

〈 25-2 프로젝트 최종보고서 〉

교과목 명	게임콘텐츠캡스톤디자인		학수번호	SWCON367-01
프로젝트 명	가상 신체 제어 학습을 위한 아바타 기반 감각 증강 시스템			
지도 교수	이름		소속	이메일
	오승재		소프트웨어 융합학과	oreo329@khu.ac.kr
팀원 (멘티)	이름		학과 (다전공)	이메일
	팀장	김태현	소프트웨어융합학과	kth000928@khu.ac.kr
	팀원	김종명	소프트웨어융합학과	kjm4235k@khu.ac.kr
	팀원			
	팀원			
멘토	이름		소속	이메일
	방영조		클레버로직	yjbang@naver.com

*다전공 학생은 필히 표시

프로젝트명 : 가상 신체 제어 학습을 위한 아바타 기반 감각 증강 시스템

팀원: 김태현, 김종명

요 약

1. 서론

현대 컴퓨팅 기술의 비약적인 발전은 가상현실과 메타버스 생태계를 급격히 확장시켰다. 시각적 디스플레이 기술의 고도화와 바디 트래킹 및 포즈 추정 기술의 대중화로 인해, 사용자는 가상 공간에서 시공간의 제약을 넘어 다양한 경험을 향유하고 있다. 이러한 가상 환경에서 사용자 경험의 핵심은 '아바타'를 통한 상호작용이다. 아바타는 단순한 그래픽 객체가 아니라 사용자의 자아를 투영하는 매개체로서, 사용자가 가상 세계에 실재한다고 느끼게 하는 중요한 역할을 담당한다.

그러나 콘텐츠적인 부분에서 현재 상용화된 **vr** 아바타의 경우 인간을 최대한 모방하는데에 집중되어 있어 휴머노이드 형태의 아바타만 다수 존재한다. 여타 다른 환경에서는 인간 뿐만 아니라 악마나 동물, 로봇 등 인체와 상이한 형태의 캐릭터를 자유롭게 조종할 수 있는 것에 비한다면 아쉬운 점이다. 이는 가상 공간에서 구현할 수 있는 다양한 아바타의 형태를 제한하는 현실이다.

이에 우리는 다양한 형태의 아바타를 조종하기 위해서는 해당 아바타가 인체와 다른 부분들에 대해서 사용자를 체화시킴이 필요하다고 생각했다. 추가되거나 변형된 신체에 대한 조작과 조작에 따른 피드백 감지를 통해 유저가 해당 신체 또한 자신의 신체라 여길 것이라 예측한다.

이러한 자신에게 존재하지 않는 가상신체에 대한 신체적 체화를 구현한다면 콘텐츠 외에도 다양한 확장성이 존재한다. 존재하지 않는 신체에 대한 체화이기에 신체 결손이나 신체 장애가 생긴 환자들에게도 동일한 경험을 줄 수 있다면 해당 환자들의 재활에도 효과적인 도움을 줄 수 있다. 게다가 현재 다양한 하드웨어로 인간의 몸을 증강시키는 기계들을 구현하고 있다. 이들을 상용화 하는 데에 사용자가 해당 기계들에 대해서 자연스럽게 체화되어 조종하는 것이 필수불가결하다. 이를 가상으로 체화하는 기술이 제대로 구현된다면 해당 기기에 대한 학습에도 사용할 수 있을 것이라 예측된다.

2. 연구배경

2.1) 연구목표

본 프로젝트는 해당 체화의 첫걸음으로 인간에게는 존재하지 않는 가상의 꼬리를 구현하고 해당 신체를 이용자가 진짜 자신의 신체로 인식하여 자유도 높게 조종할 수 있는 감각 증강시스템을 구현한다. 이를 위해 본 프로젝트는 두 가지의 목표를 설정하였었다.

첫째, 제어 시스템의 구축이다. 핸드 컨트롤러나 키보드와 같은 조작 방식의 경우 실재하는 몸을 움직인다는 인식이 약해 신체소유감이 매우 낮게 측정된다. 이에 별도의 컨트롤러 없이 사용자의 움직임을 입력받아 이를 이용하 아바타와 해당 아바타의 가상 신체를 조작한다. 이를 기반으로 해당 꼬리에 대한 행위 주체감을 높이는 것을 목표로 한다.

둘째, 상체 기반 햅틱 피드백의 구현이다. 시각 정보와 햅틱 정보를 동시에 주어졌을 때 해당 아바타에 대한 신체 소유감과 행위 주체감을 더욱 높일 수 있다는 연구 결과가 존재한다. 이를 바탕으로 사용자에게 시각적 정보와 이에 대응되는 등 부분 진동을 이용한다. 등의 진동의 경우 다른 부위 들에 비해 촉각과 고유수용성이 둔감하기 때문에 뇌의 착각을 유발하여 신체가 효과적으로 체화시킬 수 있음을 예측한다.

