

## Design and Implementation of a Low-Cost Arduino-Based Walking Interface for Immersive Virtual Reality Environments

Jong-Hyun Kim\*

\*Associate Professor, College of Software and Convergence (Dept. of Artificial Intelligence, Design Technology), Inha University, Incheon, Korea

### [Abstract]

This study proposes a low-cost, Arduino-based walking interface designed to enhance user immersion in virtual reality (VR) content. The interface detects various user locomotion patterns such as walking, running, and limping, and reflects them in the movement of the virtual character, thereby increasing the sense of immersion. To achieve this, a sensor device based on Arduino was developed to analyze acceleration data from a gyroscopic sensor, which was then synchronized with character animations and first-person visual effects in the Unity3D engine. Additionally, the system supports Bluetooth-based mobile device integration and multi-user environments, enabling both HMD and non-HMD users to share the same virtual experience. Owing to its low cost and high compatibility, this interface can provide immersive VR experiences to a wide range of users, including those with mobility impairments, suggesting its potential applications in fields such as healthcare, education, and psychological rehabilitation.

▶ **Key words:** Virtual Reality, Walking interface, Arduino, Immersion, Disabled walking, First-person perspective, Low-cost sensor system

### [요약]

본 연구는 가상현실(VR) 콘텐츠에서 사용자의 몰입도를 향상시키기 위한 아두이노 기반의 저비용 보행 인터페이스를 제안한다. 본 인터페이스는 걷기, 뛰기, 절름발이와 같은 다양한 사용자의 보행 동작을 감지하고 이를 가상 환경 내 캐릭터 움직임에 반영함으로써 사용자 몰입감을 증대시킨다. 이를 위해 아두이노(Arduino) 기반의 센서 장치를 개발하여 자이로 센서의 가속도 데이터를 분석하고, 이를 Unity3D 엔진에 연동하여 캐릭터의 애니메이션과 1인칭 시점의 시각적 효과를 동기화하였다. 또한, HMD 사용자뿐만 아니라 Non-HMD 사용자도 동일한 가상 체험이 가능하도록 블루투스를 활용한 모바일 기기 연동 및 멀티 사용자 환경을 구현하였다. 본 인터페이스는 낮은 비용과 높은 호환성을 바탕으로 일반 사용자뿐만 아니라 보행이 불편한 장애인까지 포함한 다양한 사용자층에게 몰입형 VR 경험을 제공할 수 있어, 의료, 교육, 심리적 재활 등의 분야로의 확장 가능성을 제시한다.

▶ **주제어:** 가상현실, 보행 인터페이스, 아두이노, 몰입감, 장애인 보행, 1인칭 시점, 저비용 센서 시스템

- 
- First Author: Jong-Hyun Kim, Corresponding Author: Jong-Hyun Kim
  - \*Jong-Hyun Kim (jonghyunkim@inha.ac.kr), College of Software and Convergence (Dept. of Artificial Intelligence, Design Technology), Inha University
  - Received: 2025. 04. 15, Revised: 2025. 05. 06, Accepted: 2025. 05. 16.

## I. Introduction

가상현실(Virtual Reality, VR)은 물리적인 세계와 유사한 환경을 디지털 공간에 구현함으로써 사용자가 몰입적이고 직관적인 상호작용을 할 수 있도록 도와주는 기술이다. 이러한 몰입형 콘텐츠는 게임, 교육, 의료, 시뮬레이션 등 다양한 산업 분야에서 활용되고 있으며, 기술의 발전에 따라 사용자와 시스템 간의 인터페이스 역시 고도화되고 있다. 특히 VR 환경에서 사용자의 신체 움직임을 반영하는 인터페이스는 몰입감과 현실감을 극대화하는 핵심적인 요소로 주목받고 있다.

기존의 VR 인터페이스 기술은 대부분 고가의 장비에 의존하고 있으며, 대표적으로는 HMD(Head Mounted Display), 모션 캡처 시스템, 트레드밀, 전신 트래킹 시스템 등이 있다. 이러한 장비들은 사용자의 자세, 위치, 움직임을 정밀하게 추적할 수 있지만, 고비용과 설치의 복잡성, 사용자 멀미와 같은 물리적 부작용 등의 한계로 인해 일반 대중이 접근하기에는 어렵다는 문제가 존재한다. 따라서 이러한 기술적, 경제적 제약을 극복하면서도 사용자 몰입감을 유지할 수 있는 대안적 인터페이스 기술에 대한 필요성이 대두되고 있다.

본 논문에서는 이러한 한계를 해결하기 위한 방안으로 아두이노 기반의 저비용 보행 인터페이스를 제안한다. 이 장치는 사용자의 다리에 부착되어 자이로 센서를 통해 걷기, 뛰기, 절름발이 등의 보행 패턴을 인식하고, 이를 Unity3D 기반 가상환경에 실시간으로 반영하여 캐릭터의 움직임을 제어한다. 이를 통해 고가의 HMD 장비 없이도 사용자 행동을 가상 공간에 자연스럽게 연결할 수 있으며, 몰입감 높은 VR 체험이 가능하다. 또한 본 시스템은 HMD 사용자의 움직임은 물론, Non-HMD 사용자도 모바일 장치의 자이로 센서를 통해 유사한 상호작용을 제공함으로써 다양한 사용자 환경을 지원한다.

특히 본 연구는 단순히 사용자 몰입도 향상에만 국한되지 않고, 다리 장애를 가진 사용자도 가상현실 내에서 자유롭게 걷고 움직일 수 있는 가능성을 제시한다. 아두이노 센서를 양다리에 부착하여 얻은 데이터를 기반으로 절름걸이 패턴을 감지하고, 사용자의 선택에 따라 절뚝거리는 애니메이션을 표현하거나 제거할 수 있도록 설계하였다. 이는 비장애인인 장애인들의 불편함을 체험하거나, 반대로 장애인이 비장애인처럼 자연스럽게 걷는 체험을 할 수 있는 기반을 제공하여 교육적·치료적 측면에서도 의미가 있다. 본 연구에서 제안하는 시스템은 단순한 기술 개발을 넘어, 기술의 포용성과 확장 가능성을 보여주는 사례로 기능할 수 있

다. 이는 미래의 VR 콘텐츠가 단지 시청각적 자극을 넘어, 신체적 제약을 뛰어넘는 몰입형 인터랙션 플랫폼으로 발전할 수 있다는 가능성을 제시한다. 이러한 관점에서 본 논문은 새로운 보행 인터페이스 기술을 설계하고 구현한 과정을 중심으로, 저비용 센서 기반 동작 인식, 사용자 패턴 분석, 실시간 캐릭터 애니메이션 연동, 그리고 몰입도 향상을 위한 시각적 피드백 기술 등을 다각도로 분석하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 가상현실 인터페이스를 활용한 관련 연구, 3장에서는 제안하는 알고리즘, 4장은 다양한 실험 결과 분석으로 구성되어 있다.

