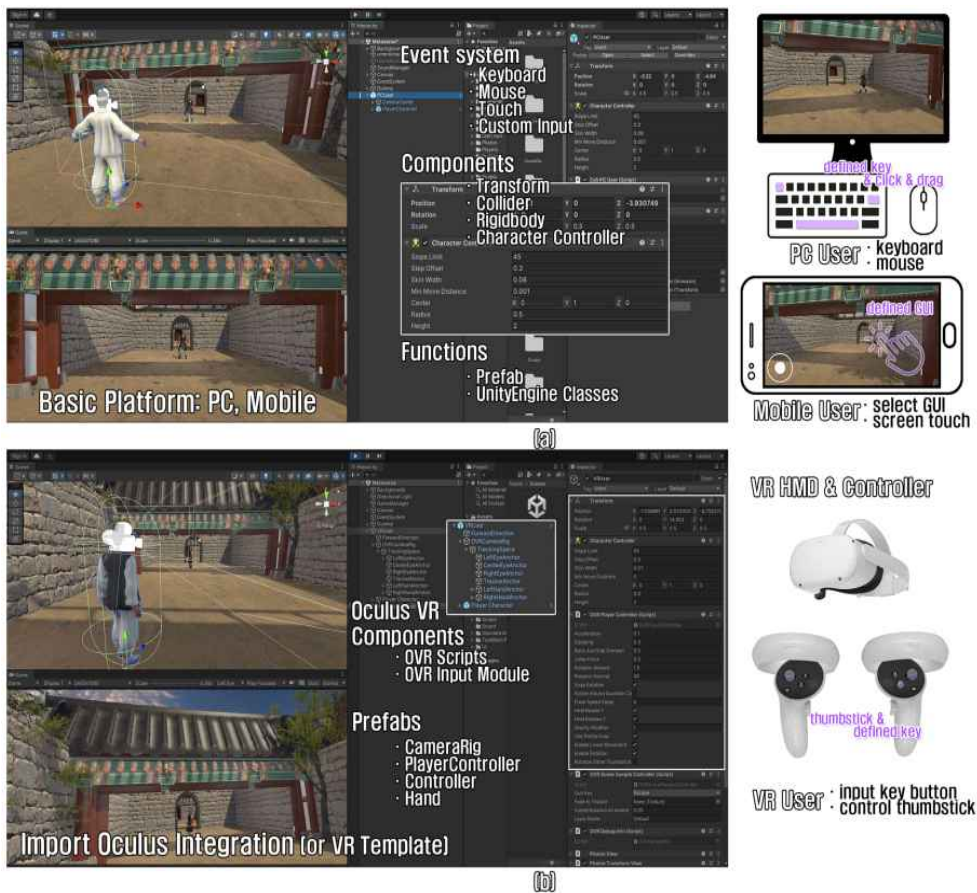
3.1.2 크로스플랫폼 기반 가상환경

유니티 3D 엔진은 3D 및 2D 비디오 게임에 대한 개발 환경을 제공하는 게임 엔진으로, 현재는 3D 애니메이션, 건축 시각화, VR 및 AR과 같은 대화형 콘텐츠 제작의 통합 도구로 사용되며 Windows, MacOS, Web, Android 및 PlayStation과 같은 다양한 플랫폼에서 쉽게 콘텐츠를 생성할 수 있도록 지원하고 있다. 본 연구에서 다양한 플랫폼에서의 사용자 경험을 분석하기 위하여 유니티 3D 엔진을 여러 플랫폼에 걸친 몰입형 콘텐츠 제작의 핵심 도구로 활용하였다.

제안하는 체험 환경은 PC 및 모바일 기기를 기반으로 하는 비몰입형 사용자와 VR HMD를 사용하는 몰입형 사용자로 구성되어 있다. 이 접근은 이전 연구에서 소개된 크로스 플랫폼 기반의 비대칭 가상 환경인 XAVE(Cho et al., 2023)에 기반하고 있다. XAVE는 다양한 사용자 참여를 고려하여 비대칭 가상 환경을 구축하며, 최소한의 장치 요구 사항과 매우 다양한 응용 프로그램을 위해 사용자 특정 특성 및 플랫폼 의존적 상호 작용을 위한 템플릿 구조를 정의한다. 제안하는 템플릿을 기반으로 이 연구에서는 PC, 모바일 및 VR 사용자가 참여하는 몰입형 가상 환경에서 상호작용을 구현한다.

먼저, 모든 플랫폼 사용자는 일인칭 시점으로 구성되었다. 이는 유니티 3D 엔진의 카메라 및 플레이어 속성 및 입력 클래스[그림 2 (a)]를 기반으로 키보드 및 마우스 또는 화면 터치 및 클릭 입력을 통해 트랜스폼 컴포넌트 및 사용자 인터페이스 이벤트를 제어함으로써 달성되었다. 이어서 몰입형 사용자는 오쿨러스 퀘스트 2와 전용 컨트롤러를 통해 VR HMD를 사용하여 참여했다. 오쿨러스 통합 소프트웨어(Oculus Integration Software, Facebook Technologies, 2021)는 유니티 3D 엔진에서 오쿨러스 기기, 렌더링 및 오디오 개발을 지원하기 위한 패키지로 제공된다. 오쿨러스 통합 소프트웨어는 유니티 3D 엔진 개발 환경에 추가로 설치하였으며 VR 사용자의 행동은 패키지에서 제공하는 기능(OVRCameraRig, OVRPlayerController 및 OVRInput 등)을 활용하여 구현되었다[그림 2 (b)]. 실험에는 플랫폼 별 상호작용 차이를

확인하기 위해 각 플랫폼들은 일관된 기능을 가지며 플랫폼 별로 적절하게 구현하였다. 이는 [그림 2]의 우측에 설명되어 있다. PC는 방향키로 움직이며 스페이스바로 점프하고 마우스를 통해 시점을 움직인다. 모바일의 경우 가상 패드를 통해 움직이고 가상 버튼을 누르는 것으로 점프를 수행하며 화면을 슬라이드하는 것으로 시점을 움직인다. 마지막으로 VR은 컨트롤러의 엄지스틱을 통해 움직이며 컨트롤러에 지정된 키를 통해 점프하며 HMD를 착용하여 고개를 돌리는 것으로 시점을 움직인다.



[그림 2] 유니티 3D 엔진의 핵심 구성 요소, 기능 및 패키지를 활용한 크로스플랫폼 가상환경 구현

(a) PC 및 모바일 기기 기반의 비몰입형 사용자

(b) 오쿨러스 퀘스트 2를 사용하는 몰입형 사용자

3.1.3 모션 캡처 기반 가상 아바타

몰입형 콘텐츠에 참여하는 사용자들은 가상 환경, 물체, 다른 사용자, 그리고 가상 캐릭터의 정의된 행동과 상호 작용을 통해 제시된 목표와 목적을 충족시키는 경험을 형성한다. 본 연구는 교육 콘텐츠에서 교육자, 게임에서 몬스터, 공연에서 배우와 같은 NPC가 콘텐츠에서 중요한 역할을 한다는 가정 하에, 인간 배우가 가상 아바타로 사용자와 상호 작용할 때 가상 환경에 몰입하고 흥미를 유발할 수 있다고 가설을 세웠다. 이를 위해 모션 캡처를 사용하여 가상 아바타를 적용하는 통합 개발 환경을 구축하였다. 모션 캡처의 방식 중 널리 알려진 방식으로는 크게 광학식과 관성식으로 나뉜다. 본 연구에서는 먼저 몰입형 가상환경에서 사용자와 아바타의 상호작용을 분석하는 것을 중점으로 하기 때문에 비용이 상대적으로 많이 들더라도 정교한 움직임이 가능한 광학식 모션 캡처 장비를 사용하였다. 이로써 NPC 역할을 하는 배우 기반 아바타의 행동을 더 정교하게 표현했다.

배우 기반 아바타의 구현을 위해 먼저 7.8m × 7.8m의 공간에 배치된 16개의 카메라를 사용하여 모션 캡처를 수행한다. 배우는 광학식 마커가 부착된 전신 슈트를 착용하고, 정의된 캐릭터의 동작을 공간에서 수행했다. [그림 3]은 모션 캡처를 사용한 배우 기반 아바타의 설정 과정을 보인다. 한 명 이상의 배우가 참여할 수 있지만, 물리적 공간의 제한, 배우의 동작, 그리고 콘텐츠의 특성을 고려하여 본 연구에서는 한 명의 배우로 체험환경을 구축했다. 또한, 배우가 자신의 동작을 기반으로 작동하는 가상 아바타의 동작을 직접 확인하는데 어려움을 겪는 경우를 고려하여, 모션 캡처 공간의 앞쪽에 프로젝터를 설치하여 간접적으로 자신의 행동을 확인할 수 있도록 하였다.



[그림 3] 배우 기반 아바타 응용을 위한 모션 캡처 장비 설정 및 공간 구성

3.1.4 실시간 스트리밍

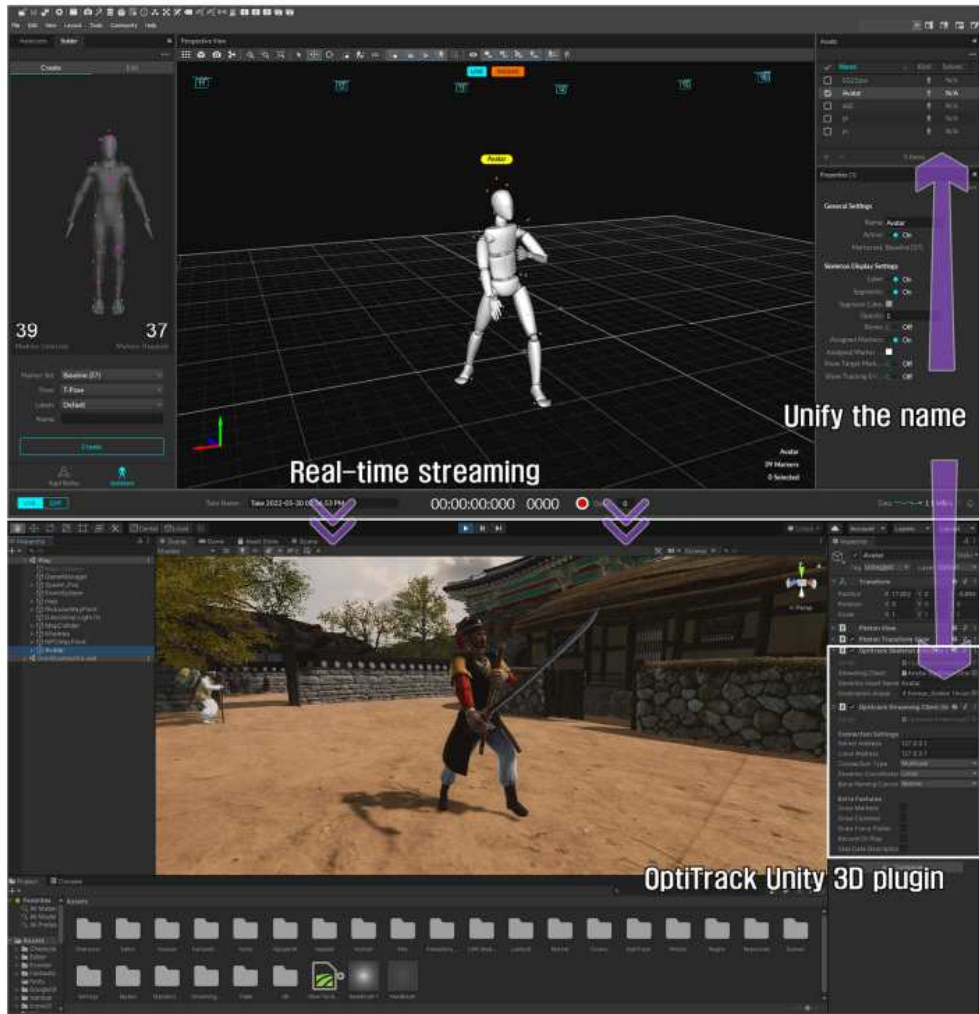
16개의 모션 캡처 카메라로부터 캡처된 배우들의 모션 정보는 Motive 소프트웨어를 통해 확인할 수 있으며 Motive 소프트웨어를 유니티 3D 엔진에

연결하기 위한 실시간 스트리밍 구조를 정의한다. 먼저 유니티 3D 엔진에서는 미리 만들어진 애니메이션 데이터를 기반으로 하지 않기 때문에 가상 아바타 캐릭터의 애니메이션을 휴머노이드(Humanoid) 유형으로 설정한다. 이후 모션 캡처 카메라에서 캡처된 애니메이션 데이터는 Motive 소프트웨어에서 스트리밍되어 유니티 3D 엔진의 휴머노이드 아바타로 실시간으로 전달된다. OptiTrack Prime 17W 카메라를 사용하여 모션 캡처 개발 환경을 구축하였기 때문에, Motive 소프트웨어를 통해 스켈레톤 데이터를 유니티 3D 엔진으로 스트리밍하면서 추가적인 스트리밍 프로그램을 사용하지 않았다. 이로써 추가적인 스트리밍 지연은 발생하지 않았다.

