

Moment Controller: VR Controller raises Awareness of the Difference in Weight between Virtual Objects

Huhn Kim¹, Miseon Baek^{2*}

¹Department of Mechanical System Design Engineering, Professor, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

²Department of Design and Engineering, Student, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

Abstract

Background Existing VR controllers provide vibration feedback, including visual and auditory stimuli, to users who interact with virtual objects. However, these alone have limitations in delivering the realistic sense of weight to the users when interacting with virtual objects of different weights, which requires improvement.

Methods Based on the threshold experiment on weight perception, this study designed and implemented the moment controller, a device that can deliver weight, and developed a VR game to compare the weight of virtual objects on both arms scales. In addition, five different situations were classified, including the appearance of a virtual object, the difference in weight, and whether the expected weight and actual weight of the virtual object were matched. An experiment was conducted to evaluate the usefulness of the moment controller by performing the two-arm scale game in each of the five situations.

Results The results of the experiment showed that participants felt more realistic when they felt the weight matching the visual appearance of a virtual object, and unrealistic when they felt the opposite weight. In particular, the task resulted in the longest time under the opposite weight. In addition, the enjoyment score was highest when the weight matching the appearance of the virtual object was applied.

Conclusions The moment controller has shown the potential to increase the sense of weight perception to users interacting with virtual objects, and is expected to enhance the sense of immersion of users experiencing virtual environments.

Keywords VR Controller, Weight Difference Threshold, Moment Variation, Augmented Weight Perception

This work has been conducted with the support of the “Project for Nurturing Advanced Design Professionals” initiated by the Ministry of Trade, Industry and Energy of the Republic of Korea, and was published based on Master’s thesis of the corresponding author in Seoultech 2020.

*Corresponding author: Miseon Baek (pebble100@gmail.com)

Citation: Kim, H., & Baek, M. (2021). Moment Controller: VR Controller raises Awareness of the Difference in Weight between Virtual Objects. *Archives of Design Research*, 34(2), 133-151.

<http://dx.doi.org/10.15187/adr.2021.05.34.2.133>

Received : Nov. 05. 2020 ; **Reviewed :** Apr. 11. 2021 ; **Accepted :** Apr. 11. 2021

pISSN 1226-8046 **eISSN** 2288-2987

Copyright : 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 educational and non-commercial use, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 들어 몰입 경험(Immersive experience)이 크게 주목받고 있다. 몰입 경험 기술이란 대화형 플랫폼, 가상현실(Virtual reality, VR), 증강현실(Augmented reality), 혼합현실(Mixed reality, MR) 등 기술의 발전된 형태로 디지털 환경에서의 경험을 실제처럼 사용자가 느끼게 하는 기술을 의미한다. 파네타(Panetta, 2019)는 가장 증강 혼합현실 기술이 발달함에 따라 사람들이 디지털 세계를 인식하고 상호작용하는 방식이 변화하면서 다양한 몰입형 사용자 경험(User experience, UX)이 가능하게 될 것이라 예측했다.

VR은 몰입 경험을 제공하는 대표적인 기술로서 현실 세계를 가상 세계에 시각적으로 투영하여 응용하는 양상을 보인다. 이는 시각적 감각 외에 인간이 느끼는 다른 감각(청각, 촉각)에 있어서도 마찬가지이다. 특히 사람들은 가상환경(Virtual environment, VE)에서 가상물체의 물성에 부합하는 촉각적 감각을 그대로 전달받기를 기대한다. 현재 판매되고 있는 VR 기기들은 시·청각 감각을 제공하는 HMD(Head mounted display) 외에, 신체에 작용하거나 접촉하는 방식으로 보다 섬세하게 VR 환경과의 상호작용을 돋는 VR 보조기기를 제공한다. 이러한 VR 보조기기들은 주로 손에 쥐는 방식인 핸드헬드(Hand-held) 형태를 취하고 있다. 대표적으로 HTC사의 VIVE 컨트롤러, Oculus Touch 컨트롤러, PlayStation의 Move 모션 컨트롤러, Microsoft의 Windows MR 컨트롤러 등이 있다(Figure 1). 그러나 이런 보조기기들은 가상물체와의 인터랙션 시 진동을 이용한 단순 햅틱(Haptic) 피드백만을 제공하고 있어 가상물체의 촉감을 현실감 있게 전달하는 데 한계가 있다. 따라서 가상현실의 미래 방향인 HR(Hyper reality; 파가니(Pagani, 2008))로 나아가기 위해서는 몰입감 향상을 위한 다양한 감각 전달에 대한 연구가 필요하다.



Figure 1 Existing VR controllers (From left to right: HTC VIVE controller, Oculus touch controller, PlayStation move motion controller, Microsoft Windows MR controller)