## II. Related Work

### 1. Advancements and Applications of Virtual Reality Technology

VR 기술은 지난 수십 년간 급속한 발전을 이뤘으며, 현재 교육, 의료, 엔터테인먼트, 공학 등 다양한 분야에서 활발하게 활용되고 있다[1-9]. VR은 주로 시각 및 청각 자극을 중심으로 가상 환경을 구성하며, 이들 감각 피드백은 사용자의 몰입감을 높이는 데 효과적인 요소로 입증되었다. 최근에는 촉각 피드백의 도입이 증가하면서, VR 내에서의 물리적 현실감을 더욱 강화하고 있다. 이는 기술 훈련[10, 11], 재활[14], 교육[12, 13] 등에서 특히 긍정적인 효과를 보이고 있다.

그러나 대부분의 기존 촉각 장치는 주로 상반신 피드백에 집중되어 있으며, 하반신과의 상호작용은 기술적으로나 상업적으로 제한적인 수준에 머물러 있다. 하체 움직임을 VR 인터페이스에 통합하는 연구는 아직 초기 단계에 있으며, 이는 사용자의 몰입감과 현실감을 향상시키는 중요한 요소임에도 불구하고 상대적으로 간과되어 왔다.

### 2. VR Motion Sickness and Sensory Mismatch Issues

VR 시스템에서 흔히 보고되는 문제 중 하나는 사용자에게 발생하는 불편감, 즉 VR 멀미(VR-induced discomfort)이다[15-17]. 이는 주로 시각, 전정감각, 촉각 등의 감각 간 불일치로 인해 발생하며, 특히 가상 이동 중 사용자의 실제 신체 움직임이 반영되지 않을 때 두드러진다. 대부분의 상용 VR 시스템은 조이스틱, 텔레포트 방식 등의 핸드 컨트롤러 기반 이동 방식을 채택하고 있는데, 이러한 방식은 현실에서의 신체 움직임과 감각 입력이 불일치하면서 멀미를 유발한다[18, 19].

감각 충동을 줄이고 몰입감을 향상시키기 위한 방안으로 신체 기반 보행 인터페이스가 주목받고 있다. 연구에 따르면 실제 보행 동작을 활용한 가상 이동 방식은 사용자의 공간 인지도 향상, 존재감 증대, 멀미 감소 등에 긍정적인 영향을 미친다[22]. 이는 조이스틱이나 포인트-투-텔레포트 방식보다 심리적 몰입과 물리적 피드백 면에서 우수하다는 여러 연구결과와도 일치한다[15, 23, 24].

### 3. Classification and Characteristics of VR

#### Locomotion Techniques

VR 보행 기술은 사용자 신체와의 상호작용을 바탕으로 다양한 방식으로 발전해왔다. 대표적인 기술 유형은 다음과 같다[30-32].

- **Real Walking** : 사용자의 실제 이동을 기반으로 하는 방식으로, HMD 위치 추적을 통해 움직임을 반영한다. 이는 가장 자연스러운 보행감을 제공하나, 현실 공간의 제약으로 인해 사용 가능 영역이 제한된다. HTC Vive, Meta Quest 등 상용 시스템이 이 방식을 채택하고 있다.
- **Redirected Walking** : 제한된 물리 공간에서 더 넓은 가상 공간을 탐험할 수 있도록 시각적 피드백을 미세하게 조작하는 방식이다. 사용자는 방향 전환을 인지하지 못한 채, 실제보다 넓은 가상환경을 경험할 수 있다[33, 34]. 그러나 사용자 인지가 가능한 조작의 임계값 존재[35]가 제한 요소다.
- **Walk-in-Place** : 사용자는 제자리에서 다리를 드는 등의 동작으로 걷는 감각을 전달한다. 이 방식은 좁은 공간에서도 안전하게 사용할 수 있으며, 충돌 위험이 적다는 장점이 있다[36].
- **Locomotion Interface** : 별도의 하드웨어 장치를 통해 사용자의 보행 동작을 가상 이동으로 변환하는 방식이다. 대표적으로 슬라이딩 플랫폼, 트레드밀, 로봇 퓌 플랫폼이 있다[37].

### 4. Major Design Approaches for Locomotion

#### Interfaces

- **슬라이딩 플랫폼** : KAT Walk C2, Virtuix Omni, Virtualizer ELITE와 같은 상용 장치는 저마찰 표면을 활용해 사용자가 발을 미끄러뜨리며 걷는 듯한 느낌을 주는 방식이다. 저비용 구조로 상용화에 유리하나, 실제 보행과의 유사성은 낮다[38].
- **트레드밀 기반 인터페이스** : 가변 속도 트레드밀 벨트를 이용해 자연스러운 보행을 재현한다. 평지 보행에

는 효과적이다. 경사나 지형 변화 구현에는 한계가 있다. 일부 고급형 설계에서는 지면 강성 조절, 2자유도 평면 이동 기능이 추가되기도 한다[39-43].

- **로봇 퓌 플랫폼** : 양발 각각에 독립된 구동 플랫폼을 부착하여 지형 피드백과 이동 제어를 구현하는 방식이다. Schmidt의 Haptic Walker, Boian의 스텐더 플랫폼, Gait Master 등이 대표 사례이며, 이들은 재활, 의료, 사용자 경험 개선을 목표로 설계되었다[44-48]. 그러나 이들 장치는 대형 구조물, 제한된 작업 공간, 회전 동작의 부재 등의 단점이 있다. 또한, 대부분의 장치가 단순한 동작만 처리하거나, 속도 및 정밀 제어 실험이 제한적으로 수행된 점에서 성능 검증에 한계가 있다.

