

다중 피드백을 지원하는 몰입형 스마트 밸런스 보드

이승용^o 이선호¹ 박준성¹ 신민철² 윤승현*

동국대학교 컴퓨터·AI학과^o, 동국대학교 멀티미디어공학과¹, 수인재두뇌과학², 동국대학교 AI소프트웨어융합학부*
{sunho990712, 0rafael0}@naver.com¹, brain@brainscience.co.kr², {randysylee, shyun}@dongguk.edu^{o,*}

Immersive Smart Balance Board with Multiple Feedback

Seung-Yong Lee^o Seonho Lee¹ Junesung Park¹ Min-Chul Shin² Seung-Hyun Yoon*

Department of Computer·AI, Dongguk University^o, Department of Multimedia Engineering, Dongguk University¹,
Suinjae Brain Science², Division of AI Software Convergence, Dongguk University*

요약

밸런스 보드 (Balance Board, BB)를 활용한 운동은 균형 감각 발달, 코어 근육 강화 등 신체 운동 능력 향상과 집중력 증진에 효과적이다. 특히, 다양한 디지털 콘텐츠와 연동되는 스마트 밸런스 보드 (Smart Balance Board, SBB)는 기존 밸런스 보드에 비해 적절한 피드백을 제공하여 운동 효과를 극대화한다. 그러나 대부분의 시스템들은 시/청각적인 피드백만 제공하여 사용자의 운동 몰입도 및 흥미 그리고 운동 자세의 정확성에 미치는 영향을 평가하지 못한다. 본 연구에서는 멀티 센서를 활용하여 다양한 피드백과 정확한 자세로 훈련이 가능한 몰입형 스마트 밸런스 보드 (Immersive-SBB, I-SBB)를 제안한다. 제안된 시스템은 아두이노 기반으로 보드의 자세를 측정하는 자이로 센서, 유/무선 통신을 위한 통신 모듈, 사용자의 정확한 발 위치를 유도하는 적외선 센서, 촉각 피드백을 위한 진동 모터로 구성되어 있다. 측정된 보드의 자세는 칼만 필터 (Kalman Filter)를 이용하여 부드럽게 보정되고, 멀티 센서 데이터는 FreeRTOS를 활용해 실시간으로 병렬처리된다. 제안된 I-SBB는 다양한 콘텐츠와 연동하여 사용자의 집중도 및 몰입도 향상과 흥미 유발에 효과적임을 보인다.

Abstract

Exercises using a Balance Board (BB) are effective in developing balance, strengthening core muscles, and improving physical fitness and concentration. In particular, the Smart Balance Board (SBB), which integrates with various digital content, provides appropriate feedback compared to traditional balance boards, maximizing the effectiveness of the exercise. However, most systems only offer visual and auditory feedback, failing to evaluate the impact on user engagement, interest, and the accuracy of exercise postures. This study proposes an Immersive Smart Balance Board (I-SBB) that utilizes multiple sensors to enable training with various feedback mechanisms and precise postures. The proposed system, based on Arduino, consists of a gyro sensor for measuring the board's posture, a communication module for wired/wireless communication, an infrared sensor to guide the user's foot placement, and a vibration motor for tactile feedback. The board's posture measurements are smoothly corrected using a Kalman Filter, and the multi-sensor data is processed in real-time using FreeRTOS. The proposed I-SBB is shown to be effective in enhancing user concentration and engagement, as well as generating interest, by integrating with diverse content.

키워드: 스마트 밸런스 보드, 자이로센서, 아두이노 병렬 처리, FreeRTOS

Keywords: Smart Balance Board, Gyro Sensor, Arduino Parallel Processing, FreeRTOS

1. 서론

현대 사회에서 건강에 관한 관심이 증가함에 따라, 운동은 삶의 중요한 부분이 되어가고 있다. 밸런스 보드(BB)를 활용한 운동은

사용자의 동적 균형 감각을 향상시키고, 코어 근육을 단련시켜 운동 선수들의 기량을 향상 시키는데 도움을 줄 뿐만 아니라, 재활 치료에도 효과적으로 활용되고 있다 [1, 2, 3, 4]. 그러나 일반적

*corresponding author: Seung-Hyun Yoon/Dongguk University(shyun@dongguk.edu)

인 밸런스 보드 운동은 지속적으로 수행하기에는 다소 지루하여 흥미를 쉽게 잃어버리는 한계가 있다.

사용자들의 집중도와 흥미를 꾸준히 유지하기 위해 사용자의 움직임에 통해 다양한 콘텐츠를 즐기며 운동하는 스마트 밸런스 보드 (SBB)가 등장하였다. 게임이나 콘텐츠를 통한 밸런싱 훈련은 사용자로 하여금 훈련에 대한 동기를 부여할 뿐만 아니라 높은 흥미로 운동의 효과를 극대화할 수 있다 [5, 6]. 이에 따라, 현재 다양한 회사들에서 SBB 제품을 판매하고 있다. 예를 들어, 모바인어스사의 RaonFit [7]은 다양한 콘텐츠와 연동되는 스마트 밸런스 보드인 라온 보드를 개발하였다. 그러나 이 제품은 청소년을 주대상으로 하고 있어 학교 및 다양한 교육 지자체와 협업하기 때문에 일반 사용자가 쉽게 이용할 수 없다. 반면, 건강한 친구사의 FAVE [8]와 Barboleta 사의 SBB [9]는 각종 디바이스와 무선 연결을 통해 사용자가 가정에서 쉽게 온라인 콘텐츠로 운동할 수 있다. 그러나, 두 장비 모두 실시간으로 사용자의 정확한 자세를 유도하지 못하며, 오직 자이로 센서만을 사용하기 때문에 사용자에게 제공되는 감각 피드백이 시각적 피드백으로 제한된다는 한계점이 있다.