2.2) 기대효과

가상 콘텐츠에서 인체와 다른 아바타에 대한 조작 가능 : 현재 VR 이나 메타버스 상에서는 대부분 인간의 모습과 비슷한 휴머노이드로 아바타가 국한되어 있다. 이는 무한한 가능성과 경험을 만들어 낼 수 있는 제한하고 있다. 이에 본 프로젝트를 통해 구현된 가상 환경에서는 인간 형태라는 틀에서 벗어나 프로젝트에서 보내주는 꼬리에서 시작하여 날개나 다족 혹은 다완 형태의 아바타를 직관적으로 제어 가능해진다. 이는 사용자가 체험할 수 있는 가상 경험의 폭을 넓힐 수 있다.

의료 분야에서 재활과 치료 목적으로 사용 : 존재 하지 않는 신체를 뇌가 진짜 신체로 만들게 느끼게 하는 메커니즘은 신체 결손 환자의 재활이나 환상통의 치료에 활용될 가능성이 있다. 환상통의 치료에 현재 가장 상용화 되어 있는 치료법은 거울 치료이다. 해당 거울 치료는 거울을 이용해 없는 신체를 시각적으로 존재하는 것으로 착각을 일으켜 치료한다. 이는 없는 신체에 대해 시각과 햅틱적 착각을 일으키는 본 프로젝트와 대동소이 하므로 해당 환자들의 치료에도 응용 가능할거라 예상한다. 이

프로젝트를 성공적으로 완성하면 환상통 치료 뿐 아니라 신체 결손으로 재활이 필요한 환자들에게도 신체 인지 능력을 향상시키는 재활 프로그램으로 발전 가능하다.

로봇 공학에서의 사용 : 활발히 연구 되고 있는 입는 로봇이나 추가 로봇 팔의 상용화에 필수 불가결하게 해당 신체에 대한 훈련이 필요하다. 본 프로젝트에 체화 시스템을 꼬리를 팔로 매핑시키기만 하면 제 3의 팔로 동작할 로봇들을 조작하기 이전에 가상 환경에서 이를 안전하고 저렴하게 제어 훈련을 할 수 있는 시뮬레이션 환경으로 활용 가능하다.

3. 배경지식 및 관련 연구

3.1) 기술 이론

Supernumeracy Robotic Limbs : 신체 기능의 확장으로 서 새로운 팔을 추가하는 것을 목표로 합니다. 시스템을 조작하기 위해 기존 신체 부위의 움직임과 이를 연결하는 방식, 표정을 이용하는 방식, 또는 근전도(EMG) 와 같은 근육 신호를 활용하는 방식등 다양한 방법이 존재합니다. SRL을 구축하는 경우 이를 자신의 신체 일부처럼 생각할 수 있는지 즉, 체화 (embodiment)가 가능한지 확인하는 것이 중요합니다. 이때 신체 운동 중의 인지적 부하가 억제된 상태를 만든다면 해당 외부 부품을 자신의 몸처럼 다룰 수 있다고 해석할 수 있다. 기존의 연구에서는 로봇 팔을 다리에 매핑하는 등의 형태로 체화 정도를 강화 시켰다. 체화의 중요한 변수로는 신체 소유감과 행위 주체감이 존재한다. 신체 소유감은 어떤 대상을 자신의 몸처럼 느끼고 정서적으로 반응하는 상태를, 행위 주체감은 행동의 결과가 자신의 행동으로 야기되는 것이라고 느끼는 상태를 의미한다.

그리고 이에 대한 실험 **Embodiment of supernumerary robotic limbs in virtual reality** 에서 시각적인 피드백과 촉각적인 진동 피드백을 함께 주는 경우가 시각적인 피드백만을 주는 경우보다 신체 소유감과 행위 주체감 둘 모두 증가하는 것을 결과로 볼 수 있었다. 이를 참고하여 시각 피드백과 햅틱 피드백만으로도 해당 증강 신체에 대한 체화를 높일 수 있을지를 확인한다.

