

골격 데이터와 발 압력매트를 활용한 재활 훈련용 가상 현실 콘텐츠

시종욱*, 정혜리**, 이상진**, 김성영***

Virtual Reality Contents for Rehabilitation Training Utilizing Skeletal Data and Foot Pressure Mat

Jongwook Si*, Hyeri Jeong**, Sangjin Lee**, Sungyoung Kim***

요약 최근 재활 치료와 운동 프로그램에 대한 관심이 증가함에 따라, 건강과 재미를 동시에 충족할 수 있는 스마트 콘텐츠 개발의 필요성이 커지고 있다. 특히, 신체 불균형 상태에서의 운동은 부상 위험이 높아, 균형을 감지하고 이를 반영한 훈련이 중요하다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 발 압력매트와 가상 현실(VR) 기술을 결합한 재활 운동 프로그램을 제안한다. 이 프로그램은 VR 환경에서 스쿼트, 제자리 걷기, 앞뒤로 걷기 등의 운동을 수행할 수 있으며, 발 압력매트를 통해 실시간으로 발 압력을 감지하여 활용한다. 또한, YOLOv8-pose 기반으로 추출된 골격 좌표를 활용한 알고리즘을 제안하여 신체 균형을 평가하고, 스쿼트 횟수를 자동으로 계산하는 기능도 포함한다. 실험 결과 각각의 자세에 대하여 평균적으로 87.9%의 정확도를 보였으며, 이를 통해 사용자는 더욱 안전하고 효율적인 맞춤형 훈련 경험과 몰입감 있는 훈련 경험을 제공할 수 있음을 확인하였다.

Abstract With the growing interest in rehabilitation therapy and exercise programs, there is an increasing need for smart content that simultaneously addresses both health and engagement. Particularly, exercises performed in a state of physical imbalance carry a high risk of injury, making it essential to detect and integrate balance into the training process. This paper proposes Rehabilitation Training program that combines a pressure platform with virtual reality (VR) technology to address this issue. The program enables users to perform exercises such as squats, stationary walking, and forward-backward walking in a VR environment, utilizing real-time foot pressure data captured through a pressure mat. Additionally, an algorithm based on YOLOv8-pose extracted skeletal coordinates is proposed to assess body balance and automatically count squat repetitions. The experimental results showed an average accuracy of 87.9% for each posture, confirming that users can be provided with a safer, more efficient, and immersive training experience through this approach.

Key Words : Virtual Reality, Skeleton Extraction, Body Balance, Contents, Exercise Program

1. 서론

최근 재활 치료 및 운동 프로그램에 대한 수요가 증가함에 따라, 사용자에게 건강과 흥미를 동시에 제공하는 스마트 콘텐츠 개발의 필요성이 더욱 커지고 있다 [1-2]. 특히, 가상 기반의 운동 프로그램은 사용자가

재활훈련에 지속적으로 몰입할 수 있도록 유도하며, 이는 재활 효과를 극대화하는 데 기여할 수 있다. 그러나 신체의 불균형 상태에서 무리한 운동을 지속할 경우, 오히려 부상의 위험이 증가하고, 특정 부위에 과도한 부담이 가해져 장기적인 재활 목표 달성에 어려움을 겪

Following are results of a study on the "Leaders in INdustry-university Cooperation 3.0" Project, supported by the Ministry of Education and National Research Foundation of Korea

* Dept. of Computer·AI Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology

** Dept. of Computer Engineering, Kumoh National Institute of Technology

*** Dept. of Computer Engineering, Kumoh National Institute of Technology (Corresponding Author)

Received September 24, 2024

Revised October 11, 2024

Accepted October 12, 2024

을 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 운동 프로그램에서 신체 균형을 고려하는 것은 필수적이다[3].

신체 불균형 상태에서의 운동은 특정 근육군에 과부하를 주고, 이를 장기간 지속할 경우 부상뿐만 아니라 재활 효과의 감소를 초래할 수 있다. 특히, 신체 균형을 무시한 프로그램은 보행 패턴의 왜곡을 일으킬 수 있으며, 이는 더 큰 문제로 발전할 가능성이 있다. 따라서 운동 프로그램에서 신체의 균형 상태를 실시간으로 평가하고, 이를 바탕으로 훈련을 조정하는 방식이 중요하다.

개인별 맞춤형 훈련 제공은 단순한 운동 효과를 넘어, 신체 균형을 유지하고 부상을 예방하는 데 중요한 역할을 한다. 개인의 체력, 신체 상태, 목표에 맞춰진 맞춤형 훈련은 일반적인 훈련보다 훨씬 더 효과적인 결과를 도출할 수 있으며, 이는 장기적인 재활 성공의 중요한 요소가 된다. 이러한 요구에 대응하여 재활 분야에서 스마트 매트와 센서 기술의 활용이 중요한 역할을 하고 있다. 스마트 매트는 사용자의 발 압력을 실시간으로 측정하고, 다양한 센서들을 바탕으로 신체 균형을 분석할 수 있다. 이러한 데이터를 통해 사용자는 자신의 신체 불균형 상태를 인지하고, 균형을 회복할 수 있는 맞춤형 훈련 프로그램을 제공받게 된다. 특히, 어린이 사용자들을 위한 맞춤형 훈련 프로그램에서는 재미 요소를 더해 사용자의 몰입도를 높이며, 효과적인 재활 훈련이 가능하도록 돕는다.