본 연구에서는 다양한 센서를 활용해 사용자에게 정확한 운동을 유도하고, 높은 몰입도를 제공하는 몰입형 스마트 밸런스 보드 (I-SBB)를 제안한다. 제안하는 몰입형 스마트 밸런스 보드는 다양한 기능을 제공하기 위해 모듈 확장성이 보장되는 아두이노를 사용하였으며, FreeRTOS 라이브러리 [10]를 활용해 다양한 센서간의 실시간 병렬 처리를 가능하게 했다. 칼만 필터 (Kalman filter) [11]를 적용한 자이로 센서 (MPU6050)를 통해 정확한 움직임 데이터를 추출하여 시리얼 포트 혹은 블루투스 모듈을 통해 PC와 유/무선 통신을 수행한다. 또한, 밸런스 보드 상판에 구멍을 뚫고 그 아래에 적외선 센서를 배치하여 사용자의 발 위치를 지속적으로 확인해 정확한 운동 자세를 유지할 수 있도록 한다. 운동의 몰입감을 극대화하기 위해 진동 모터를 활용하여 촉각 피드백을 제공하며, 다양한 콘텐츠를 활용하여 시각 및 청각적 피드백까지 제공한다. 본 논문에서 제안된 I-SBB는 다음과 같은 장점을 가진다.

- **몰입감:** 기존 스마트 밸런스 보드와 다르게 콘텐츠 속 상황을 반영한 진동 피드백을 제공해 몰입감을 향상시킨다.
- **정확성:** 적외선 센서를 활용해 사용자의 발 위치가 밸런스 보드에 정확히 위치해야 자이로 데이터를 측정할 수 있게 하여 부정확한 자세로 훈련하는 것을 방지한다.
- **효율성:** FreeRTOS를 이용하여 단일 아두이노 보드에서 멀티 센서 데이터를 병렬 처리하여 효율성을 극대화 한다.

본 논문은 다음과 같은 구성으로 이루어져 있다. 2절은 밸런스 보드 및 스마트 밸런스 보드가 운동 능력에 미치는 영향에 관한 이전 연구들을 소개한다. 3절에서는 제안한 몰입형 스마트 밸런스 보드의 전반적인 설명과 MPU6050, 적외선 센서, 유/무선 통신 모듈, 진동 센서 및 병렬 처리를 위해 사용된 라이브러리에 대해

자세하게 설명한다. 4절에서는 SBB와 I-SBB를 활용한 콘텐츠 체험을 통해 사용자의 몰입감 향상 및 흥미 유발에 대한 비교를 통한 정성평가를 진행하며, 5절에서 결론으로 마무리한다.

2. 관련 연구

밸런스 보드는 다양한 분야에서 활용 되어 운동 및 신체 균형 능력을 향상시킨다. DiStefano 등 [2]은 건강한 사람들을 대상으로 다양한 종류의 밸런스 보드를 활용한 밸런스 훈련의 효과를 세 가지로 분류하였다. 첫째, 정적인 평면 위에서 정적 밸런스 능력 향상 여부, 둘째, 동적인 평면에서 정적 밸런스 능력 향상 여부, 셋째, 동적 밸런스 능력 향상 여부에 대해 각 논문에서 실시한 실험을 비교 및 분석하였다. 이를 통해, 나쁜 영향을 미치는 밸런스 훈련은 없으며, 균형 감각을 향상 및 유지시키는 데 큰 역할을 한다고 설명했다. Ogaya 등 [12]은 80대 고령인을 대상으로 밸런스 훈련을 진행하였으며, 이 훈련이 균형 능력을 향상시켜 낙상 위험을 줄이는 데 기여할 수 있음을 보였다. Hsieh 등 [13]은 밸런스 보드를 활용한 훈련이 뇌성마비 아동의 자세 균형을 개선할 수 있음을 설명했다. 실험 결과에서 아이들은 정적 밸런스 능력이 증가하여 제자리에서의 흔들림이 감소하였고, 기능적 균형 테스트에서 성능 향상을 보였다. 이와 같이, 밸런스 보드는 특정 나이 및 신체적 조건과 무관하게 모두 긍정적인 영향을 미치는 것으로 확인할 수 있다.

기존 밸런스 보드에 다양한 콘텐츠를 추가한 훈련은 더욱 개선된 실험 결과를 산출하였다. Betker 등 [5]은 비디오 게임을 기반으로 하는 균형 재활 운동의 효과를 설명했다. 세 명의 실험자를 대상으로 한 연구를 통해 게임을 활용한 운동이 더욱 많은 흥미를 야기했으며, 낙상 테스트, 족저압 중심 (Center of Pressure, COP) 변화 범위 및 시간당 족저압 중심 이동 거리에서 더 나은 결과를 보여주었다. 이는 게임을 기반으로 하는 훈련이 사용자로 하여금 운동에 몰입감을 유지하고 동기부여를 하는 긍정적인 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 다만, 본 연구와는 다르게 밸런스 보드를 기반으로 한 것이 아닌 압력 매트를 활용하여 훈련을 진행하였다. Fitzgerald 등 [14]은 본 연구와 유사하게 스마트 밸런스 보드를 활용하여 게임 콘텐츠를 통한 밸런싱 훈련의 효과를 실험하였다. 실험 결과로 동적 밸런스 능력이 향상되었으며 내재적 학습 동기도 증가한 것으로 나타났다. 이를 통해, 게임 콘텐츠를 활용한 엑서게이밍 (exergaming) 시스템이 사용자에게 흥미와 즐거움을 제공하여 피실험자들의 참여도와 흥미를 증진하고 운동에 대한 동기를 부여한다는 것을 알 수 있다. 따라서, Baranyi 등 [6]은 PC와 무선으로 연결된 스마트폰을 밸런스 보드에 부착하여 무릎 재활에 도움이 되는 게임을 디자인하는 연구를 진행하였다.

