

소형 선형 액추에이터 설계를 통한 확장현실 햅틱 컨트롤러 소형화에 관한 연구

A Study on Miniaturization of Extended Reality Haptic Controller by Designing a Micro Linear Actuator

고기남¹, 문남미^{2*}

Ginam Ko¹, Nammee Moon^{2*}

요약

확장현실에서 핸드 컨트롤러는 여러 종류의 센서를 사용하여 사용자의 움직임 및 물리적인 입력 정보를 인식하고, 사용자의 손과 손가락에 역감, 진동, 촉감 등의 감각을 제공하여 확장현실 콘텐츠의 몰입감을 높인다. 상용 핸드 컨트롤러는 사용자 인터페이스를 고려하여 핸드헬드 형태로 설계되고 있는데, 핸드헬드 컨트롤러는 구동 모듈, 제어 모듈, 배터리와 같은 부품을 포함하면서도 사람의 손으로 잡을 수 있어야 하므로 내부 설계 및 인체공학적 디자인이 중요하다. 본 연구에서는 다섯 개의 액추에이터를 사용하여 다섯 손가락에 역감 피드백을 제공하는 확장현실 컨트롤러 설계에 관해서 연구하였다. 컨트롤러 내부의 부피 비율이 높은 소형 액추에이터 구조를 재설계하고 이를 통합하여 햅틱 피드백 모듈 및 컨트롤러 외형을 재설계하여 햅틱 컨트롤러의 크기를 소형화하였다. 기존의 컨트롤러와 새로 제작한 컨트롤러의 액추에이터 이동 거리 및 액추에이터의 힘을 측정하여 비교하였으며, 새로 제작한 컨트롤러가 소형화되었음에도 기능적으로도 개선되었음을 보였다.

핵심어 : 확장현실, 핸드 컨트롤러, 햅틱, 핸드헬드, 소형화

Abstract

In extended reality, a hand controller uses several types of sensors to recognize the user's movement and physical input information, and provides senses such as force feedback, vibration, and tactile to the user's hand and fingers to increase the immersion of an extended reality content. Commercial hand controllers are designed in a handheld form considering the user interface. Internal design and ergonomic design are important because handheld controllers must be capable of being held by a human hand while including many parts such as motor driving modules, control modules, and batteries. In this study, the design of an extended reality controller that provides force feedback to five fingers using five actuators was studied. A small actuator with a high volume ratio inside the controller was miniaturized, and the size of the haptic

1 Department Convergence Engineering, Hoseo Graduate School of Venture, Seoul, Korea [Graduate Student]
e-mail: gnko@placeb.com

2 Department Computer Science and Engineering, Hoseo University, Seoul, Korea [Professor]
e-mail: mnm@hoseo.edu (Corresponding author)

* 이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.20210009860012004, 멀티 모달 감각 인터페이스를 활용한 가상현실 콘텐츠의 실감 극대화 인터랙션 기술 개발)

Received(January 1, 2022), Review Result(1st: January 18, 2022), Accepted(April 13, 2022), Published(April 30, 2022)



© 2022 The Authors. Published by NCISS.
This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

controller was miniaturized by redesigning the haptic feedback and controller exterior. The actuator movement distance and actuator force of the existing controller and the newly designed controller were measured and compared, and it was shown that the new controller was functionally improved even though it was miniaturized.

Keyword : Extended Reality, Hand Controller, Haptic, Handheld, Miniaturization

1. 서론

메타버스와 확장현실을 기반으로 한 기술의 발전이 빠르게 변화하고 있다. 가상공간에서 아바타를 움직이고 대화하는 시각과 청각을 중심으로 하는 상호작용 방식에서 미각, 후각, 촉각 등 다양한 감각을 활용하여 몰입감을 높이는 연구가 진행되고 있다. 인간은 감각 기관을 통하여 외부의 정보를 수집하여 인지하며 행동하는데, 손은 물체를 조작하며 업무, 교육, 놀이 등을 수행하는 중요한 역할을 한다. 메타버스와 확장현실 내에서 업무를 수행하거나 원격의 아바타들과 협업을 하는 서비스에서는 손을 표현하고 활용하는 인터랙션에 관한 연구는 매우 중요하다. 확장현실에서 손과 현실에서 대응되는 것은 핸드 컨트롤러이다. 사용자는 핸드 컨트롤러의 버튼, 조이스틱, 터치패드 등을 활용하여 가상환경 속에서 손의 동작을 표현하고 가상의 물체를 능동적으로 조작한다.

