KJAB
Korean Journal of Applied Biomechanics 2025; 35(4): 282-288
http://dx.doi.org/10.5103/KJAB.2025.35.4.282
http://e-kjab.org eISSN 2093-9752
ORIGINAL

Effects of Wearing a Mixed Reality-Based Head-Mounted Display on Gait

혼합현실 기반 헤드 마운티드 디스플레이 착용이 보행에 미치는 영향

Jiho Park[1], Sukhoon Yoon[2]

[1]Department of Sports Science, Korea Institute of Sport Science, Seoul, South Korea
[2]Department of Community Sport, Korea National Sport University, Seoul, South Korea

Received : 19 September 2025
Revised : 27 October 2025
Accepted : 28 October 2025

Corresponding Author
Sukhoon Yoon
Motion Innovation Centre, Korea National Sport University, 1239, Yangjae, Songpa-gu, Seoul, 05541, South Korea
Email : sxy134@knsu.ac.kr

Objective: This study aimed to investigate the effects of wearing a head-mounted display (HMD) with mixed reality (MR) technology on gait performance in healthy adults.

Method: Twenty healthy male adults participated (Height: 172.5 ± 5 cm, Weight: 73.2 ± 8.3 kg, age: 28.1 ± 2.4 yrs.) in two walking conditions: normal gait (NG) and gait with wearing an MR-based HMD (HMDG). To identify the body segments reflective markers were attached to selected anatomical landmarks, and 3D motion capture was used to collect gait kinematics. To find the effect of MR-based HMD gait variables and joint range of motion (RoM) of lower extremity joints were calculated.

Results: Gait analysis revealed significant differences between conditions. Gait speed and stride length were significantly reduced in the HMDG condition compared to the NG condition ($p < .05$), suggesting a more cautious walking strategy. However, no significant differences were observed in stride width, stance phase time, swing phase time, double support time, or cadence. Similarly, the joint range of motion (RoM) at the hip, knee, and ankle showed no statistically significant differences between conditions.

Conclusion: Wearing an MR-based HMD influenced gait performance by reducing gait speed and stride length, indicating that visual limitations or perceptual changes caused by the HMD may alter gait strategy.

Keywords: Mixed Reality (MR), Head-Mounted Display (HMD), Gait variables, Joint range of motion

INTRODUCTION

최근 디지털 기술의 비약적인 발전은 인간의 삶 전반에 걸쳐 다양한 변화를 이끌어내고 있으며, 특히 정보통신기술의 고도화는 컴퓨팅 디바이스의 휴대성, 실시간성, 상호작용성을 강화시켜왔다. 그 중 웨어러블 디바이스(wearable device)는 사용자의 신체에 부착하여 정보를 수집하고 실시간으로 처리할 수 있는 기술 기반 전자기기로 스포츠, 산업안전, 문화생활, 교육 등의 분야에서 활용범위를 넓혀가고 있다(Dong, Lee & Song, 2019; Lee, 2018).

웨어러블 디바이스 중 헤드 마운티드 디스플레이(Head Mounted Display, HMD)는 양안 시야에 디지털 정보를 제공

Copyright © 2025 Korean Journal of Applied Biomechanics
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

함으로써 몰입형 가상환경을 구현하는 장비로, 초기에는 주로 폐쇄된 시야 내에서 가상의 정보를 전적으로 제공하는 방식으로 높은 몰입도를 가상현실(Virtual Reality, VR) 콘텐츠에 활용되었다. 그러나 최근 카메라와 위치 정보를 기반으로 한 증강현실(Augmented Reality, AR) 기술이 발전되면서 VR과 AR을 합친 혼합현실(Mixed Reality, MR) 기술과 결합되어 다양한 인터페이스 환경을 제공하고 있다(Kim, 2024). MR은 VR와 다르게 시야를 가리지 않고 장비 착용 후에도 카메라를 통해 외부 상황을 파악할 수 있으며, AR처럼 화면을 눈앞에 있는 사물과 그래픽을 함께 표현할 수 있게 되는 것이 특징이다(Kim, 2017; Yoo, 2018). 또한 착용시 양손이 자유로워 보행과 주위환경 대응의 장점으로 작업 효율성이 높고, 시선을 한곳에 집중시키지 않아도 되기 때문에 다른 일상생활과 병행할 수 있다는 장점이 있다고 알려져 있다(Park & Park 2016).