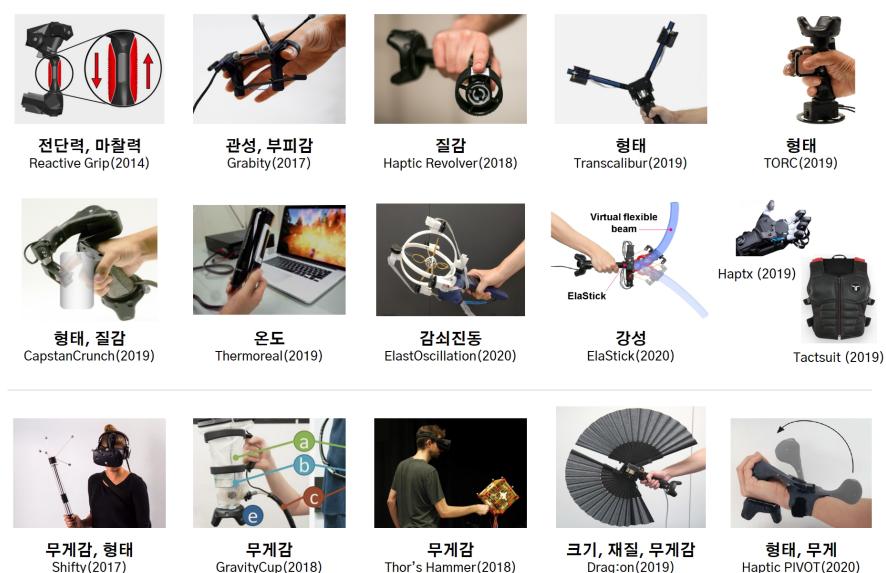


Figure 2 VR assistive devices for delivering various haptic senses

가상환경에서 사용자가 경험하는 현실감을 높이고자 가상물체의 질감, 부피, 온도, 형태에 대한 감각을 증강시키기 위한 많은 연구들이 진행되었다(Figure 2). 프로우번처(Provancher, 2014)의 Reactive Grip은 컨트롤러 손잡이 표면에 위치한 슬라이딩 플레이트가 상하로 움직이며 사용자의 손에 가상물체와 상호작용 시 느껴지는 전단력(Shear)과 마찰력을 전달하고자 하였다. 한편, 쇠, 컬버트슨, 밀러, 올왈, 폴머(Choi, Culbertson, Miller, Olwal & Follmer, 2017)의 Grability는 컨트롤러와 닿은 피부면을 변형시켜 관성이나 부피감을 인지하게 하였다. 휘트미어, 벤코, 홀츠, 오페, 싱클레어(Whitmire, Benko, Holz, Ofek & Sinclair, 2018)는 가상물체의 표면 질감을 전달하는 장치인 Haptic Revolver를 개발하였다. 가상물체를 손으로 터치하면 사용자의 검지 손끝에 접촉된 훨이 다양한 속도로 회전하면서 가상물체의 표면 질감을 느끼게 해준다. 시게야마, 하시모토, 요시다, 나루미, 타니카와, 히로세(Shigeyama, Hashimoto, Yoshida, Narumi, Tanikawa & Hirose, 2019)는 두 축의 무게 추가 달린 팔의 각도와 무게추의 위치 변화를 이용하여 가상물체의 형태 인지를 돋는 Transcalibur란 장치를 개발하였다. 리, 싱클레어, 곤살레스-프랑코, 오페, 홀츠(Lee, Sinclair, Gonzalez-Franco, Ofek & Holz, 2019)의 TORC는 손가락으로 가상물체를 쥐고 상호작용할 때 가상물체의 형태에 대한 햅틱 감각을 증강시켜준다. 비슷하게 싱클레어, 오페, 곤살레스-프랑코, 홀츠(Sinclair, Ofek, Gonzalez-Franco & Holz, 2019)의 CapstanCrunch는 가위, 베른, 공과 같은 가상물체를 손에 쥐고 조작할 때의 햅틱 피드백을 제공해준다. 테그웨이사(TEGway, 2019)의 온도실감장치 Thermoreal은 유연열전소자를 통해 사용자가 온감 및 냉감을 빠르게 느낄 수 있게 해준다고 한다. 차이, 흥, 우, 첸(Tsai, Hung, Wu & Chen, 2020)은 와인 잔을 흔들거나 낚싯대를 던지는 상황 등에서 생기는 감쇠진동을 느끼게 해주는 ElastOscillation이란 컨트롤러를 제안하였다. 류, 이, 김, 비앙치(Ryu, Lee, Kim & Bianchi, 2020)는 여러 강성을 가진 유연한 가상물체(예. 고무막대, 펜싱검)를 흔들거나 휘두를 때의 느낌을 제공해주는 ElaStick을 개발하였다. 이 외에도 전신이나 팔에 작용하여 감각을 확장시키거나 감각을 매우 섬세하게 전달하는 텍트수트(Tactsuit, 2019)나 햅트엑스(Haptx Glove, 2019) 등이 있다.

특히 일부 연구들은 가상물체의 무게감을 현실감 있게 느끼도록 지원하는 VR 보조기기에 초점을 맞추었다(Figure 2). 제너, 크뤼거(Zenner & Krüger, 2017)가 개발한 Shifty는 수직관 내부 무게추의 상하 이동을 통해 가상물체의 형태와 무게에 대한 사용자의 인지를 강화시키고자 하였으며, 청, 장, 천, 린, 황, 한, 고, 리(Cheng, Chang, Chen, Lin, Huang, Han, Ko & Lee, 2018)가 제안한 GravityCup은 장치 내부의 액체를 이동시켜 사용자에게 동적인 중량감을 제공하였다. 허, 정, 리, 위그도르(Heo, Chung, Lee & Wigdor, 2018)의 Thor's Hammer는 3축의 프로펠러 회전으로 발생하는 힘 피드백을 이용하여 사용자에게 무게감을 전달하였다. 또한, 제너, 크뤼거(Zenner & Krüger, 2019)는 두 개의 부채를 이어붙인 모양의 Drag:on이란 VR 컨트롤러를 제안하였다. Drag:on은 두 개의 부채가 펼쳐진 정도를 조절하여 팔을 휘두를 때의 공기저항과 무게를 이용하여 가상물체의 크기, 재질, 무게감을 증강시키는 효과를 준다. 코박스, 오페, 곤살레스 프랑코, 쉬, 마르베키, 홀츠 & 싱클레어(Kovacs, Ofek, Gonzalez Franco, Siu, Marwecki, Holz & Sinclair, 2020)는 공이나 과일과 같은 가상물체를 움켜쥐고, 던지고, 잡을 때 물체의 크기, 형태, 무게에 대한 햅틱 감각을 제공하는 Haptic PVOT란 컨트롤러를 개발하였다. 한편, 리에츨러, 가이젤하트, 구겐하이머, 루키오(Rietzler, Geiselhart, Gugenheimer & Rukzio, 2018)는 손에 쥐어지는 가상물체의 시각적 피드백 속도도 가상물체의 무게 인지에 영향을 미칠 수 있음을 보였다. 하지만 이러한 연구들은 핸드헬드형 컨트롤러가 가져야 할 경량성이나 인간 중심적 형태와는 거리가 있거나 범용적인 활용이 어렵다는 한계가 있었다. 본 연구에서는 이러한 한계점을 극복하고자 가상물체에 대한 무게 인지를 보다 향상시킬 수 있는 핸드헬드형 VR 보조기기의 개념을 제안하였고, 프로토타입을 개발하여 그 유효성을 검증하고자 하였다.

2. Moment VR Controller

모멘트(Moment)는 본 연구에서 제안하는 무게 인지가 가능한 VR 컨트롤러의 핵심 개념이다. 이에 컨트롤러의 이름을 모멘트 컨트롤러라 불렀다. 모멘트는 일반적으로 회전력, 물체를 회전시키기 위한 힘의 작용을 의미하며, 그 크기는 축에서 힘의 작용점까지의 직선거리에 해당하는 모멘트 팔(r)의 크기에 비례한다. 즉, 인간은 Figure 3과 같이 바벨을 들고 있을 때 (a)처럼 원판이 몸에 가까이 있는 상태보다 (b)의 상태와 같이 원판이 몸에서 멀리 위치해 있을 때 더 무겁고 힘들게 느낀다.

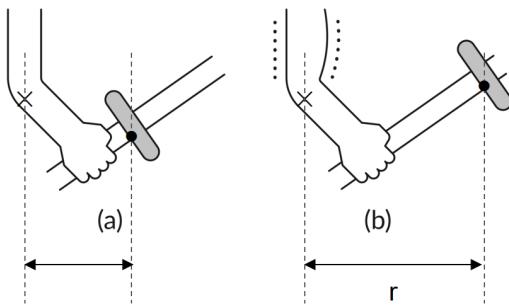


Figure 3 Force required depending on the disc position of the barbell

VR 콘텐츠를 경험할 때, 사용자들은 가상물체를 잡고, 휘두르고, 쏘고, 던지며, 타격하는 등 주로 컨트롤러를 든 양팔의 회전 움직임을 통해 많은 태스크를 수행한다. 이러한 동작들의 주요 회전축이 팔꿈치 관절(Figure 3의 × 표시)이고 힘의 작용선은 컨트롤러의 무게 중심에서 중력 방향으로 확장되어 뻗은 선이기 때문에 사용자의 자세나 장치의 무게 중심에 따라 모멘트 팔의 길이(Figure 3의 r)가 달라진다. 따라서 의도적으로 컨트롤러의 무게부(예. Figure 3의 바벨)를 이동시켜 컨트롤러의 무게 중심을 변화시키면 사용자가 느끼는 무게감에 변화를 줄 수 있다. 본 연구에서 제안한 모멘트 컨트롤러는 이와 같은 모멘트의 개념과 원리를 바탕으로 하였다.

무게감 인지를 위한 다른 컨트롤러들은 액체 이동, 프로펠러의 회전력, 모터의 압력, 부채의 공기저항 등을 활용했다는 점에서 모멘트 컨트롤러와는 원리상 차이가 있다. 반면, 모멘트 컨트롤러는 고체인 무게주 이동을 이용한다는 점에서 제너, 크뤼거(Zenner & Krüger, 2017)의 Shifty와는 원리가 유사하다. 하지만 모멘트 컨트롤러는 모멘트를 보다 효과적으로 사용자에게 전달하기 위해 총과 같이 꺾인 형태로 디자인된 점에서 차이가 있다. 총 모양으로 디자인한 이유와 꺾인 각도의 결정에 대해서는 선행 연구인 백미선, 김현(2020)에 언급되어 있다. 동일한 모멘트 크기를 기준으로 막대형인 Shifty는 꺾인 형태인 모멘트 컨트롤러보다 더 많은 무게부 이동을 필요로 한다. 또한, 총 모양의 형태 및 그에 맞는 추 이동 구조에 의해 모멘트 컨트롤러는 상대적으로 더 짧고 가볍게 만들어졌으며, 추의 이동거리가 상대적으로 짧기 때문에 추 이동에 걸리는 반응시간이 보다 빠르다.