가상현실 디스플레이와 함께 활용되는 상용화된 컨트롤러는 HMD를 착용한 상태에서도 양손의 컨트롤러를 사용하기 편하도록 핸드헬드 형태의 컨트롤러로 설계되고 있다. VIVE Cosmos 컨트롤러와 Oculus Quest 2 컨트롤러는 버튼, 조이스틱, 터치패드로 손가락 3개의 입력을 받아서 5개 손가락의 움직임을 시각적으로 표현하고 있다 [1][2]. Valve Index 컨트롤러는 5개 손가락의 입력을 받을 수 있도록 설계되어 가상현실에서 손가락 단위의 세밀한 손동작을 가능하게 하였다 [3]. 사용자 입력이 손 단위에서 손가락 단위로 발전하고 있으나 사용자 피드백의 관점에서는 컨트롤러 전체가 진동하는 손 단위의 진동 피드백만 제공하고 있다. 컨트롤러가 손가락 단위의 피드백을 제공하면 세밀한 조작을 활용한 다양한 확장현실 애플리케이션 개발이 가능해진다.

본 연구에서는 각각의 손가락에 해당하는 다섯 개의 선형 액추에이터가 독립적으로 제어되는 핸드헬드 형태의 가상현실 컨트롤러의 설계에 관해서 연구하였다. 다섯 개의 선형 액추에이터가 손가락으로 누르는 힘을 지탱할 수 있으면 사용자는 가상현실에서 가상의 물체를 인지할 수 있다. 제안하는 핸드헬드 햅틱 컨트롤러는 다섯 개의 손가락의 힘을 지탱할 수 있는 출력을 하는 다섯 개의 소형 액추에이터, 전자 부품, 배터리를 내부에 포함해야 하면서도 사용자가 손으로 잡고 사용해야 하므로 손으로 잡을 수 있는 크기로 설계되어야 한다. 햅틱 컨트롤러의 크기를 소형화하게 되면 사용자는 햅틱 컨트롤러를 잡기가 편해지면서 하드웨어 사용성이 편해지게 된다. 컨트롤러를 소형화하기 위하여 선형 액추에이터의 설계를 변경하여 크기를 줄였으며, 햅틱 피드백 모듈을 재설계함으로써 햅틱 컨트롤러의 크기를 소형화했다. 이전에 제작하였던 햅틱 컨트롤러와 새롭게 설계된 햅틱 컨트롤러의 크기를 비교하고, 기존 햅틱 컨트롤러와 동일한 기계적 성능을 제공하는지

를 실험해서 비교하였다.