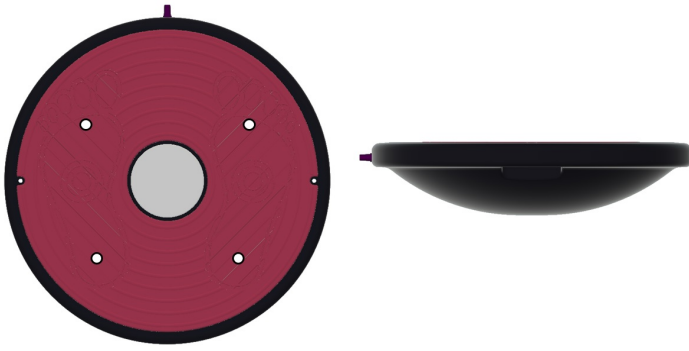


Figure 1: Exterior structure of balance board [15].

3. 몰입형 스마트 밸런스 보드

3.1 제작 방법 및 모듈

본 연구에서는 다양한 센서 및 모듈을 결합하여 몰입형 스마트 밸런스 보드를 제작하였다. 제작된 외관은 Figure 1와 같으며, 밸런스 보드의 상부 (Figure 1(왼쪽))는 사용자가 발을 위치하는 곳이며, 발의 정확한 위치를 감지하기 위해 적외선 센서가 보이도록 구멍을 뚫었다. 하부 (Figure 1(오른쪽))는 반구 형태로, 사용자가 중심을 잡을 수 있도록 설계되었다. Figure 2는 하부 및 내부를 보여주며, 다음과 같은 센서 및 장치들이 내장되어 있다.

- 아두이노 UNO (Arduino UNO): 중앙처리 장치 (CPU)로 활용하여, 다양한 주변 센서들과의 통신 및 데이터 처리 업무를 담당한다.
- 자이로 센서 (MPU6050): 밸런스 보드의 각 축 별 기울기를 측정한다.
- 적외선 센서 (IR sensor): 사용자의 발 위치를 감지한다.
- 진동 모터 (Vibration motor): 촉각 피드백을 제공한다.
- USB Type-B 소켓: 밸런스 보드와 PC와의 유선 통신을 담당한다.
- 블루투스 센서 (HC-06): 밸런스 보드와 PC와의 무선 통신을 담당한다.

제안된 I-SBB는 Figure 3와 같은 시스템 구조를 따른다. 출력 모듈로는 진동 모터가 있으며, 입력 모듈로는 적외선 센서와 MPU6050이 있다. 이들은 CPU 역할을 하는 아두이노와 연결되어 데이터를 송/수신한다. 아두이노는 Serial Port나 Bluetooth 모듈을 통해 PC와 유/무선 통신을 수행하며, PC에서는 다양한 콘텐츠가 실행된다. 이때, 아두이노와 디바이스 간 송/수신 프로세스와 수신된 정보를 기반으로 진동 모터를 작동시키는 프로세스는 FreeRTOS를 통해 병렬 처리된다.

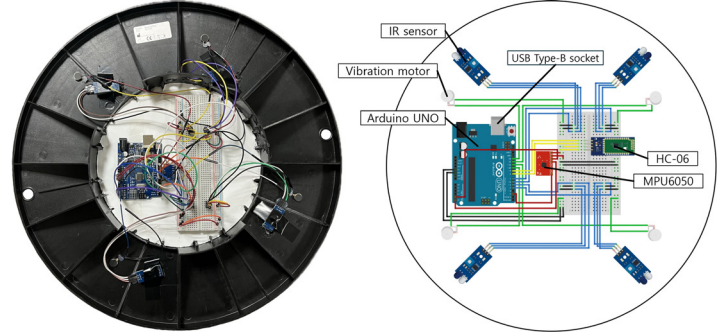


Figure 2: Inner structure of balance board and circuit.

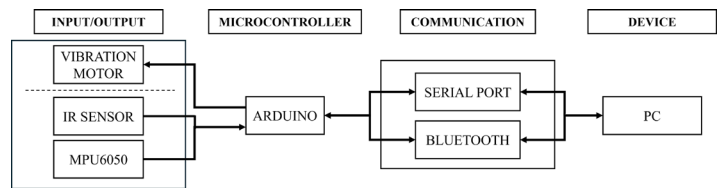


Figure 3: Block diagram of proposed system.

3.2 각 축 별 기울기 추정

스마트 밸런스 보드의 핵심은 밸런스 보드의 자세를 정확히 측정하여 애플리케이션에 적용하는 것이다. 본 연구에서는 MPU6050 센서를 활용해 사용자가 움직이는 밸런스 보드의 각 축 별 기울기를 추정하였다.

MPU6050 센서는 3축 가속도계와 3축 자이로스코프를 내장하고 있어, 총 6개의 자유도 (Degree of Freedom, DOF)를 측정할 수 있다. Figure 4(a)는 MPU6050의 회로도를 보여주며, 본 연구에서는 가속도계의 범위를 $\pm 2g$ 으로 설정해 $16,384 LSB/g$ 의 해상도, 자이로스코프의 범위를 $\pm 250^\circ/s$ 으로 설정해 $131 LSB/(^\circ/s)$ 의 해상도로 설정했다. 여기서 g 는 지구 중력 가속도, LSB (Least Significant Bit)는 최소 비트 단위를 의미한다. Figure 5은 MPU6050의 3축 회전을 가시화 하였다. x 축 기준 roll, y 축 기준 pitch, 그리고 z 축 기준 yaw는 모두 반시계 방향으로 회전하며 양의 각도를 가진다. MPU6050 센서 속 가속도계는 선형 가속도를 측정하는 장치로, 저주파 신호에 잘 반응하지만 급격히 변하는 고주파 신호에는 즉각적으로 반응하지 못한다. 반면, 자이로스코프는 회전 운동을 감지해 각속도를 측정하는 장치로, 빠르게 변화하는 고주파 신호에 정확하게 반응하지만, 저주파 또는 느리게 변화하는 신호에는 취약하다. 이러한 자이로스코프를 통해 얻은 각도를 적분하여 roll, pitch, yaw를 계산하게 되는데, 이때 적분 과정에서 적분 상수가 누적되므로 bias drift 문제를 가진다.