2. 1. 적절한 컨트롤러의 형태 및 디자인 이슈

본 연구에 앞서 모멘트를 활용한 무게감 증강 VR 컨트롤러의 디자인과 무게부의 등간격 배치 여부에 대한 선행연구를 수행하였다. 백미선, 김현(Baek & Kim, 2020)은 막대 형태보다는 Figure 4와 같은 총 모양의 꺾인 형태가 보다 효율적으로 모멘트를 전달할 수 있으며, 꺾인 부위의 각도는 135° 가 적절함을 제안하였다. 또한, 무게부의 정지 위치 간격은 일정하게 등간격으로 구성해도 무게차 인지에 큰 영향을 미치지 않음을 보였다. 즉, 무게부의 이동거리 d 를 일정하게 해도 됨을 보였다. 하지만 실질적인 무게감 증강을 위한 VR 컨트롤러를 개발하기 위해서는 Figure 4와 같이 무게의 단계(N), 전체 컨트롤러 무게 대비 움직이는 무게부의 비중(w), 그리고 무게부의 이동거리(d)에 대한 결정이 필요하였다.

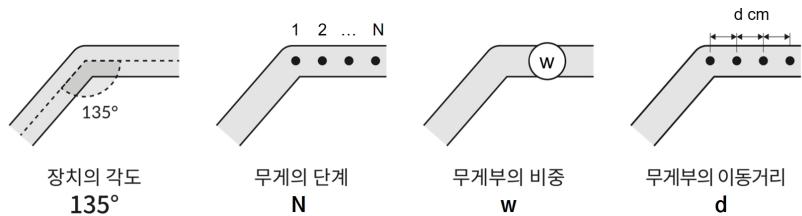


Figure 4 Design variables for developing the moment controller

2. 2. 무게의 단계 (N)

본 연구에서 제안하는 모멘트 컨트롤러는 가상물체의 실제 무게 그대로를 사용자에게 전달하는 것이 아닌 가상물체 간의 무게차를 인지하게 하여 무게감을 높여준다. 따라서 개발할 컨트롤러에서 무게차를 몇 단계까지 제공할지에 대한 결정이 필요하다. 이에 본 연구에서는 사람들이 생각하는 게임 속 가상물체들의 무게에 대한 인식을 카드소팅(Card sorting)으로 조사하여 적절한 무게 단계 수를 결정하고자 하였다.

2. 2. 1. 조사 방법

20~30대 대학원생 및 직장인 10명에게 Figure 5와 같이 가상물체 그림카드를 가지고 다음의 두 단계 테스크를 수행하게 하였다: ① 서로 유사한 무게라고 생각되는 물체끼리 자유롭게 그룹 짓기, ② 최소한의 그룹 수로 다시 그룹 짓기(1단계와 동일한 결과도 허용). 제시한 그림카드(예. 동전, 권총, 겸, 수류탄, 봇 등)는 대표적인 VR 콘텐츠 마켓인 Oculus와 Steam VR의 상위 콘텐츠들에 자주 등장하는 가상물체 32종으로 구성하였는데, 충분한 구성인지를 확인하기 위해서 선정한 콘텐츠 외의 다른 콘텐츠들 속 가상물체들도 폭넓게 접觸하였다.



Figure 5 The participant in the card sorting

2. 2. 2. 결과 및 고찰

Table 1은 카드소팅의 결과이며, 이를 카드소팅 툴인 xSort(1.6.1)에 넣어 분석한 클러스터 트리(Cluster tree)는 Figure 6과 같았다. 참여자들은 무게가 비슷한 물체끼리 그룹 짓는 1단계 테스크에서는 평균 7 그룹으로, 최소한의 그룹 수로 나누는 2단계 테스크에서는 평균 4.4 그룹으로 물체들을 나누었다. 일반적으로 32종의 모든 물체들이 하나의 게임 콘텐츠에 동시에 포함되는 경우는 없기 때문에 개별 콘텐츠별(Table 1의 A~D)로 몇 단계의 무게 그룹으로 구분된 것인지를 추가로 정리하였다. 개별 콘텐츠는 32종의 가상물체를 선정했던 VR 게임 중 상대적으로 많은 물체들이 등장하는 게임 4개로 선정하였다.

개별 콘텐츠별 무게 그룹 수를 보자면 1단계는 평균 3.775, 2단계는 평균 2.975단계였다. 즉, 사람들은 대략 자주 등장하는 가상물체들의 무게를 3~4개 정도의 구분으로 생각한다는 것이다. 이를 보면, 가상물체 간 무게감 구분은 4단계 정도의 무게 감각을 전달하는 것이 적절하며, 최소 3단계 이상의 무게감 구분이 필요함을

알 수 있었다. 이는 위킨스, 이, 리우, 고든-베커(Wickens, Lee, Liu & Gordon-Becker, 2003)에 나오는 5개 이상의 절대판단(Absolute judgement)은 좋지 못하다는 인간공학 가이드라인에도 부합한 수준 수이다.

Table 1 Results of the card sorting

실험 참여자	1 단계					2 단계				
	전체	A	B	C	D	전체	A	B	C	D
P1	11	6	5	3	3	6	5	3	3	3
P2	4	4	3	3	4	4	4	3	3	4
P3	9	4	4	4	4	3	2	3	2	3
P4	3	3	3	2	3	3	3	2	3	3
P5	7	6	4	4	3	6	5	3	4	3
P6	6	3	3	3	3	4	3	3	2	2
P7	7	5	4	3	4	2	2	2	2	2
P8	6	6	3	3	3	4	4	3	2	3
P9	10	7	2	3	4	8	5	2	3	4
P10	7	5	3	4	5	4	3	3	2	3
Mean	7	4.9	3.4	3.2	3.6	4.4	3.6	2.8	2.5	3
		3.775					2.975			

A: Five Nights at Freddy's VR

B: Blade & Sorcery

C: Vacation Simulator

D: Job Simulator

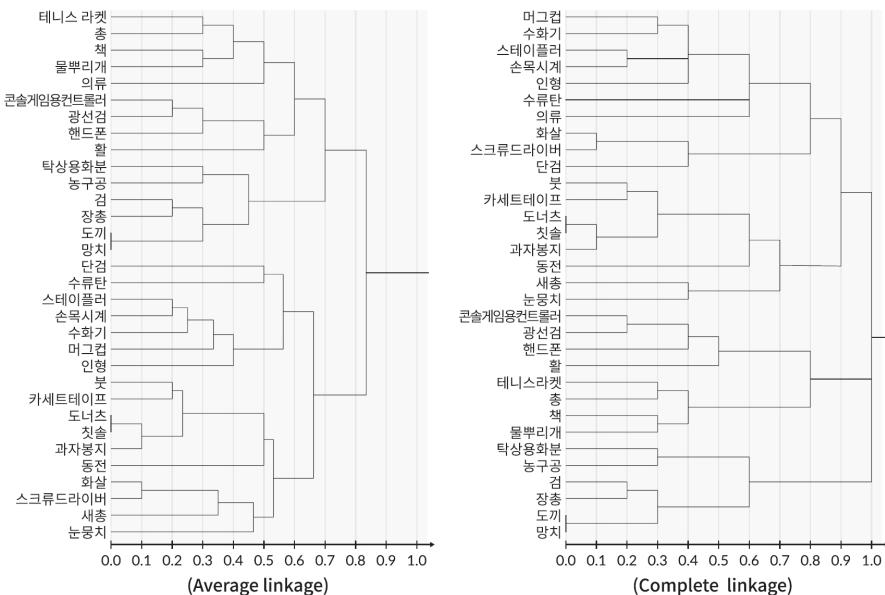


Figure 6 Cluster trees of Phase 2 data in the card sorting

2. 3. 무게감 인지의 역치 (D)

모멘트 컨트롤러의 무게 단계별 무게감 차이를 사용자에게 전달하려면, 사용자가 무게차를 인지할 수 있는 최소 자극 크기를 알아야 한다. 따라서 본 연구에서는 컨트롤러의 기준점으로부터 무게부의 거리가 얼마나 멀어져야 사람들이 무게감 차이를 느끼는지를 알아보기 위한 역치 실험을 수행하였다. 실험의 방법은 일반적으로 인간의 자극 탐지와 관련된 폐이사바디, 스트라우베, 폴게라이터, 키르흐너, 김, 알비에스(Feyzabadi, Straube, Folgheraiter, Kirchner, Kim, Albiez, 2013), 정(Hung, 2018), 로베르토,

베크벡, 야나트라, 아드수밀리, 포사드(Roberto, Birkbeck, Janatra, Adsumilli, Frossard, 2019)와 같은 연구들에 쓰인 역치 실험 방법을 활용하였다.