그러나 MR 기술이 적용된 HMD에 부착된 카메라로 주변을 인식할 수 있는 시야각은 실제 인간의 시야각인 수평 200°, 수직 130°에 비해 55-74% 정도인 가로 90-110°, 세로 90-96°로 맨눈으로 인식 가능한 시야에 비하여 매우 협소하다(Lee, 2016). 따라서 제품을 제공하는 회사에서는 HMD 착용 후 두통, 현기증, 눈과 시각 문제 등이 나타날 수 있으며, 카메라를 통해 주변을 볼 수 있지만 맨눈으로 관측하는 시야와 상이하기 때문에 평형감각 또는 보행 장애가 있는 경우 사용에 주의해야 한다고 제시하고 있다(Meta Platforms, 2024). 그럼에도 불구하고 최근에 MR 기술이 적용된 HMD 장비를 착용한 채 길을 걷거나 식사를 하는 일상생활뿐만 아니라 운전 등 외부 활동을 수행하는 사례가 매스컴을 통해 소개되면서 기기의 대중화가 예측되고 있지만, 선행연구들이 언급한 카메라를 통한 제한된 시야로 인해 발생할 수 있는 잠재적 위험성에 대한 구체적인 논의는 여전히 부족한 실정이다(Kim, 2024). 특히 이러한 시야 정보의 차이는 사용자의 공간 인식과 운동 제어 전략에 영향을 줄 수 있으며, 이는 보행과 같은 일상적이면서도 복합적인 운동 기능에서 더욱 뚜렷하게 나타날 수 있다고 생각되어진다.

일상생활에서 가장 흔하게 수행하는 보행은 시각, 전정, 고유감각계(proprioception) 등 다양한 감각 정보를 통합하여 실시간으로 자세를 조절하는 고차원적인 운동 제어 과정으로 일정한 주기(gait cycle)에 따라 신체분절들이 유기적으로 협응하는 고도의 운동 기능이다(Perry & Burnfield, 2024; Winter, 1995; Massion, 1994; Horak, 2006). 특히 시각 정보는 공간 지각과 운동 계획에 핵심적인 역할을 하며, 시야의 제약은 곧 보행 전략이나 균형 유지에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 실제로 HMD 착용을 통한 VR 콘텐츠를 체험하던 중 낙상, 충돌, 균형 손실 등의 사고가 보고되고 있으며(Yoon et al., 2020; Park, 2018; Han & Yi, 2020), 많은 연구자들은 보행 중 시각적 주의 자원을 차지하는 과제가 추가될 경우, 인지 부하 증가로 인해 보행 안정성이 더욱 감소할 수 있다고 보고하고 있다(Kramer, Larish & Strayer, 1995; Silsupadol, Siu, Shumway-Cook & Woollacott, 2006).

그러나 현재 대중적으로 인지도가 높아지고 있는 현실 공간을 카메라를 통해 인식할 수 있는 MR 기반 HMD를 착용한 상태에서의 안전성, 특히 보행 중 보행변수에 미치는 영향에 대해서는 실증적인 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 MR 기반 HMD 착용이 보행에 미치는 영향을 분석함으로써, 관련 기술의 실용화 및 사용자 안전 확보를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

METHODS

1. 연구대상

본 연구는 최근 6개월 이내 근골격계 손상 및 수술 이력이 없고, 교정시력 1.0 이상인 건강한 성인 남성 20명(신장: 172.5±5 cm, 체중: 73.2±8.3 kg, 나이: 28.1±2.4 yrs.)이 연구 대상자로 참여하였다. 본 연구는 K대학교 생명윤리위원회(IRB)의 승인을 받은 후(승인번호: 20240321-006), 연구 참여자에게 실험의 목적 및 절차에 대해 충분한 설명을 실시하였으며, 연구내용에 대하여 자발적으로 동의한 참여자들에 한하여 서면 동의서를 작성하고 연구에 참여하였다.

2. 실험절차 및 자료처리

본 연구의 목적을 수행하기 위하여 8대의 적외선 카메라(Kestrel 2200, Motion Analysis, 100 Hz)를 사용한 3차원 동작분석이 실시되었다. 실험 전 보행이 수행되는 가로 4 m, 세로 10 m 공간을 NLT (non-linear transformation) 방식으로 3차원 공간좌표계를 설정하였으며, 취득된 원자료(Raw data)는 Cortex 9.2 소프트웨어(Motion Analysis)를 통해 수집하였다.