따라서 본 연구에서는 칼만 필터를 활용해 정확하고 안정적인 각도를 추정하였다. 칼만 필터는 불확실한 측정치를 바탕으로 시스템의 상태를 추정하는 데 유용한 기술로써 가속도계와 자이로스코프의 장점만을 결합할 수 있다. Figure 6는 MPU6050에 변화를 주지 않은 상태에서 시간에 따른 기울기를 출력한 그래프이고, 칼만 필터 적용 전후의 차이를 보여준다. 본 연구에서는 밸런스

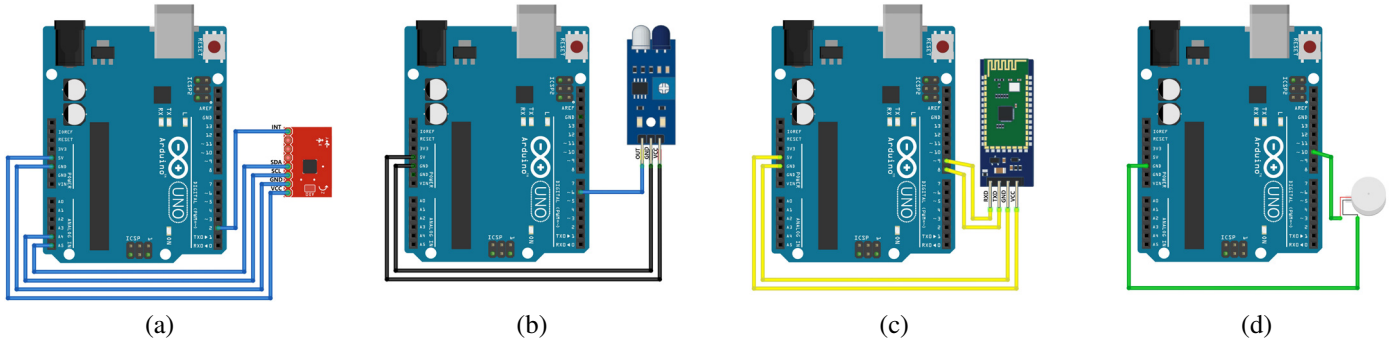


Figure 4: Circuits of sensors: (a) MPU6050, (b) IR Sensor, (c) Bluetooth Sensor, (d) Vibration Sensor.

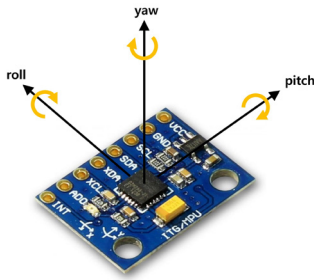


Figure 5: 3 axis-rotation of MPU6050.

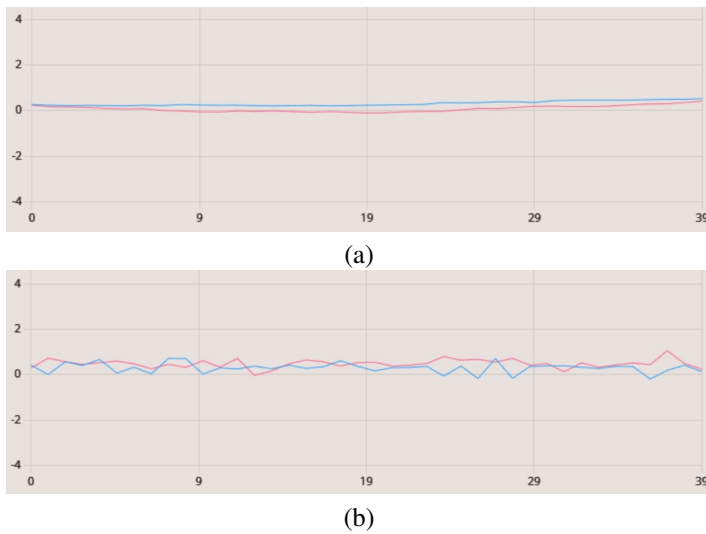


Figure 6: Values of pitch and roll of MPU6050 (a) with Kalman filter and (b) without Kalman filter.

보드의 roll과 pitch 값만 사용하기 때문에 두 기울기에 대해서만 칼만 필터 적용 유무에 따른 측정 값을 비교하였다. Figure 6의 가로 축은 측정된 시간 (ms)을 나타내며, 세로 축은 측정 값을 나타낸다. 파란 선과 붉은 선은 각각 roll과 pitch 값을 나타낸다. 칼만 필터를 사용하지 않고 측정한 경우 (a) roll 값과 pitch 값이 불안정하고 노이즈가 많다. 반면, 칼만 필터를 적용한 경우 (b) roll과 pitch 값이 상당히 안정적으로 추정된다.