2. 3. 1. 실험 참여자 및 환경

실험에는 20~40대 남녀 32명(남 16, 여 16)이 참여하였다. 실험 참여자들은 눈을 가리고 앉은 상태에서 양손에 물체를 들고 무게를 비교하는 양손 실험(양손 그룹) 또는 주로 사용하는 한 손만으로 두 물체를 번갈아 들어보면서 무게를 비교하는 한손 실험(한손 그룹)을 수행하였다. 한손 그룹에 포함된 16명 중 3명은 왼손잡이였고(남 2, 여 1), 나머지는 모두 오른손잡이였다.

2. 3. 2. 실험 장치

무게차 인지가 가능한 최소 거리를 알아내기 위해 Figure 7과 같은 컨트롤러 모양의 실험 장치를 설계하였다. 실험 장치의 상단 총 9개의 위치(L1~L9)에는 무게부를 체결할 수 있는 나사 구멍이 있는데, 무게부를 그립부에서 더 먼 위치에 체결할수록 사람이 장치를 쥐고 움직일 때 더 무겁게 느껴진다. 이러한 무게차 인지는 장치의 총 무게 대비 무게부의 비중에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Figure 8과 같이 동일한 300그램의 무게에 무게부 비중만 다른 세 개의 실험 장치를 제작하였다. 세 장치 각각의 무게부(Figure 8 상단) 비중은 장치의 총 무게에서 20%, 35%, 50%(WR20, WR35, WR50)를 차지하도록 쇠추와 편납을 채워 정밀하게 제작하였다.

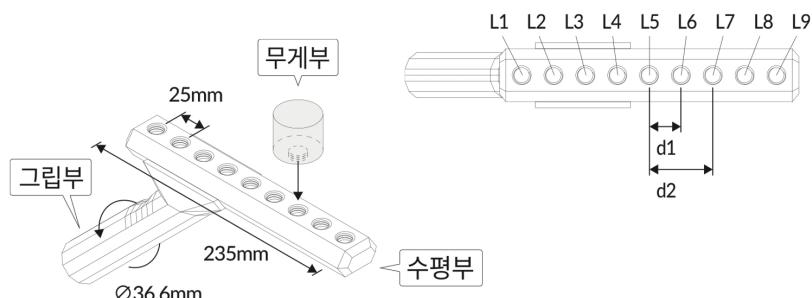


Figure 7 The structure of preliminary experimental device



Figure 8 Inside of the weight part of WR20, WR35 and WR50



Figure 9 The participant in the experiment

2. 3. 3. 실험 방법

실험 참여자들은 눈을 가린 채 Figure 7의 L3 위치(그립부 중심)에 무게부가 장착된 기준 장치와 L4부터 L9 위치 중 한 곳에 무게부가 장착된 비교 장치들을 들어보면서 무게를 상대 비교하는 태스크를 수행하였다 (Figure 9). 이 때, 무게차의 최소 자극은 d1(2.5cm), 최대 자극은 d6(15cm)였다. 실험 범위에서 L1과 L2 위치를 배제한 이유는 해당 자극이 포함된 파일럿 테스트에서 사용자의 불안정한 무게 인지가 관찰되었기 때문이다. 비교 장치는 무작위 순서로 배치하였으며, 실험 참여자의 반은 양손 실험을, 나머지 반은 한손 실험을 수행하였다. 실험은 다음의 순서로 진행하였다.

- ① 자리에 앉아 안대로 눈 가리기
- ② 실험 장치를 손에 들고 5초 동안 자유롭게 움직여보기
- ③ 손에 든 장치를 바꿔 들어 5초 동안 자유롭게 움직여보기
- ④ 무게 비교하여 더 무거운 장치 선택하기

실험의 주 인자는 무게부 비중(WR20, WR35, WR50), 성별, 손 유형(한손, 양손), 무게부 거리(d1~d6)로 삼았다. 실험데이터는 다음과 같이 코딩하여 무게차 인지 여부, 최소 무게차 인지거리, 그리고 오류횟수 데이터를 추출하여 분석하였다. 두 개의 비교 장치 간에 무게차가 있다고 답변한 경우는 1, 그렇지 않은 경우는 0으로 표기하였는데, 이는 무게차 인지 여부를 나타낸다. 예를 들면, L3 기준위치와 L4~L9 위치 간 총 여섯 번의 무게차 비교 실험 후 실험 참여자의 무게차 인지 여부에 대한 답변은 '011001'과 같이 표기될 수 있다. 이때, 왼쪽에서 두 번째 위치에서 처음으로 무게차를 인지하여 1로 표기하였으므로 최소 무게차 인지거리는 2가 된다. 그리고 다음과 같은 두 경우는 오류인 것으로 간주하였다. 첫째, 자극을 거리순으로 정렬했을 때 무게차 인지 시점 전후로 결과가 동일하지 않고 중간에 반대 값이 나타나는 경우이다. 예로, 실험 참여자의 무게차 답변을 코딩하여 정렬한 값이 '011001'일 경우, 네 번째와 다섯 번째는 오류로 판단하였는데, 그 이유는 거리가 짧은 두 번째 수준에서 무게차를 인지했다고 했기 때문에 그보다 더 긴 네 번째와 다섯 번째의 무게차는 당연히 인지했어야 했기 때문이다. 둘째, 무게감을 반대로 인지한 경우이다. 예를 들면, 비교 자극인 L4~L9 상태보다 가장 가벼운 기준 자극인 L3을 더 무겁다고 인지한 경우이다. 이러한 오류횟수는 적을수록 더 정확하게 무게차를 인지한 것이다.

2. 3. 4. 실험 결과

(1) 무게차 인지 여부

무게부의 비중이 높을수록, 무게부의 거리차가 클수록 무게차를 유의하게 더 잘 인지하였으며, 여성보단 남성이, 한손보다는 양손을 사용해서 비교했을 때 인지율이 유의하게 더 높았다 (Table 2).

Table 2 ANOVA Table: weight difference recognition (*p<0.05, **p<0.01)

인자	DF	Adj SS	Adj MS	F-값	P-값
무게부 비중	2	6.835	3.41751.7578z	26.14	0.000**
성별	1	1.758	1.7578	13.44	0.000**
손 유형	1	0.543	0.5425	4.15	0.042*
무게부 거리	5	38.994	7.7988	59.65	0.000**
오차	1142	149.307	0.1307		
총계	1151	197.437			

(2) 오류 횟수

오류 횟수에서 성별 간 유의차는 없었으나 무게부 비중과 손 유형에서 유의한 차이를 보였다(Table 3). 무게부의 비중이 낮을수록, 한손일 경우에 오류가 더 많이 발생하였다.

Table 3 ANOVA table: number of errors (*p<0.05, **p<0.01)

인자	DF	Adj SS	Adj MS	F-값	P-값
무게부 비중	2	7.719	3.85938	7.89	0.001**
성별	1	0.083	0.08333	0.17	0.680
손 유형	1	3.000	3.000	6.13	0.014*
오차	187	91.51	0.48936		
총계	191	102.312			

(3) 최소 무게차 인지거리

Table 4에서 보여주듯이 무게부 비중과 성별에 따른 최소 무게차 인지거리에 유의한 차이가 존재하였다. 남성일 때와 무게부 비중이 높을수록 최초 무게차 인지거리가 짧았다. 최소 무게차 인지거리의 평균은 WR20이 d2.11(5.28 cm), WR35가 d2(5 cm), 그리고 WR50이 d1.53(3.83 cm)이었다.

