Regular paper | Journal of the KIECS. pp. 379-386, vol. 18, no. 2, Apr. 30. 2023, t. 118, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2023.18.2.379

손가락 부상 환자의 재활을 위한 장갑형 웨어러블 시스템

성지훈* · 최현진**

A Wearable Glove System for Rehabilitation of Finger Injured Patients

Ji-Hun Seong* · Hyun-Jin Choi**

요 약

손가락 골절 치료 후에는 장시간 사용하지 않아 손가락 힘줄 운동 능력이 떨어져 관절이 뻣뻣해지고, 경직된다. 이것은 근력손실 및 유연성 저하를 비롯한 손 사용의 어려움으로 이어질 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 손가락의 유연성 회복과 근력 강화를 위한 반복적인 재활 훈련을 해야 한다. 본 연구에서는 집에서도 사용할 수 있는 손가락 힘 훈련용 웨어러블 장갑 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 FSR센서를 사용하여 힘을 측정하며, 신호 획득을 위한 맞춤형 PCB를 적용했고 고무 밴드를 사용하여 크기를 조정할 수 있다. 균형잡힌 손가락 근력 훈련 평가를 위해 네 가지 경우의 동작에서 쥐는 힘 측정 결과를 분석하였다. 본 연구에서는 다섯 손가락 힘의 중심을 나타내는 벡터를 제안하며, 힘의 균형 수준을 수치적으로 나타낼 수 있음을 보였다.

ABSTRACT

When patients suffer from finger injuries, their finger joints can become stiff and inflexible due to decreased ability to exercise the finger tendons. This can lead to a loss of strength and difficulty using their hands. To address this, it is important to provide patients with consistent rehabilitation treatment that can help restore finger flexibility and strength simultaneously. In this study, we propose wearable gloves that use FSRs (force sensitive resistors) for finger strength training. The glove is designed to be adjustable using rubber bands and a custom PCB is designed for signal acquisition. For the evaluation of finger strength training, the result was analyzed in four cases. We suggest a vector that represents the center of five finger forces, and the result shows that the vector can indicate the level of force balance.

키워드

Finger Rehabilitation, Wearable Sensor, Pressure Sensor
손 재활 시스템, 웨어러블 센서, 압력 센서

Ⅰ. 서 론

인간은 손을 사용하여 수많은 작업을 한다. 특히 현대인들은 컴퓨터와 스마트폰을 장시간 사용하며 손과 손가락을 끊임없이 움직인다. 이러한 손에 부상을 당하는 경우 일상생활이 어려워진다. 손가락의 골절이

* 동국대학교 기계공학과 (hunee_e2@naver.com)
** 교신저자 : 상명대학교 휴먼지능로봇공학과
· 접 수 일 : 2023. 02. 25
· 수정완료일 : 2023. 03. 20
· 게재확정일 : 2023. 04. 17
· Received : Feb. 25, 2022, Revised : Mar. 20, 2023, Accepted : Apr. 17, 2023
· Corresponding Author : Hyun-Jin Choi
Dept. of Human Intelligence and Robot Engineering, Sangmyung University
Email : hyunjin@smu.ac.kr

발생하면, 뼈가 접합될 때까지 해당 부위를 움직이지 않도록 고정하는 치료를 한다. 치료 과정에서 장시간 사용하지 않은 손가락은 손가락 힘줄(tendon)의 움직임이 제한되기 때문에 관절이 굳게 되어 손 사용 능력과 손 부위의 힘이 손실된다. 부상이 아닌 뇌 신경계 질환으로 손 재활운동이 필요한 경우들도 있다. 손은 인체의 말단부위로 가장 먼저 신경 회복이 시작된다. 손의 힘은 악력으로 평가할 수 있으며, 2019년 국민건강영양조사 악력검사 자료에 따르면 30대에서 악력 평균이 남자 43.3 kg, 여자 25.8kg으로 전 연령대 중 가장 높으며, 이후부터 점차 감소한다[1]. 나이가 들수록 손가락 근력이 약해지기 때문에 다른 신체 부위와 같이 꾸준한 운동이 필요하다. 자발적인 꾸준한 운동을 촉진하기 위해 헬스케어 애플리케이션이 활용되기도 한다[2, 3].