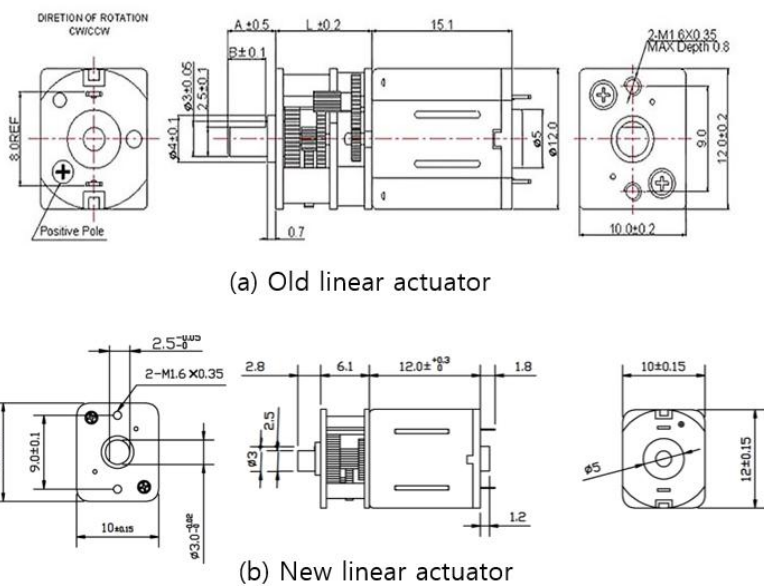
2. 관련 연구

햅틱 디바이스는 피부를 통해서 마찰, 전단력을 전달하거나 진동, 역감과 같은 힘을 전달함으로써 가상의 물체에 대한 감각 정보를 손에 제공함으로써 몰입형 상호작용을 높인다. 햅틱 컨트롤러는 손에 다양한 감각을 전달하기 위하여 다양한 메커니즘을 가지고 연구되고 있다 [4][5]. 햅틱 디바이스를 손가락 끝에 착용함으로써 가상물체의 거칠기나 부드러움과 같은 속성을 전달하는 연구도 진행되고 있다. FinGAR는 집게손가락에 장착되어 모터와 진동을 사용하여 압력과 전단변형의 감각을 전달할 수 있도록 제작되었다 [6]. Touch&Fold는 집게손가락에 햅틱 링을 장착하고 압력과 진동을 렌더링하여 가상물체와의 접촉, 질감을 전달하도록 제작되었다 [7]. 외골격 구조의 웨어러블 햅틱 디바이스는 장치를 착용하고 기계적 메커니즘을 사용하여 손가락의 이동을 제한함으로써 가상의 물체를 잡는 감각을 전달할 수 있다. CyberGrasp은 다섯 손가락과 같은 형태의 외골격 구조를 사용하여 모터를 사용하여 다섯 손가락의 움직임을 제어할 수 있으나 장치의 크기가 크고 유선으로 설계되어 확장현실에 적용하기에는 적합하지 않다 [8]. Grability는 엄지손가락과 나머지 손가락들로 구성된 머리뼈의 이동점을 축으로 해서 선형으로 이동이 가능한 그리퍼 형태로 설계되어 가상의 물체와 접촉하였을 때 이동을 제한함으로써 물체를 잡는 감각을 렌더링한다 [9]. 사용자가 손으로 편하게 잡고 사용하는 핸드헬드 형태의 햅틱 컨트롤러가 최근에는 많이 연구되고 있다. 손가락에 접촉한 물체의 특성을 표현하는 것뿐만 아니라 손가락으로 물체를 잡는 물리적인 역감을 제공하는 햅틱 컨트롤러들이 연구되고 있다. CLAW는 핸드헬드 형태에 집게손가락을 하드웨어에 끼워서 움직임을 제어함으로써 집게손가락을 사용하여 소형의 물체를 잡는 감각을 제공한다 [10]. TORC도 핸드헬드 형태에 엄지손가락과 2개의 손가락을 활용하여 물체를 쥐는 힘을 측정할 수 있는 메커니즘을 가지고 있으며 엄지손가락과 접촉되는 트랙패드를 활용하여 물체를 돌리면서 조작하는 사용자 인터페이스가 가능하다 [11]. 두 손가락으로 물체를 잡는 구조 뿐만 아니라 손 바닥을 사용하여 물체를 잡는 형태의 핸드헬드 컨트롤러의 메커니즘이 확장되고 있다. PaCaPa는 엄지와 손바닥에 위치한 2개의 날개 구조를 열고 닫을 수 있도록 설계함에 따라 가상의 물체의 크기와 각도에 따른 물체 조작을 표현할 수 있도록 했다 [12]. X-Rigns는 집게손가락부터 새끼손가락의 위치에 맞춰 4개의 링으로 구성된 원통 형태의 구조를 갖는 햅틱 컨트롤러로 내부의 모터를 제어하여 링의 지름을 조절함으로써 가상의 원통형 물체의 형상을 변경할 수 있다 [13].