피험자들은 일반 보행(normal gait: NG)과 MR 기술이 적용된 HMD (Meta Quest 3, Meta, USA) 착용 후 보행(wearing head mounted display gait: HMDG)을 실시하였으며, HMDG의 경우 HMD 착용 후 각 피험자의 두부 크기와 눈 간격에 맞게 조절하였다.

보행 중 피험자들의 신체분절 움직임을 규명하기 위하여 지름 2 cm 반사 마커 46개를 머리, 몸통, 골반, 상완, 전완, 대퇴, 하퇴 그리고 발 분절의 주요 해부학적 지점에 IOR Gait Full Body Model 및 Rab Upper Extremity Model을 참고하여 부착하였다(Leardini et al., 2007; Rab, Petuskey & Bagley, 2002). 이후 신체의 지역좌표를 설정하기 위하여 스텐딩 켈리브레이션을 실시한 후 실험을 진행하였다. 피험자들은 자신의 운동화를 착용한 후 정면을 향해 두 조건의 보행을 실

시하였으며, 보행속도는 피험자가 선호하는 속도로 수행하였다(Figure 1).

HMD 착용 시 초기 시각적 어색함과 보행 패턴의 적응을 고려하여 약 8분 이상 보행을 실시하였으며(Horsak et al., 2021), 각 조건에서 안정된 보행 패턴이 형성된 이후의 오른쪽 뒤꿈치가 지면에 처음 닿은 순간부터 다음 오른쪽 뒤꿈치가 접촉하는 시점까지의 한 스트라이드(stride)를 분석 구간으로 설정하였다. 실험 시 수집된 데이터는 MATLAB R2015a (The MathWorks), Visual3D (C-Motion)를 이용해 분석에 필요한 변인을 산출하였으며, 위치 데이터의 노이즈 제거를 위해 버터워스 2차 저역통과 필터(Second-order Butterworth low-pass filter)를 적용하였다. 이때 차단주파수(cutoff frequency)는 파워 스펙트럼 밀도(Power Spectral Density, PSD)의 99%를 포함하는 주파수로 설정하였으며, 모든 피험자의 PSD 범위는 4-5 Hz였으므로 5 Hz로 필터링 하였다.

3. 분석변인

두 보행 조건의 보행변수(스트라이드 길이(stride length), 스트라이드 폭(stride width), 보행속도(gait speed), 오른발 지지시간(stance phase time), 오른발 스윙시간(swing phase time), 양발 지지시간(double support time), 분당 스텝 수(cadence))와 운동학적 변수(하지관절, 목관절, 몸통분절의 가동범위(range of motion, RoM), 전신무게중심(whole body center of

Figure 1. Gait tasks under normal (NG) and wearing head mounted display conditions (HMDG).

Table 1. Gait variable comparison between NG and HMDG conditions

Variables	NG	HMDG	*t* (*p*)
	M ± SD		
Gait speed (m/s)	**1.32±0.13**	**1.28±0.15**	**2.098 (.050)***
Stride length (m)	**1.45±0.12**	**1.40±0.12**	**2.397 (.027)***
Stride width (m)	0.12±0.02	0.11±0.02	1.448 (.164)
Stance phase time (sec)	0.65±0.03	0.66±0.05	-1.765 (.094)
Swing phase time (sec)	0.44±0.02	0.44±0.01	1.942 (.067)
Double support time (sec)	0.21±0.03	0.22±0.05	-1.840 (.081)
Cadence (Frequency)	109.62±4.35	109.96±6.38	-.335 (.741)

*: significant difference between NG and HMDG (p<.05)
NG: normal gait, HMDG: wearing head mounted display gait

Table 2. Kinematic variables comparison between NG and HMDG conditions

Variables	NG	HMDG	*t* (*p*)
	M ± SD		
Ankle joint RoM (°)	36.20±3.84	37.02±4.66	-1.198 (.246)
Knee joint RoM (°)	82.81±4.46	82.94±4.65	-.130 (.898)
Hip joint RoM (°)	46.67±4.52	47.20±5.82	-.561 (.582)
Neck joint RoM (°)	5.53±2.72	4.31±1.68	1.853 (.079)
Sagittal trunk RoM (°)	5.64±1.52	5.38±1.37	.575 (.572)
Frontal trunk RoM (°)	15.18±2.33	14.09±1.80	1.835 (.082)
M-L WCoM RoM (cm)	4.01±1.26	3.76±1.39	.660 (.517)