손 재활을 위한 다양한 로봇이나 장치들도 등장하고 있다. 뇌졸중 환자의 손 재활에 로봇이 활용고 있으며[4], 근전도센서 등을 활용한 다양한 손 재활 장치들이 연구되었다[5, 6]. Castellini외 1인은 운동 재활 치료를 돕기 위한 손 힘 측정 장치를 제안했다[7]. 손가락 끝을 스트레인게이지가 포함된 베이스에 고정시키고 손가락 운동을 수행하는 방식이다. 손의 재활을 위한 외골격형 로봇[8, 9]이나 공압을 활용하는 손가락 재활 로봇[10] 연구도 진행되고 있다. 그러나 이러한 장치들은 설치형태로 병원과 같은 장소에서만 사용할 수 있거나, 착용형 타입이어도 무겁거나 배선이 복잡한 단점이 있다.

손 힘 훈련을 위해 일반적으로 가장 간단히 사용되는 기구는 말랑한 재질의 고무공이다. 재활의 효과를 위해서는 짧은 주기로 반복적인 훈련을 하는 것이 중요하므로 집에서도 간단히 사용할 수 있는 기구가 활용된다. 이러한 고무공 훈련은 전반적인 악력을 키울 수는 있지만, 다섯손가락의 균형있는 훈련을 하기 어렵다. 약하거나 통증이 있는 손가락에는 힘을 적게 주게 되어, 훈련의 효과가 떨어질 수 있다. 본 연구에서는 간단한 방식을 사용하여 다섯손가락을 균형있게 훈련할 수 있도록 하는 장갑형 웨어러블 장치를 소개한다. 장치 착용 상태에서도 다른 일상생활을 할 수 있으며, 다양한 물체를 쥐는 훈련에 사용할 수 있다. 다섯 손가락 끝과 손바닥 부분에 FSR(Force Sensitive Resistors)센서를 추가하여 각 손가락을 굽혀 물체를 잡는 힘을 확인할 수 있도록 한다. 제안하는 장치는 쥐는 힘의 크기를 확인할 수 있도록 하였다. 손가락 별 힘 균형도를 판별하는 평가지표를 제안하고, 불균형적인 힘과 균형적인 힘의 경우를 실험적으로 비교하였다.

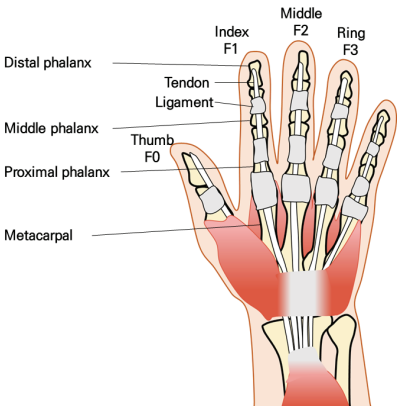


그림 1. 손 부위의 해부학적 구조
Fig. 1. Anatomy of the hand

II. 웨어러블 시스템 설계 및 제작

2.1 손과 손가락의 구조

인간의 손은 27개의 관절로 이루어져 있다. 손가락 자체에는 큰 힘을 내는 근육이 없으며, 손가락을 구부리고 펴는 힘은 힘줄을 통해 전달된다. 손가락 끝의 말절골에 부착되어 손목 부근까지 이어진 힘줄이 팔뚝 부근의 근육과 연결되어 있으며(그림 1), 이 근육의 수축이 힘줄을 당겨 손가락을 구부리거나 펴게 된다. 악력 운동을 하는 경우 팔꿈치 근육이 발달하는 것은 이러한 이유이다. 기절골 부근은 별도의 근육과 연결되어 있지만 말절골과 중절골 관절은 함께 움직이는 특징이 있다. 따라서 말단부에서만 힘을 측정해도 손가락 전체의 구부림 힘을 추정할 수 있다.