## III. The Proposed Scheme

이번 장에서는 아두이노 기반의 저비용 보행 인터페이스 설계 및 구현에 대해 설명한다.

### 1. 아두이노 모듈 개발

- 아두이노 기반 센서 모듈을 사용하여 사용자의 움직임을 측정한다.
- 자이로 센서와 블루투스 모듈을 이용해 걷기, 뛰기, 정지, 절름발이 동작을 인식하고, 데이터를 무선으로 전송하여 Unity3D와 연동한다.

### 2. 동작 패턴 분석

- 자이로 센서 데이터를 분석하여 정지, 걷기, 뛰기, 절름발이로 구분한다.
- 센서 값이 2,000이면 걷기, 2,000 이상이면 뛰기로 판단하여 가상 캐릭터의 움직임을 제어한다.

### 3. 절름걸이 인식

- 두 다리에 아두이노 센서를 부착하여 절름거리는 보행 패턴을 감지한다.
- 특정 패턴을 통해 정상 걸음과 절름걸이를 구분하여 애니메이션을 전환한다.
- 비장애인처럼 자연스럽게 걷는 옵션을 추가하여 포용성을 고려한다.

### 4. 카메라 흔들림 효과

- 1인칭 시점에서 몰입감을 높이기 위해 카메라 흔들림 효과와 모션 블러를 적용하여 현실감 있는 움직임을 표현한다.

### 5. 멀티 유저 지원

- Unity3D의 Photon Unity Networking (PUN)을 사

용하여 HMD 사용자와 Non-HMD 사용자가 함께 가상 환경을 공유할 수 있도록 구현한다.

## 1. Development of an Arduino Module

본 논문에서는 사용자의 자세와 움직임을 측정하기 위해 Arduino 기반의 센서 모듈을 제작하였다. 사용자의 움직임을 정밀하게 측정하려면 고가의 장비가 필요하지만, 비용적인 제약이 있으므로 본 연구에서는 저비용으로 구현 가능한 자이로 센서를 사용하였다. 이를 위해 Arduino Uno, HC-06 블루투스 모듈, 자이로 센서, 점퍼 케이블, Uno용 USB 케이블, 브레드보드, 배터리를 사용하였으며, Fig. 1과 같은 구조로 센서를 제작하였다.

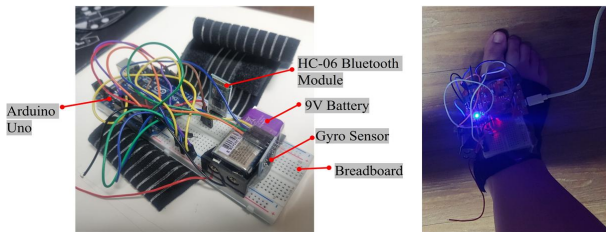


Fig. 1. Setting up the Arduino.

기본적인 동작 구조는 다음과 같다. 먼저 USB 케이블을 통해 아두이노에 코드를 업로드한 후, HC-06 블루투스 모듈을 이용해 데이터를 무선으로 전송한다. 자이로 센서를 통해 사용자의 움직임 값을 측정하고, 이를 블루투스를 통해 PC나 모바일 디바이스로 전달한다. 자이로 센서는 각 축의 가속도 값을 측정할 수 있으며, 회전 각도와 기울기 등을 파악할 수 있어 가속도 센서와 함께 동작 인식에 효과적으로 활용된다. 측정 결과, 사용자 움직임에 따라 Z축 가속도 값의 변화가 가장 크게 나타났으며, 이를 바탕으로 사용자의 움직임을 판단하였다. 아두이노 코드 또한 자이로 센서로부터 수집한 가속도 값을 출력할 수 있도록 설계되었다.

자이로 센서 값을 아두이노에서 읽어오는 방식은 크게 두 가지로 나뉜다:

- 유선 연결 시 직접 값을 읽어오는 방식
- 무선 연결 시 블루투스를 통해 값을 수신하는 방식

본 논문에서는 두 가지 방법을 모두 실험에 적용하였다. 특히 Non-HMD 사용자 환경에서는 유선 아두이노의 사용이 어려우므로, 블루투스를 통한 무선 연결 방식을 사용하였다. 자이로 센서 값을 수신하기 위해서는 아두이노 블루투스를 PC 또는 모바일 디바이스와 페어링해야 하며, Fig. 2a에서 붉은 불빛은 블루투스 연결 상태를 나타내며, Fig. 2b는 블루투스와 연결된 Unity3D 장면이다.

또한, Unity3D 환경에서는 Arduino Bluetooth Unity 플러그인을 설치하여 블루투스 데이터를 수신할 수 있도록 구현하였다. 코드 내에 아두이노 디바이스 이름을 입력하면 콘텐츠 실행 시 자동으로 연결된 블루투스 장치 중 해당 아두이노를 인식하여 자이로 센서 값을 읽어온다.

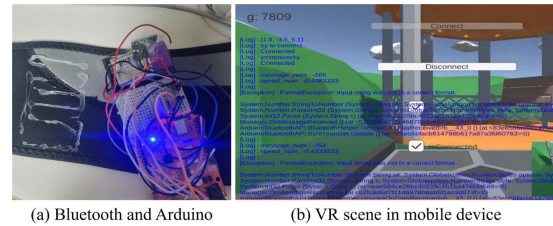


Fig. 2. Unity3D scene connected via bluetooth.

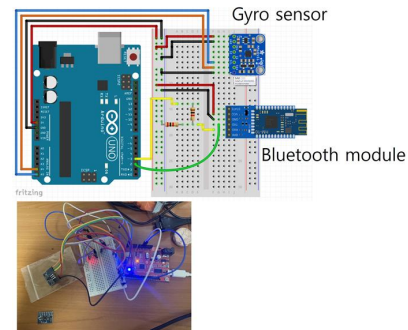


Fig. 3. Circuit diagram of Gyro sensor and Bluetooth module.

Fig. 3은 자이로 센서와 블루투스 모듈의 회로도이다. 자이로 센서가 움직이면 *move*, 움직이지 않으면 *nomove*로 출력되도록 했으며, 이를 Unity3D와 연동하여 움직이는 것을 확인했다.