3.3 발 위치 감지

사용자가 밸런스 보드를 활용한 운동 시 발 위치는 운동 효과에 직접적인 영향을 미친다 [16]. 따라서, 발의 위치가 정확한지 판단하기 위해 적외선 (IR) 센서를 활용하였다. 적외선 센서 송수신 모듈은 주로 객체의 존재 여부를 감지하기 위해 사용된다. 송신기인 적외선 LED는 특정 주파수의 적외선 빛을 발산하며, 이 빛이 객체에 반사되어 돌아온 양을 적외선 수신기가 감지하여 객체의 존재를 확인한다. Figure 4(b)는 적외선 센서의 회로도를 보여준다.

본 연구에서는 밸런스 보드 위에 사용자의 양발 앞부분과 뒷부분이 위치하는 곳에 총 네 개의 적외선 센서를 배치하여 발의 위치를 감지했다. 모든 적외선 센서에서 동시에 사용자의 발을 감지해야만 자이로 센서 데이터에 접근할 수 있게 하였다. Figure 7는 올바른 발의 방향 (a)과 올바르지 않은 방향 (b)의 예시를 보여준다. Figure 8은 사용자의 발 위치가 올바르지 않을 경우, 실행 중인 콘텐츠에서 표시되는 경고 메시지를 나타낸다.

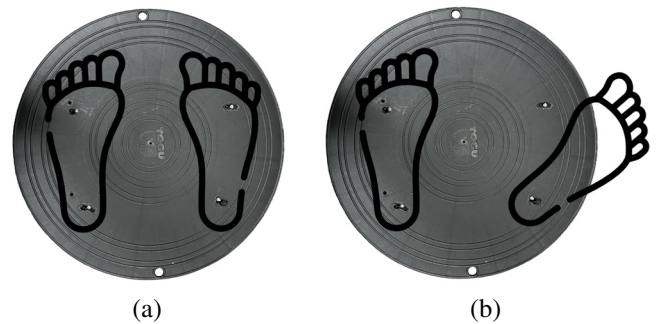


Figure 7: Foot orientation: (a) correct and (b) wrong.

3.4 통신 인터페이스: 유/무선 접근의 비교와 적용

본 연구는 I-SBB와 디바이스 간 통신을 위한 두 가지 접근 방식을 제안한다: (1) 무선 연결을 위한 블루투스 통신과 (2) 유선 연결을 위한 시리얼 통신. 블루투스 연결 방식은 최대 10~100미터 범위 내에서 모듈 간 자유로운 무선 통신을 가능하게 하여 이는 사용자에게 이동성과 유연성을 제공한다. 이를 위해 블루투스 HC-06 모듈을 사용하였고, Figure 4(c)는 HC-06의 회로도를 보여준다.



Figure 8: Warning of the foot displacement.

블루투스 통신은 무선 연결의 장점을 가지지만, 전원 공급을 위해 추가적인 외부 배터리 연결이 필요하다는 단점을 가진다. 반면, 시리얼 (Serial port) 통신은 아두이노와 디바이스 간의 물리적 연결을 통해 통신하는 방식이다. 이는 무선 통신과 달리 추가적인 전원 공급이 필요 없다는 장점을 가지지만, 연결 선의 길이에 의해 밸런스 보드의 실행 위치에 제약이 받는다는 단점을 가진다. 이러한 두 가지 통신 방식 중 사용자는 주변 환경에 맞는 통신 방법을 선택할 수 있다. 추가적인 전원 공급이 불가능한 상황에서는 유선 통신 방법을 채택하는 것이 좋으며, 장소가 협소한 공간에서는 무선 통신을 채택하는 것이 바람직하다.

3.5 다감각 피드백

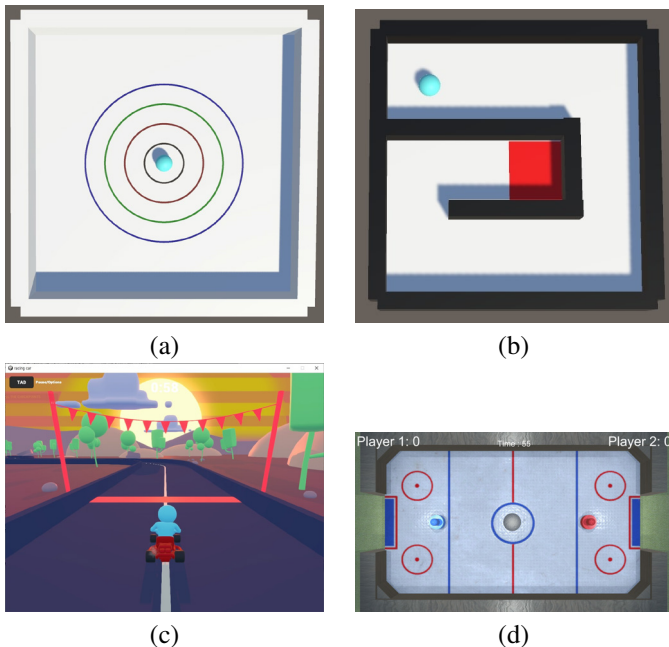


Figure 9: Various contents: (a) target, (b) maze, (c) race car, and (d) 3D hickey.

사용자의 몰입도를 높이기 위해 다양한 감각 피드백을 제공하는 것이 효과적이다. 본 연구에서는 시각적, 청각적, 촉각적 피드백을 포함한 세 가지의 감각 피드백을 제공한다.

세 가지 피드백을 동시에 제공하기 위해 Unity 게임 엔진을 활용하여 다양한 인터랙티브 콘텐츠를 제작하였다. 콘텐츠는 훈련 콘텐츠와 게임 콘텐츠로 구성된다. 훈련 콘텐츠는 사용자가 I-SBB를 조작할 수 있도록 훈련하는 목적이며 균형 감각을 익히기 위한 과녁 맵(Figure 9(a))과 복잡한 조작을 위한 미로 맵(Figure 9(b))이 있다. 게임 콘텐츠는 복잡한 조작을 통해 균형 감각을 기르는 목적으로 자동차를 시간 내에 운전해야 하는 레이싱 게임 [17] (Figure 9(c))과 싱글 또는 멀티플레이가 가능한 에어 하키 게임 [18] (Figure 9(d))을 개발하였다.