컴퓨터 비전 기술의 발달은 실시간 인간의 신체 동작 및 포즈 추출을 가능하게 하였으며, 이는 다양한 분야에서 큰 잠재력을 보이고 있다[4]. 특히, 신체의 균형 상태를 분석하는 기술은 사용자의 자세를 모니터링하고 개선하는 데 중요한 역할을 한다. 정확한 자세와 균형을 유지하는 것은 신체 건강에 중요한 요소로, 특히 운동 중에는 균형 잡힌 자세가 부상을 방지하고 운동 성과를 극대화하는 데 기여한다. 최근 들어, 딥러닝 기반 객체 탐지 및 포즈 추적 모델의 성능이 크게 향상되었으며, 실시간으로 사람의 신체 골격을 감지하는 데 뛰어난 성능을 보인다. 따라서, 신체 불균형 상태에서 운동을 지속할 경우 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위해서는 신체 균형을 고려한 맞춤형 훈련 프로그램이 필요하다. 가상현실에서 제공되는 이러한 프로그램은

사용자의 신체 데이터를 기반으로 훈련을 조정하고, 이를 통해 재활 효과를 극대화하며 부상을 예방할 수 있는 효과적인 수단으로 자리잡고 있다. 본 논문에서는 이러한 기술적 요구와 중요성을 바탕으로, 스마트 매트와 신체 균형 감지 기술을 활용한 재활 훈련 콘텐츠를 소개하고자 한다.

2. 관련 연구

메타버스의 부상에 따라 가상현실과 증강현실 등의 분야에서 많은 플랫폼과 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 이성민 연구팀[5]은 가상현실 콘텐츠 내의 조명과 색 온도에 따른 시각적 피로를 해결하기 위해 PPG 신호를 기반으로 한 Mamdani 퍼지 추론 시스템을 제안하였다. 이 연구에서는 가상현실의 색 온도를 자동으로 제어하여 사용자의 시각적 피로를 줄이는 방법을 소개하였다. 공수민 연구팀[6]은 메타 퀘스트 프로와 유니티 3D 엔진을 활용하여 혼합현실 기반의 전기회로 실습교육 콘텐츠를 제안하였다. 이 연구에서는 전통적인 전기회로 실습 방식을 혼합현실 환경에서 구현하고, 이를 통해 사용자의 몰입감과 학습 경험을 분석하는 설문 실험을 진행하여 타당성을 증빙하였다. 김정운 연구팀[7]은 보행 영상을 딥러닝으로 분석하여 환경 제약 없이 보행 특성을 측정하는 가상현실 산림치유 플랫폼을 제안하였다. 이 연구는 HMD와 피톤치드 분사기 등을 활용해 시각, 촉각, 후각을 제공하고, 심박 센서와 3D 보행분석 시스템으로 건강 데이터를 수집하였다. 이를 통해 뇌졸중 및 골관절염 환자를 대상으로 한 실험을 통해 플랫폼의 신뢰성과 효과를 입증하였다. 윤채원 연구팀[8]은 메타버스와 인공지능을 결합한 가상 면접 플랫폼을 제안하였다. GPT-4 기반 질문 생성과 음성 합성 기술을 통해 사용자와 가상 면접관 간 상호작용하며, 유니티 엔진으로 실제 면접과 유사한 환경을 제공하는 콘텐츠를 제공하였다.

박도현 연구팀[9]은 초기 아동의 운동 발달 단계에 맞춰 피겨스케이팅 기술 습득을 위한 연령별 운동 프로그램을 개발을 제안하였다. 이 연구는 전문가 논의를 통해 프로그램을 수정·보완하는 작업을 진행하여 타당성을 확보하였다. 김준희 연구팀[10]은 4축 모션 플랫폼 기반의 운동기구를 제안하였다. 이 기기는 족저압

측정과 모션 플랫폼 구동을 단일 시스템에서 구현하였으며, 재활 치료 중 실시간으로 족저압 모니터링이 가능하다는 것이 특징이다. 윤태복 연구팀[11]은 푸쉬업을 기반으로 사용자의 어깨 근력에 맞춘 운동 각도를 자동으로 조절하는 장치를 사용하는 게임 플랫폼을 제안한다. 이 연구는 운동과 게임적 요소를 결합하여 흥미로운 운동 경험을 제공하며, 다른 사람과의 상호작용을 통해 운동 효과를 극대화할 수 있는 것이 특징이다.

메타버스 관련 플랫폼[5-8]과 운동에 관한 다양한 연구들[9-11]을 분석한 결과, 이들은 여러 목적과 분야에서 활용되며 점점 더 높은 정확도와 사용자 친화적인 시스템으로 구현되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 플랫폼들은 주로 교육, 의료, 헬스케어 등에서 하나의 방법으로 적용되며, 사용자가 쉽게 접근할 수 있도록 설계된다. 본 연구에서 제안하는 방법은 가상현실(VR) 콘텐츠와 재활 운동을 결합하여 사용자의 운동 효과를 극대화하려는 목적을 가지고 있다. 제안하는 시스템은 기존의 메타버스 및 운동 관련 연구들과 연관성을 지니며, 재활 치료 분야에서의 새로운 접근 방식을 제시하는 데 중점을 두고 있다.