## 2. Pattern Setting

블루투스를 통해 수신한 자이로 센서 값을 활용하여 사용자의 동작을 네 가지 상태로 분류하였다. 본 논문에서는 사용자의 동작을 걷기, 뛰기, 정지, 다리 저는 동작으로 구분하였으며, 이러한 패턴을 기반으로 특징점을 분류하기 위해 자이로 센서 데이터를 다음과 같이 분석하였다. 아래 Fig. 4는 사용자가 아두이노 센서를 한쪽 다리에 착용한 상태로 걸었을 때의 속도 값을 나타낸 그래프이다.



Fig. 4. Speed graph while wearing the Arduino device.

그래프를 살펴보면, 사용자가 움직이는 동안 측정된 값이 일정 시간 동안 0에 가까운 수치를 유지하다가, 일정 시점 이후 3,000 이상의 급격한 수치 변동이 발생하고, 다시 0에 가까운 수치로 돌아가는 패턴이 반복됨을 확인할 수 있다. 이러한 패턴을 통해, 센서 값이 0에 가까울 때는 사용자가 정지해 있으며, 값이 400 이상일 때는 움직이고 있음을 알 수 있다. 이를 기반으로 센서 값을 이용해 캐릭터의 움직임을 제어하였다. 정지, 걷기, 뛰기 동작을 구분하기 위해 다양한 실험을 실시한 결과, 센서 값이 0~400 범위에 있을 때는 정지 상태, 400~2,000 범위일 때는 걷기, 2,000 이상일 때는 뛰는 동작으로 판단할 수 있었다. 이에 따라 입력된 센서 값에 따라 캐릭터의 움직임을 실시간으로 변경하였다.

### 3. Limp Posture

사용자가 장애인인지 비장애인인지 알 수 없는 상황에서는 다리의 불편함 여부와 관계없이 일반적인 사용자 행동, 예를 들어 걷거나 뛰기 등을 인식할 수 있어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 아두이노 기반의 센서를 두 개 제작하여 양쪽 다리에 부착해 실험을 진행하였다.

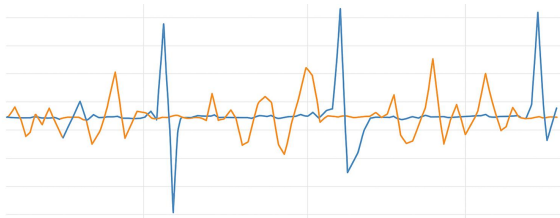


Fig. 5. Comparison of Position Changes Between Normal Gait and Limping Gait (Blue: Normal Gait, Orange: Limping Gait).

Fig. 5는 아두이노 센서를 양쪽 다리에 착용한 상태에서 사용자가 한쪽 다리를 절며 걸었을 때의 속도 값을 나타낸 그래프이다. 파란색 선은 정상적인 다리에 부착한 자이로 센서의 값이며, 주황색 선은 절름거리는 다리에 부착한 자이로 센서의 값을 나타낸다. 그래프를 보면, 정상 다리의 센서 값은 0에 근접했다가 급격히 증가하는 패턴을 반복한다. 반면, 절름거리는 다리의 센서 값은 유사한 패턴을 보이지만, 전체적으로 1,000 이하의 값으로 유지된다. 그러나 센서 데이터에 지연이 있고, 프레임마다 값의 변동성이 크기 때문에 단순히 속도 값 하나만으로 절름걸이를 정확히 인식하기는 어렵다.

본 연구에서는 사용자가 한쪽 다리만 절며 걷는다고 가정하고, 절름거리는 다리의 센서 값 중 최근 3개의 값이 모

두 1,000 이하인지 확인하고, 반대쪽 다리의 최근 5개의 값이 600 이하인지 확인하는 부분 패턴 분석(Piecewise pattern analysis) 기법을 적용하였다. 센서 값이 이와 같은 패턴을 만족하면 이를 '절름 패턴'으로 정의하고, 캐릭터의 움직임을 절름걸이 애니메이션으로 전환한다. 본 논문에서는 절름 패턴을 다음과 같이 정의한다: 다리를 절면서 뛰지 못하고 제대로 걸지 못하는 상황. 이처럼 각각의 다리에 부착된 센서에서 얻은 데이터에 따라 절름 패턴이 감지되면 절름걸이는 애니메이션이 실행되고, 걷기 패턴이 감지되면 일반 걷기 애니메이션이 실행되도록 구성하였다.

또한, 장애인 사용자가 비장애인처럼 자연스럽게 걷는 동작을 구현하기 위해, 본 연구에서는 절름걸이 애니메이션을 비활성화하고 일반적인 걷기 애니메이션으로 대체할 수 있는 선택 옵션을 제공한다. 사용자가 해당 옵션을 활성화하면, 센서가 절름걸이 패턴을 인식하더라도 일반적인 걷기 애니메이션이 실행되며, 이를 통해 가상환경 내에서 장애인이 비장애인처럼 행동할 수 있는 경험을 제공한다. 반대로 이 옵션을 비활성화하면, 절름 패턴 인식 시 실제 절름걸이는 동작이 캐릭터에 반영된다. 이러한 기능은 장애인 사용자에게 몰입감 있는 경험을 제공할 뿐 아니라, 비장애인이 장애인의 움직임을 간접 체험할 수 있는 교육적 요소로도 활용될 수 있다.

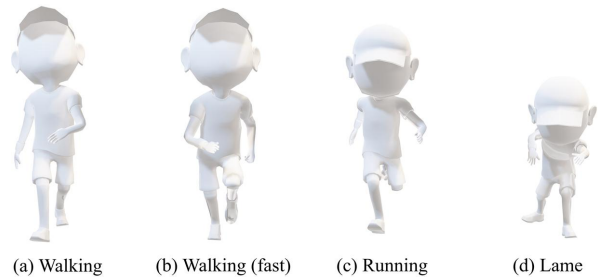


Fig. 6. Template for animation.