Table 4 ANOVA table: initial weight difference recognition (*p<0.05, **p<0.01)

인자	DF	Adj SS	Adj MS	F-값	P-값
무게부 비중	2	12.073	6.0365	6.57	0.002**
성별	1	7.922	7.9219	8.62	0.004**
손 유형	1	0.422	0.4219	0.46	0.499
오차	187	171.828	0.9189		
총계	191	192.245			

(4) 무게차에 대한 인지율과 최소 무게차

Figure 10은 무게부 거리에 따른 무게차 인지율과 이에 대한 회귀분석 결과를 보여준다. 무게차 인지율 그래프를 보면, 거리 값과 무게부의 비중이 커질수록 무게차 인지율이 증가함을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 알아내고자 하는 무게감 역치인 최소 식별차는 일반적으로 50%의 인지율에 해당하는 자극의 변화를 의미하기 때문에 회귀분석을 수행하였다. 그 결과, 무게차 인지율이 50%일 때의 각 비중 별 무게부간 거리(d) 값은 다음과 같았다: WR20 - 4.02 cm, WR35 - 3.34 cm, WR50 - 1.80 cm.

WR20의 경우, 무게부 거리가 5cm 보다 짧을 때는 인지율이 매우 낮고 불안정하였다. 한편, WR50은 50퍼센트라는 제한된 범주 내에서 무게부를 제외한 나머지 장치들을 만들어야 해서 실제 제품 제작을 고려할 때 현실적인 한계가 클 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 WR35와 같이 무게부 비중이 35%이고 무게부 간 거리는 3.34cm로 구성된 컨트롤러를 개발하기로 하였다.

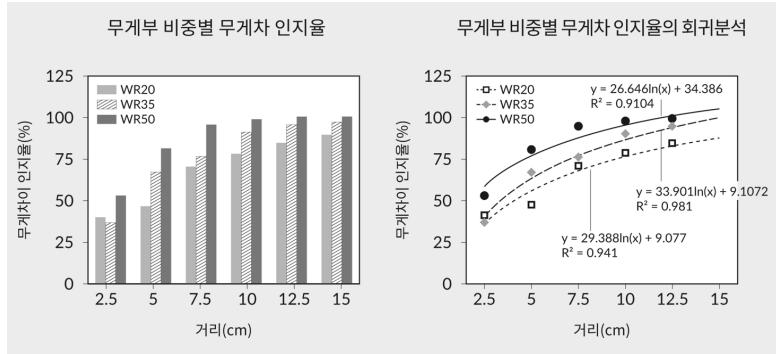


Figure 10 Cognition rate of weight difference by weight-ratio of weight part

3. 모멘트 컨트롤러 프로토타입 개발

3. 1. 시스템 구조

2절에서의 실험 결과들을 설계에 반영하여 Figure 11과 12와 같은 모멘트 컨트롤러를 개발하였다. 모멘트 컨트롤러는 모션 트래킹 센서인 HTC VIVE Tracker(이하 바이브 트래커)와 진동 액추에이터 및 DC 모터를 제어하기 위한 아두이노 보드로 구성되어 있다. 바이브 트래커는 컨트롤러의 위치와 방향에 대한 정보와 아두이노에 연결된 그립 버튼의 작동 정보를 PC의 유니티로 구현된 VR 소프트웨어에 전송해준다. 사용자가 물체를 잡기 위해 아두이노에 연결된 그립 버튼(택트 스위치)을 누르면 VR 소프트웨어에서 제공되는 가상물체의 무게 및 인터랙션 정보에 따라 진동 피드백과 함께 DC 모터가 움직이며 무게부의 위치를 이동시킨다. 무게부의 이동은 빈손 상태 (W0) 및 진동 피드백을 포함한 네 단계의 위치(W1~W4) 제어로 구성된다.

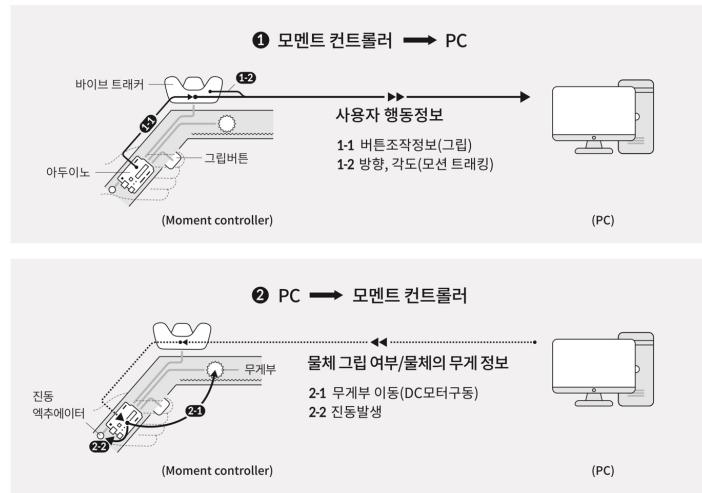


Figure 11 The system architecture of moment controller

3. 2. 하드웨어 설계 및 제작

Figure 12는 모멘트 컨트롤러의 유용성을 평가하기 위해 제작한 하드웨어 프로토타입이다. 수평부의 길이는 223mm, 바이브 트래커를 제외한 장치의 전체 높이는 140.5mm로 제작하였다. 바이브 트래커의 무게는 89g, 총 무게는 436g, 그리고 바이브 트래커를 포함한 무게부의 무게는 총 무게의 약 35%인 153g으로 제작하였다.

수평부에 위치한 DC 모터는 랙 및 피니언 기어 방식으로 직선 이동하며, 이 모터를 감싸는 케이스 내부의 빈 공간에 납구슬을 채워 넣어 무게부의 중량을 조절하였다. 무게부 하단에는 리드 스위치를, 수평부가 이동하는 레일부 옆에는 4개의 자석을 위치시켜 동일한 간격으로 정확한 위치에 무게부가 정지할 수 있도록 제작하였다. 손잡이 부분에는 진동 액츄에이터와 아두이노, 그리고 택트 스위치가 위치해 있다. 아두이노와 바이브 트래커로의 전원 공급은 12V 리튬이온 충전지를 활용하여 무선 조작이 가능하도록 하였다.

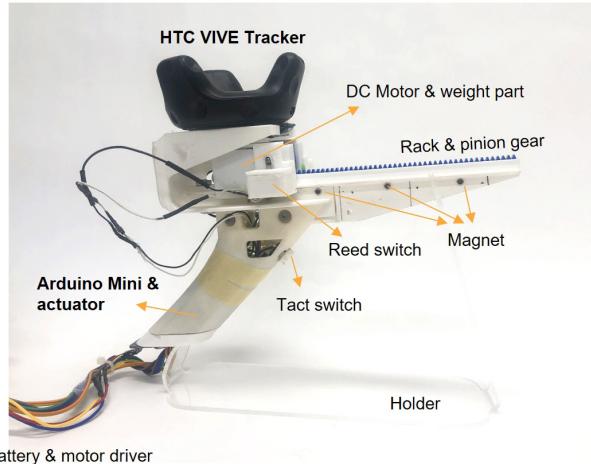


Figure 12 The prototype of moment controller

4. 모멘트 컨트롤러의 유용성 평가

4. 1. 실험용 VR 게임

모멘트 컨트롤러의 유용성을 검증하기 위해 앞서 3장에서 설명한 프로토타입 컨트롤러로 제어할 수 있는 VR 게임을 개발하였다. 게임의 내용으로는 무게감 인지의 유용함을 평가하는 데 적절한 양팔 저울 게임으로 하였다. Figure 13과 같이 사용자 주위에 흩어져 있는 가상물체들을 잡아서 양팔 저울에 올려 양팔의 무게를 동일하게 맞추는 게임이다. 이 게임은 3D 모델링 프로그램인 Blender(2.79)로 가상공간 및 물체를 3D 디자인하였고, 게임 엔진인 Unity(2018.4.1.f)를 이용하여 개발하였다. 양팔 저울은 단위 무게당 7°씩, 최대 49°(W1~W7)까지 기울어지면서 양팔의 무게 차이를 시각적으로 보여주었다. 바닥에는 발자국 그림을 표시하여 실험 참여자가 기준 위치를 잡을 수 있게 하였다.