NG: normal gait, HMDG: wearing head mounted display gait

mass, WCoM)의 좌우 이동범위)를 분석변인으로 설정하였다. 구체적으로 스트라이드 길이는 오른쪽 발뒤꿈치가 지면에 접촉하는 시점부터 동일한 발이 지면에 다시 접촉하는 시점 간의 전후 변위를 기준으로 산출하였으며, 스트라이드 폭은 오른발과 왼발의 뒤꿈치가 지면에 닿는 순간 두 마커의 좌우 변위로 산출하였다. 또한 보행속도는 스트라이드 길이를 소요시간으로 나누어 산출하였으며, 오른발 지지시간은 오른발 뒤꿈치가 지면에 닿은 순간부터 발이 지면에서 떨어질 때까지, 스윙시간은 오른발이 지면에서 떨어진 순간부터 다시 지면에 닿을 때까지의 시간으로 산출하였다. 양발 지지시간은 양발이 동시에 지면에 닿아 있는 시간으로, 본 연구에서는 오른발 뒤꿈치 접촉 시점부터 왼발이 이탈하는 시점까지로 산정하였다. 분당 스텝 수(cadence)는 분당 걸음 수를 의미하며, 60을 오른발 스텝시간으로 나누어 계산하였다. 하지관절 RoM은 스트라이드 구간 동안 시상면(sagittal plane)에서 발생한 관절 각도의 최대값과 최소값의 차이로 산출하였다. 발목관절 RoM은 하퇴분절 기준 발 분절의 최대 배측굴곡(dorsiflexion) 각도에서 최대 저측굴곡(plantarflexion) 각도를 뺀 값으로 정의하였으며, 무릎 및 엉덩관절 RoM은 근위분절 기준 원위분절의 최대 굴곡(flexion) 각도에서 최대 신전(extension) 각도를 뺀 값으로 정의하였다. 목관절 RoM은 몸통분절 기준 머리분절 회전 각도로 스트라이드 구간 동안 시상면(sagittal plane) 최대 굴곡(flexion) 각도에서 최대 신전(extension) 각