2.2 장갑형 웨어러블 시스템

손가락 힘을 측정하기 위해 손가락 끝부분의 압력을 잴 수 있는 장치를 설계했다. 손의 자유로운 움직임을 위해 그림 2와 같이 패브릭 소재의 장갑 형태로

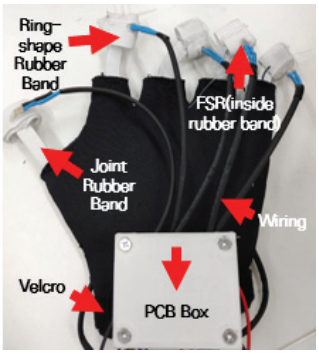


그림 2. 웨어러블 장갑 시스템 구성
Fig. 2 Configuration of the proposed system

제작했다. 일반 장갑 형태를 사용할 경우, 착용자에 따라 손가락 길이가 다른 경우 센서가 손가락 끝 부분에 정확히 위치하지 않을 수 있으므로 손바닥 부분과 끝부분을 분리하였다. 손바닥 부분은 네오프렌 원단을 사용하여 손가락이 잘린 장갑 형태로 제작했으며, 손목 부분은 고정을 위해 벨크로 형식의 조임부를 설계했다. 손가락 끝부분은 다양한 손가락 굵기에도 센서가 빠지지 않고 잘 부착되도록 탄성 재질의 밴드에 소형 FSR 센서를 내장하였다. 손가락 끝부분과 손바닥 부분은 탄성 밴드로 연결하여 길이조절이 가능하도록 하였다. 악력 측정을 위해 손가락 끝 뿐 아니라 손바닥의 중수골 부위에도 두 개의 FSR 센서를 내장하였다.

FSR 센서는 필름 타입의 가변저항으로 힘을 가하지 않을 때에는 큰 저항값을 가지며, 면에 누르는 힘을 가하면 저항값이 작아지는 특징이 있다. 따라서 FSR 센서 양단에 가해지는 전압변화를 이용하여 힘을 측정할 수 있으며, 일반적으로 각 센서별 별도의 pull-down 저항을 연결해야 한다. 각 센서에는 세 가닥의 배선이 필요하며, 총 7개의 FSR 센서를 사용하기 위해서는 21개의 배선이 필요하다. 장치의 배선을 간소화 하기 위해 별도의 PCB(: Printed Circuit Board)를 설계하였다. PCB는 각 손가락 센서의 배선을 취합하고 pull-down 저항 회로를 포함하여, 입력 전압과 ground, 7개의 아날로그 출력으로 배선을 간소화 했다. PCB는 소형으로 제작되어 장치의 손등 부분에 벨크로로 고정하였다.

2.3 데이터 획득 및 실험 세팅

7개의 FSR 센서의 아날로그 전압을 측정하기 위해 데이터획득장치로 National Instrument 사의 myRIO-1900를 사용하였다. 아날로그 신호는 5V전압에 대해 12bit 해상도로 측정되며, 데이터는 100Hz의 주기로 획득했다. 손가락 끝의 FSR 센서에서 힘 값을 측정하기 위해, 평면에서의 누르는 힘을 측정하고 FSR 센서 측정값과 비교하였다. MATLAB의 curve fitting 함수를 사용하여 3차 다항식 형태의 힘 변환식을 도출하였다.

웨어러블 장치에서 측정한 힘과 쥐는 힘의 비교하기 위해, 쥘 수 있는 장치에 압력센서를 사용하여 힘을 측정할 수 있는 실험장치를 제작했다. 손으로 쥘 수 있는 지름 약 6cm 실린더 형태의 구조물에 한쪽 끝이 막힌 실리콘 튜브를 감아 전체 면을 감싸도록 했다. 실리콘 튜브의 반대쪽에는 공압 기반의 압력 센서(33A-007G-2210)을 연결하여 실린더 전체에 가해지는 총 압력을 측정하였다. 해당 실험장치의 압력센서의 아날로그 출력값도 myRIO를 사용하여 획득했다.

III. 손가락 힘 측정 실험

3.1 실험 방법

압력측정이 가능한 실린더 장치를 제안하는 웨어러블 시스템을 착용하고 쥐는 실험을 실시했다. 한 명의 20대 여성을 대상으로 실험을 진행했으며, 쥐는 힘은 약한 힘(low)과 중간 정도의 힘(medium), 그리고 최대의 힘(high)으로 구분하여 진행했다. 사람이 정밀한 힘을 생성하기 힘들기 때문에 PC 화면에 실린더의 압력값을 보여주어 단계를 구분하여 힘을 줄 수 있도록 구성했다.