Figure 13에서 보여주듯이 게임이 시작되면 양팔 저울 주변에 8개의 가상물체들이 나타난다. 가상물체들의 위치는 저울 주변 눈에 보이지 않는 18개의 위치 중 임의의 위치들에 생성되게 하였다. 사용자는 Figure 14와 같은 손 모양을 물체 가까이 이동시킨 후 모멘트 컨트롤러의 그립 버튼을 눌러 물체를 잡을 수 있고, 눌렸던 버튼을 공중에서 놓음으로써 물체를 바닥에 버릴 수 있다. 공중이 아닌 저울 가까이에서 버튼을 놓으면 저울 위에 물체를 올려놓을 수 있다. 시작 알림, 게임 결과, 정성 평가, 종료 알림 등의 상황에서 표시되는 안내 메시지는 양팔 저울과 정면의 벽 사이 위쪽에 필요시마다 출력하였다.



Figure 13 The VR game for experiment



Figure 14 The audio-visual effects when holding an object

모멘트 컨트롤러의 무게부 이동은 모터 이동에 일정한 시간이 필요하기 때문에 물체를 잡기 위해 그립 버튼을 누르는 행위와 무게차가 인지되는 시점 간에 불일치가 야기된다. 따라서 평가를 위한 VR 게임에서는 가상물체가 그립 버튼을 누르는 즉시 손에 잡히는 것이 아닌, 버튼을 누른 후부터 특정 시간(1.4초; 무게부의 최대 이동시간)이 경과해야만 시각적으로 손에 완전히 잡히도록 설정하였다. 그리고 사용자가 이를 자연스럽게 받아들이도록 Figure 14와 같이 그립의 진행을 알려주는 시·청각 효과를 적절히 활용하였다.

4. 2. 실험 설계 및 태스크

실험 참여자는 무작위 순서로 제시되는 다섯 개의 상황(C1~C5)에서 양팔 저울 게임을 수행하였다. Table 5에서 보여주듯이 각 상황은 물체의 외형과 무게감 조건이 같거나 다른 경우를 조합하여 결정하였다. C1은 모든 물체들의 외형은 동일하지만 무게감은 다른 경우, C2는 외형과 무게감이 모두 동일한 경우, 그리고 C3는 외형은 다르지만 느껴지는 무게감은 같은 경우이다. 여기서 C3는 가상물체의 외형에서 느껴지는

시각적 무게감은 다르지만 느껴지는 무게감은 같을 수밖에 없는 기준 VR 컨트롤러를 이용한 게임 상황을 대표한다. 마지막으로 무게와 외형이 모두 다른 조합은 무게감의 조화 및 부조화라는 기준을 통해 C4와 C5로 다시 구분하였다. C4의 ‘조화(match)’는 물체의 외형에 타당한 무게가 적용되어 있는 경우를, C5의 ‘부조화(mismatch)’는 물체의 외형과 반대되는 무게가 적용되어 있는 경우를 의미한다. 실험 참여자들은 이러한 서로 다른 상황에 대한 사전정보 없이 양팔의 무게를 맞추는 테스크를 수행하였다.

Table 5 Type of experimental cases (=: Equality, ≠: Difference)

상황(Case)	C1	C2	C3	C4	C5
외형	=	=	≠	≠	≠
무게	≠	=	=	≠(조화)	≠(부조화)

외형이 동일한 상황(C1, C2)을 구현하기 위해 모든 가상물체가 밝은 무채색의 각진 구 형태이 되 물체 간에 구분은 가능하도록 물체 표면에 서로 다른 기호를 세긴 기호 세트 4개를 제작하였다(1,2,3,4; #,&,*,@; ○,△,□,☆; ♠,♣,♥,♦). 외형이 다른 상황(C3, C4, C5)은 과일, 무기, 사무용품의 세 가지 테마를 구성하여 실사 그레픽으로 물체를 구성하였다(Table 6). 게임 시작 시 양팔 저울 주변에 나타나는 8개의 물체는 ‘무게가 같은 상황’에서는 4개의 기호 타입 중, ‘무게가 다른 상황’에서는 3개의 테마 중 무작위로 2개를 선택하여 제시하였다. 이때, 부조화 상황의 경우 Table 6에서 W1, W2의 무게는 W3, W4로, W3과 W4는 W1과 W2의 무게로 변경하여 제시하였다.

Table 6 The combination of virtual objects for the different-shaped cases

테마	동일외형	과일	무기	사무용품
이미지				
W1(W3)	-	딸기	표창	연필
W2(W4)	-	사과	단검	핸드폰
W3(W1)	-	커팅 파인애플	권총	책
W4(W2)	-	수박	머신건	화분

실험 테스크는 최대한 빠르게 양팔 저울에 적어도 세 개 이상의 물체를 올려 양팔을 평행하게 만드는 것이었다. 실험 참여자는 시각 정보와 모멘트 컨트롤러를 통해 전달받는 무게감을 종합하여 물체의 무게를 판단하였다. 테스크 성공 여부, 소요시간, 물체 그립 횟수, 저울에 물체를 올린 횟수 등의 데이터는 게임 소프트웨어에 의해 자동으로 기록되었다. 각 상황별 테스크 완료 후에 실험 참여자는 현실감, 조작 용이성, 그리고 즐거움을 7점 척도로 평가하였으며, 해당 점수에 대한 이유를 간략히 설명하였다.

4. 3. 실험 환경 및 참여자

실험은 바닥면적 2.2m × 2.5m 룸스케일(room-scale)의 실내 공간에서 진행하였다. HTC VIVE 시스템의 HMD와 모멘트 컨트롤러를 센싱하는 베이스 스테이션 2개는 Figure 15의 왼쪽과 같이 실험공간의 대각선 끝 위치에 각각 2.07m와 1.91m의 높이로 설치하였다.

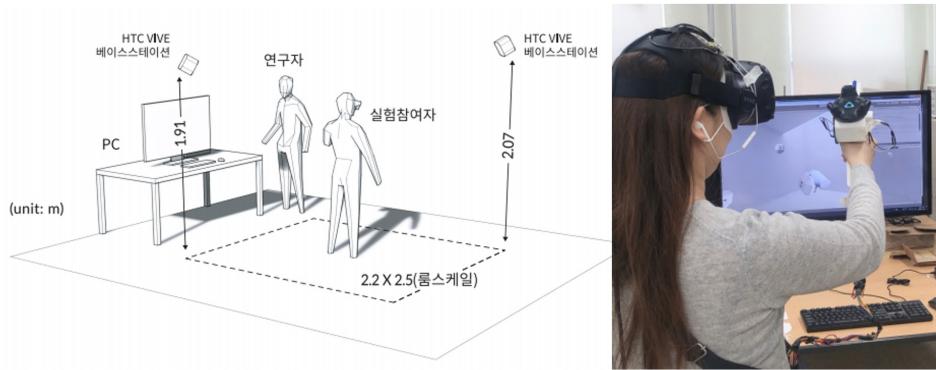


Figure 15 Experimental environment

실험에는 20~40대 대학생 및 대학원생 21명(남자 13명, 여자 8명)이 참여하였으며, 이들 중 왼손잡이는 2명이었고 나머지는 모두 오른손잡이였다. 실험 참여자는 Figure 15와 같이 HMD를 착용하고 컨트롤러를 손에 든 상태에서 약 20분 간 실험을 진행하였다. 실험은 실험 안내 및 장비 작용 과정을 거쳐 기본 조작법을 익히는 연습게임을 통과한 후 본 게임을 진행하도록 하였다.