각 콘텐츠에서는 사용자를 나타내는 객체(구, 자동차, 에어 하키 핸들)가 I-SBB의 이동에 맞게 실시간으로 움직이는 것을 확인할 수 있다. 콘텐츠를 플레이하는 도중 사용자의 발 위치가 변형되어 적외선 센서가 이를 감지하지 못하는 경우, 경고 창을 띄워 시각적 피드백을 제공함으로써 사용자가 발 위치를 수정하고 올바른 훈련이 진행될 수 있게 한다. 또한, 콘텐츠 플레이 중 긴장감을 유발하는 배경 음악과 상황에 맞는 효과음을 추가하여 청각적 피드백을 제공한다. 더 나아가, 본 연구에서는 촉각적 피드백을 제공하기 위해 SBB 내부에 3V 출력 진동 모터를 총 네 개 부착하여 충돌이 감지될 시 0.5초의 진동을 전달한다. Figure 4(d)는 진동 모터의 회로도를 보여준다. 콘텐츠를 플레이하는 중 벽에 부딪히는 경우 진동 및 경고 메시지 창을 띄워 촉각 및 시각적 피드백을 통해 SBB의 조작을 빠르게 수정할 수 있게 하였다.

3.6 병렬 처리

본 연구의 시스템 구축에 있어 두 가지 주요 프로세스의 동시 실행이 필수적이었다. 첫 번째 프로세스는 MPU6050 센서로부터 수집된 자이로 데이터를 지속적으로 처리하고 디바이스(PC)와 통신하는 역할을 담당한다. 두 번째 프로세스는 디바이스에서 송신된 충돌 감지 정보를 확인하여 진동 모터를 활성화하는 것이다. 아두이노 플랫폼은 기본적으로 멀티스레딩을 지원하지 않기 때문에, 진동 모터가 활성화될 때 기울기 데이터의 디바이스 송신이 중단되는 문제가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 다중 작업을 효과적으로 관리하기 위해 FreeRTOS를 활용한 병렬 처리 방식을 도입하였다. FreeRTOS는 임베디드 디바이스에 널리 사용되는 실시간 운영체제로, 단일 아두이노 보드에서 우선순위에 따라 여러 작업을 효과적으로 스케줄링한다. 디바이스에서 송신된 충돌 데이터를 수신하는 빈도는 자이로 데이터를 송신하는 빈도보다 상대적으로 적기 때문에, 자이로 데이터 송신을 더 높은 우선순위로 설정하였다. 이를 통해, 자이로 데이터를 진동 모터 활성화와 관계없이 끊임 없이 송신할 수 있다. 이러한 병렬 처리 전략의 도입은 아두이노의 제한된 처리 능력을 극복하고, 실시간 데이터 처리를 가능하게 하였다.

Table 1: Questions and the scores of user experiment assessment.

Questions	Average Score (5)	
	Original SBB	I-SBB
콘텐츠를 체험하는 중 집중 상태를 유지하는데 어려움이 있었나요? (1: 매우 어려움, 5: 매우 쉬움)	2.23	3.67
콘텐츠를 체험하는 중 외부 요인에 의해 쉽게 산만해졌나요? (1: 매우 산만함, 5: 전혀 산만하지 않음)	3	4.29
콘텐츠를 체험하는 중 얼마나 많은 흥미를 느꼈나요? (1: 전혀 흥미롭지 않음, 5: 매우 흥미로움)	3.62	4.71

4. 실험 결과

본 논문에서는 다양한 센서가 활성화된 몰입형 스마트 밸런스 보드 (I-SBB)가 운동 중 사용자의 집중도와 흥미에 미치는 영향을 정성적으로 평가하였다. 실험 참여자는 20대 초반부터 30대 초반의 남성 15명, 여성 6명으로 구성된 총 21명의 건강한 대학(원)생들이며 밸런스 보드 사용 경험이 없다. 실험자들은 적외선 센서 및 진동 센서가 포함되지 않은 일반적인 SBB와 I-SBB를 모두 활용하여 3.5절에서 소개된 다양한 인터랙티브 콘텐츠를 체험하였다. 일반적인 SBB는 MPU6050만을 장착하여 사용자의 기울기만을 인식하는 형태이다. 반면, 제안된 I-SBB는 MPU6050, 적외선 센서, 진동 센서를 포함한다. 각 밸런스 보드 사용 순서는 무작위로 결정되었으며, 이는 사용 순서가 집중도와 흥미에 미치는 영향을 배제하기 위함이었다. Figure 10은 실험 환경을 보여주며, 본 실험에서는 밸런스 보드와 PC 간의 유선 통신을 활용하였다.



Figure 10: Image of user experiment

실험 후, 직접 제작한 사용자 평가를 통해 두 밸런스 보드를 비교하는 질문에 대한 평균 점수를 Table 1에 제시하였다. 첫번째와 두번째 질문은 몰입도와 관련된 질문이며, 마지막 질문은 흥미도와 관련된 질문이다.