다섯 손가락이 균형있게 훈련되고 있는지를 파악하기 위해 불균형적인 힘의 경우를 함께 실험하고 그 결과를 비교하고자 했다. 그림 3과 같이 네 가지의 경

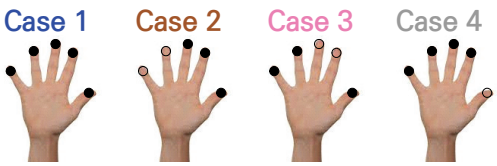
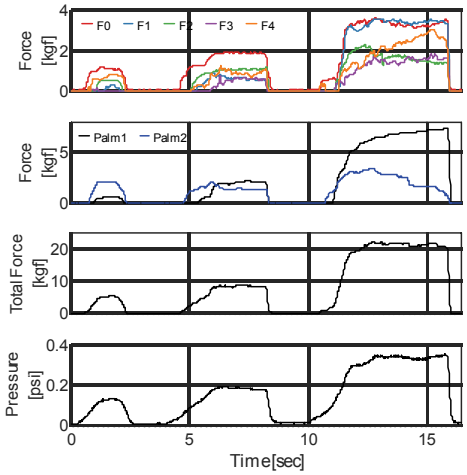


그림 3. 실험에 사용된 쥐는 방법들
Fig. 3 Four gripping methods



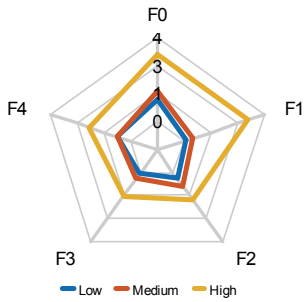
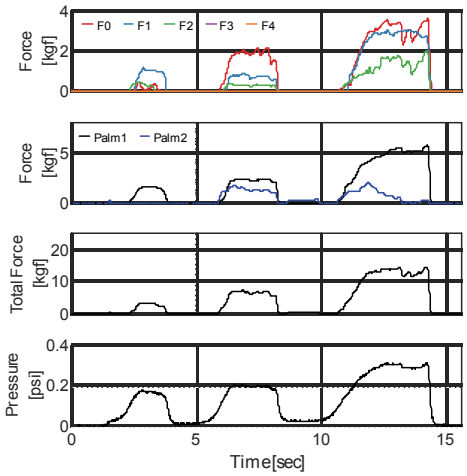


그림 4. Case 1의 실험 결과
Fig. 4 Experimental results of Case 1



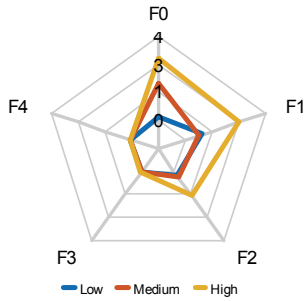


그림 5. Case 2의 실험 결과
Fig. 5 Experimental results of Case 2

우를 진행했다. 먼저, 다섯 손가락을 모두 사용하는 경우를 Case 1로 정했다. 엄지, 검지, 중지만을 사용하여 쥐는 실험을 Case 2로 하고, 엄지, 약지, 새끼손가락을 사용하는 실험을 Case 3으로 했다. 마지막으로 엄지를 제외한 네 손가락으로 쥐는 경우를 Case 4로 정했다.

3.2 실험 결과

그림 4는 다섯 손가락을 모두 사용한 Case 1의 실험 결과이다. 위쪽 첫 번째 그래프는 다섯 손가락의 FSR 센서 값을 힘으로 나타낸 것이다 F0은 그림 1에서 표시한 것과 같이 엄지(Thumb)를 나타내고, F1은 검지(Index Finger), F2은 중지(Middle Finger), F3은 약지(Ring Finger), F4는 새끼손가락(Pinky Finger)를 나타낸다. 위쪽 두 번째 그래프는 손바닥 부분의 FSR 두 개에서 측정한 힘 값을 나타낸다. 위쪽 세 번째 그래프는 손가락과 손바닥 총 7개의 센서에서 측정된 힘 값의 총합을 나타내었다. 1회 실험 동안 세 단계의 힘으로 쥐었다 폈다 하는 동작을 반복하였다. 위쪽 마지막 그래프는 해당 실험동안 측정된 실린더의 압력 값을 나타낸다. 웨어러블 장치에서 측정된 손 힘의 크기와 실린더에서 측정된 힘 값이 같은 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

그림 4의 아래쪽에는 다섯 손가락 센서의 값을 레이다 도표(Radar Chart)로 나타내었다. 파란 선은 약한 힘의 경우, 붉은 선은 중간 힘의 경우, 노란 선은 큰 힘의 경우에 대해 구간 평균값을 도출하여 그렸다.