4. 4. 실험 결과

태스크 소요시간에 대한 분산분석 결과, 성별에 따른 유의한 차이는 존재하지 않았다(Table 7). 상황의 경우, 유의수준 0.1에서 유의한 차이를 보였으며, Turkey 사후분석에서 85%까지 신뢰수준을 낮춰야 상황 간 유의한 차이를 보여 통계적으로 유의미한 차이가 있다고 보기는 어려웠다. 하지만 같은 형태의 가상물체에 다른 무게감을 적용한 C1에서 사용자들은 가장 짧은 평균 30초가 걸렸으며, 다른 형태의 가상물체에 부조화 무게감이 적용된 C5에서 42초의 가장 긴 태스크 소요시간을 기록하였다.

Table 7 ANOVA Table: task completion time (*p<0.05, **p<0.01)

인자	DF	Adj SS	Adj MS	F-값	P-값
상황	4	2308.5	577.1	2.08	0.089
성별	1	285.2	285.2	1.03	0.313
오차	99	27498.7	277.8		
총계	104	30092.4			

현실감 점수는 상황과 성별에 대해 모두 유의한 차이를 보였다(Table 8). Figure 16의 상황별 현실감 점수 그래프를 보면, 실험 참여자들은 서로 다른 외형에 조화로운 무게가 적용된 C4에서 가장 높은 현실감을 느꼈던 것을 알 수 있다. 다음으로 현실감이 높았던 상황은 C1과 C2였다. 이 두 상황의 가상물체들은 기본 도형 모양의 동일한 외형이어서 실험 참여자들이 무게에 대한 사전 기대나 예측이 가능하지 않았기 때문에 어떤 무게도 자연스럽게 받아들인 것으로 보인다. 현실감이 가장 낮게 평가된 상황은 실사 그래픽에서 기대되는 무게와 실제 적용된 무게감이 서로 상반되었던 C3와 C5였다. C3는 외형이 다름에도 무게가 같았기에, C5는 무게가 반대로 적용되었기에 실험 참여자들은 당연히 비현실적이라 느꼈을 것이다. C3나 C5에 비해 C4에서 현실감을 유의하게 크게 느꼈다는 것은 가상물체의 무게에 대한 기대와 모멘트 컨트롤러에 의해 부여되는 무게감 일치가 사용자의 무게감 증강에 기여했음을 의미한다.

Table 8 ANOVA Table: sense of reality (*p<0.05, **p<0.01)

인자	DF	Adj SS	Adj MS	F-값	P-값
상황	4	41.46	10.365	6.05	0.000**
성별	1	10.84	10.837	6.32	0.014*
상황×성별	4	31.86	7.965	4.65	0.002**
오차	95	162.83	1.714		
총계	104	264.99			

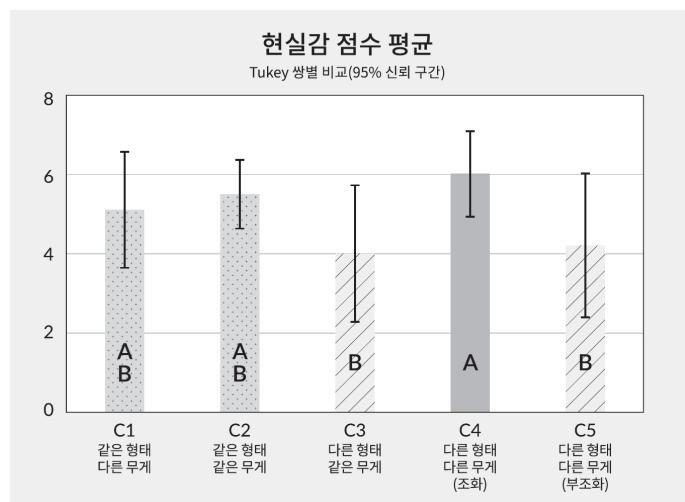


Figure 16 The average score of the sense of reality

남녀 간에 현실감 점수에서 유의한 차이가 있었고(여성 평균: 5.41, 남성 평균: 4.74), 성별과 상황 사이에 교호작용도 존재하였다. 시각적으로 느껴지는 무게가 다른 형태임에도 모멘트 컨트롤러가 같은 무게나 부조화된 무게를 부여하는 C3와 C5에서 여성에 비해 남성이 느끼는 현실감이 크게 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 남성이 더 민감하게 모멘트 컨트롤러가 제공하는 무게감을 인지한 것으로 볼 수 있다.

물체 그립 횟수나 무게 측정 횟수, 그리고 조작 용이성과 즐거움에 대한 주관적 평가점수에 있어서는 상황 및 성별 간에 통계적으로 유의한 차이가 존재하지 않았다(Table 9). 실험 참여자들은 신나는 배경 음악과 컨트롤러로부터 전달받는 무게감각을 느끼며 VR 환경에서의 실험 자체를 전반적으로 매우 즐거워하였다($M=6.1 \pm 1.1$). 특히 다른 형태 및 조화로운 무게로 구성되었던 C4 상황의 즐거움 평균 점수가 6.4점으로 가장 높았다. 심지어 부조화 상황이었던 C5 상황조차 그것을 게임의 트릭 요소로 인지하여 즐겁게 느껴진다고 실험 참여자들은 응답했다.

Table 9 Significance for the number of grips and balancing, operability, and enjoyment

인자	p-values			
	물체 그립 횟수	무게 측정 횟수	조작 용이성	즐거움
상황	0.409	0.507	0.838	0.656
성별	1.172	0.514	0.174	0.677

5. 결론 및 고찰

본 연구는 사용자가 가상환경 속 가상물체와 상호작용할 때 무게감에 대한 현실감을 증강시키기 위한 모멘트 컨트롤러를 제안하고 설계하였으며, 워킹 프로토타입을 개발하여 실험을 통해 그 유용성을 검증하였다. 실험 결과는 모멘트 컨트롤러가 사용자의 무게감에 대한 현실감을 증강시켜 줄 수 있음을 보였다. 실험 참여자들은 가상물체의 시각적 외형과 조화되는 무게감을 모멘트 컨트롤러를 통해 느꼈을 때(C4 상황) 더 현실적이라고 평가했으며, 반대되는 무게감을 느꼈을 때는(C5 상황) 비현실적이라 평가했다. 특히, 반대되는 무게감이 적용된 상황에서는 테스크 소요시간이 가장 길었다. 한편, 가상물체의 외형이 동일한 경우에는 무게감이 같거나 다름에 무관하게 참여자들은 이를 비교적 자연스러운 것으로 생각했다(C1과 C2 상황).

즐거움에 있어서는 모멘트 컨트롤러의 유무(C3과 C4 상황의 차이)에 따른 차이가 유의하지 않았으나 물체의 외형과 어울리는 무게감이 적용된 경우(C4 상황)에 즐거움 점수가 가장 높았다. 또한 기본 도형의 가상물체보다 실사 그래픽의 물체가 제시되었을 때 훨씬 더 긍정적인 반응을 보였는데, 이때는 반대의 무게감을 제공한 상황(C5)에서도 그 상황을 트리 요소로 인지하는 경우가 다수 있어 무게감 적용의 다양한 활용에 대한 가능성을 보여주었다. 예를 들면, 무게감을 별칭 또는 보상 요소로 활용하여, 의도적으로 사용자를 더 힘들게 하거나 덜 힘들게 할 수도 있을 것이다. 이것은 사용자의 신체 운동과 관련된 콘텐츠(예. 야구, 낚시 등)에 직접적인 활용이 가능할 것이다.