3. 햅틱 피드백 모듈

햅틱 컨트롤러는 사용 목적에 따라 서로 다른 하드웨어 디자인 및 내부 설계 메커니즘을 갖는

다. 본 연구에서 제안하는 햅틱 컨트롤러는 사용자의 다섯 개의 손가락으로부터 서로 다른 압력 값을 입력받고, 손가락 단위로 역감을 제어할 수 있는 컨트롤러의 설계 목적을 갖는다. 사용자가 가상의 물체를 잡게 되면 물체의 형상에 따라 손가락의 위치를 유지해 물체를 잡는 감각을 렌더링 한다. 물체의 형상에 따라 사용자 손가락의 위치를 유지 시켜 줄 수 있는 구동부가 필요한데, 제안한 햅틱 컨트롤러는 손가락마다 선형 액추에이터를 배치하는 방식으로 설계하였다. 컨트롤러에서 사용하는 선형 액추에이터의 크기가 작으면 햅틱 컨트롤러의 부피가 작아지는 반면 제어할 수 있는 힘의 크기가 작아짐에 따라 사용자가 손가락으로 누르는 힘을 버티기가 어렵다. 선형 액추에이터의 크기가 크면 사용자가 누르는 힘을 쉽게 버틸 수 있으나, 배터리의 소모량이 커져서 컨트롤러의 사용 시간이 감소하고 햅틱 컨트롤러의 부피가 커지면서 사용자가 컨트롤러를 자연스럽게 잡을 수 없게 된다. 햅틱 컨트롤러 내부에 5개의 모듈이 장착되게 되는 소형 액추에이터의 크기와 성능은 가장 중요한 설계 요소이다. 초기 컨트롤러에는 [그림 1-(a)]와 같은 크기의 선형 리니어 모터를 사용하였으며 1:30 기어비를 사용하였다. 새롭게 설계한 선형 리니어 모터는 [그림 1-(b)]와 같이 모터 내부 공간을 최소화하여 액추에이터 길이를 약 3mm 길이를 줄였으며, 기어박스를 재설계하여 약 4mm 길이를 줄였다.



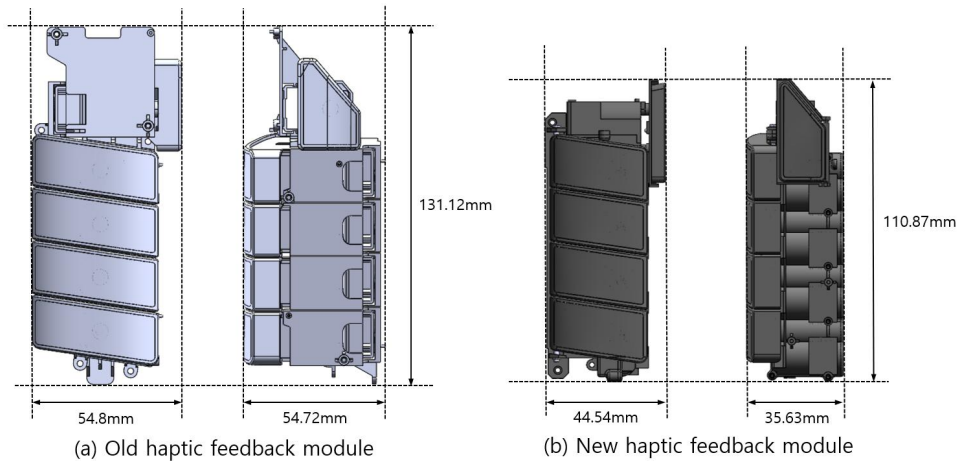
(a) Old linear actuator

(b) New linear actuator

[그림 1] 선형 액추에이터 설계
[Fig. 1] Linear actuator design

선형 액추에이터를 소형화 설계함에 따라 5개의 선형 액추에이터를 손가락과 접촉하는 형태로 배치해주는 햅틱 피드백 모듈의 재설계가 필요하다. 기존의 햅틱 피드백 모듈은 하나의 선형 액추

에이터와 하나의 압력 센서를 포함하는 구동 모듈로 설계하고 엄지손가락에 1개, 집게손가락부터 새끼손가락까지 4개를 중복하여 사용하는 방식으로 설계하였다. 이러한 설계방식은 구동 모듈들 사이에 중복되는 벽을 가지고 있어서 공간의 낭비가 있으므로, 집게손가락부터 새끼손가락까지의 4개의 선형 액추에이터를 포함하는 부분을 하나의 모듈로 설계함으로써 [그림 2]와 같이 햅틱 피드백 모듈을 소형화하였다. 햅틱 피드백 모듈의 높이는 131.12mm에서 110.87mm로 21.25mm, 폭은 54.8mm에서 44.54mm로 10.26mm, 두께는 51.72mm에서 35.63mm로 16.09mm 감소하였다.