마지막으로 유니티 3D 엔진에서 스트리밍되는 모션 정보를 받기 위해 NPC의 역할을 수행하는 아바타에게 OptiTrack에서 제공하는 기능(OptitrackSkeletonAnimator, OptitrackStreamingClient)을 컴포넌트(Component)로 할당한다. [그림 4]는 이 과정을 보여준다. 최종적으로 모션 캡처 카메라에 의해 캡처된 배우의 모션이 Motive 소프트웨어를 통해 스트리밍되어 유니티 3D 엔진의 가상 아바타와 실시간으로 동기화되는 것이다. 가상 환경 내에서의 가상 아바타의 행동과 상호 작용은 유니티 3D 엔진 기능을 통해 구현되었다.

다음은 하나 이상의 배우가 참여할 수 있는 가상 아바타의 실시간 스트리밍 처리 과정을 단계별로 간략하게 정리한 것이다.

1. 각 배우가 착용할 전신 슈트에 마커를 부착
2. Motive 소프트웨어에서 각 배우에 대한 스켈레톤을 생성하고 스켈레톤에 대한 이름을 등록
3. 모션 캡처 장비를 유니티 3D 엔진과 연동하기 위한 플러그인을 설치
4. 유니티 3D 엔진에서 휴머노이드 가상 아바타를 생성하고 모션 캡처 데이터를 실시간으로 스트리밍하기 위한 컴포넌트를 할당
5. Motive 소프트웨어에서 각 스켈레톤에 해당하는 가상 아바타의 실시간 스트리밍 구성 요소의 이름을 통일

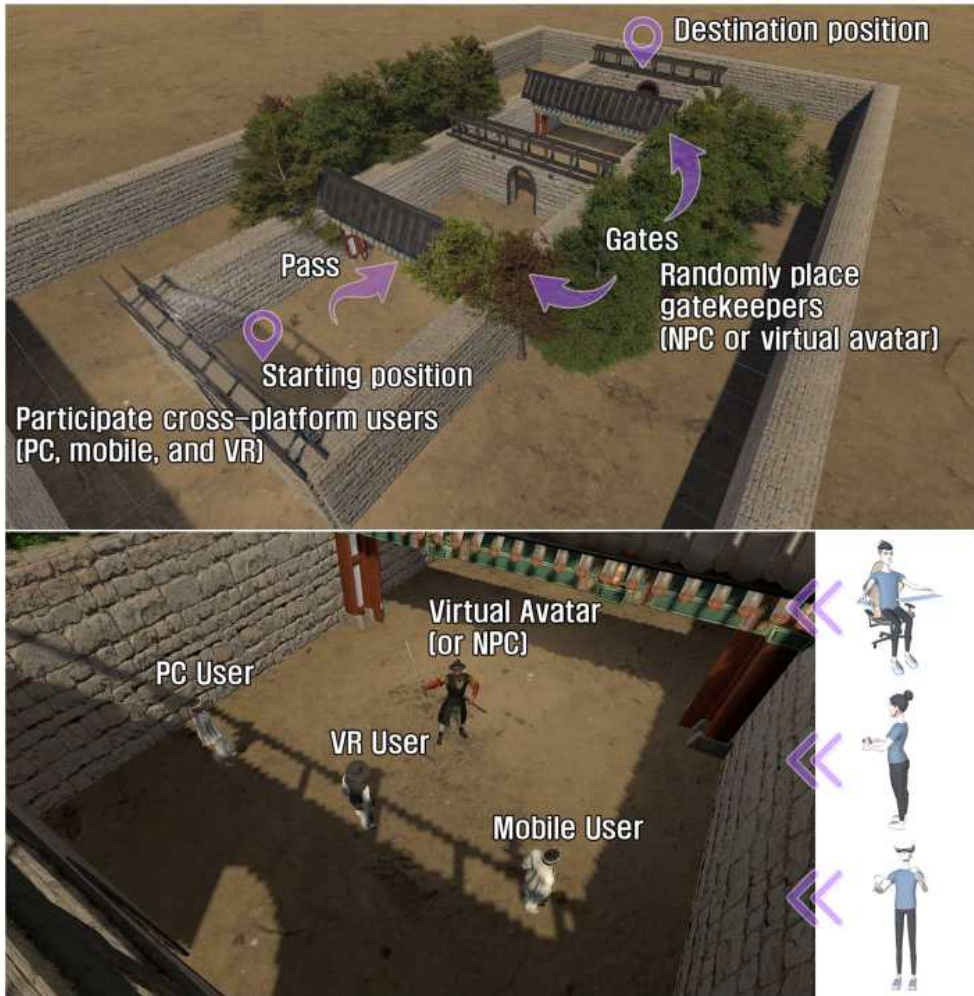


[그림 4] Motive 소프트웨어 및 유니티 3D 엔진의 실시간 스트리밍 프로세스

3.2 몰입형 콘텐츠 제작

본 연구에서 제안하는 배우 기반 아바타 NPC와 가상환경에서 상호작용하는 사용자 경험을 실험 및 분석하기 위해 다음과 같은 콘텐츠를 제작하였다. PC, 모바일과 같은 비몰입형 사용자와 VR과 같은 몰입형 사용자가 함께 참여하는 가상 환경을 가정하고 제작하였으며 본 연구에서는 플랫폼 별 조작의

차이는 고려하지 않기 때문에 두 유형의 사용자 모두 가상환경에서의 조작은 동일하게 설정하였다. 그리고 배우 기반 아바타 NPC의 비교 대상으로 정해진 패턴에 따라 동작하는 NPC를 배치하였다. 여기서 사용자는 상호 작용 중인 캐릭터가 가상 아바타 또는 NPC인지 여부를 모르는 채로 콘텐츠에 참여하였다. 이후 설문에서 사용자에게 가상 아바타와 NPC와의 상호 작용 간에 차이를 인식했는지를 확인하였다. [그림 5]는 제안하는 몰입형 콘텐츠의 장면 구성과 제작 결과를 보여준다. 모든 사용자는 동일한 위치에서 시작하고 목적지에 도달하기 위해 두 개의 관문을 통과한다. 각 관문에서는 무작위로 배치된 가상 아바타와 NPC가 문지기의 역할을 수행하며 사용자는 문지기를 피하기 위해 빠르게 관문을 통과해야 한다. 문지기들은 간단한 규칙을 가지고 있었으며, 사용자에게 주어진 무기를 사용하여 공격하고 사용자가 피하지 못하고 공격받았을 경우 시작 위치로 사용자는 되돌아간다.



[그림 5] 모션 캡처를 사용하는 배우 기반 아바타 및 NPC의 사용자 경험을 비교 분석하기 위한 몰입형 콘텐츠 장면 구성

배우 기반 아바타 NPC를 비교 분석하기 위해 설계된 FSM 기반 NPC의 행동 패턴 알고리즘은 [알고리즘 1]과 같으며 [그림 6]에 표현되어 있다. 먼저 NPC는 웨이포인트 배열에 정해진 지정된 경로에 따라 반복해서 움직인다. 사용자가 NPC를 중심으로 정해진 일정 추적 영역 안으로 들어오면 해당 사용자의 위치가 웨이포인트에 삽입되며 사용자를 추적한다. 이 때 속도가 빨라지며 설정된 공격 범위에 사용자가 들어오게 될 경우 공격을 수행한다. 공격받은 사용자는 다시 처음 위치로 돌아가게 된다. 사용자가 추적 영역을 벗

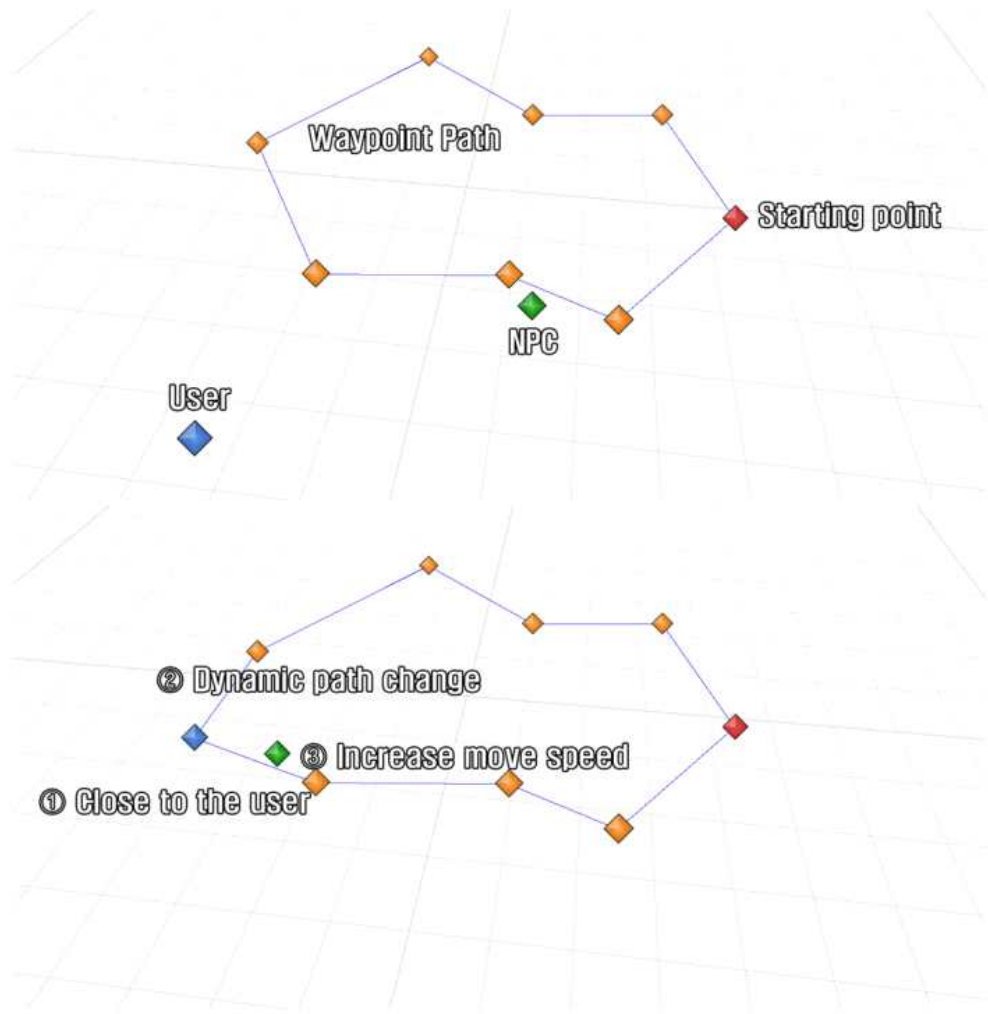
어날 경우 NPC는 웨이포인트 배열에서 사용자의 위치를 제거하고 기존의 경로를 따라 움직인다.