그림 5,6,7은 각각 그림 3의 Case 2,3,4에 해당하는 실험 결과이다. Case 2의 경우 약지와 새끼손가락에 해당하는 F3, F4의 데이터가 0으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 의도적으로 세 개의 손가락만을 사용하여 세 단계의 힘의 크기로 쥐었고, 힘의 총합과 실린더의 압

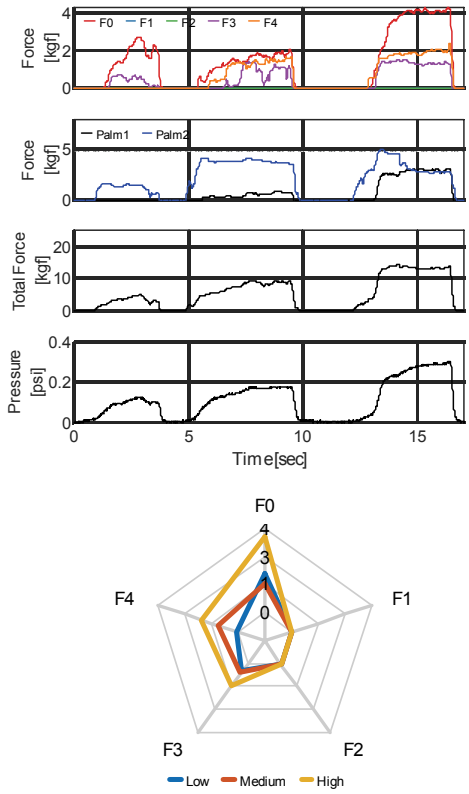


그림 6. Case 3의 실험 결과
Fig. 6 Experimental results of Case 3

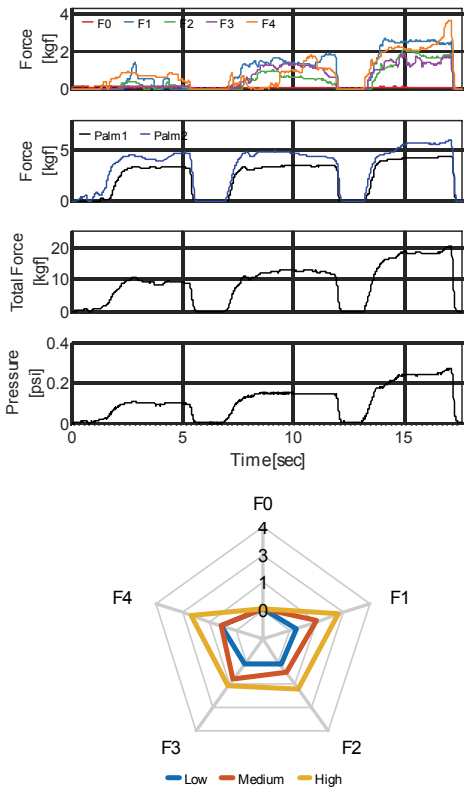


그림 7. Case 4의 실험 결과
Fig. 7 Experimental results of Case 4

력이 유사한 경향을 보였다. 레이다 도표는 F0,1,2방향으로만 치우쳐 확장되는 모양을 띈다. Case 3은 검지와 중지에 해당하는 F1,F2의 데이터가 0으로 나오도록 한 실험 결과이며, Case 4는 엄지(F0)를 사용하지 않고 실험한 결과이다.