각 문항의 만점 점수는 5점이며, 결과에서 볼드(bold)체로 표현된 항목들은 일반 SBB에 비해 제안된 몰입형 SBB가 더 높은 몰입도와 흥미를 제공함을 나타낸다. 첫번째 문항의 경우 다른 두 문항과 달리 상대적으로 낮은 점수가 나왔는데, 이는 사용자들이 밸런스 보드를 경험해보지 않아 온전히 콘텐츠에 집중하지 못한 것으로 예측 된다. 하지만 일반 SBB와 비교하면 1.44 정도 향상된 점수를 보여준다. 또한, 종합적으로 실험에 사용된 두 보드 중 하나를 사용하고자 하면 어떤 보드를 선호하는지에 대한 질문에

대해, 실험자 중 19명은 I-SBB를 선호하였고, 1명은 일반 SBB를, 나머지 1명은 확실하지 않다고 응답하였다. 이는 몰입형 스마트 밸런스 보드가 콘텐츠를 플레이하는 동안 더 높은 몰입감을 제공했음을 의미한다.

각 문항에 대한 통계적 유의한 차이를 확인하기 위해 t-검정(t-test)을 수행했으며 결과는 Table 2와 같다.

Table 2: Results of t-test of each question of user experiment assessment.

Question #	t-value	p-value
1	-2.932	0.0056
2	-3.644	0.0008
3	-4.301	0.0001

Table 2에서 볼 수 있듯이, 세 질문 모두에서 일반적인 SBB보다 I-SBB간의 점수 차이는 통계적으로 유의미한 수준 ($p < 0.05$)으로 나타났다. 이는 제안된 I-SBB가 일반 SBB에 비해 사용자 경험 측면에서 더 우수함을 의미한다.

이후 I-SBB의 각 센서에 대한 객관식 및 주관식 평가를 진행하였다. 진동 모터의 경우 콘텐츠 상에서 벽에 부딪히거나 다른 물체와 충돌 시 진동을 통해 직관적인 피드백을 제공하여, 실험자의 반응 속도를 높이고 빠른 대처가 가능하게 했다는 긍정적인 반응이 있었다. 또한, 진동이 발생하면 충돌을 최소화하려는 노력이 증가하여 긴장 상태를 유지하게 되어 운동 효과가 뛰어나다는 의견이 있었다. 적외선 센서의 경우 발 위치를 지속적으로 확인하여 사용자가 콘텐츠를 체험하는 동안 집중도를 높이고, 부정확한 자세로 콘텐츠를 진행하는 것을 방지해 훈련의 정확도를 높였다는 긍정적인 반응이 있었다. 하지만, 각 실험자의 체형 및 신체 조건에 따라 최적의 발 위치가 다르므로 이를 고려해야 한다는 의견이 있었다. 또한 본 실험에는 한계점이 존재한다. 참여한 실험자들은 모두 20대로 구성되어 있어, 제안한 몰입형 SBB의 몰입도와 흥미도를 입증하기에는 연령대가 다소 제한되었다.

5. 결론

본 논문에서는 다양한 센서를 활용한 몰입형 스마트 밸런스 보드를 제안하였으며, 사용자의 정확한 운동을 유도하고 몰입도와 흥미를 극대화하는 것을 목표로 하였다. 아두이노 UNO 보드를 기반으로 하여 MPU6050 모듈을 활용해 칼만 필터를 적용한 SBB의 실시간 자이로 데이터를 유/무선 통신을 통해 디바이스로 전달하고, 사용자는 이 데이터를 활용하여 인터랙티브 콘텐츠로 운

동을 할 수 있다. 이때 사용자의 정확한 발 위치를 유도하기 위해 적외선 센서를 사용하였으며, 진동 모터를 통해 촉각 피드백을 제공하여 더욱 깊은 몰입감과 흥미를 유발하였다. 이러한 I-SBB와 일반 SBB를 비교하기 위해 동일한 인터랙티브 콘텐츠를 플레이한 후 사용자 평가를 진행하였다. 실험 결과, 모든 참여자는 일반 SBB보다 제안된 I-SBB가 더욱 높은 몰입감과 흥미를 유발하였다는 긍정적인 의견을 보였다. 구체적으로, 적외선 센서를 통해 정확한 발 위치를 유지하기 위해 많은 집중을 하게 되었고, 진동 모터를 통해 콘텐츠 속 움직임을 직관적으로 파악하여 높은 몰입감을 느낄 수 있었다는 의견이 있었다.

제안된 I-SBB는 여러 장점을 가지고 있다. 일반 SBB의 한계점인 운동의 흥미와 동기 부여를 위한 콘텐츠의 부재를 해결하고, 기존 SBB의 한계점인 다감각 피드백의 부재를 해결하기 위해 시각 및 청각 피드백 뿐만 아니라 콘텐츠 상황을 반영한 진동 피드백을 제공하여 높은 몰입감으로 운동 효과를 극대화시킨다. 또한, 적외선 센서를 활용해 사용자의 발 위치를 정확하게 유지하도록 함으로써 사용자는 전신에 긴장을 유지하게 되며, 부상을 방지할 뿐만 아니라 정확한 자세로 운동할 수 있다. 마지막으로, I-SBB는 다양한 센서를 활용하면서도 FreeRTOS를 사용한 병렬 처리로 비용을 절약하여 높은 효율성을 보였다.

이러한 다양한 센서를 활용한 I-SBB는 다양한 분야에 활용될 수 있으며, 이를 통해 재활이나 운동 능력 향상의 정도를 파악하는 데 큰 기여를 할 것으로 예상된다. 이를 위해서는 적외선 센서의 위치를 다양하게 조정하여 발 위치에 따른 다양한 운동을 가능하게 하는 것이 중요하다. 따라서 향후 연구에서는 다양한 연령대의 사용자에게 따른 최적의 자세를 제공하는 보드를 개발하고, 이를 활용한 임상 실험을 통해 제안하는 I-SBB의 신뢰성을 입증할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 인공지능융합혁신인재양성사업 연구 결과로 수행되었음 (IITP-2024-RS-2023-00254592).