[알고리즘 1] NPC 캐릭터의 행동 패턴 정의

procedure 정의된 웨이포인트 기반 NPC 행동 패턴

1. $p[] \leftarrow$ 웨이포인트 위치 좌표 배열
2. $p[]$ 를 통해 지정된 경로로 이동
3. $d_m \leftarrow$ 이동 임계 거리
4. $d_a \leftarrow$ 공격 임계 거리
5. $d_u^N \leftarrow$ 유저와 NPC 사이의 거리
6. **if** $d_u^N < d_m$ **then**
7. **if** $!p[].\text{contain}(p_u)$ **then**
8. $i \leftarrow$ 현재 웨이포인트 인덱스
9. $p[i]$ 와 $p[i+1]$ 사이에 p_u 를 삽입
10. 이동 속도 증가
11. **end if**
12. **else**
13. **if** $p[].\text{contain}(p_u)$ **then**
14. 배열에서 p_u 를 제거
15. **end if**
16. **end if**
17. **if** $d_u^N < d_a$ **then**
18. NPC 공격 동작 실행
19. **end if**

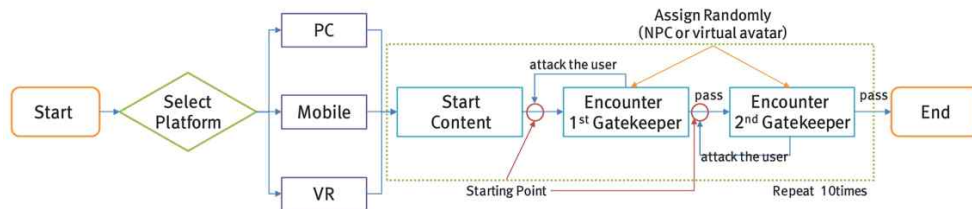
end procedure



[그림 6] 정의된 NPC의 동적 경로 변경 및 사용자 추적 과정을 보여주는 웨이포인트 네비게이션 구조의 예시

사용자는 배우 기반 아바타와 NPC가 어떻게 배치되어 있는지 알지 못한 상태에서 실험을 진행하였다. 여기서 사용자는 두 아바타들과 반복적으로 상호작용하면서 NPC의 규칙적인 패턴과 배우 기반 아바타의 불규칙적인 패턴을 인식하였다. 이러한 과정에서 배우 기반 아바타를 사용하는 것이 동일한 콘텐츠를 경험하는 과정에서 존재감, 몰입도 및 흥미와 같은 전반적인 경험에 차이를 일으킬 수 있는지를 비교하고 분석하는 것이 본 연구에서의 주요 목표 중 하나이다. 이는 설문 실험을 통해 확인되었다. [그림 7]은 본 연구에서

제작한 콘텐츠에서 사용자의 전반적인 진행 흐름을 보인다. 사용자가 콘텐츠를 시작하면 PC, 모바일, VR의 세 가지 플랫폼 중 하나를 선택하여 시작한다. 그리고 두 관문을 통과하여 목적지에 도달하면 1회 완료된다. 두 관문에는 배우 기반 아바타와 NPC가 무작위로 문지기로 할당된다. 이 과정에서 사용자가 문지기에게 공격당하면 처음 위치로 돌아간다. 설문 실험에서 사용자는 이러한 과정을 총 10회 반복 경험한다. 여기서 관문에 할당되는 문지기는 처음에 할당되면 이후 10회 동안 변경되지 않는다. 이는 사용자가 10번의 반복을 수행하면서 문지기가 NPC인지 배우 기반 아바타인지 추정하는 과정을 포함시키기 위함이다.



[그림 7] 제안하는 몰입형 콘텐츠에 적용된 사용자의 진행 흐름

3.3 실험 및 분석

3.3.1 실험환경 구성

본 연구에서 제안하는 통합 개발 환경은 Intel Core i7-11800H, 16GB RAM, 그리고 Geforce RTX 3050 GPU 사양의 PC에서 진행되었다. 또한 16대의 OptiTrack Prime 17W 카메라를 사용하여 현실 배우의 동작을 캡처하는데 사용하였다. 현실의 배우는 7.8m x 7.8m의 공간에서 동작을 수행하고 비몰입형 및 몰입형 사용자는 편안하게 앉거나 서 있을 수 있는 1.5m x 1.5m의 공간에서 콘텐츠에 참여하였다. 가상 환경 및 몰입형 콘텐츠 제작은 Unity 2021.3.7f1 (64-bit)을 기반으로 한 오쿨러스 통합 소프트웨어 개발 키트 (SDK), Motive 소프트웨어와 컴포넌트가 사용되었다. [그림 8]은 PC, 모바일, VR 사용자가 제작된 몰입형 콘텐츠를 체험하는 것을 보여준다.



[그림 8] 체험 환경 구성 예시

본 연구에서는 모션 캡처를 사용하여 실시간으로 사용자와 상호작용하도록 응용하는 것을 제안하고 있으며 따라서 실시간 사용을 위한 스트리밍 성능은 필수적이다. [표 2]는 콘텐츠의 실시간 스트리밍 성능을 보여준다. 사용된 성능 측정용 PC는 Intel Core i7-9700K, 32GB RAM, 그리고 Geforce RTX 2080 GPU로 구성되었다. 배우 기반 아바타 또는 NPC가 연결된 PC를 기반으로 1명에서 10명까지 접속자 수를 늘려가며 연결될 때의 FPS를 측정하였다. 이는 최대 접속자 수인 10명을 가정하여 측정된 것이다. 여기서 사용자가 한 명일 경우에는 배우 기반 아바타 또는 NPC만이 연결된 기본 상태이다. 측정 결과 배우 기반 아바타를 사용할 때와 NPC를 사용할 때의 FPS의 차이가 약 10~15FPS 정도의 적은 차이를 확인했다. 이로써 본 연구에서 제안하는 배우 기반 아바타를 적용하여도 몰입형 가상환경에서 여러 사용자가 함께 참여하여 응용하는데 스트리밍 성능과 관련한 기술적인 문제가 없음을 확인하였다.

Frame Per Seconds (FPS)										
유저의 수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NPC	169.2	162.4	160.7	157.2	155.4	153.3	150.2	148.2	146.5	143.6
배우기반 아바타	152.1	145.1	144.1	143.2	140.0	138.6	136.6	133.1	132.0	130.4

[표 2] 모션 캡처를 기반으로 한 실시간 스트리밍 성능의 비교 측정 결과

3.3.2 사용자 설문 분석

몰입형 콘텐츠를 체험하는 과정에서 제안하는 모션 캡처를 사용한 가상 아바타와 기존 NPC 간 상호작용에 대한 경험을 비교하고 분석하기 위해 설문 실험을 진행하였다. 설문은 게임을 포함한 몰입형 콘텐츠를 경험해본 적이 있는 23세에서 27세 사이의 참여자 남성 6명, 여성 3명 총 9명을 대상으로 진행되었다. 참여자들은 PC, 모바일 기기를 사용하는 비몰입형 플랫폼과 VR HMD를 사용하는 몰입형 플랫폼 중 선택하여 체험하였다. 경험의 순서가 경험에 미치는 영향을 고려하여, 참여자 그룹을 형성하여 콘텐츠를 체험하기로 결정하였다. 첫번째 그룹은 PC, VR, 모바일의 순서, 두번째 그룹은 모바일, PC, VR의 순서, 마지막 그룹은 VR, 모바일, PC의 순서로 진행했다. 제안하는 몰입형 가상환경은 세가지 플랫폼과 대수의 사용자가 동시에 참여할 수 있으나, 설문은 사용자와 배우 기반 아바타 또는 NPC와의 직접적인 상호작용 경험에 초점을 맞추고 있기 때문에 단일 사용자의 참여만을 고려했다. 실험의 주요 목표는 참여자들이 배우 기반 아바타와 NPC와 상호작용하면서 발생하는 경험의 차이를 분석하는 것이다. 그룹은 어느 한 플랫폼에 집중되지 않도록 나이, 성별, VR과 같은 상호작용 콘텐츠에 대한 경험을 기준으로 적절하게 구성하였다. 각 참여자는 세 플랫폼을 차례대로 경험한 후 설문에 참여했다. 초기 테스트 과정에서 두 관문을 탈출하는 데에 평균 30~45초가 소요되었다. 너무 빠르게 실험이 종료되어 충분히 분석되지 못하는 경우가 있었고 이런 점을 반영하여 참여자들에게 플랫폼 별로 각 10번의 연속적인 체험을 수행하도록 하였다. 참여자들은 경험을 반복적으로 수행하는 과정에서 배

우 기반 아바타와 NPC를 구별할 수 있었다. 특히 NPC의 행동 패턴을 발견함으로써 NPC가 서있는 관문을 상대적으로 쉽게 통과하는 모습을 보였다.

첫 번째 설문은 사용자의 존재감과 관련된 현실감을 분석한다. 연구는 10번의 체험 동안 참여자들이 가상 아바타와 NPC 간의 차이를 인식할 것으로 가설을 세웠으며, 따라서 가상 환경에서의 몰입에 차이가 발생할 것으로 예상하였다. 대안 가설은 제안하는 배우 기반 아바타가 NPC의 행동 패턴과 비교하여 현실감에 차이를 만들어낼 것이라는 것이며 귀무 가설은 둘 사이에 차이가 존재하지 않을 것으로 설정하였다. 참여자들은 10회의 체험 중 첫 번째, 다섯 번째, 마지막 체험을 수행한 후 동일한 설문에 반복해서 답하였다. 이 연구는 현실감과 관련된 설문을 수행하기 위해 (Witmer et al., 2005)의 Presence Questionnaire의 일부를 사용하였다. Presence Questionnaire은 현실감(Realism), 행동 가능성(Possibility to Act), 인터페이스 품질(Quality of Interface), 조사 가능성(Possibility to Examine) 및 성능 자체 평가(Self-Evaluation of Performance)라는 다섯 가지 핵심 요인을 기반으로 하는 19개의 질문을 통해 존재감을 포괄적으로 평가하는 데 사용된다. 이 연구는 Presence Questionnaire의 핵심 요인 중 사용자의 몰입과 관련된 현실감에 대한 7가지 질문을 활용했다. 기존의 일반적인 질문 항목들은 본 연구의 성격에 알맞게 해석되도록 수정하였다. 참여자들은 7점 척도로 제시된 질문에 대해 총 세 번의 설문을 진행하였다. 다음은 본 연구의 실험에 맞게 수정된 질문들이다.

1. 문지기를 중심으로 환경과의 상호작용이 얼마나 자연스러운 것 같습니까?
2. 문지기의 행동에 대하여 시각적 요소가 당신을 얼마나 몰입하게 했습니까?
3. 문지기의 행동을 통한 움직임의 제어하는 방법은 얼마나 자연스러웠습니까?
4. 공간을 통한 객체(문지기)들의 움직임에 대한 느낌이 얼마나 흥미로웠습니까?
5. 가상 환경에서의 문지기와의 상호작용 경험은 실제 세계의 경험과 얼마나

일치합니까?

6. 가상 환경 내에서 문지기의 움직이는 감각이 얼마나 흥미로웠습니까?

7. 가상환경 경험에 당신은 얼마나 관여하였습니까? (몰입하였습니까?)

[표 3]은 위의 설문 질문을 기반으로 한 현실감의 비교 분석 결과를 보여 준다. 참여자들은 NPC의 경우 반복적으로 체험하며 그들의 행동 패턴에 적응하여 플랫폼에 관계없이 반복 횟수가 늘어날수록 현실감은 감소하는 경향을 보인다. 그에 반해 제안하는 배우 기반 아바타는 현실감을 유지하거나 때로는 높이는 결과를 보인다. 이는 배우가 문지기로 참여하여 행동 패턴을 예측하는 것이 어려웠기 때문으로 보이며 또한 배우가 참여자의 패턴에 적응하여 매번 새로운 상호 작용이 발생했기 때문이다. 플랫폼 측면에서는 VR이 PC 및 모바일보다 비교적 높은 결과를 보여 기본적인 시스템의 몰입감에 차이가 존재함을 확인하였다. 통계적 유의성을 계산하기 위한 일원분산분석(ANOVA, Analysis of Variance)을 수행한 결과 모든 플랫폼에서 반복 횟수와 관계없이 유의한 차이가 관찰되었다. 이로써 귀무 가설을 기각함으로써 배우가 참여하는 가상 환경이 일반적인 NPC보다 상호작용에 대한 현실감에서 유의한 차이를 유발하는 것을 입증했다.