Fig. 6은 센서로부터 감지된 동작 패턴을 기반으로 캐릭터 애니메이션을 제어하는 과정을 보여준다. 애니메이션은 '걷기', '빠른 걸음', '달리기', '절름걸이' 네 가지로 분류되며, 각 애니메이션 모션 클립은 리스트에 저장된 후 사용자 속도에 따라 적절한 클립이 호출된다. 보다 자연스러운 움직임 표현을 위해 자이로 센서 값이 사용자 속도에 직접적인 영향을 주도록 설계하였다. 사용자의 속도는 다음의 정규화 식을 통해 계산되었다 (수식 1 참조).

$$v_{user} = \alpha \frac{v_{sensor}}{\eta} \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ 는 사용자의 속도를 제어하는 가중치이며,  $\eta$ 는 자이로 센서의 최댓값이고,  $v_{sensor}$ 는 센서로부터 현재 읽어온 값이다. 위 수식처럼 사용자의 속도를 계산함으로써 사용자는 자신의 걷기 속도나 달리기 속도 등을 조절하면서 이동할 수 있다. 이 부분이 가상현실 내 캐릭터 움직임에 반영되기 때문에 몰입감을 높일 수 있다.

**4. Camera Shake for a More Immersive First-Person View**

HMD 사용자와 Non-HMD 사용자 모두에게 높은 몰입감을 제공하기 위해, 본 시스템은 아두이노 센서를 통해 수집된 움직임 패턴을 분석하여 사용자의 행동(예: 걷기, 달리기 등)을 판단한다. 이때 1인칭 시점에 가까운 몰입감을 높이기 위해, 사용자의 동작에 따라 화면에 흔들림 효과를 추가하였다.

시각적 흔들림 효과는 카메라 셰이킹(Camera shaking)과 모션 블러(Motion blur) 기법을 통해 구현되었다. 카메라 셰이킹의 경우, 카메라의 현재 위치를 기준으로 상하좌우에 랜덤 값을 적용해 흔들리는 패턴을 생성하며, 이는 사용자의 속도에 따라 진폭이 조절된다. 빠르게 움직일수록 흔들림이 커지도록 설계되어 실제 움직임과 유사한 시각적 경험을 제공한다. 모션 블러는 현재 프레임과 이전 프레임들을 합성하여, 빠르게 움직일 때 외곽선이 흐릿하게 보이도록 시각적인 잔상을 만들어낸다. 이를 통해 실제 환경에서 빠르게 움직일 때 시야가 흐려지는 현상과 유사한 효과를 구현할 수 있었다.

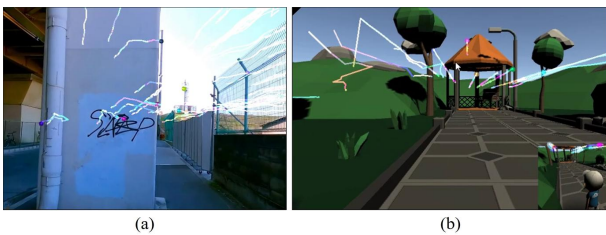


Fig. 7. Comparative analysis of shaking effects with Optical Flow : (a) Real environment, (b) Virtual environment.

Fig. 7은 카메라 셰이킹 효과를 시각화한 것으로, 특징점을 연결한 선을 통해 흔들림의 방향성과 범위를 나타낸다. 1인칭 카메라 시점에 실제 현상과 유사한 떨림 효과를 추가했다. 또한 모션 블러를 추가하여 몰입이 개선될 수 있도록 했다. Fig. 8은 모션 블러 효과로 인해 외곽 영역의 특징이 흐려져 뿌옇게 표현된 결과를 보여준다.

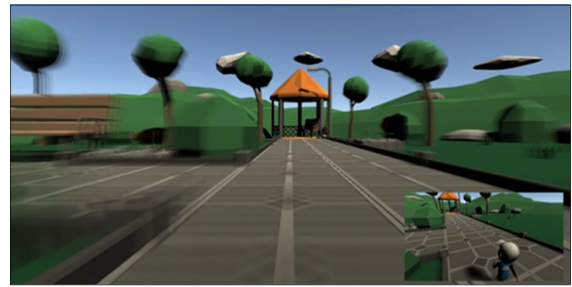


Fig. 8. Motion blur enhances the sense of speed in first-person view.

**4. Support for Multi-user Connections**

본 논문에서는 HMD 사용자와 Non-HMD 사용자 간의 상호작용을 개선하고자 하였다. 이를 기반으로, 여러 사용자가 함께 참여할 수 있는 다중 사용자 콘텐츠를 제작하기 위해 Unity3D에서 Photon Unity Networking (PUN)을 활용하여 멀티 사용자 환경을 구현하였다.

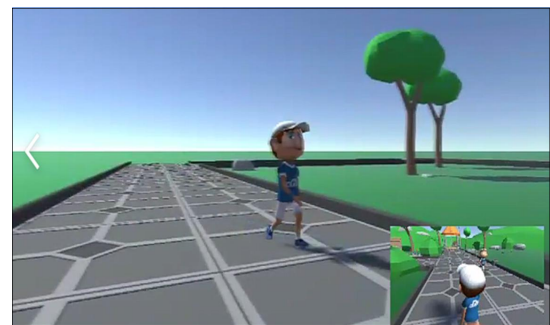


Fig. 9. Multiplayer setting.

Fig. 9는 멀티 환경을 테스트한 장면을 보여주며, 그림의 오른쪽 하단에서는 두 명 이상의 사용자가 동일한 가상 공간 내에서 함께 이동하는 모습을 확인할 수 있다.

**5. Experimental Environment Setup for HMD and Non-HMD Users**

본 연구에서는 HMD 사용자와 Non-HMD 사용자의 상호작용 개선 정도를 평가하기 위해, 두 사용자가 동시에 이용할 수 있는 실험 환경을 구성하였다. HMD 사용자를 위해서는 오픈소스 도구인 VRTK를 활용하여 VR 환경을 구현하였으며, Non-HMD 사용자의 경우 모바일 환경에서 실험을 진행하였다. 모바일 환경에서는 지자기 센서를 이용하여 사용자의 머리 방향을 추적하고, 이에 따라 캐릭터의 시야 방향을 조정함으로써 VR과 유사한 경험을 제공하였다.

#### IV. Experiment and Results

본 연구의 결과들을 만들기 위해 실험한 환경은 Intel Core i7-7700K CPU, 32GB RAM, Geforce GTX 1080Ti GPU가 탑재된 컴퓨터를 이용하였다.