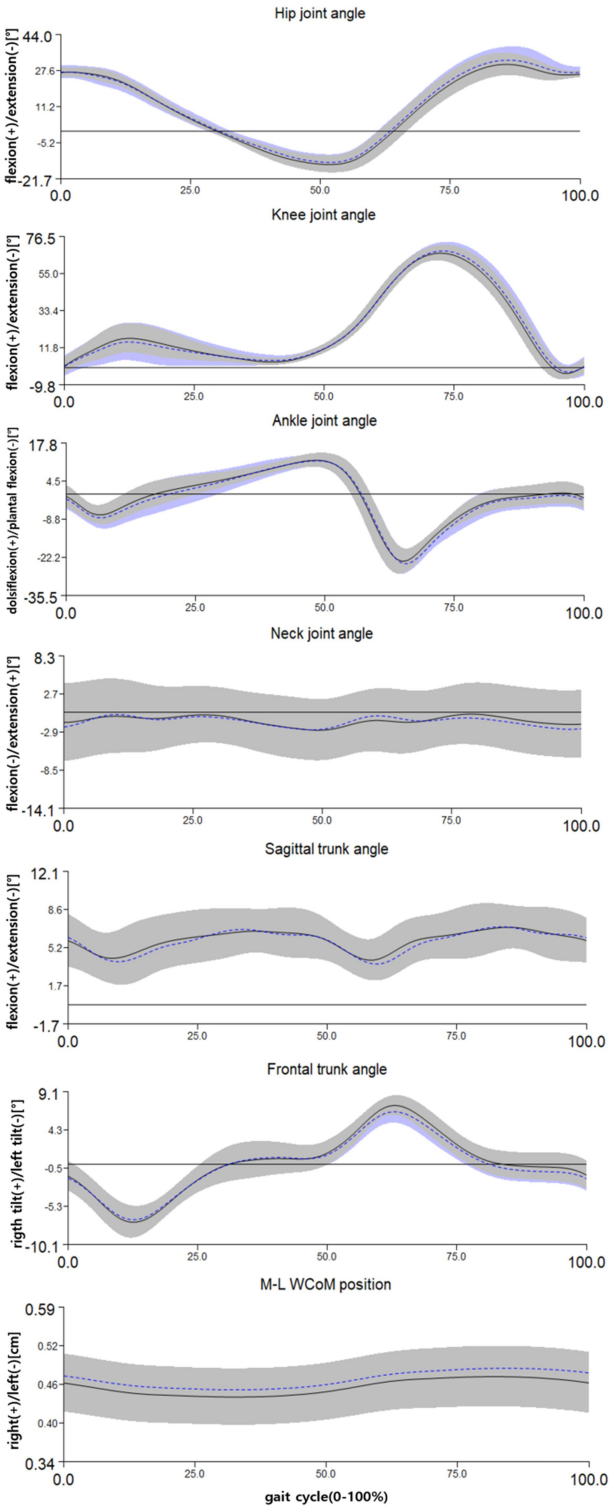

Figure 2. Kinematic variables during the gait cycle under NG and HMDG conditions. The solid black line represents the NG condition, and the blue dashed line represents the HMDG condition.

도를 뺀 값으로 정의하였다. 몸통분절 RoM은 전역좌표를 기준 몸통분절 회전 각도이며, 스트라이드 구간 동안 시상면(sagittal plane), 관상면(frontal plane)에서 발생한 분절 각도의 최대값과 최소값의 뺀 값으로 정의하였다. WCoM 좌우 이동범위는 De Leva (1996)을 참고하여 WCoM 위치를 산출한 후, 스트라이드 구간 동안 나타난 좌우 WCoM 위치의 최대값과 최소값의 뺀 값으로 정의하였다.

4. 통계처리

연구는 MR 기반 HMD 착용이 보행에 미치는 영향을 분석하기 위해 두 가지 보행 조건(NG, HMDG) 간에 대응표본 T 검정(Paired-samples *t*-test)을 수행하였으며, 이때 통계적 유의수준은 α=.05로 설정하였다.

RESULTS

본 연구 결과 HMDG가 NG에 비하여 통계적으로 유의하게 감소된 보행속도와 짧아진 스트라이드 길이를 나타내었다(p<.05, Table 1). 그러나 그 외의 변인들에서는 두 조건 사이의 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다(p>.05, Table 1, Table 2, Figure 2).

DISCUSSION

본 연구는 MR 기반 HMD 착용이 보행에 미치는 영향을 분석하기 위해 HMD 착용 후 보행 조건(HMDG)과 일반 보행 조건(NG) 간 보행변수와 운동학적 변인(하지관절, 목관절, 몸통 각도, WCoM 좌우 이동범위)를 비교하였다. 분석 결과, HMDG 조건에서 보행속도(gait speed)와 스트라이드 길이(stride length)가 NG 조건에 비해 유의하게 감소하였다(p<.05; Table 1).

MR 기술이 적용된 HMD는 장비를 착용하고도 카메라를 통해 외부환경을 시각적으로 인식할 수 있도록 설계되어 있으나, 본 연구에 사용된 HMD는 실제 인간의 자연 시야인 수평 약 200˚, 수직 약 130˚의 시야각에 비해 좁은 수평 110˚, 수직 96˚이며, 영상이 디스플레이에 출력되기까지 약 20-40 ms의 지연(latency)이 발생할 수 있다(Jerald, 2015; Lee, 2016). 이러한 시야각 제한과 시간 지연은 시각 자극 처리 및 운동 반응 통합(sensorimotor integration)에 미세한 영향을 줄 가능성이 있으며(Ha, 2020; Meehan, Insko, Whitton & Brooks, 2003), 시각 정보의 변화로 인해 보행 전략이 미세하게 조정될 가능성이 있다고 할 수 있다. 본 연구에서도 HMDG 조건에서 보행속도와 스트라이드 길이가 NG 조건보다 유의하게 감소하였으며, 이는 시각 정보의 제한에 따른 보수적 보행 전략(conservative gait strategy)의 일부로 해석될 수 있을 것으로 생각된다(Menz, Lord & Fitzpatrick, 2003; Patla, 1997).