반복 횟수				
평균(표준편차)		1	5	10
PC	Our	5.460 (0.813)	5.619 (1.145)	5.524 (1.197)
	NPC	3.619 (0.777)	2.762 (1.170)	2.524 (1.197)
Mobile	Our	5.095 (0.913)	5.556 (1.277)	5.698 (1.442)
	NPC	3.032 (0.563)	2.571 (0.893)	2.238 (0.921)
VR	Our	6.222 (0.462)	6.048 (1.015)	6.016 (0.733)
	NPC	3.794 (1.459)	3.016 (1.423)	2.810 (1.357)
쌍별 비교(Pairwise Comparison) (Our vs NPC)				
현실감(PC)	F(1,16) = 21.452, p < 0.001*	F(1,16) = 24.365, p < 0.001*	F(1,16) = 25.120, p < 0.001*	
현실감(Mo)	F(1,16) = 29.597, p < 0.0001*	F(1,16) = 29.337, p < 0.0001*	F(1,16) = 32.724, p < 0.0001*	
현실감(VR)	F(1,16) = 20.154, p < 0.001*	F(1,16) = 24.076, p < 0.001*	F(1,16) = 34.580, p < 0.0001*	

[표 3] 모션 캡처 장비를 사용한 제안하는 배우 기반 아바타와 NPC간의
현실감 비교 분석 결과
(*통계적 유의성 명시)

두 번째 설문은 배우 기반 아바타와 NPC가 사용자 흥미에 미치는 영향을 비교하고 분석한다. 이 설문의 목적은 배우 기반 아바타와 NPC의 인식과 몰입형 콘텐츠에서의 경험을 분석하는 것이다. 이 연구에서는 (Ijsselstein et al., 2013)의 Game Experience Questionnaire(GEQ)의 인게임(In-Game) 버전에서 14개의 항목을 사용하였으며, 이는 역량(Competence), 감각과 상상의 몰입(Sensory and Imaginative Immersion), 분위기(Flow), 긴장(Tension), 도전(Challenge), 부정적 영향(Negative Affect) 및 긍정적 영향(Positive Affect)이라는 일곱 가지 요인으로 구성된다. 참여자들은 각 질문에 대해 5점 척도로 설문을 수행한다.

[표 4]에서 [표 6]은 각각 PC, 모바일 및 VR에 대한 사용자 경험 결과를 보여준다. 현실감의 경우와 마찬가지로 NPC의 경우 반복된 체험 중에 경험 값이 부정적으로 변했지만, 배우 기반 아바타의 경우 다양한 유형의 변화가 나타났다. 제안하는 가상 아바타의 관점에서 자세히 분석하면 관문을 통과하는 난이도를 나타내는 긴장 결과 값이 경험이 진행됨에 따라 배우에게서 더 큰 어려움을 보이는 것으로 나타났다. 참여자가 배우 기반 아바타의 행동을 분석할수록 배우도 참여자의 행동 패턴에 적응하여 함께 학습하면서 경험이 더 어려워진 것으로 보인다. 이러한 측면들이 참여자들의 성취감(역량), 흥미로운 및 인상적인 경험(감각과 상상의 몰입), 상황에 집중(분위기) 및 목표 달성을 위한 도덕적 욕망 및 노력(도전)에 영향을 미쳤다. 결과적으로 경험 과정에서의 심심함(부정적 영향)은 감소하거나 유지되었으며, 만족도(긍정적 영향)는 증가하거나 유지되었다.

반면에 NPC는 지속적이고 예측 가능한 행동 패턴으로 낮은 결과 값을 보였다. 동시에 경험에 대한 전반적인 만족도도 시간이 지남에 따라 감소했다. 실험에서 나타난 다른 차이점은 PC와 모바일과 같은 비몰입형 플랫폼과 VR을 사용한 몰입형 플랫폼 간의 차이이다. VR은 시스템 내에서 매우 몰입적인 경험 환경으로 인해 현실감에 대한 만족도가 비교적 높았다. 또한 경험 측면에서도 비교적 높은 결과를 보였다. 그러나 HMD로 인한 시각적 피로로 인해 일부 부분은 반복되는 경험 과정에서 부정적인 영향을 미쳤다.

통계적 유의성은 일원분산분석을 사용하여 계산하였다. 대부분의 참여자들

은 경험을 다섯 번까지 수행할 때 가장 동적인 변화를 느끼며, 10번까지 반복하면 다소 지루하게 느꼈다. 따라서 통계 분석은 다섯 번의 경험 이후의 설문 결과를 기반으로 수행되었다. 대부분의 요소들이 모든 플랫폼에서 유의한 차이를 보였다. 콘텐츠의 어려움을 나타내는 긴장의 경우, 몰입형 콘텐츠가 비교적 간단하여 일부 유의한 차이가 나타나지 않았다. 그러나 통계값(p -값)은 미션 콘텐츠가 더 복잡해지면 이 방법이 충분히 의미 있는 결과를 제공할 수 있음을 보여준다. 추가로 모든 참여자가 반복 횟수가 증가함에 따라 NPC의 행동 패턴을 완벽하게 예측했다고 응답했다.

추가로 실험 설문 과정에서 사용자의 현실감과 경험에 영향을 주는 두 가지 외부 요인을 확인하였다. 먼저, 본 연구에서는 세 명의 다른 사람이 배우로 참여하였으며, 경험은 배우에 따라 일부 영향을 받는 것으로 확인되었다. 이는 전반적인 설문 결과에는 중요한 영향을 미치지 않았지만, 향후 연구에서 변수로 고려될 수 있다. 다음은 문지기에 대한 예측이다. 참여자들은 어떤 문지기가 배우인지 NPC인지 구별했다. 모든 참여자가 첫 번째 경험에서 올바른 답을 추론했으며, 더불어 다섯 번째 반복 이후에는 올바른 답에 확신을 가졌다. 추가적으로 흥미로운 점은 첫 번째 경험에서 올바른 답을 추론하더라도, 그 아바타가 배우가 움직이는지 아니면 정해진 알고리즘에 의해 움직이는지 파악하지 못하는 경우도 존재하였다.

	반복 횟수					
	1		5		10	
PC	Our	NPC	Our	NPC	Our	NPC
역량	2.667 (0.577)	1.944 (0.896)	2.889 (0.614)	1.667 (1.080)	3.611 (0.485)	1.833 (1.106)
감각과 상상의 몰입	2.889 (0.936)	1.944 (0.896)	2.944 (0.984)	1.556 (1.117)	3.167 (0.816)	1.278 (1.108)
분위기	2.167 (0.782)	1.056 (0.896)	2.389 (0.994)	1.000 (0.850)	2.556 (1.066)	0.833 (1.000)
긴장	0.778 (0.853)	0.444 (0.550)	0.833 (0.745)	0.167 (0.333)	1.111 (0.994)	0.333 (0.408)
도전	2.500 (2.047)	1.056 (1.005)	2.778 (2.406)	0.722 (0.839)	2.722 (1.998)	0.667 (0.972)
부정적 영향	0.500 (0.722)	1.944 (1.890)	0.444 (0.631)	1.944 (2.073)	0.222 (0.981)	2.389 (2.307)
긍정적 영향	3.056 (2.413)	1.889 (1.785)	3.278 (2.568)	1.556 (1.735)	3.167 (2.273)	1.444 (1.466)
쌍별 비교(Pairwise Comparison) (Our vs NPC, number of cycles: 5)						
역량	F(1,16) = 7.744, p < 0.05*					
감각과 상상의 몰입	F(1,16) = 6.963, p < 0.05*					
분위기	F(1,16) = 9.025, p < 0.05*					
긴장	F(1,16) = 5.333, p < 0.05*					
도전	F(1,16) = 14.077, p < 0.005*					
부정적 영향	F(1,16) = 13.018, p < 0.005*					
긍정적 영향	F(1,16) = 13.978, p < 0.005*					

[표 4] 모션 캡처 장비를 사용한 제안하는 배우 기반 아바타와 PC 플랫폼
기반 NPC 간의 경험 비교 분석 결과
(*통계적 유의성 명시)

	반복 횟수					
	1		5		10	
Mobile	Our	NPC	Our	NPC	Our	NPC
역량	3.111 (0.737)	2.000 (0.972)	3.111 (0.567)	1.833 (1.000)	3.389 (0.906)	1.667 (0.913)
감각과 상상의 몰입	3.000 (0.667)	1.667 (0.972)	3.167 (0.913)	1.222 (0.749)	3.333 (0.745)	1.167 (0.850)
분위기	2.167 (0.972)	0.889 (0.994)	2.222 (0.786)	0.889 (0.774)	2.389 (0.994)	0.611 (0.737)
긴장	0.944 (1.091)	0.278 (0.248)	1.000 (1.027)	0.222 (0.342)	1.000 (1.000)	0.167 (0.333)
도전	2.556 (1.988)	1.222 (1.417)	2.444 (1.700)	0.889 (1.100)	2.556 (1.856)	0.611 (0.953)
부정적 영향	0.389 (0.720)	2.111 (2.138)	0.556 (1.054)	2.278 (2.311)	0.500 (0.957)	2.389 (2.502)
긍정적 영향	3.111 (2.337)	1.778 (1.820)	3.111 (2.198)	1.722 (1.865)	3.444 (2.517)	1.444 (1.578)
쌍별 비교(Pairwise Comparison) (Our vs NPC, number of cycles: 5)						
역량	F(1,16) = 9.888, p < 0.01*					
감각과 상상의 몰입	F(1,16) = 21.681, p < 0.001*					
분위기	F(1,16) = 11.695, p < 0.005*					
긴장	F(1,16) = 4.126, p = 0.0591					
도전	F(1,16) = 12.346, p < 0.005*					
부정적 영향	F(1,16) = 11.683, p < 0.005*					
긍정적 영향	F(1,16) = 9.615, p < 0.01*					

[표 5] 모션 캡처 장비를 사용한 제안하는 배우 기반 아바타와 모바일 플랫폼
기반 NPC 간의 경험 비교 분석 결과
(*통계적 유의성 명시)

	반복 횟수					
	1		5		10	
VR	Our	NPC	Our	NPC	Our	NPC
역량	3.389 (0.614)	2.389 (0.906)	3.278 (0.749)	1.178 (0.885)	3.278 (0.749)	2.000 (0.972)
감각과 상상의 몰입	3.611 (0.458)	2.111 (0.936)	3.444 (0.497)	1.889 (0.875)	3.444 (0.598)	1.611 (0.906)
분위기	3.000 (0.624)	2.056 (0.926)	2.944 (0.956)	1.111 (1.173)	2.833 (0.782)	1.000 (1.054)
긴장	0.889 (0.567)	0.389 (0.393)	1.111 (0.906)	0.444 (0.546)	1.222 (0.946)	0.611 (0.698)
도전	3.000 (2.371)	1.167 (1.331)	3.167 (2.135)	1.056 (1.357)	2.944 (1.838)	0.833 (1.103)
부정적 영향	0.111 (0.805)	1.389 (1.329)	0.444 (0.927)	1.889 (1.753)	0.722 (0.961)	2.111 (1.976)
긍정적 영향	3.500 (2.715)	2.500 (2.429)	3.389 (2.382)	1.833 (1.711)	3.389 (2.313)	1.722 (1.478)
쌍별 비교(Pairwise Comparison) (Our vs NPC, number of cycles: 5)						
역량	F(1,16) = 13.376, p < 0.005*					
감각과 상상의 몰입	F(1,16) = 19.122, p < 0.001*					
분위기	F(1,16) = 11.741, p < 0.005*					
긴장	F(1,16) = 3.165, p = 0.094					
도전	F(1,16) = 19.781, p < 0.001*					
부정적 영향	F(1,16) = 11.912, p < 0.005*					
긍정적 영향	F(1,16) = 13.0124, p < 0.005*					

[표 6] 모션 캡처 장비를 사용한 제안하는 배우 기반 아바타와 가상현실
플랫폼 기반 NPC 간의 경험 비교 분석 결과
(*통계적 유의성 명시)

마지막으로, 사용자가 NPC와 배우 기반 아바타가 문지기 역할을 하는 두 관문을 통과하는 데 걸리는 시간을 측정했다. 이에 대한 결과는 [표 7]에 표시되어 있으며, 현재 주기에서의 개별 평균, 해당 주기까지의 누적 평균, 최소 및 최대 시간이 기록되었다. 결과적으로 NPC와 배우 기반 아바타 간에 명확한 차이가 있음을 확인할 수 있다. 배우 기반 아바타는 예측할 수 없는 행동 패턴을 갖고 있으며, 주기 수가 증가하더라도 시간에 유의미한 차이가 없다. 반면에 정의된 패턴으로 행동하는 NPC는 통과 시간이 단축되는 모습을 보인다. 또한 누적 평균 시간은 전반적으로 주기 수에 따라 감소하는 경향이지만,

배우 기반 아바타의 경우 각 개별 단계에서의 평균 시간이 감소하는 패턴이 없다. 이는 때로는 빠르고 때로는 지연되는 경향이 있지만, 이는 배우 기반 아바타의 예측할 수 없는 패턴에 쉽게 적응할 수 없었음을 의미한다. 중요한 점은 통과 시간의 패턴 변화이며, 이는 절대적인 시간보다 중요하다. 이러한 불규칙한 특성이 현실감과 경험에 영향을 미쳤다고 분석된다. 그러나 체험 순서 상으로 PC를 먼저 체험한 후에 VR을 체험하는 경우가 많아 유사한 조작 때문에 VR이 상대적으로 적은 시간이 소요되었다.