3. 재활 훈련을 위한 가상현실 콘텐츠

제안하는 가상현실 콘텐츠는 유니티 엔진을 기반으로 개발하였으며, 크게 “로비”와 “필드” 2개의 공간으로 구성된다. “로비”에서는 로그인과 훈련장을 선택하거나 튜토리얼 등의 기능들을 포함한다. 그리고 “필드”는 실제 재활 훈련을 위한 콘텐츠를 중심으로 사용자가 선택한 자세에 대하여 지정 시간 내에 훈련을 하고, 이에 대한 결과를 제공받을 수 있는 것으로 구성된다.

3.1 로비 시나리오 및 내용

로그인 과정은 회원 로그인과 게스트 로그인으로 구분된다. 회원 로그인은 사전에 시스템의 데이터베이스(DB)에 계정 정보가 생성되어 있어야 하며, 게스트 로그인은 사용자에게 대한 정보 없이 체험판으로 서비스를 이용할 수 있는 방식으로 제공된다. 회원으로 로그인하기 위해서는 계정이 필요하며, 계정은 아이디와 비밀번호를 통해 인증할 수 있다. 계정이 없는 사용자는 회원가입 절차를

통해 계정을 생성해야 한다. 그림 1은 로그인과 회원가입을 위한 시스템의 UI를 나타낸다. 회원가입 과정에서는 사용자가 입력한 이메일과 비밀번호가 형식에 부합하는지 검증한다. 회원가입 시 사용자는 이름, 나이, 성별 등의 추가 정보를 입력해야 하며, 해당 정보는 Firebase 기반 데이터베이스에 등록된다. Firebase는 인증과 간단한 DB 구축을 위해 사용되며, FirebaseAuth는 사용자의 인증을 담당하고, Firestore Database는 NoSQL 기반의 데이터베이스로서 사용자 정보를 저장하는 데 활용한다.

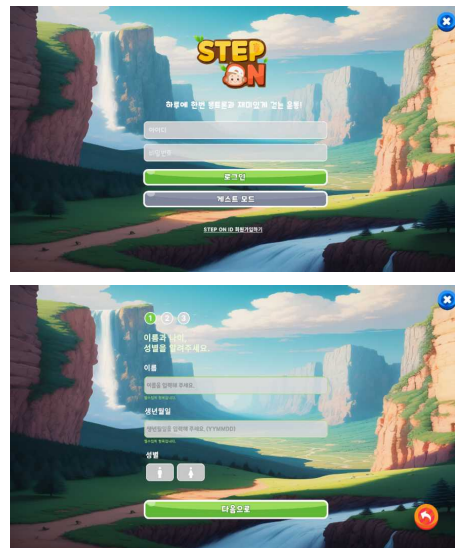


그림 1. 로그인 및 회원가입 UI
Fig. 1. User Interface of Login and Registration

본 콘텐츠는 사용자가 선택할 수 있는 3가지의 훈련 필드를 제공하며, 각 필드는 걸거나 달릴 수 있는 시간과 거리를 표시한다. 사용자는 자신이 원하는 장소에서 훈련을 진행할 수 있으며, 선택 가능한 필드는 풀밭, 숲, 밤으로 구성된 3가지 콘텐츠이다. 사용자는 각 필드를 클릭하여 서로 다른 환경에서 훈련을 진행할 수 있다. 3개의 필드 중 하나를 클릭하면 사용자는 해당 공간으로 이동하여 훈련을 시작하게 된다. 그러나, 사용자가 계정 접속 후 처음 훈련을 진행하는 경우, 시스템은 튜토리얼을 진행할지 여부를 묻는 팝업 창을 띄운다. 이를 통해 사용자는 훈련에 필요한 기본적인 사용법을 익

힐 수 있는 시간을 가질 것인지, 아니면 바로 훈련을 진행할 것인지를 선택할 수 있다. 그림 2는 훈련 필드를 선택하는 상황을, 그림 3은 튜토리얼에 관련한 팝업의 사용자 인터페이스를 나타낸다.

튜토리얼 진행 여부를 묻는 팝업 창에서 "훈련하기" 버튼을 누르면 바로 훈련이 시작되며, "네 해볼게요" 버튼을 누르면 게임의 조작법을 익힐 수 있는 튜토리얼이 시작된다. 튜토리얼에서는 발 압력매트를 사용해 캐릭터를 전진시키는 방법과 같은 기본적인 조작법을 배우게 되며, 이를 통해 사용자는 게임 내 훈련 환경에서 동작하는 방법을 숙지하게 된다. 예를 들어 걷는 동작을 위해 왼발과 오른발을 번갈아 밟도록, 대사를 통해 사용자의 움직임을 유도하고, 이에 따라 화면 우측 아래에 매트에 입력된 압력을 시각화하여 사용자에게 정보를 제공한다. 이러한 시스템 시나리오를 통해 사용자는 다양한 필드에서 훈련을 경험할 수 있으며, 첫 훈련 시 튜토리얼을 통해 시스템 사용법을 자연스럽게 익히도록 유도할 수 있다.