[그림 2] 햅틱 피드백 모듈의 크기 비교

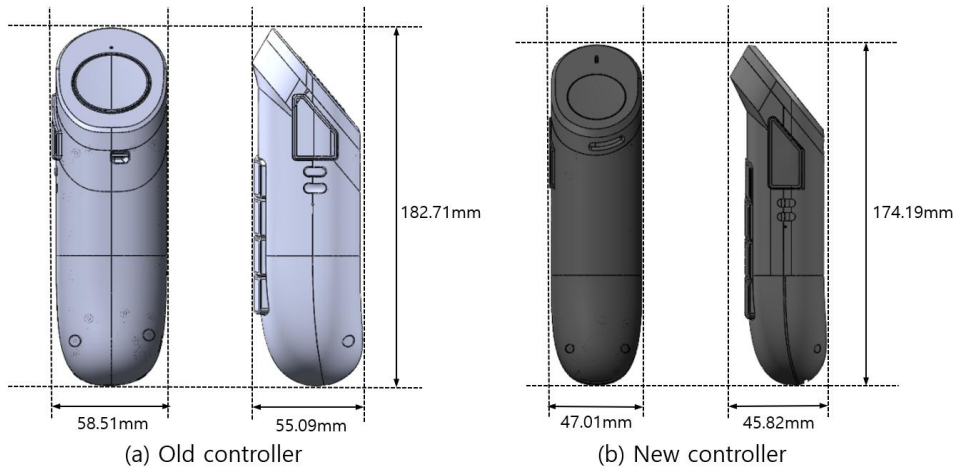
[Fig. 2] Size comparison of haptic feedback modules

4. 가상현실 햅틱 컨트롤러

햅틱 피드백 모듈의 소형화의 결과로 햅틱 컨트롤러의 내부 설계를 내부 설계 및 외형 디자인을 진행하였다. 트랙패드 및 버튼과 같은 기능적 요소는 동일하게 유지하되 외형 디자인의 구조는 동일하게 유지하였으며 [그림 3]과 같이 컨트롤러의 둘레를 줄임으로써 사용자 인터페이스를 개선하였다. 컨트롤러의 높이는 182.71mm에서 174.19mm로 8.52mm, 폭은 58.51mm에서 47.01mm로 11.5mm, 두께는 55.09mm에서 45.82mm로 9.27mm 감소하였다.

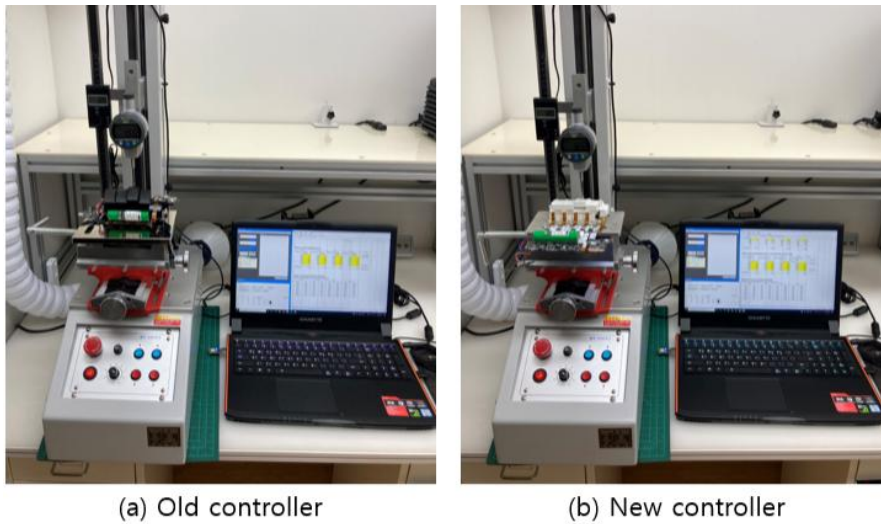
사용자 인터페이스의 개선을 위해서 햅틱 컨트롤러가 인간의 신체적 특성에 적합하게 크기를 최적화하는 작업은 중요하다. 하지만, 햅틱 컨트롤러의 주요 기능 중의 하나인 사용자가 손가락으로 누르는 힘을 햅틱 컨트롤러가 견디지 못하면 확장 현실 공간에서 시각적 감각과 물리적 감각의 불일치가 발생함에 따라 몰입감이 떨어진다. 햅틱 컨트롤러의 기계적 성능과 기본 제어 테스트를 위하여 [그림 4]와 같이 기존의 컨트롤러와 새로 제작된 컨트롤러의 햅틱 피드백 모듈의 4개의 액

추에이터에 대한 이동 거리 측정시험을 진행하였다.