References

- [1] 한은상 and 구민, “요통 호소자의 밸런스보드 운동을 통한 코어 근 발달이 고관절 균형과 통증 척도에 미치는 영향,” *한국발목발달학회지*, vol. 29, no. 2, pp. 117–122, 2021.
- [2] L. J. DiStefano, M. A. Clark, and D. A. Padua, “Evidence supporting balance training in healthy individuals: a systemic review,” *The Journal of Strength & Conditioning Research*, vol. 23, no. 9, pp. 2718–2731, 2009.
- [3] A. Gebel, O. Prieske, D. G. Behm, and U. Granacher, “Effects of balance training on physical fitness in youth and young ath-

letes: a narrative review,” *Strength & Conditioning Journal*, vol. 42, no. 6, pp. 35–44, 2020.

- [4] J. Saraiva, G. Rosa, S. Fernandes, and J. B. Fernandes, “Current trends in balance rehabilitation for stroke survivors: A scoping review of experimental studies,” *International journal of environmental research and public health*, vol. 20, no. 19, p. 6829, 2023.
- [5] A. L. Betker, T. Szturm, Z. K. Moussavi, and C. Nett, “Video game-based exercises for balance rehabilitation: a single-subject design,” *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 87, no. 8, pp. 1141–1149, 2006.
- [6] R. Baranyi, L. Rast, K. Pinter, C. Aigner, D. Hoelbling, and T. Grechenig, “Fruitgrind: Analysis, design and development of a serious game supporting knee rehabilitation using a smartphone attached to a balance board,” in *2023 IEEE 11th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*. IEEE, 2023, pp. 1–6.
- [7] I. mobinus, “mobinus,” 2017, <https://www.mobinus.co.kr/main/index.html> [Accessed: 2024.06.11].
- [8] I. STORNG FREINDS, “Strong friends,” 2021, <https://www.strongfriends.co.kr/> [Accessed: 2024.06.11].
- [9] I. SIA Barboleta, “Barboleta,” 2018, <https://barboleta.lv/en/home/>, [Accessed: 2024.06.12].
- [10] R. Barry *et al.*, “Freertos,” *Internet, Oct*, vol. 4, p. 18, 2008.
- [11] M. Khodarahmi and V. Maihami, “A review on kalman filter models,” *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 727–747, 2023.
- [12] S. Ogaya, T. Ikezoe, N. Soda, and N. Ichihashi, “Effects of balance training using wobble boards in the elderly,” *The Journal of Strength & Conditioning Research*, vol. 25, no. 9, pp. 2616–2622, 2011.
- [13] H.-C. Hsieh, “Preliminary study of the effect of training with a gaming balance board on balance control in children with cerebral palsy: a randomized controlled trial,” *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, vol. 99, no. 2, pp. 142–148, 2020.
- [14] D. Fitzgerald, N. Trakarnratanakul, B. Smyth, and B. Caulfield, “Effects of a wobble board-based therapeutic exergaming system for balance training on dynamic postural stability and intrinsic motivation levels,” *journal of*

orthopaedic & sports physical therapy, vol. 40, no. 1, pp. 11–19, 2010.

[15] S. Brain Science Inc., <https://www.brainscience.co.kr/>.

[16] R. De Ridder, T. Willems, S. De Mits, J. Vanrenterghem, and P. Roosen, “Foot orientation affects muscle activation levels of ankle stabilizers in a single-legged balance board protocol,” *Human movement science*, vol. 33, pp. 419–431, 2014.

[17] U. Technologies, “Unity learn karting microgame urp,” 2020, <https://assetstore.unity.com/packages/templates/unity-learn-karting-microgame-urp-150956description> [Accessed: 2024.06.12].

[18] A. Lapusteanu, “Simple 2-player 3D air hockey game developed in unity,” 2020, <https://github.com/Andrei-Lapusteanu/3D-AirHockey> [Accessed: 2024.06.12].

〈 저 자 소 개 〉

이 승 용

- 2023 동국대학교 멀티미디어공학과 학사
- 2023 ~ 현재 동국대학교 컴퓨터AI학과 석사과정
- 관심분야 : 컴퓨터그래픽스, 기하 모델링, 렌더링
- <https://orcid.org/0009-0005-1441-4794>



이 선 호

- 2019 ~ 현재 동국대학교 멀티미디어공학과 학사과정
- 관심분야 : 컴퓨터 비전, 컴퓨터 그래픽스
- <https://orcid.org/0009-0002-1244-8243>



박 준 성

- 2019 ~ 현재 동국대학교 멀티미디어공학과 학사과정
- 관심분야 : 컴퓨터그래픽스, HCI, 인간공학
- <https://orcid.org/0009-0009-4770-6477>



신 민 철

- 2009 ~ 현재 (주)썬메디 대표이사
- 2012 ~ 현재 (주)수인재두뇌과학 공동대표
- 2014 ~ 2019 한국뇌과학심리학회 연구위원
- 2016 ~ 2018 동국대학교 융합소프트웨어교육원 교육위원
- 2016 ~ 현재 한국뇌파신경학회 교육이사
- 2018 동국대학교 멀티미디어공학과 석사
- 2022 ~ 현재 강남구보건소 청소년심리지원센터 사이심 자문위원
- 관심분야 : 컴퓨터그래픽스, 뉴로피드백 트레이닝
- <https://orcid.org/0000-0002-6425-6772>



윤 승 현

- 2001 한양대학교 수학과 학사
- 2007 서울대학교 컴퓨터공학과 박사
- 2007 ~ 현재 동국대학교 AI소프트웨어융합학부 조교수/부교수/교수
- 관심분야 : 컴퓨터그래픽스, 기하모델링, 가상/증강/혼합현실
- <https://orcid.org/0000-0002-0015-8305>