다만, 본 연구에서 관찰된 보행속도와 스트라이드 길이 차이는 약 4% 미만으로, 운동학적 측면에서 실질적인 변화로써는 미미한 수준으로 해석할 수도 있으며, 이러한 결과는 스트라이드 폭, 지지 및 스윙시간, 분당 스텝 수(cadence)와 운동학적 변인 간 유의한 차이가 나타나지 않았다는 결과와도 일관된 경향을 보인다(p>.05; Table 1, Table 2). 이러한 결과는 시각의 제한이 운동학적 변인들의 차이를 유발한다는 선행연구들과는 상이한 결과이며(Hallemans et al., 2009a; Hallemans et al., 2009b; Iosa, Fusco, Morone & Paolucci, 2012), 이는 HMD 착용이 보행속도 및 스트라이드 길이에는 영향을 미쳤으나, 보행 안정성에 큰 영향을 미치는 몸통과 목의 움직임에도 유의한 변화가 없었다는 점은 전신 자세 제어 및 균형 유지의 수준에는 실질적인 저하를 초래하지 않았음을 시사한다(Kavanagh, Barrett & Morrison, 2006). 따라서 본 연구에서 사용된 MR 기술이 적용된 HMD 장비 착용은 일부 시각 정보 제한이 발생하지만 정면 시야 정보를 인식할 수 있어 보행 안정성에 영향을 줄 만큼의 영향을 미치지 않았을 것으로 생각되며, 젊고 건강한 20대의 연구 대상자들이 보행을 수행하였기 때문에 미미한 시각 정보의 변화로는 보행조건 간의 차이가 나타나지 않는 것으로 판단된다.

결론적으로 MR 기반 HMD 착용이 보행에 미치는 영향을 분석한 결과 HMDG가 NG에 비하여 스트라이드 길이를 줄여 속도를 줄이는 보행 전략이 나타남을 확인하였으나 그 밖의 보행변수와 운동학적 변인에서 유의한 차이를 나타내지 않았다. 최근 MR 기술이 적용된 HMD 장비를 착용한 채 길을 걷거나 식사를 하는 등 일상적인 외부 활동을 수행하는 사례가 늘어나고 있는 만큼(Kim, 2024), 일반 사용자의 위험성을 파악하고 안전 확보의 필요성을 알아보기 위해 본 연구를 수행하였다. 그러나 본 연구 결과만으로는 실제 HMD 착용이 보행 중 어떠한 잠재적 위험을 초래할 수 있는지를 명확히 제시하기 어렵다 판단되며, 보다 다양한 환경과 조건을 고려한 후속 연구가 필요하다고 생각된다. 또한, 본 연구는 20대의 젊고 건강한 피험자를 대상으로 추가 과제 없이 보행만을 수행한 제한된 조건에서 이루어졌기 때문에, 향후 연구에서는 다양한 연령층과 복합적인 과제를 포함하여 보다 현실적인 상황에 적용 가능한 결과를 도출할 필요가 있다.

CONCLUSION

본 연구에서는 연구는 MR 기반 HMD 착용이 보행에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, HMD 착용 시 보행속도와 스트라이드 길이가 유의하게 감소하는 결과를 나타내었으나, 다른 보행변수와 운동학적 변인에는 유의한 차이가 나타나

지 않았다. 이는 HMD 사용이 일부 보행 패턴을 유발하지만 운동학적인 변화로 보행 안정성에 감소를 줄 만큼의 영향은 미치지 않는 것으로 나타났다. 향후 MR 기술이 적용된 HMD 장비 사용에 따른 위험성과 안전 확보 방안을 보다 명확히 규명하기 위해, 다양한 환경과 과제를 포함한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF-2024S1A5B5A17040628).

REFERENCES

De Leva, P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, *29*(9), 1223-1230.

Dong, J., Lee, C. & Song, Y. (2019). Trends in user experience analysis of smart wearable devices. *The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences*, *36*(4), 3-9.

Ha, S. (2020). Effects of participation in contact sports on neurocognitive scores and dual-task walking in retired athletes. *Korean Journal of Applied Biomechanics*, *30*(3), 265-273.

Hallemans, A., Beccu, S., Van Loock, K., Ortibus, E., Truijen, S. & Aerts, P. (2009a). Visual deprivation leads to gait adaptations that are age-and context-specific: I. Step-time parameters. *Gait & Posture*, *30*(1), 55-59.

Hallemans, A., Beccu, S., Van Loock, K., Ortibus, E., Truijen, S. & Aerts, P. (2009b). Visual deprivation leads to gait adaptations that are age-and context-specific: II. Kinematic parameters. *Gait & Posture*, *30*(3), 307-311.