	반복 주기							
	평균 : 개별(누적)							
	1		5		10		최대(최소)	
횟수	Our	NPC	Our	NPC	Our	NPC	Our	NPC
PC	17.79 (17.79)	7.50 (7.50)	15.73 (12.66)	5.26 (5.24)	15.21 (10.62)	4.50 (4.45)	115.25 (6.01)	14.60 (3.00)
Mobile	16.26 (16.26)	7.43 (7.43)	16.20 (13.47)	4.57 (5.40)	15.71 (11.20)	3.77 (4.89)	173.05 (5.94)	11.88 (2.98)
VR	15.19 (15.19)	4.53 (4.53)	15.56 (11.38)	2.36 (3.46)	15.80 (9.04)	3.50 (3.50)	172.25 (5.96)	11.70 (2.92)

[표 7] 제안하는 모션 캡처 장비를 사용한 배우 기반 아바타와
NPC 간의 시간 측정 비교 결과

IV. 몰입형 가상환경을 위한 강체추적 기반 아바타 응용

4.1 강체 추적 기반의 가상 아바타 구현

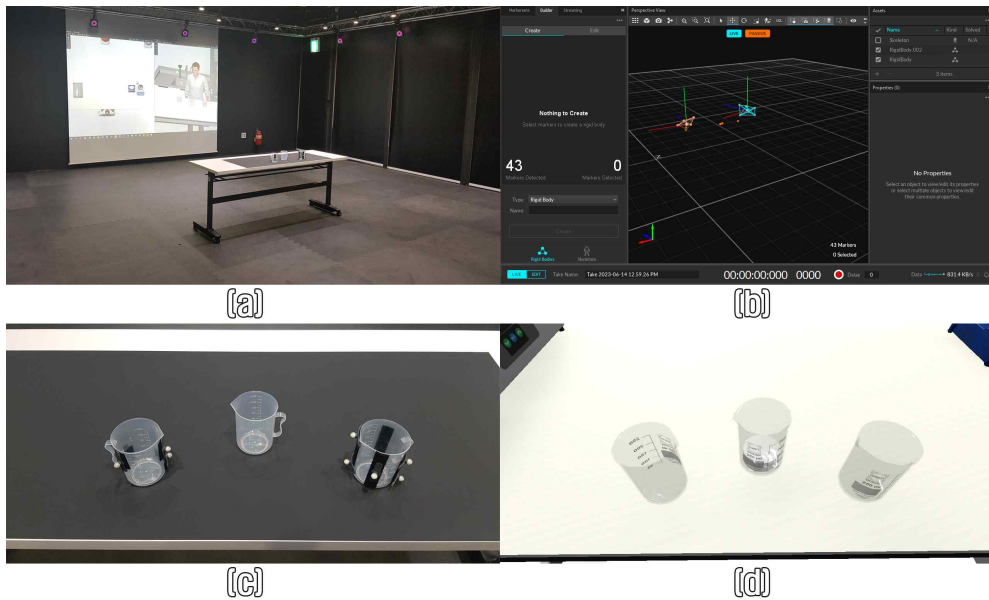
가상 아바타로 표현되는 아바타 혹은 에이전트는 현실과 가상의 경계를 허무는 요소로서 사용자와 상호작용하며 사용자의 몰입을 높이고 가상환경에서 제공하고자 하는 바를 정확하게 전달하고 이해하도록 도움을 줄 수 있다. 본 연구에서는 몰입형 가상환경에서 가상현실 사용자의 몰입을 높이는 하나의 요소로 먼저 배우 기반 아바타를 활용하는 방법을 제안했다. 그러나 배우 기반 아바타의 경우 특정한 상황이 아니라면 마커를 부착한 배우와 캡처 장소가 필요하여 높은 비용을 요구한다. 따라서 보다 적은 비용으로 배우의 인체 정보를 추적, 기록하는 방식이 아닌 강체 추적을 기반으로 정해진 객체의 움직임에 대응되는 가상 아바타의 동작을 추정하는 방법을 추가적으로 제안한다. 제안하는 강체 추적 기반 아바타는 상대적으로 더 비용이 낮은 관성식이나 이미지 기반의 추적 방식으로도 사용이 가능하지만 본 연구에서는 우선 강체 추적 기반 아바타의 구현 및 사용자 경험을 중점으로 하기 때문에 광학식 마커를 사용하여 구현하였다.

4.1.1 강체 추적

본 연구에서 제안하는 가상 아바타의 몰입형 가상환경 응용을 위해 사용된 모션 캡처 장비는 OptiTrack Prime 17W 카메라 16대를 활용한다. 추적하고자 하는 현실 객체에 광학식 마커를 부착하고 추적 정보는 Motive 소프트웨어를 통해 확인한다. Motive에서 제공하는 강체 추적은 단단하며 외부의 힘으로 외형이 변하지 않는 성질을 지닌 객체를 추적하는데 사용되는 기능이다.

추적하고자 하는 현실 객체에 마커를 부착하고 소프트웨어로 추적하면 배

치 정보에 따라 다수의 객체가 존재할 경우 각각을 식별하며, 6DoF(Degree of Freedom) 데이터로 움직임을 인지할 수 있다. [그림 9]는 본 연구의 실험 환경에서 강체 추적을 통해 현실 객체에 대응되는 가상 객체를 보여준다. 객체 부착되는 마커의 수는 특별히 정해지지 않았으며, 사용자가 실제 객체를 잡고 행동하는 데 방해가 되지 않으며 정확한 움직임 정보를 인지할 수 있는 범위 내에서 적절히 조절하였다.



[그림 9] 제안하는 몰입형 가상 환경 구축 과정:

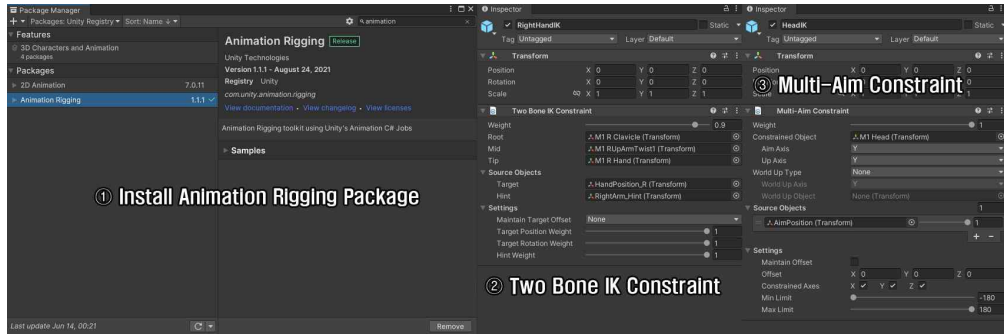
- (a) 모션 캡처 스튜디오에서의 실험 환경,
- (b) Motive 소프트웨어를 통한 강체 추적 결과,
- (c) 마커가 부착된 실제 물체,
- (d) 강체 추적으로 계산된 가상 물체

4.1.2 가상 아바타 동작 추정

모션 캡처를 통해 추적된 강체의 움직임에 따른 가상 아바타의 자연스러운 동작 추정 과정을 설계한다. 본 연구는 가상현실 사용자의 참여를 고려한 몰입형 가상환경에서 강체 추적을 통해 계산된 강체 움직임을 기반으로 가상

아바타의 동작 추정까지 이어지는 개발환경을 구축한다. 따라서, 몰입형 콘텐츠 제작에 많이 사용되면서 가상현실 체험환경을 구축하기 위한 템플릿, 패키지 활용이 유연하면서 Motive 소프트웨어와의 연동이 효과적인 유니티 3D 엔진을 활용한다. 먼저, 추적하는 강체의 움직임으로부터 가상 아바타의 동작을 추정하기 위해 강체를 목표 대상으로 아바타의 관절 동작을 역으로 계산하는 역운동학(Inverse Kinematics, IK)을 사용한다. 이를 위해 유니티 3D 엔진의 절차적 애니메이션 생성을 위한 패키지로 애니메이션 리깅(Animation Rigging)을 활용한다. 애니메이션 리깅 패키지에서 제공하는 여러 컴포넌트를 사용하면 다양한 제약 설정과 함께 목표 대상에 대한 동작을 역운동학으로 자연스럽게 표현 또는 목표 대상을 향하여 바라보는 등의 기능을 쉽게 구현할 수 있다. 이외에도 대상이 되는 아바타를 설정하고 현재 아바타를 대상 아바타의 회전과 일치하도록 제어하거나 서로 다른 두 객체의 애니메이션을 융합하는 등의 응용 방법도 제공한다. 본 연구에서는 가상 아바타 동작 추정을 위하여 해당 패키지를 활용한다.

본 연구에서 제안하는 가상 아바타 동작 추정에는 두 뼈대 역운동학 제약(Two Bone IK Constraint)과 다중 조준 제약(Multi-Aim Constraint)을 사용한다. 먼저, 두 뼈대 역운동학 제약의 경우 제어하고자 하는 아바타의 관절에 뿌리가 되는 루트(root), 중간(mid), 끝 부분이 되는 팁(tip) 부위를 지정하고, 목표 대상(target)을 지정하는 것으로 목표 대상 즉, 본 연구에서는 추적된 강체 객체를 향한 자연스러운 관절 제어가 가능하다. 다음으로, 다중 조준 제약은 가상 아바타의 자연스러운 시선 처리를 위한 것으로, 아바타가 행동을 수행하는 과정에서 객체 또는 가상환경에 참여하는 가상현실 사용자를 바라보는 자연스러운 시선 처리를 구현한다. 이는 조준 대상(source object)과 적용될 관절(constrained object)을 지정하는 방식으로 구현한다. [그림 10]은 유니티 3D 엔진으로 기반으로 애니메이션 리깅 패키지를 설치하는 과정과 함께 본 연구에 사용되는 두 뼈대 역운동학 제약과 다중 조준 제약에 대한 설정 화면을 나타낸 것이다.



[그림 10] 가상 아바타 동작 추정을 위한 애니메이션 리깅 사용 개발 환경 설정

[그림 11]은 [그림 9]에서 보여주고 있는 현실 객체와 강체 추적을 통해 표현된 가상환경에서의 객체를 사용자가 손으로 제어하였을 때, 가상 아바타 동작 추정 과정을 통해 표현된 결과의 모습이다. 본 연구에서는 객체의 움직임에 따라 전신을 추정하지 않고 팔의 동작과 동시에 머리를 움직여 시선의 처리만을 구현한다. 이는 가상 아바타의 상체 동작의 표현 정도에 비해 하체 동작의 표현 정도는 몰입감에 크게 반영되지 않는다는 연구(Yun et al., 2023)에서 근거한다.