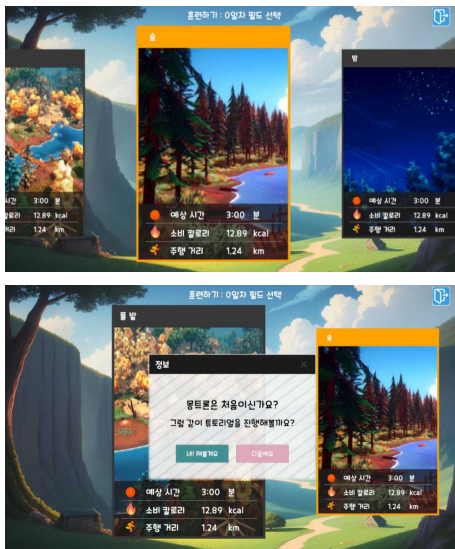


그림 2. 훈련 필드 선택과 튜토리얼 팝업의 사용자 인터페이스
Fig. 2. User Interface of Training Field Selection Screen and Tutorial Popup Window

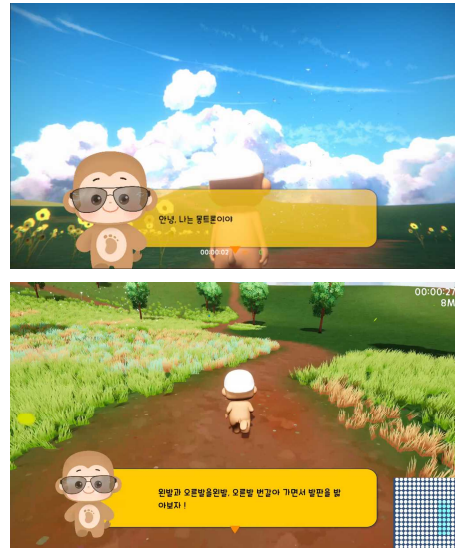


그림 3. 튜토리얼 진행 내용 예시
Fig. 3. Examples of Tutorial Progress

3.2 훈련 콘텐츠

훈련을 위한 콘텐츠는 “앞뒤로 걷기”, “제자리 걷기”, “제자리 스쿼트” 3가지로 구성된다. “앞뒤로 걷기”의 경우 사용자가 매트를 앞에 두고 발의 좌우를 번갈아 올라갔다 내려오는 동작이며, “제자리 걷기”는 매트 위에서 모든 걷는 동작이 이루어지는 훈련이다. 마지막으로, “제자리 스쿼트”는 매트 위에서 스쿼트 자세를 진행하는 것이다.

그림 4는 제안된 콘텐츠를 활용하기 위한 장치 배치와 주변 구성을 보여준다. 걷기 동작의 경우, 발 압력매트를 이용해 사용자의 걸음을 감지하고 그 결과를 실시간으로 사용자에게 제공한다. 사용자의 신체 균형을 고려하기 위해 전면 상단에 웹캠 카메라를 설치해 구성하며, 이 카메라는 골격 좌표를 추출하여 제안된 알고리즘으로 신체 균형을 평가한다. 이 골격 좌표는 스쿼트 동작의 횟수 계산에도 활용되어 가상 현실에서 효과적인 훈련이 가능하다. 즉, 운동 종류에 따라 횟수 측정 방식이 다른데, 제자리 걷기와 앞뒤 걷기는 발 압력매트를 통해 횟수를 측정하고, 스쿼트는 카메라로 신체 균형을 감지하여 올바른 자세일 때만 횟수가 증가하는 방식이며, 불균형한 자세의 횟수를 추가로 사용자에게 제공한다. 측정된 운동 횟수는 시간 UI 스크립트로 전

달되어 사용자 인터페이스에 표시되며, 웹캠으로 사용자를 인식한 후 골격을 그려 사용자가 모니터를 통해 자신의 자세를 실시간으로 확인할 수 있다.

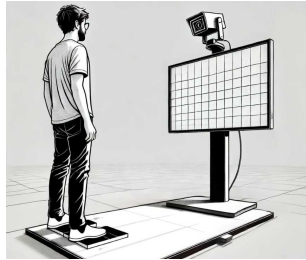


그림 4. 제안 콘텐츠를 경험하기 위한 주변 구성도
 Fig. 4. Peripheral Configuration for Experiencing the Proposed Contents

발 압력매트[12]는 USB 포트를 통해 압력 센서의 값과 관련된 정보를 데이터를 시리얼 통신을 통해 콘텐츠가 설치된 PC로 송신하는 역할을 한다. 해당 매트는 그림 5와 같이 구성되며, 사용자가 발에 가하는 압력에 따라 좌우를 인식할 수 있는 기능을 제공한다. 사용자가 매트를 밟는 방식에 따라 4가지 상태로 구분할 수 있다. 이 상태는 왼발을 밟은 상태, 오른발을 밟은 상태, 양발을 동시에 밟은 상태, 그리고 아무 발도 밟지 않은 상태로 구분된다. 이러한 상태는 사용자가 발을 움직일 때마다 상태가 적절히 변경된다.