IV. 평가 지표 분석

레이다 도표는 시작적으로 각 성분의 값의 균형도를 어느정도 파악할 수 있지만, 이를 수치적으로 표현하기 어렵다는 단점이 있다. 또한 F0부터 F4의 배치 순서를 다르게 할 경우 도표의 형상이 달라지기 때문에 불균형도를 판별하기 어렵다. 본 연구에서는 다섯 손가락 힘의 균형도를 판별하기 위해 각 손가락 힘을 벡터화하여 3차원 공간에서 표현하였다. 모든 손가락이 같은 힘을 낼 때 합력의 벡터값이 0이 되도록 각 손가락에 해당하는 단위벡터를 방사형으로 배치하였다. 그림 8은 각 손가락에 해당하는 단위벡터를 표시한 것이다. P0부터 P4는 엄지(F0)부터 새끼손가락(F4)에 해당하는 단위벡터의 끝점의 좌표이며, 값은 표 1에 정리하였다. 엄지를 제외한 네 개의 손가락은 90도씩 방사형으로 향하게 하였으며, 엄지는 z축을 향하게 했다. 엄지를 포함하였을 때 0의 값을 만들기 위해 나머지 네 손가락의 z 방향은 -0.25로 하였다.

평가 지표를 위한 벡터, $\boldsymbol{C}$,는 식 (1)로 구할 수 있다.

$$\boldsymbol{C} = \left(\sum_{i=0}^{4} \boldsymbol{P}_i * F_i\right) / \left(\sum_{i=0}^{4} F_i\right) \quad \cdots (1)$$

그림 9는 네 가지 Case의 큰 힘(high) 경우에 대한 실험 값으로 벡터 $\boldsymbol{C}$를 구하고, 그 끝점을 표시한 결과이다. 왼쪽은 xz평면에서 본 경우이고, 오른쪽은

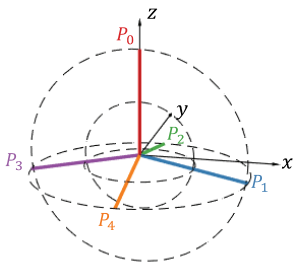


그림 8. 다섯 손가락의 단위벡터
Fig. 8 Unit vectors of five fingers

표 1. 다섯 손가락의 단위 벡터
Table 1. Unit vectors of five fingers

	x	y	z
P_0	0	0	1
P_1	1	0	-0.25
P_2	0	1	-0.25
P_3	-1	0	-0.25
P_4	0	-1	-0.25

xy평면에서 본 경우이다. 네 가지 경우의 벡터는 표 2과 같이 도출되었다. 다섯가지 손가락을 모두 사용한 Case 1의 경우는 원점에 가장 가까운 위치를 나타내고, Case 2는 F0,1,2를 주로 사용했기 때문에 xy평면에서 보았을 때 1사분면에 위치하며, F0,3,4를 사용한 Case 3은 xy평면에서 3사분면에 위치하는 것을 확인할 수 있다. 각 벡터가 원점에서 얼마나 떨어져 있는지의 정도가 다섯 손가락 힘의 불균형의 정도이기 때문에 벡터의 norm 값을 구해보았다. 각 경우의 norm 값은 $norm(\boldsymbol{C}_1) = 0.1929$, $norm(\boldsymbol{C}_2) = 0.5045$, $norm(\boldsymbol{C}_3) = 0.5282$, $norm(\boldsymbol{C}_4) = 0.2769$ 로 계산되었다. Case 1과 Case 4의 경우 그림 9에서는 유사한 거리로 보이지만 norm 값을 보면 Case 1이 더 균형있는 힘을 가했음을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 손쉽게 손 힘 재활 훈련을 하면서 균형잡힌 손가락 힘을 키우기 위한 방법으로 FSR센서를 활용한 장갑 형태의 웨어러블 장치를 제작하여 쉽게 착용할 수 있도록 하였다. 손가락 끝과 손바닥에 내장된 센서의 값은 손등의 PCB와 myRIO를 통해 측정되었다. 손가락과 손바닥 센서에서 측정된 힘의 총합으로 쥐는 힘의 정도를 추정할 수 있는지를 확인하기 위해 압력측정이 가능한 원통형 장치를 쥐며 실험을 진행했다.

일반적인 비전자식 고무공을 쥐는 훈련방법은 손쉽게 일상에서 사용할 수 있지만, 다섯 손가락이 균형있게 사용되는지를 판별할 수 없다. 본 연구에서는 각 손가락의 개별 힘을 측정할 수 있으며, 힘의 불균형 정도를 수치적으로 표현할 수 있는 총합벡터를 도출하였다. 의도적으로 불균형적인 손가락을 사용하는 경우와 균형 있게 사용하는 경우를 비교하였을 때, 다섯 손가락을 골고루 사용하는 경우에 norm 값이 0에 가깝게 나타났다. 본 연구에서 제안하는 장치에 훈련 동기를 유발할 수 있는 다양한 UI를 접목하면 각 손가락 별로 운동하거나, 다섯 손가락을 균형 있게 사용하는 등의 다양한 재활훈련 프로그램을 구성할 수 있을 것으로 기대된다.