[그림 3] 햅틱 컨트롤러의 크기 비교

[Fig. 3] Size comparison of haptic controllers



[그림 4] 햅틱 액추에이터 이동 거리 측정시험

[Fig. 4] Haptic actuator movement distance measurement test

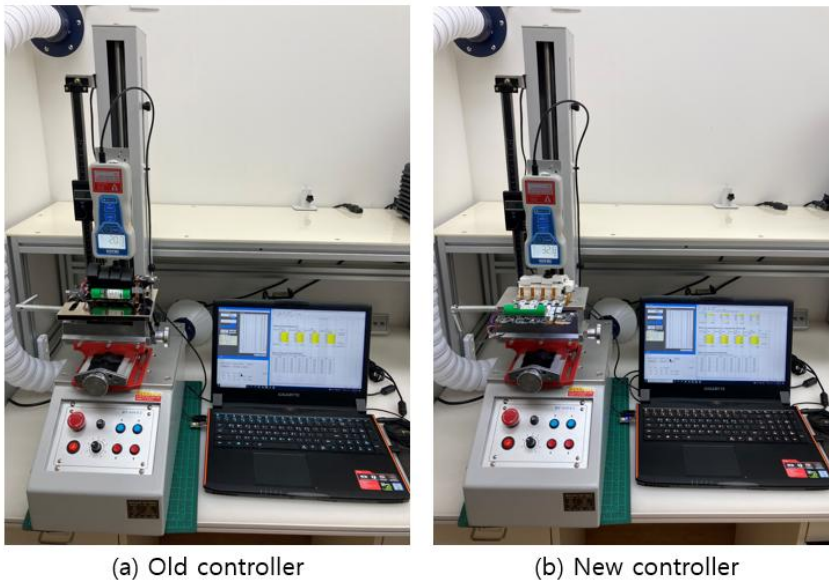
컨트롤러의 액추에이터 이동 거리 실험 결과는 [표 1]과 같다. 기존의 컨트롤러의 유효 이동 거리는 8.135(mm)~8.514(mm)였으며, 새로 설계된 컨트롤러의 유효 이동 거리는 8.740(mm)~9.601(mm)로 나타났다. 새로 설계된 햅틱 액추에이터의 이동 거리가 기존 액추에이터보다 증가함에 따라 가상공간에서 표현할 수 있는 가상물체의 크기의 변화가 증가하였다.

[표 1] 햅틱 액추에이터 이동 거리

[Table 1] Haptic actuator movement distance

	Actuator 2	Actuator 3	Actuator 4	Actuator 5
Old controller	8.491(mm)	8.514(mm)	8.383(mm)	8.135(mm)
New controller	9.601(mm)	8.740(mm)	9.067(mm)	9.036(mm)

[그림 5]는 디지털 푸시풀게이지를 사용하여 액추에이터의 이동 거리에 따른 힘 측정 실험을 수행하였다. 액추에이터의 위치를 0mm부터 7mm까지 1mm씩 변경하며 액추에이터가 건디는 힘을 측정하고 [표 2]와 같이 평균을 계산하였다. 기존의 컨트롤러는 평균 17.32N~ 20.80N의 힘을 견딜 수 있으며, 새로 설계된 컨트롤러는 24.42N~30.43N으로 사용자가 손가락으로 누르는 힘을 견딜 수 있는 크기가 늘어났다.



[그림 5] 햅틱 액추에이터 힘 측정시험

[Fig. 5] Haptic actuator force measurement test

[표 2] 햅틱 액추에이터 힘 평균

[Table 2] Haptic actuator power average

	Actuator 2	Actuator 3	Actuator 4	Actuator 5
Old controller	20.80(N)	17.32(N)	20.65(N)	20.31(N)
New controller	30.43(N)	29.79(N)	26.28(N)	24.43(N)