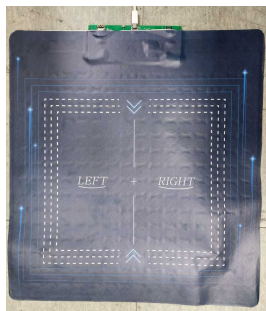


그림 5. 사용한 발 압력매트의 예시
 Fig. 5. Examples of Used Pressure Mat

3가지 방법에 대한 횡수 인식 방법은 다음과 같다. 먼저 앞뒤로 걷기의 경우, 사용자가 매트를 밟았을 때 사용자의 상태가 갱신되고 훈련의 진행 상황이 반영된

다. 이 동작의 경우 사용자가 매트 뒤에서 초기에 위치하며, 전진 및 후진 동작을 진행한다. 사용자가 양발을 모두 매트에 올리면 그에 따라 훈련이 진전되고, 걸음 상태가 적절히 갱신된다. 반대로 발을 매트에서 뗀 경우 걸음의 상태가 다시 갱신된다. 추가적으로, 사용자의 걸음 수를 기록하며, 사용자가 일정 시간 동안 매트를 밟지 않으면 훈련이 자동으로 일시 중지된다. 다만, 신체가 불균형한 상황에서 걸음 동작을 한 경우 횡수에서 제외된다. 다음으로 제자리 걷기 운동의 경우 앞뒤로 걷기의 프로세스와 거의 비슷하게 진행된다. 이 동작의 경우 사용자가 매트 위에 두 발을 둔 상태로 위치하는 것이 시작 자세이다. 변경되는 큰 특징은 운동 자세에 의해 초기 상태를 제외하고는 두 발 중에 최소 하나의 발은 매트 위에 위치한다는 것이다. 발을 매트에 올리면 발 상태가 Left 또는 Right로 전환되며, 사용자가 발을 떼면 발 상태가 None으로 변경된다. None이라는 상태는 왼발 오른발이 서로 교체되는 상황을 의미한다. 이 과정에서 올바르게 운동을 수행했을 경우 운동의 반복 횡수를 증가시킨다.

본 논문에서는 신체 균형을 감지하고 스쿼트 동작을 위해 골격 추출 모델을 활용한다. 이를 위해 Unity 플랫폼에서 SentiS와 YOLOv8-pose[13] 모델(nano)을 활용하여 실시간으로 사용자의 골격을 추출하고, 이를 통해 신체의 균형 상태를 분석하는 방법을 제안한다. 이 모델은 실시간으로 사용자의 신체 골격을 17개의 주요 관절을 기반으로 추출하며, 빠른 처리 속도와 높은 정확도를 제공한다. 이를 바탕으로 얼굴, 어깨, 허리와 같은 주요 신체 부위 간의 각도와 좌표를 계산하고, 좌우 대칭을 분석하여 신체 균형 상태를 판단할 수 있다. 그림 6은 YOLOv8-pose[13]를 통해 추출한 골격 데이터를 시각화한 내용을 나타낸다. 제안 방법에서는 귀(4, 5번)와 양측 어깨(6, 7번) 사이의 어깨 부근 좌우 각도(θ_1, θ_2), 양측 어깨와 양측 허리(12, 13번) 사이의 어깨 부근 좌우 각도(θ_3, θ_4)를 계산하고, 이들 각도의 좌우 차이가 15도 이하일 경우를 하나의 균형 조건으로 정의한다. 나머지 균형 조건은 정면을 올바르게 바라보고 있어야 하는 것으로, 이를 판단하는 조건은 코(1번)의 x 좌표와 어깨 및 허리의 중심 x 좌표를 고려하는 것이다. 본 논문에서는 실제 중심과 비교하였을 때 절댓값

오차 10% 이내인 경우를 균형이라 판단한다. 위에서 언급한 모든 조건을 모두 만족시키는 경우 신체가 균형 잡힌 최종 상태로 판단하며, 이를 수식으로 표현하면 (1)과 같다.

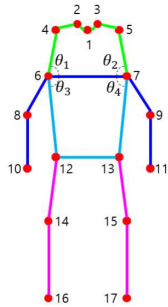


그림 6. 골격 좌표 시각화
Fig. 6. Visualization of Skeletal Coordination

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{if } \left\{ \begin{array}{l} \theta_1 - \theta_2 \leq 15 \text{ and} \\ \theta_3 - \theta_4 \leq 15 \text{ and} \\ \left| \frac{x_1 - x_6}{x_7 - x_6} - \frac{1}{2} \right| \leq 10\% \text{ and Balance} \\ \left| \frac{x_1 - x_{12}}{x_{13} - x_{12}} - \frac{1}{2} \right| \leq 10\% \end{array} \right. \\ \text{else} \end{array} \right. \quad (1) \quad \text{Unbalance}$$