감각 호문쿨루스 : 신체의 감각은 모든 부위가 동일한 정도로 동일한 정밀도로 감각을 수용하지 않는다. 감각에 대해서 자주 감각을 받는 부분과 그렇지 않은 부분에서 촉각을 비롯한 감각이 서로 다르다. 감각을 자주 감지했던 손과 얼굴 같은 부위에서는 촉각이 일어나는 위치와 해당 부위가

공간적으로 어디에 존재하는지 그리고 어떤 형태로 관절이 움직여 어떤 모양을 하고 있는 지를 비교적 정교하게 탐지할 수 있다. 그러나 그렇지 않은 부위에서는 촉각이 일어나는 위치를 대략적으로 느끼는 데다 촉각의 모호함으로 촉각을 한 지점에서 받았는지 두 지점에서 받았는지 조차 제대로 감지하지 못한다. 이 때 우리의 연구에서는 피드백을 주는 부위에 대해서 해당 부에 대한 촉각을 일으키는 목적으로 하기에 촉각과 고유수용성에 대해서 낮은 부위에 햅틱 피드백을 매핑시키고 이를 통한 체화의 확인을 목표로 한다.

3.2) 기술 동향

3.3) 이슈 및 분석

피드백 부위 지정 : **Supernumeracy Robotics Limbs**를 구현하는 경우 대부분 가상의 팔을 다리에 매칭시켜 다리에 피드백과 조작을 입력하게 된다. 그러나 현재 우리가 구현하는 환경에서는 몸 전체를 그대로 입력시키는 방식이기에 이러한 매핑 방식은 해당 다리에 대한 입력과 피드백에 혼란을 줄 수 있기 때문에 현재 우리의 시스템에서는 팔과 다리에 혼란을 주지 않는 다른 곳에 피드백을 매핑하는 것을 필요로 한다.

꼬리의 물리적 구현 : 프로젝트의 주 구현 요소인 꼬리의 경우 일반 휴머노이드 아바타와 달리 리깅과 조작을 구현하는 방식이 획일화 되어있지 않다. 이에 꼬리의 리깅과 피직스를 우리가 원하는 기능에 적절하게 구현한다.

4. 프로젝트 내용

[Phase 1: 이론 정립 및 기반 기술 조사 (5~6주차)]

- 5주차: 관련 논문 및 기술 분석
 - 가상 신체 소유감(Body Ownership) 및 감각 확장 관련 선행 연구 분석.
 - 컴퓨터 비전 기반 포즈 추정 기술의 한계 및 활용 가능성 검토.
- 6주차: 중간 점검
 - 기존 이론적 배경 정리 및 프로젝트 세부 목표 구체화.

[Phase 2: 기본 제어 구현 (7~10주차)]

- 7주차: MediaPipe 기반 포즈 디텍션 및 Unity 연동
 - MediaPipe를 활용한 2D 영상 내 관절 추출.
 - 추출된 데이터를 Unity의 Rigidbody와 연동하여 물리 기반 캐릭터 조종 기초 구현.
- 9주차: 가상 신체 활용 분야 및 하드웨어 선정
 - 활용 분야 설정: 콘텐츠 제작, 산업 현장 보조, 의료/재활 훈련(환상통 완화 등).
 - 센서 체계 확립: 카메라(MediaPipe), 보이스, 근전도, IMU(관성 센서), 아이트래커 등 검토.
 - 전략적 선택: 하드웨어 자체 개발 대신 기존 상용 하드웨어(Galaxy Watch, bHaptics 등)를 활용하여 소프트웨어 알고리즘 및 피드백 패턴 최적화에 집중.
- 10주차: IMU 기반 꼬리 제어 및 햅틱 통신 구축
 - Flutter 앱을 개발하여 스마트폰 IMU(가속도/자이로) 데이터를 IP 통신을 통해 Unity로 전송.
 - 전달된 수치를 활용해 꼬리의 회전 및 움직임 구현.
 - 이벤트 발생 시 Unity → 스마트폰 → 갤럭시 워치로 이어지는 햅틱 피드백 경로 구축.

[Phase 3: 제어 정교화 및 햅틱 맵핑 (11~12주차)]

- 11주차: 인터랙션 정교화 및 디바이스 확장
 - MediaPipe 인식 범위를 안면(Face) 및 손가락(Hands)까지 확장하여 전체적인 리깅 개선.
 - DualSense 컨트롤러의 적응형 트리거 및 햅틱 피드백 연동 테스트.
- 12주차: 감각 호문쿨루스 기반 피드백 매핑
 - 매핑 전략: 고유수용성과 촉각의 착각을 유도하기 위해 흉부(Torso) 피부 감각에 꼬리의 감각을 매핑.
 - 환상통 완화를 위한 기법 중 흉부에 손을 매핑한 사례를 토대로 torso 부분에 햅틱 피드백을 구현
 - bHaptics 슈트를 활용하여 꼬리의 감각을 흉부로 전달함으로써 신체 확장 가능성 탐색.