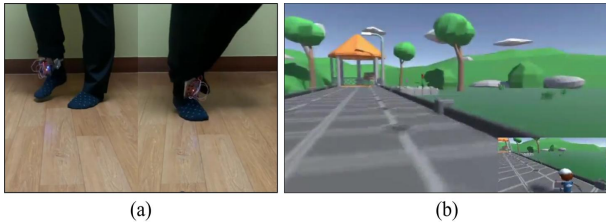


Fig. 10. Character animation driven by the user's running motion.

이번에는 실제 사용자의 동작을 센서를 통해 수집하고, 이를 캐릭터에 적용한 결과를 살펴보고자 한다. Fig. 9는 특정 영역 내에서 사용자가 달리는 동작을 인식한 사례를 보여주며(Fig. 10a), 이에 따라 캐릭터가 해당 동작을 그대로 재현하였다. Fig. 11은 사용자가 절뚝거리는 보행을 했을 때, 이에 반응하여 움직이는 아바타 애니메이션을 보여준다. 이 두 결과에서 볼 수 있듯이, 사용자의 보행 형태에 따라 아바타의 움직임이 결정된다.



Fig. 11. Character animation driven by the user's limping motion.

Fig. 12는 사용자가 보폭을 작게 하여 실험한 결과를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 보폭이 작아짐에 따라 아바타 역시 이동 거리가 상대적으로 짧아졌다.

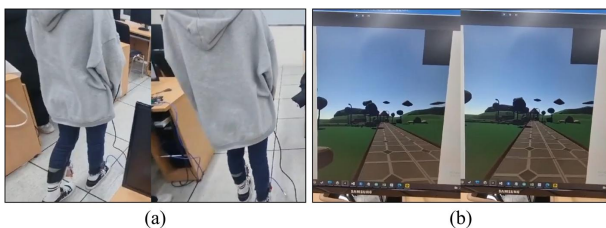


Fig. 12. As a result of the experiment conducted with shortened strides.

이와는 대조적으로, Fig. 13은 보폭을 크게 하여 실험한 결과이다. 보폭이 커지면서 아바타는 더 먼 거리를 빠르게 이동하는 특성을 보였다. 또한, Fig. 12와 비교해 보면 보폭이 작을 때는 걷기 동작이, 클 때는 달리기 동작이 자동으로 전환되어 보다 자연스러운 애니메이션 전환 효과가 나타났음을 확인할 수 있다. Fig. 13이 보폭이 크기 때문에 상대적으로 아바타가 더 빨리 오두막으로 이동하는 모습을 보여주고 있다.



Fig. 13. The result of the experiment conducted with wider strides.

Fig. 14는 HMD를 착용한 사용자와 모바일 디바이스를 사용하는 Non-HMD 사용자가 함께 참여하는 실험 환경을 보여준다. 제안하는 방법은 HMD 사용자는 물론, Non-HMD 환경에서도 VR 체험이 가능하도록 설계되었다. 이 실험을 진행하기 위해 Qimeng 등이 제안한 알고리즘을 이용했다[49].

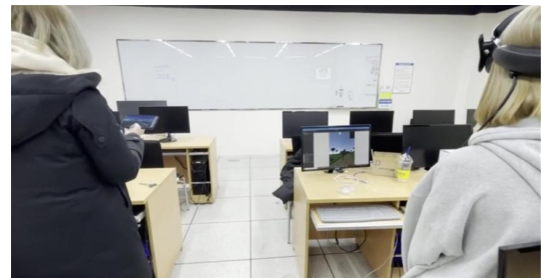


Fig. 14. An experimental environment accessible to both HMD and non-HMD users simultaneously.

Fig. 15는 본 논문에서 제안한 방법을 통해 사용자가 절름발이 동작을 했을 때, 아바타의 움직임이 어떻게 제어되는지를 보여준다. 제안한 알고리즘은 절름발이 동작을 기반으로 아바타가 정상적으로 걷거나 뛰는 동작을 묘사할 수 있을 뿐만 아니라, 좀비와 유사한 형태의 움직임까지도 가상환경 내에서 표현이 가능하다.

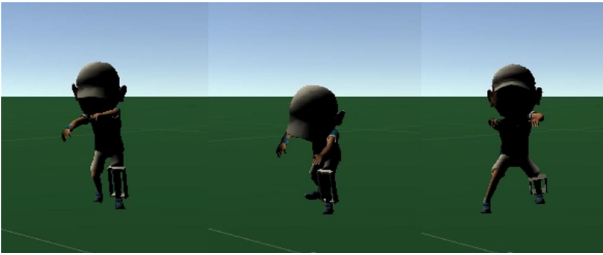


Fig. 15. Zombie movement in a virtual environment generated from the user's limping motion.

## V. Conclusion

본 논문에서는 아두이노를 활용하여 사용자의 움직임을 측정하고, 이를 바탕으로 가상환경 내에서 걷기, 뛰기, 절름발이 동작을 구현하였다. 이를 통해 아두이노를 착용한 사용자의 실제 움직임이 가상현실 속 모션에 반영되어, 사용자가 마치 가상공간을 실제로 이동하는 듯한 몰입감을 제공하는 새로운 형태의 인터페이스를 제안하였다.

또한, HMD를 착용하지 않은 Non-HMD 사용자들도 동일한 공간에서 HMD 사용자와 유사한 몰입 경험을 할 수 있도록, 1인칭 시점에서의 화면 흔들림 및 모션 블러 효과를 구현하였다.

더 나아가, 하지 장애가 있는 사용자들도 가상현실 콘텐츠를 체험할 수 있도록 '절름발이 인터페이스'를 제안하였다. 이 인터페이스는 적용 분야에 따라 실제 절름발이 환자들이 가상현실 공간에서는 정상적인 보행을 경험할 수 있도록 활용될 수 있으며, 가상현실 기반 재활 치료 시스템 등에도 폭넓게 응용 가능하다.