Han, H. S. & Yi, J. (2020). Lumbar spine fracture secondary to a virtual reality game: A case report. *Journal of Korean Society of Spine Surgery*, *27*(4), 147-151.

Horak, F. B. (2006). Postural orientation and equilibrium: What do we need to know about neural control of balance to prevent falls?. *Age and Ageing*, *35*(suppl_2), ii7-ii11.

Horsak, B., Simonlehner, M., Schöffer, L., Dumphart, B., Jalaeefar, A. & Husinsky, M. (2021). Overground walking in a fully immersive virtual reality: A comprehensive study on the effects on full-body walking biomechanics. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *9*, 780314.

Iosa, M., Fusco, A., Morone, G. & Paolucci, S. (2012). Effects of visual deprivation on gait dynamic stability. *The Scientific World Journal*, *2012*(1), 974560.

Jerald, J. (2015). *The VR book: Human-centered design for virtual reality*. Morgan & Claypool.

Kavanagh, J., Barrett, R. & Morrison, S. (2006). The role of the neck and trunk in facilitating head stability during walking. *Experimental Brain Research*, *172*(4), 454-463.

Kim, H. (2017). The current status and development direction of mixed reality content. *Cartoon and Animation Studies*, *46*, 181-206.

Kim, S. (2024, February 10). A personal theater worth 4.6 million won... Will Apple Vision Pro become a game changer? *Kyunghyang Newspaper*. https://m.khan.co.kr/economy/market-trend/article/202402100800001

Kramer, A. F., Larish, J. F. & Strayer, D. L. (1995). Training for attentional control in dual task settings: A comparison of young and old adults. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *1*(1), 50.

Leardini, A., Sawacha, Z., Paolini, G., Ingrosso, S., Nativo, R. & Benedetti, M. G. (2007). A new anatomically based protocol for gait analysis in children. *Gait & Posture*, *26*(4), 560-571.

Lee, J. (2018). VR system environment technologies and user input elements. *Journal of the Korean Society Design Culture*, *24*(2), 585-596.

Lee, H. (2016). Visual acuity, color, and fields. *The Korean Society of Neuro-Ophthalmology*, *6*(2), 77-80.

Massion, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, *4*(6), 877-887.

Meehan, M., Insko, B., Whitton, M. & Brooks, F. P. (2003). Physiological reaction as an objective measure of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, *12*(5), 538-549.

Menz, H. B., Lord, S. R. & Fitzpatrick, R. C. (2003). Age-related differences in walking stability. *Age and Ageing*, *32*(2), 137-142.

Meta Platforms, Inc. (2024). *Oculus Rift health and safety warnings*. Retrieved June 9, 2025, from https://www.oculus.com/legal/health-and-safety-warnings/

Park, H. & Park, S. (2016). Effects of smart-phone use on gait biomechanics and auditory cognition. *Journal of Sport and Leisure Studies*, *64*, 783-795.

Park, S. (2018, June 1). 'Dizziness, falls, collision accidents'... VR experience center safety 'caution'. *Herald Economy*. http://news.heraldcorp.com/view.php?ud=20180601000111

Patla, A. E. (1997). Understanding the roles of vision in the

control of human locomotion. *Gait & Posture*, *5*(1), 54-69.

Perry, J. & Burnfield, J. (2024). *Gait analysis: Normal and pathological function*. CRC Press.

Rab, G., Petuskey, K. & Bagley, A. (2002). A method for determination of upper extremity kinematics. *Gait & Posture*, *15*(2), 113-119.

Silsupadol, P., Siu, K. C., Shumway-Cook, A. & Woollacott, M. H. (2006). Training of balance under single-and dual-task conditions in older adults with balance impairment. *Physical Therapy*, *86*(2), 269-281.

Winter, D. A. (1995). Human balance and posture control during standing and walking. *Gait & Posture*, *3*(4), 193-214.

Yoo, B. (2018). Overview of virtual reality, augmented reality, and mixed reality. *Journal of Korea Robotics Society*, *15*(4), 3-7.

Yoon, S., An, H., Ahn, T., Choi, H., Lee, B., Seo, D., Lee, K., Jung, S. & Yi, J. (2020). Performance evaluation of balance measurement ability equipment using VR. *Journal of The Korean Society of Integrative Medicine*, *8*(3), 33-41.