[그림 11] 가상 아바타 동작 추정 결과의 예: (a) 현실 세계에서 객체를 제어하는 과정, (b) 가상 세계에서 표현된 가상 아바타의 결과

본 연구에서 구현한 두 뼈대 역운동학 제약과 다중 조준 제약을 사용한

가상 아바타 동작의 추정 과정은 [그림 12]와 같다. 먼저, 마커를 부착한 객체가 지정된 바닥과 지정된 거리 이상으로 떨어지는 등의 강제 이벤트가 발생하면, 가상 아바타의 팁이 되는 손목이 목표 대상이 되는 해당 객체를 추적한다. 그리고 팁의 변화에 따라 중간이 되는 팔꿈치 관절의 동작을 역운동학을 통해 계산하는 과정을 거치게 된다. 그리고 이러한 동작 추정과정은 객체가 다시 바닥과 일정 거리 이하로 가까워지거나 제어할 수 없는 상황으로 판단되기까지 수행된다. 다음으로, 가상 아바타가 동작을 수행하는 과정에서 제약 관절이 되는 머리의 조준 대상을 정해진 정면의 좌표 또는 해당 객체로 적절하게 변화시킴으로써 자연스러운 시선 처리를 구현한다. 추가로 가상현실 사용자가 참여하게 될 경우, 조준 대상에 가상현실 사용자의 위치를 추가시킴으로써 더욱 자연스러운 시선 처리를 설정할 수 있다.



[그림 12] 제안하는 가상 아바타 동작 추정의 과정

- (a) 초기 동작, (b) 강제 추적 이벤트에 의한 동작 (팔, 시선) 실행
(c) 강제 추적을 통한 지속적인 동작 수행 과정

[알고리즘 2]는 앞서 정의한 추적하는 현실 세계 객체에서 가상 객체까지 위치와 방향 정보를 계산하고 이를 기반으로 가상 아바타의 팔 동작과 시선 처리를 추정하는 과정을 정리한 것이다.

[알고리즘 2] 강체 추적을 기반으로 한 가상 아바타 동작 추정 과정

procedure 가상 아바타 동작 구현

$n \leftarrow$ 실제 객체의 마커 수

$p_r, \theta_r \leftarrow$ 마커의 위치와 방향 계산

$obj \leftarrow$ 현실 객체에 해당하는 가상 객체

$p_v, \theta_v \leftarrow obj$ 의 위치와 방향을 p_r, θ_r 로 설정

$e_{obj} \leftarrow obj$ 에서의 발생 이벤트

if $e_{obj} == \text{true}$ **then**

가상 아바타의 대상으로 obj 를 지정

$e_{vr} \leftarrow$ VR유저의 발생 이벤트

if $e_{vr} == \text{true}$ **then**

$p^{i_{vr}} \leftarrow$ 이벤트가 발생한 i 번째 VR사용자의 위치

$p^{i_{vr}}$ 를 아바타가 바라보도록 설정

else

랜덤한 간격에 따라 obj , 정면, 좌, 우를 바라보도록 설정

end if

else

아바타의 기본 동작 수행

end if

end procedure

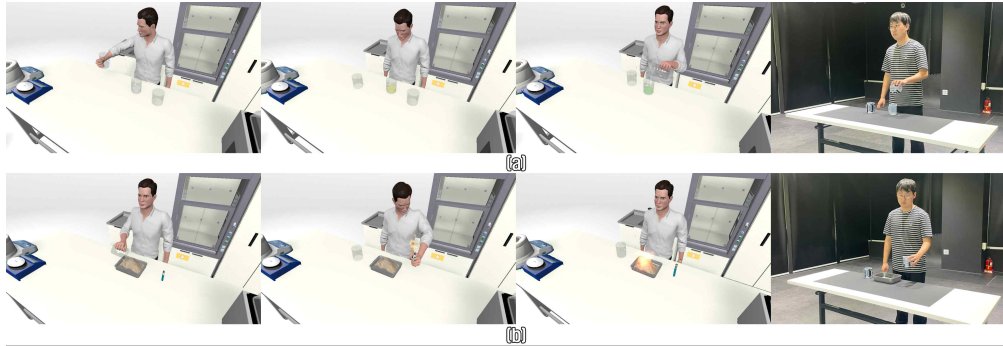
4.2 몰입형 가상환경 구성 및 응용

본 연구에서 제안하는 강체 추적 기반 아바타의 몰입형 가상환경으로의 응용은 여러 가상현실 사용자가 참여하는 체험환경에 가상 아바타를 교육자, 안내자와 같은 역할로 참여시켜 콘텐츠에서 다루는 정보와 내용을 효율적이고 몰입감 높게 전달하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서 참여하는 가상현실 사용자는 오쿨러스 퀘스트 2 HMD와 터치 컨트롤러를 사용하였다. 따라서, 가상현실 사용자의 체험환경 구축을 위하여 유니티 엔진에 오쿨러스 통합 SDK를 설치 및 활용하여 기본적인 가상현실 사용자의 기능을 구현하였다. 본 연구는 가상 아바타 동작 추정과 응용에 초점을 맞추고 있기 때문에 가상현실 사용자의 행동과 상호작용에 추가적인 기능을 구현하지는 않는다. 다시 말해 가상현실 사용자는 제작된 가상 환경에서 가상 아바타를 통해 전달되는 내용을 체험하는 방식으로만 참여하게 된다.

추적하는 강체의 움직임에서 추정된 가상 아바타의 행동을 몰입형 가상환경에 구체적으로 표현하기 위하여 본 연구에서는 과학실험 체험 활동을 주제로 콘텐츠를 제작하였다. 제안하는 방법을 통해 생성된 가상 아바타를 초등학교 이하 저연령의 학생들이 현실 세계에서 직접 실험 및 체험하기에는 위험하거나 어려움이 있는 경우에 응용하는 것이 효과적이라 판단하였고, 이러한 이유로 본 연구는 과학실험 콘텐츠를 구성하였다. 실제로 과학실험 중 학생들이 화상을 입거나 다치는 등의 사고가 잦았기 때문에[(박지은, 강원도민일보), (이현기, KBS 뉴스)] 이를 배경으로 안전하면서 시청각 교육보다는 몰입감 높은 직접적인 체험이 가능할 수 있도록 콘텐츠를 구성하고자 하였다.

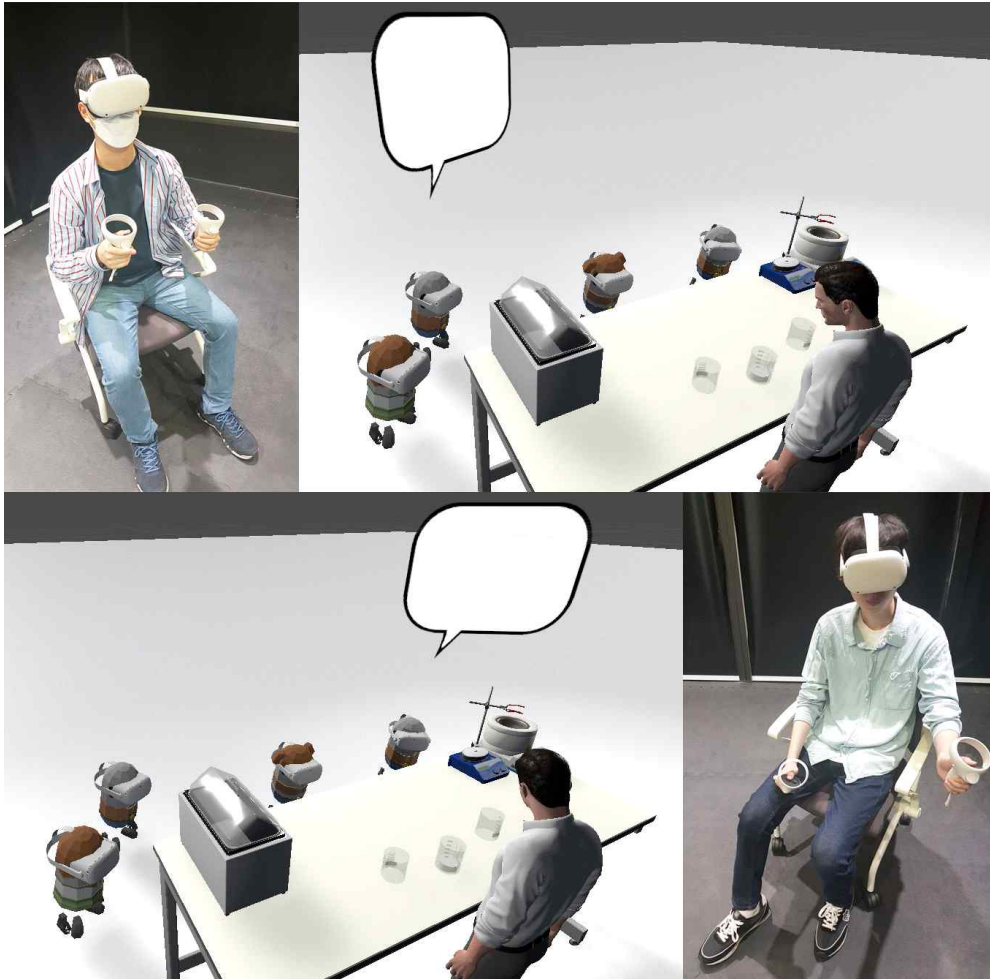
첫 번째 과학실험은 중크롬산나트륨에 대한 불꽃 반응으로 화산의 분화 과정을 유사하게 관찰하기 위한 실험이다. 불꽃 반응을 위해 실외에서 관찰하다가 바람이 불면서 불꽃에 학생들이 화상을 입는 등의 사고가 자주 발생하여 현재는 금지된 실험 중 하나이다. 모션 캡처 스튜디오에 있는 배우는 아무것도 담겨있지 않은 비커 객체를 조작하여 실험하듯 행동을 취하고, 비커를 강체 추적을 통해 위치와 방향을 추적하여 가상환경의 비커 객체에 반영함과 동시에 가상 아바타는 가상 비커 객체의 움직임에 따라 추정된 행동을 자연스럽게 수행한다. 위험한 중크롬산나트륨에 불을 붙여 반응을 관찰하는 실험은 가상환경에서 시연하게 되고, 피교육자는 안전하고 몰입감 높게 HMD를 통해 교육환경에 참여하게 되는 것이다 [그림 13 (a)].

두 번째 과학실험은 중화반응 실험이다. 이는 염산에 BTB(bromothymol blue) 용액을 첨가하고 수산화나트륨 용액을 조금씩 떨어뜨리면서 중화반응이 일어나 노랑에서 초록, 초록에서 파랑 순으로 색의 변화가 나타나는 것을 관찰하는 실험이다. 염산이나 수산화나트륨 용액은 인체에 닿으면 상당한 피해를 주는 물질이며 학교 현장에서 실험을 진행하는 데에 어려움이 있을 것으로 판단하여 콘텐츠로 제작하였다. [그림 13 (b)]. 이때, 실험을 수행하는 교육자의 역할을 하는 가상 아바타의 행동이 중요하기 때문에, 가상 아바타 행동이 추정되기까지 실제 객체의 움직임을 미리 설계해야 하는 사전 시나리오 작업이 요구된다.



[그림 13] 제안하는 몰입형 가상 환경에서의 과학 실험 콘텐츠 및 실험 결과
(a) 화산 실험, (b) 중화 반응 실험

가상 아바타 응용을 통해 구축된 몰입형 가상환경에는 가상현실 사용자가 참여하여 함께 체험한다. [그림 13]에서 제작된 과학실험 콘텐츠에 다수의 가상현실 사용자가 함께 참여하며, 가상현실 사용자들은 피교육자로서 실험을 진행하는 내용을 보면서 교육을 수행하게 된다. [그림 14]은 이를 나타낸 것으로, 오쿨러스 퀘스트 2 HMD를 착용하여 가상환경에 참여하고, 가상 아바타로 실험을 진행하는 과정에서 가상현실 사용자의 질의 행동을 수행하면 시선을 사용자 방향으로 전환하는 기능들을 구현하여 자연스러운 시선 처리를 구현하였다.