## ACKNOWLEDGEMENT

The National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. RS-2023-00254695, Contribution Rate : 50%). This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.RS-2022-00155915, Artificial Intelligence Convergence Innovation Human Resources Development (Inha University), Contribution Rate : 50%)

## REFERENCES

- [1] Zhang, Yuxuan, Hexu Liu, Shih-Chung Kang, and Mohamed Al-Hussein. "Virtual reality applications for the built environment: Research trends and opportunities." *Automation in Construction*, vol. 118, 2020, p. 103311. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103311
- [2] Ali, Nabeel, and Mohammed Al-Mhiqani. "Review of virtual reality trends (previous, current, and future directions), and their applications, technologies and technical issues." *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, Feb. 2017.
- [3] Muñoz-Saavedra, Luis, Lourdes Miró-Amarante, and Manuel Domínguez-Morales. "Augmented and virtual reality evolution and future tendency." *Applied Sciences*, vol. 10, no. 1, 2020, p. 322. DOI: 10.3390/app10010322
- [4] Martín-Gutiérrez, Jorge, Carlos Efrén Mora, Beatriz Añorbe-Díaz, and Antonio González-Marrero. "Virtual technologies trends in education." *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, vol. 13, Jan. 2017, pp. 469-486. DOI: 10.12973/eurasia.2017.00626a
- [5] Soliman, Maged, et al. "The application of virtual reality in engineering education." *Applied Sciences*, vol. 11, no. 6, 2021. DOI: 10.3390/app11062879
- [6] Sik-Lanyi, Cecilia. "Virtual reality healthcare system could be a potential future of health consultations." *2017 IEEE 30th Neumann Colloquium (NC), IEEE, 2017, pp. 000015-000020. DOI: 10.1109/NC.2017.8263275*
- [7] Vorderer, Peter, et al. "Entertainment in Virtual Reality and Beyond: The Influence of Embodiment, Co-Location, and Cognitive Distancing on Users' Entertainment Experience." *The Oxford Handbook of Entertainment Theory*, Feb. 2021, pp. 717-732. DOI: 10.1093/oxfordhb/9780190072216.013.37
- [8] Wang, Peng, et al. "A critical review of the use of virtual reality in construction engineering education and training." *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, no. 6, 2018, p. 1204. DOI: 10.3390/ijerph15061204
- [9] Berni, Aurora, and Yuri Borgianni. "Applications of virtual reality in engineering and product design: Why, what, how, when and where." *Electronics*, vol. 9, no. 7, 2020, p. 1064. DOI: 10.3390/electronics9071064
- [10] Collaço, Elen, et al. "Immersion and haptic feedback impacts on dental anesthesia technical skills virtual reality training." *Journal of Dental Education*, vol. 85, no. 4, Apr. 2021, pp. 589-598. DOI: 10.1002/jdd.12503
- [11] Gani, Abrar, et al. "Impact of haptic feedback on surgical training outcomes: A Randomised Controlled Trial of haptic versus non-haptic immersive virtual reality training." *Annals of Medicine and Surgery*, vol. 83, 2022, p. 104734. DOI: 10.1016/j.amsu.2022.104734

- [12] Chrysanthakopoulou, Agapi, Konstantinos Kalatzis, and Konstantinos Moustakas. "Immersive Virtual Reality Experience of Historical Events Using Haptics and Locomotion Simulation." *Applied Sciences*, vol. 11, no. 24, Dec. 2021, p. 11613. DOI: 10.3390/app112411613
- [13] Edwards, Bosede Iyiade, et al. "Haptic virtual reality and immersive learning for enhanced organic chemistry instruction." *Virtual Reality*, vol. 23, no. 4, Dec. 2019, pp. 363-373. DOI: 10.1007/s10055-018-0345-4
- [14] Bortone, Ilaria, et al. "Wearable Haptics and Immersive Virtual Reality Rehabilitation Training in Children with Neuromotor Impairments." *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 26, no. 7, July 2018, pp. 1469-1478. DOI: 10.1109/TNSRE.2018.2846814
- [15] Chattha, Umer Asghar, et al. "Motion sickness in virtual reality: An empirical evaluation." *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 130486-130499. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007076
- [16] Kolasinski, Eugenia M. "Simulator Sickness in Virtual Environments". 1995.
- [17] Lo, W. T., and Richard H. Y. So. "Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes." *Applied Ergonomics*, vol. 32, no. 1, 2001, pp. 1-14.
- [18] Nürnberger, Matthias, et al. "Mismatch of visual-vestibular information in virtual reality: Is motion sickness part of the brain's attempt to reduce the prediction error?" *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 15, 2021. DOI: 10.1016/S0003-6870(00)00059-4
- [19] Ng, Adrian K. T., Leith K. Y. Chan, and Henry Y. K. Lau. "A study of cybersickness and sensory conflict theory using a motion-coupled virtual reality system." *Displays*, vol. 61, 2020, p. 101922. DOI: 10.1016/j.displa.2019.08.004
- [20] Heo, Jaeseok, and Gilwon Yoon. "EEG Studies on Physical Discomforts Induced by Virtual Reality Gaming." *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 15, no. 3, May 2020, pp. 1323-1329. DOI: 10.1007/s42835-020-00373-1
- [21] Chang, Eunhee, Hyun Taek Kim, and Byoungyun Yoo. "Virtual Reality Sickness: A Review of Causes and Measurements." *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 36, no. 17, Oct. 2020, pp. 1658-1682. DOI: 10.1080/10447318.2020.1778351
- [22] Langbehn, Eike, Paul Lubos, and Frank Steinicke. "Evaluation of Locomotion Techniques for Room-Scale VR: Joystick, Teleportation, and Redirected Walking." *ACM International Conference Proceeding Series*, no. 18, Apr. 2018. DOI: 10.1145/3234253.323429
- [23] Choi, InBeom, Jong-Jin Park, ShinWoo Kim, and Hyung-Chul O Li. "Effect of Inconsistency Between Visually Perceived Walking Speed and Physically Perceived Walking Speed on VR Sickness in VR-Treadmill Walking." *Science of Emotion and Sensibility*, vol. 23, no. 3, Sept. 2020, pp. 79-90.
- [24] Mayor, Jesus, Laura Raya, and Alberto Sanchez. "A Comparative Study of Virtual Reality Methods of Interaction and Locomotion Based on Presence, Cybersickness, and Usability." *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 9, no. 3, 2021, pp. 1542-1553. DOI: 10.1109/TETC.2019.2915287
- [25] Cherni, Heni, Souliman Nicolas, and Natacha Métayer. "Using Virtual Reality Treadmill as a Locomotion Technique in a Navigation Task: Impact on User Experience - Case of the KatWalk." *International Journal of Virtual Reality*, vol. 21, no. 1, May 2021, pp. 1-14. DOI: 10.20870/IJVR.2021.21.1.3046
- [26] Kitson, Alexandra, et al. "Comparing Leaning-Based Motion Cueing Interfaces for Virtual Reality Locomotion." *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 3DUI 2017 - Proceedings*, Apr. 2017, pp. 73-82. DOI: 10.1109/3DUI.2017.7893320
- [27] Bovim, Lars Peder, et al. "The Impact of Motor Task and Environmental Constraints on Gait Patterns During Treadmill Walking in a Fully Immersive Virtual Environment." *Gait & Posture*, vol. 77, Mar. 2020, pp. 243-249. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2020.01.031
- [28] Vukelic, Goran, et al. "Application of VR Technology for Maritime Firefighting and Evacuation Training—A Review." *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 9, 2023, p. 1732. DOI: 10.3390/jmse11091732
- [29] Conges, Aurelie, et al. "Crisis Management Exercises in Virtual Reality." *Proceedings - 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VRW 2020, Mar. 2020*, pp. 87-92. DOI: 10.1109/VRW50115.2020.00022
- [30] Boletsis, Costas. "The New Era of Virtual Reality Locomotion: A Systematic Literature Review of Techniques and a Proposed Typology." *Multimodal Technologies and Interaction*, vol. 1, no. 24, Sept. 2017. DOI: 10.3390/mti1040024
- [31] Bozgeyikli, Evren, et al. "Locomotion in Virtual Reality for Room Scale Tracked Areas." *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 122, Feb. 2019, pp. 38-49.
- [32] Cherni, Heni, Natacha Métayer, and Nicolas Souliman. "Literature Review of Locomotion Techniques in Virtual Reality." *International Journal of Virtual Reality*, vol. 20, Mar. 2020, pp. 1-20. DOI: 10.20870/IJVR.2020.20.1.3183
- [33] Razzaque, Sharif, Zachariah Kohn, and Mary C. Whitton. "Redirected Walking." *Eurographics 2001 - Short Presentations*, Eurographics Association, 2001.
- [34] Matsumoto, Keigo, et al. "Unlimited Corridor: Redirected Walking Techniques Using Visuo-Haptic Interaction." *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies, SIGGRAPH 2016*, July 2016.
- [35] Steinicke, Frank, et al. "Estimation of Detection Thresholds for Redirected Walking Techniques." *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 16, Jan. 2010, pp. 17-