각도의 경우 세 점의 좌표에 대하여 두 개의 벡터 (\vec{a} , \vec{b})를 계산하고, 이 벡터들의 내적을 통한 사잇각을 아크코사인(Arccosine)을 통해 계산하는 방법을 사용한다. 이렇게 계산된 각도는 라디안으로 표현되므로 도 (degree)로 변환하여 사용한다. 이를 다시 나타내면 수식 (2)와 같다. 그림 7은 제안하는 골격 정보를 활용한 신체 균형 판단 알고리즘에 대한 예시를 나타낸다.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} \right) * \frac{180}{\pi} \quad (2)$$

스쿼트 동작은 사용자의 허리 위치(12, 13번)를 기준으로 횡수를 센다. 이 동작은 사용자의 골반이 영상에서 차지하는 높이를 기준으로 스쿼트가 진행 중인지, 완료되었는지를 판단한다. 사용자가 스쿼트를 수행할 때, 골반이 특정 기준선 이하로 내려가면 스쿼트가 진

행 중이라고 판단하고, 그 이후 다시 기준선 위로 올라가면 스쿼트가 완료된 것으로 간주하여 횡수를 더한다. 당연히 스쿼트 동작 간에 신체의 균형을 유지해야만 횡수로 반영된다. 구체적으로, 골반의 좌표는 12, 13번의 y좌표의 평균값을 기준으로 한다. 이때, 스쿼트의 진행 여부는 이 좌표가 영상 높이(I_h)의 2/3 이하로 내려갔는지에 따라 결정된다. 사용자의 골반이 이 기준선보다 내려가면 동작이 진행 중으로 간주되며, 다시 기준선 위로 올라오면 완료된 것으로 인식하여 횡수를 증가시킨다. 이를 수식으로 표현하면 (3)과 같다.

$$\frac{y_{12} + y_{13}}{2} > I_h * \frac{2}{3} \quad (3)$$

그림 7은 제안하는 콘텐츠에서 운동을 진행하는 예시와 결과창을 나타낸다. 사용자는 심폐 지구력, 협응성, 근력/지구력 버튼 중 하나를 클릭하면 새로운 창에서 제자리 걷기, 앞뒤로 걷기, 제자리 스쿼트 중 하나를 선택할 수 있다. 선택된 운동에 대해 화면의 좌측 상단의 캐릭터는 해당 동작을 나타낸다. 운동 중에는 사용자 캐릭터의 애니메이션이 동적으로 변경되며, 발 상태에 따라 왼발, 오른발, 또는 양발의 움직임을 반영한다. 이러한 애니메이션을 통해 사용자는 해당 동작을 따라 하면서 익힐 수 있으며, 콘텐츠의 좌측에서 시간적으로 확인할 수 있다. 좌측 하단에는 실제 웹캠 영상을 기반으로 한 YOLOv8-pose[13]의 골격 추출 결과가 출력된다. 이 웹캠 영상은 사용자가 동작을 선택하고 시작하기 버튼을 누른 후에 표출된다. 사용자가 운동을 진행하면, 캐릭터는 맵 상에서 지정된 경로를 따라 이동한다. 경로 이동은 올바른 동작을 한 경우에만 동작한다. 그리고 시간이 종료되면 콘텐츠를 종료하고 걸음 수(올바른 걸음 수, 불균형 상태에서의 걸음 수)와 누적 시간 정보를 사용자에게 제공한다. 누적 시간의 경우 하나의 계정에서 사용자가 해당 콘텐츠를 진행한 총 시간이며, 개인 계정에 대한 DB에 훈련 내용을 기록한다.

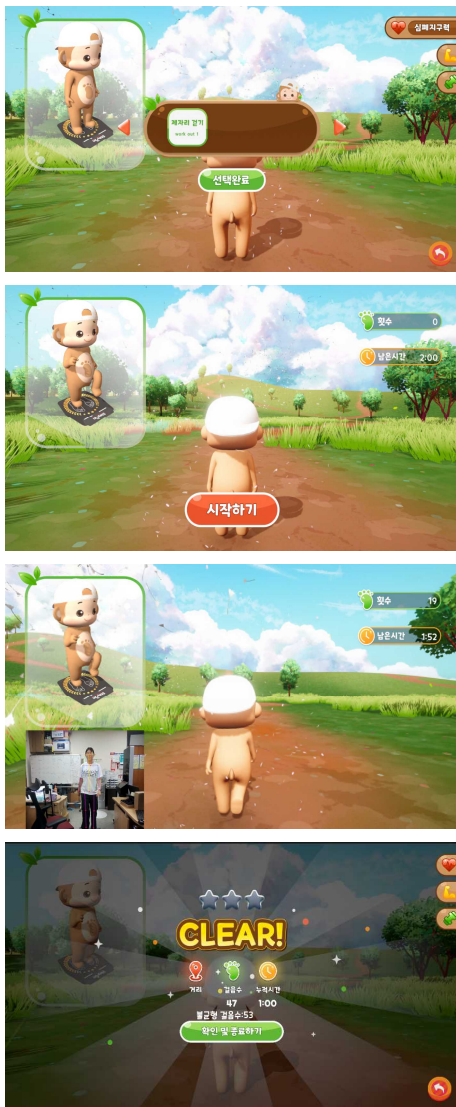


그림 7. 시나리오에 따른 가상 현실 콘텐츠의 사용자 인터페이스
 Fig. 7. User Interface of VR Contents according to Scenario

제안된 방법에서 각각의 운동 자세에 대한 제안 알고리즘의 균형 감지 정확도를 평가하기 위해 실험을 진행하였다. 각 자세는 균형 자세 50회, 불균형한 자세 50회를 포함하여 총 100회를 수행하였고, 이를 혼동 행렬로 분석하였다. 표 1은 제자리 걷기, 표 2는 앞뒤로 걷기, 표 3은 스쿼트 자세에 대한 결과를 나타낸다.