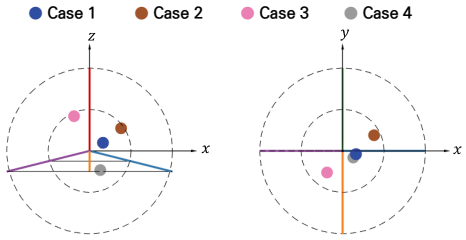


그림 9. 다섯 손가락 힘의 합벡터
Fig. 9 Sum vector of five finger forces

표 2. 다섯 손가락 힘의 합벡터
Table 2. Sum vector of five finger forces

	x	y	z
$\boldsymbol{C}_1$	0.1614	-0.0396	0.0978
$\boldsymbol{C}_2$	0.3799	0.1888	0.2731
$\boldsymbol{C}_3$	-0.1881	-0.2610	0.4189
$\boldsymbol{C}_4$	0.1285	-0.0803	-0.2317

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021R1F1A1062499).

References

[1] D. Kim, S. Park, K. Oh, and Y. Kim, “Current Status of Decreased Grip Strength in the Elderly in Korea,” *Weekly Health and Illness*, vol. 15, no. 19, 2022, pp. 1280-1287.

[2] S. Hong, “Development of smart healthcare contents using virtual reality experiential devices,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences,* vol. 17, no. 4, 2022, pp. 739-744.

[3] J. Moon and I. Bak, “The Effects of Self-Exercise Based on Health Care Application on Upper Extremity Function and Daily Living, Satisfaction in Patients with Stroke,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences,* vol. 12, no. 3, 2017, pp. 515-523.

[4] J. Park, “Effect of Robot-Assisted Hand Rehabilitation on Hand Function in Chronic Stroke Patients,” *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 8, no. 4, 2013, pp. 273-282.

[5] H. Kim and G. Kim, “Development of a Finger-rehabilitation Robot for Fingers’ Flexibility Rehabilitation Exercise,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing,* vol. 14, no. 4, 2013, pp. 535-541.

[6] Y. Yun, S. Dancausse, P. Esmatloo, A. Serrato, C. Merring, P. Aqarwal, and A. Deshpande, “Maestro: An EMG-Driven Assistive Hand Exoskeleton for Spinal Cord Injury Patients,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA)*, Singapore, 2017, pp. 2904-2910.

[7] C. Castellini and V. Ravindra, "A wearable low-cost device based upon Force-Sensing Resistors to detect single-finger forces," *5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, São Paulo, Brazil, 2014, pp. 199-203.

[8] B. Wang, N. Takahashi, and H. Koike, “Sensor Glove Implemented with Artificial Muscle Set for Hand Rehabilitation,” *The Augmented Humans (AHs) International Conference*, Kaiserslautern, Germany, 2020.

[9] S. Baek, H. Kim, and J. Kim, “Design and implementation of motor-based rehabilitation wearable robot hand system using 3D printing,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences,* vol. 16, no. 5, 2021, pp. 941-946.

[10] Y. Chen, X. Tan, D. Yan, Z. Zhang, and Y. Gong, “A Composite Fabric-Based Soft Rehabilitation Glove with Soft Joint for Dementia in Parkinson’s Disease,” *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine,* vol. 8, 2020, pp. 1-10.

저자 소개

성지훈(Ji-Hun Seong)

2023년 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 졸업(공학사)
2023년 ~ 현재 동국대학교 대학원 기계공학과 (석사)

※ 관심분야 : 웨어러블 로봇, 재활로봇, 로봇 회로 설계

최현진(Hyun-Jin Choi)

2012년 서강대학교 물리학과 졸업(이학사)
2019년 서강대학교 기계공학과 졸업(공학박사)

2017년 ~2020년 ㈜엔젤로보틱스 책임연구원
2020년 ~현재 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 교수

※ 관심분야 : 재활로봇, 착용형로봇, HRI