27. DOI: 10.1109/TVCG.2009.62
- [36] Slater, Mel, Anthony Steed, and Martin Usoh. "The Virtual Treadmill: A Naturalistic Metaphor for Navigation in Immersive Virtual Environments." 1995, pp. 135-148.
- [37] Iwata, Hiroo. "Locomotion Interface for Virtual Environments." *Robotics Research*, pp. 275-282, 2000.
- [38] Hager, Holger, et al. "Cyberith Virtualizer Elite 2 - Second Generation VR Locomotion Device Based on a 2 DOF Motion Platform." 2019.
- [39] Barkan, Andrew, Jeffrey Skidmore, and Panagiotis Artemiadis. "Variable Stiffness Treadmill (VST): A Novel Tool for the Investigation of Gait." *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sept. 2014, pp. 2838-2843. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907266
- [40] Skidmore, Jeffrey, Andrew Barkan, and Panagiotis Artemiadis. "Variable Stiffness Treadmill (VST): System Development, Characterization, and Preliminary Experiments." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 4, Aug. 2015, pp. 1717-1724. DOI: 10.1109/TMECH.2014.2350456
- [41] Hernandez, Ernesto, et al. "A Novel Treadmill that Can Bilaterally Adjust the Vertical Surface Stiffness." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 5, 2018, pp. 2338-2346. DOI: DOI: 10.1109/TMECH.2018.2866337
- [42] Pyo, Sang Hun, et al. "Development of a Fast Omnidirectional Treadmill (F-ODT) for Immersive Locomotion Interface." 2018 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018, pp. 760-766. DOI: DOI: 10.1109/ICRA.2018.8460669
- [43] Hollerbach, John M., et al. "Design Specifications for the Second Generation Sarcos Treadport Locomotion Interface." *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, Nov. 2021, pp. 1293-1298. DOI: 10.1115/IMECE2000-2446
- [44] Schmidt, Henning, et al. "HapticWalker—A Novel Haptic Foot Device." *ACM Transactions on Applied Perception*, vol. 2, no. 2, Apr. 2005, pp. 166-180.
- [45] Boian, R.F., et al. "Dual Stewart Platform Mobility Simulator." 9th *International Conference on Rehabilitation Robotics, ICORR 2005*, 2005, pp. 550-555. DOI: 10.1109/ICORR.2005.1502023
- [46] Iwata, H., et al. "Gait Master: A Versatile Locomotion Interface for Uneven Virtual Terrain." *Proceedings - Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 131-137, 2001. DOI: 10.1109/ICORR.2005.1502023
- [47] Yoon, Jungwon, et al. "A Planar Symmetric Walking Cancellation Algorithm for a Foot-Platform Locomotion Interface." *The International Journal of Robotics Research*, vol. 29, no. 1, 2010, pp. 39-59. DOI: 10.1177/0278364909104293
- [48] Yoon, Jungwon, et al. "A 6-DOF Gait Rehabilitation Robot with Upper and Lower Limb Connections that Allows Walking Velocity Updates on Various Terrains." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 15, no. 2, 2010, pp. 201-215. DOI: 10.1109/TMECH.2010.2040834
- [49] Zhang, Qimeng, Ji-Su Ban, Mingyu Kim, Hae Won Byun, and Chang-Hun Kim. "Low-asymmetry interface for multiuser VR experiences with both HMD and Non-HMD users." *Sensors*, vol. 21, no. 2, pp. 397, 2021. DOI: 10.3390/s21020397

## Authors



Jong-Hyun Kim received the B.A. degree in the Department of Digital Contents at Sejong University in 2008. He received M.S. and Ph.D. degrees in the Department of Computer Science and Engineering at Korea University,

in 2010 and 2016. Prof. Kim is an Associate Professor in the College of Software and Convergence (Dept. of Artificial Intelligence, Design Technology) in Inha University. His current research interests include fluid animation and virtual reality.