표 1. 제자리 걷기의 균형 감지에 대한 혼동 행렬
 Table 1. Confusion Matrix for Balance Detection in Walking in Place

		Act.	
		Balance	Unbalance
Pred.	Balance	TP: 41	FP: 2
	Unbalance	FN: 9	TN: 48

표 2. 앞뒤로 걷기의 균형 감지에 대한 혼동 행렬
 Table 2. Confusion Matrix for Balance Detection in Walking in Back and Forth

		Act.	
		Balance	Unbalance
Pred.	Balance	TP: 40	FP: 2
	Unbalance	FN: 10	TN: 48

표 3. 스쿼트의 균형 감지에 대한 혼동 행렬
 Table 3. Confusion Matrix for Balance Detection in Squat

		Act.	
		Balance	Unbalance
Pred.	Balance	TP: 42	FP: 5
	Unbalance	FN: 8	TN: 45

False Positive(FP)와 False Negative(FN)의 개수만을 고려했을 때, 제자리 걷기는 총 11회의 오분류가 발생해 앞뒤로 걷기(12회), 스쿼트(13회)보다 적은 오분류 결과를 보였다. 제자리 걷기와 앞뒤로 걷기의 경우 불균형한 자세를 올바르게 예측한 정확도는 96%로 매우 높았으나, 스쿼트의 경우 90%로 약간 낮은 결과를 보였다. 균형 자세에 대한 인식 정확도는 불균형 자세에 비해 다소 낮게 나타났다. 앞뒤로 걷기의 경우 10회 오분류하여 가장 낮은 성능을 보였으며, 스쿼트는 8회의 오분류로 가장 높은 성능을 기록하였다.

표 4는 전체 결과를 종합하여 균형과 불균형을 기준으로 각각의 Precision, Recall, F1-score, Macro-F1 수치를 제시한다. 제자리 걷기와 앞뒤로 걷기의 경우 균형을 기준으로 한 Precision과 불균형을 기준으로 한 Recall이 95% 이상의 높은 정확도를 보였다. 제자리 걷기의 경우 균형을 기준으로 한 F1-score는 88.2%, 불균형을 기준으로 했을 때는 89.7%로, Macro-F1은 88.9%로 계산되어 모든 동작 중 가장 높은 수치를 기록했다. 앞뒤로 걷기의 경우 균형 기준 F1-score는 87.0%, 불균형 기준은 88.9%로,

Macro-F1은 87.9%로 나타났다. 마지막으로 스쿼트 동작에서는 균형 기준 F1-score가 86.6%, 불균형 기준이 87.4%로, Macro-F1은 87.0%로 가장 낮은 수치를 기록하였다.

결론적으로, 이 실험을 통해 제안하는 알고리즘은 세 가지 동작에 대하여 평균적인 성능은 87.9%로 성능의 우수성을 확인할 수 있었다. 하지만, 동작 간 이동 시 골격 검출이 제대로 이루어지지 않거나 잘못 인식되는 경우가 있어 불균형으로 잘못 분류되는 사례가 존재했다. 이를 해결하기 위해서는 보다 정교한 골격 검출 기술의 개선이 필요함을 알 수 있다.

표 4. 모든 운동의 균형 감지에 대한 성능 평가
Table 4. Performance Evaluation of Balance Detection for All Exercises

		Precision	Recall	F1 Score	Macro F1
Walking (in place)	Balance	0.953	0.820	0.882	0.889
	Unbalance	0.842	0.960	0.897	
Walking (back & forth)	Balance	0.952	0.800	0.870	0.879
	Unbalance	0.828	0.960	0.889	
Squat	Balance	0.894	0.840	0.866	0.870
	Unbalance	0.850	0.900	0.874	

4. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 발 압력매트와 신체 균형을 고려한 가상 현실 기반의 재활 운동 콘텐츠를 제안하였다. 이 시스템은 발 압력을 실시간으로 모니터링하고, 좌우 발의 움직임을 분석하여 신체 균형을 유지하면서 운동을 수행할 수 있도록 설계되었다. 골격 검출 인공지능 모델을 활용하여 제안하는 알고리즘을 통해 신체 균형을 감지하고, 가상 현실 콘텐츠 내에서 결과를 제공함으로써 사용자의 운동 효율성을 극대화할 수 있었다. 특히, 스쿼트 및 걷기와 같은 운동에서 신체 균형을 유지해야 하는 맞춤형 훈련 프로그램을 제공함으로써, 재활 훈련 및 운동의 효과성을 높일 수 있었다.