[그림 14] 가상 아바타의 시선 처리 결과

4.3 실험 및 분석

4.3.1 실험환경 구성

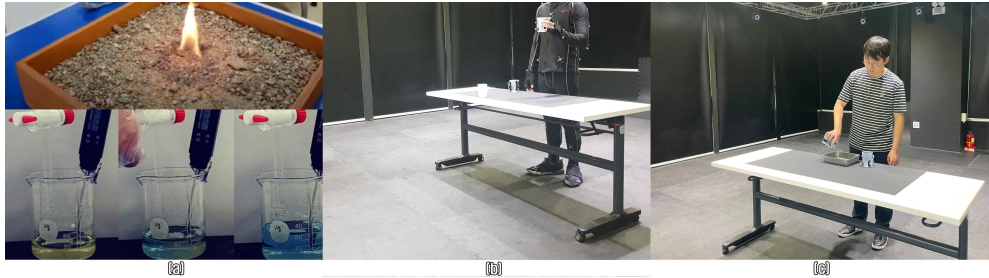
본 연구에서 제안하는 가상 아바타 동작 추정 및 몰입형 가상환경은 유니티 엔진(Unity 2021.3.7f1)을 기반으로 애니메이션 리깅(Animation Rigging 1.1.1), 오쿨러스 통합 패키지, 그리고 모션 캡처 스튜디오와의 연동을 위한 플러그인

(OptiTrack Unity Plugin 1.4.0)을 사용하여 구현하였다. 가상현실 사용자는 오쿨러스 퀘스트 2 HMD를 착용하여 참가하고, 핵심이 되는 강체 추적은 OptiTrack Prime 17W 카메라 16대를 활용하고 추적된 동작에 대한 처리 및 유니티 엔진과의 연동은 Motive 소프트웨어를 활용한다. 과학실험을 위해 제작한 교육 콘텐츠는 유니티 에셋 스토어(Asset Store)의 그래픽 리소스를 활용하여 제작되었다. 마지막으로 통합 개발 환경과 과학실험을 위한 PC는 Intel Core i7-11800H, 16GB RAM, Geforce RTX 3050 Ti Laptop GPU를 탑재하고 있다.

본 연구에서 제안하는 몰입형 가상환경에서의 가상 아바타 응용 경험을 분석하기 위해 설문을 진행하였다. 설문 참여자는 24~27세 사이의 총 8명으로 구성하였다. 설문은 가장 기본적인 교육 방식인 동영상 활용 시청각 교육과 비교하여 제안하는 가상 아바타 응용 몰입형 가상환경이 개선된 교육 효과와 함께 높은 몰입을 제공할 수 있다는 대안 가설을 세웠다. 또한, 전신 슈트를 착용한 배우를 통해 가상 아바타를 구축하는 것과 비교해서도 강체 추적만으로도 동작을 자연스럽게 묘사할 수 있다면 두 방법에 차이가 크지 않을 것이라는 대안 가설을 세웠다. 본 연구에서의 귀무가설은 시청각 교육과 비교하여 제안하는 응용 가상환경이 몰입과 교육에 큰 영향을 미치지 못한다는 것이며, 전신 추적과 강체 추적의 차이가 유의미하다는 것이다. 참여자들은 각각 제안하는 두 가지의 과학실험을 확산 실험, 중화반응 실험 순서대로 동영상을 통한 시청각 교육, 전신 추적, 강체 추적을 통한 가상 아바타를 활용한 실험을 순서대로 체험[그림 15]하고, 모든 체험이 끝난 이후 제시하는 설문 문항에 답을 기록한다. 몰입에 관한 질문은 (Witmer et al., 2005)의 Presence Questionnaire에서 정리한 핵심 요소 중 하나인 현실감 부분의 질문을 토대로 수정하였다. 또한 교육과 관한 질문도 이를 기반으로 이해와 흥미의 관점으로 구성하였다. I1~2는 몰입에 관한 질문, E1~2는 교육에 관한 질문으로 참여자는 2가지 과학실험을 체험한 후 전혀 아니다의 1점에서 완벽하도의 7점 척도로 결과를 기록하였다.

- I1. 가상환경에서 교육자의 행동이 당신을 얼마나 몰입하게 했습니까?
- I2. 가상환경에서의 시각적 효과가 당신을 얼마나 몰입하게 했습니까?
- E1. 제시된 콘텐츠가 실험 내용을 이해하는 데에 얼마나 도움이 되었습니까?

E2. 교육 콘텐츠에서 교육자의 행동이 교육의 흥미를 높이는 부분에서 얼마나 도움을 주었습니까?



[그림 15] 비교 실험을 위한 세 가지 교육 환경 구성
(a) 시청각 교육, (b) 전신 추적, (c) 강체 추적

4.3.2 사용자 설문 분석

[표 8]은 설문 결과를 나타낸 것으로, 체험환경의 차이로 인하여 시청각과 비교하여 제안하는 몰입형 가상환경이 사용자의 몰입을 높이는데 긍정적인 영향을 제공하는 것을 볼 수 있었다. 또한, 가상 아바타의 동작에서 부자연스러운 행동이 계산될 경우 사용자의 몰입에 방해가 될 것이라는 판단과 그 차이가 크지 않을 경우 뛰어난 대체 응용방법이 될 것으로 판단하여 전신 추적을 함께 비교하였다. 실험 결과, 전신 추적으로 자연스러운 동작 추정이 가능해짐에 따라 가상 아바타 행동의 폭이 넓어져 몰입에 더 긍정적인 영향을 미치는 것이 확인되었다. 교육에 관한 결과 역시, 몰입과 유사한 결과를 보인다. 참여자가 교육환경에 몰입할수록 교육에 대한 효과도 함께 향상되는 것을 고려하면 피교육자의 참여를 높일 수 있는 다양한 교육환경이 제공될 수 있다면 교육에 대한 만족도가 향상될 것으로 기대된다. 또한, 설문 결과를 토대로 통계적 유의성을 일원배치 분산분석(One-Way ANOVA, Analysis of Variance)을 통해 확인하였다. 이를 통해 제안하는 강체 추적 방법과 시청각 교육의 몰입과 교육에서 모두 유의미한 차이가 없을 것이라는 귀무가설이 기각됨을 확인하였다. 즉, 제안하는 강체 추적기반의 가상 아바타를 교육 목적의 가상환경으로 응용함으로써 기존의 동영상을 활용한 시청각 교육과 비교하여 높은 몰입과 함께 향상된 교육 효과를 이끌어낼 수 있음

을 확인하였다. 흥미로운 점은 전신 추적과 강제 추적으로부터 표현되는 가상 아바타 동작 표현에 따라서 몰입에서는 유의미한 차이가 발생하는 것에 반면, 교육 효과에서는 유의미한 차이가 없었다는 것이다. 이러한 결과를 통해 가상 아바타가 정확하고 자연스러운 동작을 수행할수록 사용자의 몰입에 유의미한 차이를 발생시키지만, 제안하는 강제 추적기반의 가상 아바타 동작 추정으로 표현되는 가상환경의 몰입 정도만으로도 충분히 교육적인 부분에서 유의미한 차이 없이 긍정적인 효과를 기대할 수 있다는 점을 도출할 수 있었다. 이는, 몰입에서의 유의미한 차이가 반드시 교육에서의 유의미한 차이를 유도하는 것은 아닐 수 있다는 점을 의미한다. 본 연구는 과학 실험 교육에만 한정되어 연구를 수행했으나, 추정 수준을 개선하고 추정 신체 범위를 늘린다면 더 다양한 분야에도 응용이 가능할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 본 연구에서는 광학식 모션 캡처를 사용하였으나 이것은 필수적이지 않으며 현재 계속해서 연구되고 있는 다양하고 상대적으로 비용이 적은 키넥트, RGB 카메라를 사용하는 등의 캡처 방식을 사용한다면 낮은 접근성과 비용으로 높은 효과를 기대할 수 있을 것으로 보인다.

평균(표준편차)	몰입 (Immersion)	교육 (Education)
시청각(A)	3.281(0.795)	3.938(0.908)
강제 추적(R)	5.500(0.354)	5.843(0.374)
전신 추적(F)	6.281(0.363)	6.125(0.354)
쌍별 비교 (Pairwise Comparison)		
몰입 (A vs R)	F(1,14)=45.532, $p<0.001^*$	
교육 (A vs R)	F(1,14)=26.390, $p<0.001^*$	
몰입 (R vs F)	F(1,14)=16.634, $p<0.05^*$	
교육 (R vs F)	F(1,14)=2.0922, $p=0.170$	

[표 8] 제안하는 가상 아바타 애플리케이션의 분석 결과
(A: 시청각영상, R: 강제 추적, F: 전신 추적, * 통계적 유의성 명시)

V. 결론

본 연구는 몰입형 가상환경에서의 사용자의 몰입도를 높이기 위한 방법으로 모션 캡처 장비를 활용한 배우 기반 아바타와 강제 추적 기반의 아바타를 응용하는 것을 제안한다. 먼저 PC 및 모바일, VR HMD 사용자가 함께 참여하여 모션 캡처를 사용한 배우 기반 아바타와 FSM 기반 NPC와 상호작용하는 통합 개발 환경을 구축하였다. 제안하는 배우 기반 아바타의 사용자 상호작용과 경험을 분석하기 위해 설문 실험을 진행하였고 이를 통해 배우 기반 아바타와 FSM 기반 NPC와의 현실감과 콘텐츠 경험에 미치는 효과를 확인하고자 했다. 실험결과 배우 기반 아바타가 FSM 기반 NPC에 비해 반복적인 실험 과정에서 상대적으로 높은 몰입과 긍정적인 효과를 유도하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과를 통해 배우가 몰입형 콘텐츠의 사용자와 상호 작용할 수 있는 체험 환경은 콘텐츠의 목적과 목표를 달성하는 데에 많은 도움이 될 수 있을 것으로 보인다. 다음으로 현실 객체에 마커를 부착하고 모션 캡처의 강제 추적을 통해 움직임을 추적하여 대응되는 가상 객체를 생성하고 이를 기반으로 행동을 수행하는 가상 아바타 동작 추정 과정을 설계하였다. 제안하는 강제 추적 기반 아바타를 응용한 몰입형 가상환경으로부터 사용자에게 유익하거나 흥미로운 경험을 제공할 수 있음을 확인하기 위하여 과학실험을 주제로 하는 가상현실 콘텐츠를 직접 제작하였다. 과학실험 교육환경에 참여하는 참여자를 대상으로 동영상을 활용한 시청각 교육과의 몰입, 교육 효과를 비교함과 동시에 강제 추적과 전신 추적에 대한 차이를 함께 분석하기 위한 설문 실험을 진행하였다. 결과적으로, 제안하는 방법을 통해 일반적으로 수행되는 시청각 교육보다 높은 몰입과 함께 교육에서도 긍정적인 영향을 줄 수 있음을 확인하였으며 동시에 슈트를 착용한 전신 추적 방법을 사용하지 않고도 전신 추적과 유사한 경험을 제공할 수 있음을 기대할 수 있었다. 본 연구에서 제안하는 아바타를 통해 사용자들에게 몰입형 가상환경에서 더 높은 몰입감을 제공할 수 있으며 차후연구에서는 실용적인 유용성과 경제적 타당성, 접근성 등을 개선하여 다양한 주제의 몰입형 메타버스 콘텐츠로 확장할 것이다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

- 김민규, 이지원, 전찬규, 김진모. (2017). 모바일 가상현실 환경에서의
김정호, 강다은, 이윤상, 권태수. (2022). 저가형 모션 캡처 장비를 이용한 실
시간 상호작용 애니메이션 시스템. 『한국컴퓨터그래픽스학회』,
28(2):29-41
- 김진모. (2019). 몰입형 가상현실에서 손기반 인터페이스의 비교 실험에 관한
연구. 『한국컴퓨터그래픽스학회』, 25(2):1-9
- 박명석, 김진모. (2023). 강체 추적 기반의 가상 아바타를 통한 몰입형 가상
환경 응용. 『한국컴퓨터그래픽스학회』, 29(3), 69-77
- 배태성, 이은지, 김하은, 박민지, 최명걸. (2019). 제한된 모션 센서와 애니메
이션 데이터를 이용한 캐릭터 동작 제어. 『한국컴퓨터그래픽스학회』,
25(3):85-92
- 시선기반 사용자 인터페이스 상호 작용에 관한 연구.
『한국컴퓨터그래픽스학회』, 23(3), 39-46

2. 국외문헌

- Chakraborty, S. (2022). Effects of asymmetric locomotion methods on
collaborative navigation and wayfinding in shared virtual
environments. In 2022 IEEE Conference on Virtual Reality and
3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), 952-953.