[Phase 4: 물리 엔진 구현 및 시스템 최적화 (13~14주차)]

- 13주차: 꼬리 물리(Physics) 및 진동 패턴 설계
 - 물리 특성:
 - 관성 지연(Inertia),
 - 강성 경계(Stiffness Gradient),
 - Idle 상태의 흔들림 구현.
 - 햅틱 패턴:
 - Idle 진동(존재 인지용 4초 주기)
 - 관성 진동(회전 방향에 따른 이동 진동)
 - 충돌 진동(루트/끝부분 타격 시 패턴턴 차별화)
 - 장력 진동(늘어남에 따른 Rumble 피드백)
- 14주차: 시스템 통합 및 시나리오 초안
 - 꼬리 제어 정교화: Root Bone을 Kinematic으로 설정하고 가상 중력과 IMU 벡터를 합성하여 목표 방향 산출.
 - 범위 인식: 충돌 감지 시 방향을 계산하여 상위 3개 열의 모터에 피드백 매핑.
 - 시나리오 구현
 - 꼬리의 존재 여부 체화 : idle 피드백으로 꼬리의 소유감을 가질 수 있는지 확인
 - 꼬리의 행위 주체감 체화 : 장애물을 등장 시킨 뒤 꼬리를 움직여 해당 장애물을 피하게하여 꼬리의 주체감을 확인
 - 꼬리의 위치 별 진동 체화 : 꼬리의 특정 부분을 시각적으로 표시하고 해당 부분에 대한 진동을 주어 충돌 부위를 체화
 - 원거리 물체 공간감 체화 : 몸 주위를 둘러싼 원거리 물체를 배치. 이후 특정 위치의 원거리 물체에 자극을 주어 해당 진동의 진동 위치 체화

[Phase 5: 시나리오 및 데모 구현 (14~15주차)]

- 15주차: 시스템 및 시나리오 수정 후 데모 진행

○ 시스템 수정

- **Idle**피드백 비활성화 : 지속적인 진동이 오히려 꼬리의 체화 감각에 악영향 발생으로 비활성화

○ 시나리오 수정

■ 능동적 움직임으로 햅틱 효과 검증

- 초기 설정 : 사용자가 정면을 볼 때를 기본상태로 설정하고 햅틱이 켜진 상태로 시작한다.
- 적응 훈련 : 사용자를 향해 장애물 발사위치를 설정하고 이를 미리 장애물의 경로를 알려주어 유저의 능동적 방어를 유도한다.
- 대조군 테스트 : 실험 도중 'H'키를 눌러 햅틱 피드백을 제거한다. 이후 시각 정보만 존재하는 상황에서 사용자의 반응이 달라지는 지를 확인한다.

■ 꼬리의 위치 별 진동 체화

- 적응 훈련 : 꼬리와 해당 꼬리에 **Root**부위와 **Tip** 부위를 화살표로 랜덤으로 지정하여 가리키고 해당 부위에 햅틱을 부여한다. 이는 햅틱 감각과 시각 정보를 매칭하는 단계이다.
- 대조군 테스트 : 해당 화살표를 'B'키를 눌러 화살표가 보이지 않게 제거한다. 이후 보이지 않는 화살표로 랜덤한 햅틱을 동일하게 부여한다. 이후 햅틱 감각만을 가지고 해당 진동이 어떤 부분을 자극한 것인지를 판단할 수 있는지 확인한다.
- 테스트 시에 1, 2를 눌러 해당 부분이 어딘지를 답변한다. 이 답변을 판단해 점수를 올려 체화 정도를 확인한다.

■ 충격량에 따른 꼬리 햅틱의 변화 체화

- 꼬리 햅틱 구현 중 충격량에 따라 햅틱의 세기가 달라지는 기능을 체화시킨다.
- 스포너는 꼬리를 향해 두 가지 물리 속성의 투사체를 발사한다.

이름	속도	질량	크기	색상
Weak	3	0.5	0.2	초록

Strong	12	5	0.5	빨강
--------	----	---	-----	----

- 해당 물리 속성 중 속도와 질량의 차이를 이용해 꼬리에 충격량을 다르게 부여한다.
 - 사용자는 충격량에 따라 달라지는 햅틱 피드백을 체화한다.
- 원거리 물체 공간감 체화
- 사용자 주변을 공전하는 원거리 물체들을 신체의 연장선으로 인식하여, 사각지대나 원거리 물체를 감지하는 훈련을 한다.
 - 원거리 물체가 이동하는 경로에 랜덤으로 장애물을 소환한다.
 - 해당 장애물에 원거리 물체가 충돌하면 충돌 위치와 해당 위치와 사용자의 거리를 계산한다.
 - 해당 계산된 위치에 따라 현재 감지된 부분의 방향을 햅틱의 형태로 인지시킨다.

5. 결론

5.1) 기대효과

5.2) 향후 연구방향

참고문헌

[1]

[2]

[프로젝트 GitHub 링크]

<https://github.com/Lunamana00/Capstone-HCI>