향후 과제로는 다양한 운동 동작을 감지할 수 있는 고도화된 압력 센서와 인공지능 모델을 개발하여, 더 폭넓은 운동 프로그램에 적용할 수 있도록 할 필요가 있다. 또한, 사용자 개인의 생체 데이터를 보다 정밀하

게 분석하여, 맞춤형 훈련 프로그램의 정확성과 효율성을 더욱 향상시킬 수 있는 방안을 모색해야 한다.

REFERENCES

- [1] J. Yang and J. Lee, "Utilization exercise rehabilitation using metaverse (vr·ar·mr·xr)". Korean Journal of Sport Biomechanics, Vol. 31, No. 4, pp. 249-258, 2021.
- [2] K. Cho, J. Park, and A. Kang, "Metaverse for Exercise Rehabilitation: Possibilities and Limitations", International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol. 20, No. 8, pp. 5483-5494, 2023.
- [3] S. Son, J. Si, and S. Kim, "Development of Metaverse Rehabilitation Content for Body Balance and Gait Analysis". Proceedings of KIIT Conference, pp. 414-415, Nov. 2023.
- [4] J. Si, H. Son, D. Kim, M. Kim, J. Jeong, G. Kim, Y. Kim, and S. Kim, "Fall Detection using Skeletal Coordinate Vector and LSTM Model", Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 18, No. 12, pp. 19-29, 2020.
- [5] S. Lee and M. Lee, "Real-Time Display Color Temperature Automatic Control Method Based on Stress Parameters to Improve Visual Comfort in VR Environment", Journal of Korea Multimedia Society, Vol. 27, No. 7, pp. 745-757, 2024.
- [6] S. Kong, J. Kim, G. Jeong, G. Roh, E. Park, Y. Cho, and J. Kim, "Production of Virtual Electrical Circuit Practice Education Contents based on Mixed Reality using Meta Quest Pro", Journal of the Korea Computer Graphics Society, Vol. 30, No. 3, pp. 61-69, 2024.
- [7] J. Kim, E. Bae, J. Lee, S. Ahn, and H. Bae, "New approach to Forest Virtual Reality based rehabilitation platform", Journal of Rehabilitation Welfare Engineering & Assistive Technology, Vol. 18, No. 2, pp. 47-53, 2024.
- [8] M. Kang and H. Lee, "Development of Virtual-Reality based Verb Learning Program for Children with Language Disorders",

Journal of the Korea Entertainment Industry Association, Vol. 18, No. 2, pp. 103-112, 2024.

- [9] C. Yoon, S. Yang, J. Park, J. Si, Y. Jung, and S. Kim, "Metaverse Virtual Interview Platform Leveraging Generative AI and Speech Recognition", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 22, No. 6, pp. 163-173, 2024.
- [10] D. Park, J. Yeo, and K. Shin, "Development of an Early Childhood Figure Skating Program by the Motor Developmental Phase", Korean Journal of Convergence Science, Vol. 13, No. 1, pp. 47-62, 2024.
- [11] T. Yoon and K. Lee, "Design and implementation of an interactive fitness platform", Journal of Korea Game Society, Vol. 23, No. 5, pp. 111-120, 2023.
- [12] Smart Mat for Rehabilitation Exercises, <https://doi.org/10.8080/1020220142587>
- [13] YOLOv8-Pose, <https://docs.ultralytics.com/ko/tasks/pose/>

저자약력

시 종 욱 (Jongwook Si)



- 2020년 8월 : 국립금오공과대학교 컴퓨터공학과(공학사)
- 2022년 2월 : 국립금오공과대학교 컴퓨터공학과(공학석사)
- 2022년 3월~현재 : 국립금오공과대학교 컴퓨터·AI융합 공학과 대학원(박사수료)
- 2023년 9월~현재 : 국립금오공과대학교 인공지능공학과 강사

〈관심분야〉 컴퓨터비전, 영상처리, 이상감지, 생성형 AI, 딥러닝

정 혜 리 (Hyeri Jeong)



- 2022년 3월~현재 : 국립금오공과대학교 컴퓨터공학과 재학

〈관심분야〉 가상 현실, 메타버스

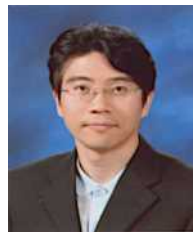
이 상 진 (Sangjin Lee)



- 2020년 3월~현재 : 국립금오공과대학교 컴퓨터공학과 재학

〈관심분야〉 문자 인식, 딥러닝, 인공지능

김 성 영 (Sungyoung Kim)



- 1994년 2월 : 부산대학교 컴퓨터공학과(공학사)
- 1996년 2월 : 부산대학교 컴퓨터공학과(공학석사)
- 2003년 8월 : 부산대학교 컴퓨터공학과(공학박사)
- 2004년~현재 : 국립금오공과대학교 컴퓨터공학과 교수

〈관심분야〉 영상처리, 컴퓨터비전, 기계학습, 딥러닝, 메타버스