- Chalil Madathil, K., & Greenstein, J. S. (2017). An investigation of the efficacy of collaborative virtual reality systems for moderated remote usability testing. *Applied Ergonomics*, 65, 501–514.
- Chatzitofis, A., Albanis, G., Zioulis N., and Thermos, S., (2022). A Low-cost & Realtime Motion Capture System. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, New Orleans, LA, USA, 21421–21426.
- Cho, Y., Kang, J., Jeon, J., Park, J., Kim, M., & Kim, J. (2021). X-person asymmetric interaction in virtual and augmented realities. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 32(5), e1985.
- Cho, Y., Park, M., & Kim, J. (2023). XAVE: Cross-platform based Asymmetric Virtual Environment for Immersive Content. *IEEE Access*. 11, 71890–71904.
- Duan, H., Li, J., Fan, S., Lin, Z., Wu, X., Cai, W. (2021). Metaverse for social good: A university campus prototype. In *Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia, MM '21*, 153–161.
- Feld, N., & Weyers, B. (2021). Mixed reality in asymmetric collaborative environments: A research prototype for virtual city tours. In *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops, VR Workshops*, 250–256.
- Fraser, A. D., Branson, I., Hollett, R. C., Speelman, C. P., & Rogers, S. L. (2022). Expressiveness of real-time motion captured avatars influences perceived animation realism and perceived quality of social interaction in virtual reality. *Frontiers in Virtual Reality*, 3, 981400.

- Gaafarr, A. A. (2021). Metaverse in architectural heritage documentation & education. *Advances in Ecological and Environmental Research*, 6(10), 66–86.
- Gugenheimer, J., Stemasov, E., Frommel, J., Rukzio, E. (2017). Sharevr: Enabling co-located experiences for virtual reality between Hmd and Non-Hmd Users. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '17* 4021–4033.
- Ijsselsteijn, W. A., De Kort, Y. A. W., & Poels, K. (2013). The game experience questionnaire: Development of a self-report measure to assess the psychological impact of digital games. Eindhoven University of Technology, 2013, 1–9.
- Jansen, P., Fischbach, F., Gugenheimer, J., Stemasov, E., Frommel, J., Rukzio, E. (2020). Share: Enabling co-located asymmetric multi-user interaction for augmented reality head-mounted displays. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 459–471.
- Kammerlander, R. K., Pereira, A., Alexanderson, S. (2021). Using virtual reality to support acting in motion capture with differently scaled characters. In *Proceedings of the 2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* 402–410.
- Kang, T., Chae, M., Seo, E., Kim, M., & Kim, J. (2020). Deephandsvr: Hand interface using deep learning in immersive virtual reality. *Electronics*, 9(11), 1863.
- Kim, M., Kim, J., Jeong, K., & Kim, C. (2020). Grasping vr: Presence of pseudo-haptic interface based portable hand grip system in

- immersive virtual reality. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 36(7), 685–698.
- Lee, J., Kim, M., & Kim, J. (2020). Rolevr: Multi-experience in immersive virtual reality between co-located hmd and non-hmd users. *Multimedia Tools and Applications*, 79(1–2), 979–1005.
- Li, Y., Sarcar, S., Kim, K., Tu, H., & Ren, X. (2022). Designing successive target selection in virtual reality via penetrating the intangible interface with handheld controllers. *International Journal of Human Computer Studies*, 165(C), 102835.
- Mehta, D., Sotnychenko, O., Mueller, F., Xu, W., Elgharib, M., Fua, P., Seidel, H., Rhodin, H., Pons-Moll, G., and Theobalt, C. (2020). XNect: real-time multi-person 3D motion capture with a single RGB camera, *ACM Transactions on Graphics*, vol. 39, no. 4, Article 82, 1–17.
- Mutasim, A. K., Batmaz, A. U., Stuerzlinger, W. (2021). Pinch, click, or dwell: Comparing different selection techniques for eye-gaze-based pointing in virtual reality. In *ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications, ETRA '21 Short Papers*. Association for Computing Machinery, Article 15, 1–7.
- Narang, S., Best, A., Manocha, D. (2018). Simulating movement interactions between Avatars & Agents in virtual worlds using human motion constraints. In *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* 9–16.
- Park, M., Cho, Y., Na, G., Kim, J. (2023). Application of Virtual Avatar using Motion Capture in Immersive Virtual Environment.

International Journal of Human–Computer Interaction, Latest Articles, in press

- Pei, S., Chen, A., Lee, J., Zhang, Y. (2022). Hand interfaces: Using hands to imitate objects in ar/vr for expressive interactions. In Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '22. Association for Computing Machinery, Article 429, 1–16.
- Pelechano, N., Stocker, C., Allbeck, J., and Badler, N. (2008). Being a Part of the Crowd: Towards Validating VR Crowds Using Presence. *Autonomous Agents and Multiagent Systems*, vol. 1, 136–142.
- Pütten, A., Krämer, N., Gratch, J., and Kang, S., (2010). “It doesn’t matter what you are!” Explaining social effects of agents and avatars. *Computers in Human Behavior*, vol. 26, issue 6, pp. 1641–1650.
- Rogers, S. L., Broadbent, R., Brown, J., Fraser, A., & Speelman, C. P. (2022). Realistic motion Avatars are the future for social interaction in virtual reality. *Frontiers in Virtual Reality*, 2, 750729.
- Sweeney, T. (2019). Foundational principles & technologies for the metaverse. In *ACM SIGGRAPH 2019 Talks*, SIGGRAPH '19, New York, NY, USA, Article 38, 1.
- Tatzgern, M., Domhardt, M., Wolf, M., Cenger, M., Emsenhuber, G., Dinic, R., Gerner, N., Hartl, A. (2022). Airres Mask: A precise and robust virtual reality breathing interface utilizing breathing resistance as output modality. In *Proceedings of the 2022 CHI*

- Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '22. Association for Computing Machinery. Article 274, 1–14.
- Van Dam, A. (1997). Post-wimp user interfaces. *Communications of the ACM*, 40(2), 63–67.
- Wagner, J., Stuerzlinger, W., & Nedel, L. (2021). Comparing and combining virtual hand and virtual ray pointer interactions for data manipulation in immersive analytics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(5), 2513–2523.
- Witmer, B. G., Jerome, C. J., & Singer, M. J. (2005). The factor structure of the presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(3), 298–312.
- Xi, N., Chen, J., Gama, F. et al. The challenges of entering the metaverse: An experiment on the effect of extended reality on workload. *Inf Syst Front* 25, 659–680.
- Xi, N., Chen, J., Gama, F., Riar, M., & Hamari, J. (2023). The challenges of entering the metaverse: An experiment on the effect of extended reality on workload. *Information Systems Frontiers*, 25(2), 659–680.
- Xinyu Yi, Yuxiao Zhou, and Feng Xu. (2021). TransPose: real-time 3D human translation and pose estimation with six inertial sensors. *ACM Trans. Graph.* 40, 4, Article 86 13.
- Xu, M., Niyato, D., Kang, J., Xiong, Z., Miao, C., Kim, D. I. (2022). Wireless edge-empowered metaverse: A learning-based incentive mechanism for virtual reality. In *ICC 2022 – IEEE International Conference on Communications*, 5220–5225.
- Yassien, A., Soliman, M. A., & Abdennadher, S. (2022). Quarantivityvr:

- Supporting self-embodiment for non-hmd users in asymmetric social vr games. *i-com*, 21(1), 55–70.
- Ye, X., & Long, J. (2022). Real-time adjustment of tracking offsets through a brain-computer interface for weight perception in virtual reality. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 52(5), 855–866.
- Yun, H., Ponton, J. L., Andujar, C., and Pelechano, N., (2023). Animation Fidelity in Self-Avatars: Impact on User Performance and Sense of Agency, 2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), Shanghai, China, 286–296.
- Yun, S., Park, S., Park, B., Ryu, S., Jeong, S. M., & Kyung, K.-U. (2020). A soft and transparent visuo-haptic interface pursuing wearable devices. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(1), 717–724.
- Zhang, L., (2022). Digital Protection of Dance of Intangible Cultural Heritage by Motion Capture Technology. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 85, 429–436.

3. 국외 단행본

- Dalton, J. (2019). 『Seeing is believing』 report UK: PwC.
- Stephenson, N. (1992). *Snow crash* (First ed.), chapter First hardback edition. Bantam Books.

4. 기타 자료

박지은. (2017). 화재·폭발 ‘안전 불감증’ 여전한 학교 실험실.
 이현기. (2022). 원주 한 초등학교에서 과학실험 어지러움 호소.
 BEAR3D. (2022). Urban Man Character. BEAR3D.
<http://www.kado.net/news/articleView.html?idxno=860953>
<https://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=5603888>
 IO-Studio. (2020). Archviz Laboratory Pack. IO-Studio.
 KBS뉴스. Available From :
 Meta. (2022). Meta quest. Meta Technologies, LLC.
 NaturalPoint. (2023). Motive Software and Unity Plugin, NaturalPoint.
 NaturalPoint. (2023). Optitrack. NaturalPoint Inc. DBA OptiTrack.
 TRIPLE. (2021). Village palace, people, soldier, interior. TRIPLE.
 UnityTechnologies. (2019). Unity engine. Unity Technologies.
 강원도민일보. Available From :

ABSTRACT

Motion Capture-Based Virtual Avatar Applications for Immersive Virtual Environments

Park, Myeongseok

Major in Computer Engineering

Dept. of Computer Engineering

The Graduate School

Hansung University

This study proposes the application of motion capture-based virtual avatars as a method to enhance the immersion of virtual reality users and provide diverse experiences in immersive virtual environments. To achieve this, we established an integrated development environment where both non-immersive users, such as those using PCs or mobile devices, and immersive users using VR headsets could participate together. This environment allows real-time interaction with motion capture-based virtual avatars in the virtual space through streaming motion capture data. To analyze the positive effects of the proposed actor-based motion capture avatars on virtual reality users, interactions were conducted sequentially with non-player character (NPC) avatars that follow predetermined patterns in a virtual environment. Based on the results of

user surveys conducted after these interactions, it was confirmed that the actor-based avatars utilizing motion capture provide users with unpredictable and diverse experiences, leading to high immersion and positive experiences. While actor-based avatars offer high immersion to users, they require the attachment of markers to actors, specific capture locations, and capture equipment, resulting in high costs. To address this, we additionally propose rigid-body tracking-based avatars as a method to provide high immersion to virtual environment users while mitigating the cost. For this purpose, we estimate the motion of virtual avatars in real-time based on inverse kinematics using rigid-body tracking, which is not based on tracking and recording the bodily information of actors but is a more cost-effective solution. To experimentally and analytically apply the proposed rigid-body tracking-based avatars to immersive virtual environments, we created scientific educational content. We compared and analyzed immersion and educational effects through auditory education, whole-body tracking methods, and user surveys. As a result, it was confirmed that the use of rigid-body tracking-based avatars can achieve higher immersion and educational effects than traditional auditory education, providing a positive experience without the need for extensive work on whole-body tracking.

【Key words】 Motion Capture, Virtual Avatar, Rigid-Body Tracking, Immersive Virtual Environment, Virtual Reality