5. 결론

본 논문에서는 가상현실 공간에서 손으로 가상의 물체를 잡고 조작할 수 있는 감각을 제공할 수 있도록 손가락마다 길이를 제어할 수 있는 다섯 개의 선형 액추에이터를 포함하는 핸드헬드 혼합현실 컨트롤러의 설계 및 구현에 대해서 논의하였다. 기존에 제작하였던 햅틱 컨트롤러의 경우 부피를 줄이는 것이 사용자 인터페이스가 향상될 것으로 예상되었다. 컨트롤러에서 가장 많은 부피를 차지하는 선형 액추에이터를 소형화하고, 선형 액추에이터와 관련된 햅틱 피드백 모듈과 컨트롤러의 외형의 크기를 줄여서 설계하였다. 초기 컨트롤러의 기계적 성능을 측정하기 위하여 액추에이터의 유효 이동 거리 및 이동 거리에 따른 힘을 측정하여 기존 컨트롤러보다 새로 설계 제작한 컨트롤러의 성능이 높아졌을 보였다. 이후 연구로는 햅틱 컨트롤러에 생체신호를 측정하는 모듈을 추가하는 연구를 진행함으로써 인간의 여러 정보를 수집하여 재활 분야에 활용하는 연구를 수행할 계획이다.

References

- [1] VIVE, “VIVE Cosmos Controller (R)”, vive.com, <https://www.vive.com/us/accessory/cosmos-controller-right/>, (accessed March 28, 2022).
- [2] Meta Quest, “Oculus Quest Accessories & Parts”, oculus.com, “<https://www.oculus.com/accessories/quest/>”, (accessed March 28, 2022).
- [3] Valve Index, “Valve Index Controllers”, valvesoftware.com, “<https://www.valvesoftware.com/en/index/controllers>”, (accessed March 28, 2022).
- [4] C. Pacchierotti, S. Sinclair, M. Solazzi, A. Frisoli, V. Hayward, D. Prattichizzo, “Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives”, *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 10, no. 4, May 2017, pp. 580-600, doi: 10.1109/TOH.2017.2689006.
- [5] D. Wang, K. Ohnishi, W. Xu, “Multimodal Haptic Display for Virtual Reality: A Survey”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 1, June 2019, pp. 610-623, doi: 10.1109/TIE.2019.2920602.
- [6] V. Yem, R. Okazaki, H. Kajimoto, “FinGAR: combination of electrical and mechanical stimulation for high-fidelity tactile presentation”, *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, July 24-28, 2016, Anaheim, CA, USA, pp. 1-2, doi: 10.1145/2929464.2929474.
- [7] S. Y. Teng, P. Li, R. Nith, J. Fonseca, P. Lopes, “Touch&Fold: A foldable haptic actuator for rendering touch in mixed reality”, *2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, May 8-13, 2021, Yokohama, Japan, pp. 1-14, doi: 10.1145/3411764.3445099.
- [8] M. Aiple, A. Schiele, “Pushing the limits of the CyberGrasp™ for haptic rendering”, *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 6-10, 2013, Karlsruhe, Germany, pp. 3541-3546,

doi: 10.1109/ICRA.2013.6631073.

- [9] I. Choi, H. Culbertson, M. R. Miller, A. Olwal, S. Follmer, "Grabity: A Wearable Haptic Interface for Simulating Weight and Grasping in Virtual Reality", The 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, October 22-25, 2017, Québec City, Canada, pp. 119-130, doi: 10.1145/3126594.3126599.
- [10] I. Choi, E. Ofek, H. Benko, M. Sinclair, C. Holz, "CLAW: A Multifunctional Handheld Haptic Controller for Grasping, Touching, and Triggering in Virtual Reality", 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, April 21-26, 2018, Montreal, Canada, pp. 1-13, doi: 10.1145/3173574.3174228.
- [11] J. Lee, M. Sinclair, M. Gonzalez-Franco, E. Ofek, C. Holz, "TORC: A virtual reality controller for in-hand high-dexterity finger interaction", 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, May 4-9, 2019, Glasgow, UK, pp. 1-13, doi: 10.1145/3290605.3300301.
- [12] Y. Sun, S. Yoshida, T. Narumi, M. Hirose, "PaCaPa: A Handheld VR Device for Rendering Size, Shape, and Stiffness of Virtual Objects in Tool-based Interactions", 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2019, Glasgow, UK, pp. 1-12, doi: 10.1145/3290605.3300682.
- [13] E. J. Gonzalez, E. Ofek, M. Gonzalez-Franco, M. Sinclair, "X-Rings: A Hand-mounted 360 Shape Display for Grasping in Virtual Reality", The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, October 10-14, 2021, USA, pp. 732-742, doi: 10.1145/3472749.3474782.