모멘트 컨트롤러는 기본적으로 다양한 VR 콘텐츠에서의 범용적 활용을 지향한다. 그러나 현재 개발된 프로토타입에는 장치 자체의 무게 및 모터 이동에 의한 시간 지연 등 몇 가지 한계점이 있다. 이러한 한계 때문인지 현실감에 대한 주관적 평가 외에는 소요시간, 물체 그립 횟수 등의 객관적 평가척도에 있어서는 유의한 차이를 보이지 않았다. 또한 2.2절의 카드소팅 결과를 기반으로 4단계 정도의 무게 단계 수를 제시하였으나 카드소팅의 신뢰성을 높이기 위해서는 더 많은 인원을 대상으로 추가 조사를 할 필요성이 있다. 그리고 양팔 저울 게임 외의 다양한 VR 콘텐츠에서 모멘트 컨트롤러의 유용성에 대한 추가적인 검증도 필요하다. 하지만 현재의 한계점을 극복하고 추가적인 검증이 진행된다면 모멘트 컨트롤러는 향후 대중적인 VR 컨트롤러의 일반적 형태가 될 가능성도 있어 보인다. 또한 모멘트 컨트롤러의 개발 과정에서 도출된 여러 조사와 실험 결과들은 무게감 증강을 위한 VR 보조기기의 향후 연구들에 가치 있게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. Baek, M. S., & Kim, H. (2020). VR 컨트롤러의 모멘트 변화에 따른 최소 무게 차이 인지에 관한 연구 [A Study on the Minimum Weight Difference Threshold in a VR Controller with Moment Variation]. *Journal of Korea Game Society*, 20(1), 13–22.
2. Cheng, C. H., Chang, C. C., Chen, Y. H., Lin, Y. L., Huang, J. Y., Han, P. H., Ko, J., & Lee, L. C. (2018). GravityCup: a liquid-based haptics for simulating dynamic weight in virtual reality. In *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (pp. 1–2).
3. Choi, I., Culbertson, H., Miller, M. R., Olwal, A., & Follmer, S. (2017). Grability: A wearable haptic interface for simulating weight and grasping in virtual reality. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 119–130).
4. Feyzabadi, S., Straube, S., Folgheraiter, M., Kirchner, E. A., Kim, S. K., & Albiez, J. C. (2013). Human force discrimination during active arm motion for force feedback design. *IEEE transactions on haptics*, 6(3), 309–319.
5. HaptX. (2019). HaptX gloves DK2. Retrieved November, 2020, from <https://haptx.com/>
6. Heo, S., Chung, C., Lee, G., & Wigdor, D. (2018). Thor's hammer: An ungrounded force feedback device utilizing propeller-induced propulsive force. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1–11).

7. Jung, J. (2018). Absolute Threshold in Tactile Sensing of Step by Fingertip. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 27(6), 517–523.
8. Kovacs, R., Ofek, E., Gonzalez Franco, M., Siu, A. F., Marwecki, S., Holz, C., & Sinclair, M. (2020). Haptic PIVOT: On-Demand Handhelds in VR. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 1046–1059).
9. Lee, J., Sinclair, M., Gonzalez-Franco, M., Ofek, E., & Holz, C. (2019). TORC: A virtual reality controller for in-hand high-dexterity finger interaction. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1–13).
10. Pagani, M. (2008). *Encyclopedia of multimedia technology and networking* (Vol. 3). London: IGI Global, pp.631–632.
11. Panetta, K. (2019). Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019. Published online October 15, 2018.
12. Provancher, W. (2014). Creating greater VR immersion by emulating force feedback with ungrounded tactile feedback. *IQT Quarterly*, 6(2), 18–21.
13. Rietzler, M., Geiselhart, F., Gugenheimer, J., & Rukzio, E. (2018). Breaking the tracking: Enabling weight perception using perceivable tracking offsets. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1–12).
14. Roberto, G. D. A., Birkbeck, N., Janatra, I., Adsumilli, B., & Frossard, P. (2019). On the first JND and Break in Presence of 360-degree content: An exploratory study. In *Proceedings of the 11th ACM Workshop on Immersive Mixed and Virtual Environment Systems* (pp. 1–3).
15. Ryu, N., Lee, W., Kim, M. J., & Bianchi, A. (2020). ElaStick: A Handheld Variable Stiffness Display for Rendering Dynamic Haptic Response of Flexible Object. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 1035–1045).
16. Sinclair, M., Ofek, E., Gonzalez-Franco, M., & Holz, C. (2019). CapstanCrunch: A haptic vr controller with user-supplied force feedback. In *Proceedings of the 32nd annual ACM symposium on user interface software and technology* (pp. 815–829).
17. Shigeyama, J., Hashimoto, T., Yoshida, S., Narumi, T., Tanikawa, T., & Hirose, M. (2019). Transcalibur: A weight shifting virtual reality controller for 2d shape rendering based on computational perception model. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1–11).
18. Tactsuit. (2019). TackSuit X series. Retrieved January, 2021, from <https://www.bhaptics.com/tactsuit>
19. TEGway. (2019). Flexible thermoelectric device. Retrieved January, 2021, from <http://tegway.co/>
20. Tsai, H. R., Hung, C. W., Wu, T. C., & Chen, B. Y. (2020). ElastOscillation: 3D Multilevel Force Feedback for Damped Oscillation on VR Controllers. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1–12).
21. Whitmire, E., Benko, H., Holz, C., Ofek, E., & Sinclair, M. (2018). Haptic revolver: Touch, shear, texture, and shape rendering on a reconfigurable virtual reality controller. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1–12).
22. Wickens, C. D., Lee, J., Liu, Y.D., & Gordon-Becker, S. (2003). *Introduction to Human Factors Engineering* (2nd Edition), Prentice-Hall, Inc.
23. Zenner, A., & Krüger, A. (2017). Shifty: A weight-shifting dynamic passive haptic proxy to enhance object perception in virtual reality. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 23(4), 1285–1294.
24. Zenner, A., & Krüger, A. (2019). Drag: on: A virtual reality controller providing haptic feedback based on drag and weight shift. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1–12).

모멘트 컨트롤러: 가상물체 간의 무게 차이 인식이 가능한 VR 컨트롤러

김현¹, 백미선^{2*}

¹서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, 교수, 서울, 대한민국

²서울과학기술대학교 나노IT디자인융합대학원 디자인기술융합전공, 학생, 서울, 대한민국

초록

연구배경 현존하는 VR 보조기기들은 가상물체와 상호작용하는 사용자에게 시각 및 청각 자극을 비롯한 진동 피드백을 제공하고 있다. 하지만 이것만으로는 무게가 서로 다른 가상물체와 상호작용 시 사용자에게 현실적인 무게감을 전달하는 데 한계가 있어 개선이 필요하다.

연구방법 본 연구에서는 무게감 인지에 대한 역치 실험을 바탕으로 무게감을 전달하는 장치인 모멘트 컨트롤러를 설계 및 제작하였고, 무게 속성을 지닌 가상물체를 양팔 저울에 올려 무게를 맞추는 VR 게임 콘텐츠를 개발하였다. 또한, 가상물체의 외형, 무게감 차이 여부, 그리고 외형에서 기대되는 무게와 실제 무게감 간의 일치 여부 등이 서로 다른 다섯 상황을 분류하였다. 그리고 다섯 상황 각각에서의 양팔 저울 게임 수행을 통해 모멘트 컨트롤러의 유용성을 평가하는 실험을 수행하였다.

연구결과 실험 결과, 실험 참여자들은 가상물체의 시각적 외형과 어울리는 무게감을 느꼈을 때 보다 현실적이라고 평가했으며, 반대되는 무게감을 느꼈을 때는 비현실적이라 생각했다. 특히, 반대되는 무게감이 적용된 상황에서 태스크 소요시간이 가장 길었다. 또한 가상물체의 외형과 어울리는 무게감이 적용된 경우에 즐거움 점수가 가장 높았다.

결론 모멘트 컨트롤러는 가상물체와 상호작용하는 사용자에게 무게감을 증강시킬 수 있는 가능성을 보여주었다. 이를 적극 활용한다면 가상환경을 경험하는 사용자의 몰입감을 더 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 VR 컨트롤러, 무게차 역치, 모멘트 변화, 무게감 증강