

손가락 동작 분류를 위한 니트 데이터 글러브 시스템

Knitted Data Glove System for Finger Motion Classification

이슬아¹·최유나²·차광열²·성민창²·배지현³·최영진[†]

Seulah Lee¹, Yuna Choi², Gwangyeol Cha², Minchang Sung², Jihyun Bae³, Youngjin Choi[†]

Abstract: This paper presents a novel knitted data glove system for pattern classification of hand posture. Several experiments were conducted to confirm the performance of the knitted data glove. To find better sensor materials, the knitted data glove was fabricated with stainless-steel yarn and silver-plated yarn as representative conductive yarns, respectively. The result showed that the signal of the knitted data glove made of silver-plated yarn was more stable than that of stainless-steel yarn according as the measurement distance becomes longer. Also, the pattern classification was conducted for the performance verification of the data glove knitted using the silver-plated yarn. The average classification reached at 100% except for the pointing finger posture, and the overall classification accuracy of the knitted data glove was 98.3%. With these results, we expect that the knitted data glove is applied to various robot fields including the human-machine interface.

Keywords: Data Glove, Wearable Sensor, Fabric Strain Sensor, Motion Classification

1. 서 론

최근 로봇 기술이 고도화됨에 따라 로봇과 인간 사이의 인간-기계 인터페이스(human-machine interface, HMI) 장치인 데이터 글러브(data glove)에 대한 관심이 증가 되고 있다. 데이터 글러브는 위험한 작업환경에서 사람을 대신하여 로봇이 정확하고 섬세한 작업이 가능하도록 하게하는 입력장치로 사용될 수 있으며, 산업용 로봇 뿐만 아니라 절단 환자들이 착용하는 전동 의수 및 신체 재활 훈련 등에서도 사용될 수 있다^[1-4]. 오늘날 로봇 핸드(robotic hand)는 인간의 손을 모사하여

정확한 파지 및 다자유도를 추구하며, 사용자의 의도대로 움직일 수 있는 원격 기술 등을 기반으로 개발되고 있다^[5]. 이처럼 여러 동작에서도 안정적인 센싱을 구현하기 위해서는 유연하고 신축성이 우수한 소재가 필요하다.

이러한 문제점을 개선하기 위해, 특히, 전도성 섬유를 기반으로 한 변형 센서(strain sensor)는 많은 연구원들에 의해서 연구되고 있고, 다양한 종류의 기법 및 구조로 사용되고 있다. 전자 섬유(E-textile)는 원단에 전자회로가 내장된 섬유이다. 이러한 전자 섬유는 가상-증강현실, 로봇, 오락 및 가전 제품 등을 제어하기 위해 인간과 기계 사이의 인터페이스 역할을 하는 중요한 요소 중 하나이다. 전자 섬유는 전기적 기능을 가진 원사를 이용하여 직조(weaving), 니팅(knitting), 자수(embroidery), 부직포(nonwoven) 등의 제조 방법을 통해 제작된다. 전도성 섬유는 딱딱한 금속 재료들을 대신하며, 우수한 전도성과 가볍고, 피부 트러블이 없으며, 다양한 크기로 변형이 가능하다^[6].

다양한 영역에서 정보통신기술(information and communication technology, ICT)을 활용함에 따라 웨어러블 센싱 디바이스(wearable sensing device)로서 데이터 글러브는 여러 분야에서 연구되고 있다. 이처럼 데이터 글러브는 웨어러블 센서(wearable sensor)를 직물에 통합하여 신체 부위에 활동량에 대한 모니터링^[7]과 자세(posture) 분류^[8] 등에 관한 성능 연구와

Received : Mar. 12. 2020; Revised : Apr. 11. 2020; Accepted : May. 6. 2020

※ This work was supported by the convergence technology development program for bionic arms through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science & ICT (No. 2015M3C1B2052811, and No. 2018R1A2B6005220)

1. Researcher, Department of Electrical and Electronic Engineering, Hanyang University, Ansan, 15588, Korea (seulah@hanyang.ac.kr)
2. MS student, Department of Electrical and Electronic Engineering, Hanyang University, Ansan, 15588, Korea (chldbsk2220@naver.com, tjalsckd@gmail.com, cky890@hanyang.ac.kr)
3. Associate Professor, Department of Clothing and Textiles, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea (jbae2@hanyang.ac.kr)

† Professor, Corresponding author: Department of Electrical and Electronic Engineering, Hanyang University, Ansan, 15588, Korea (cyj@hanyang.ac.kr)

새로운 소재 및 구조에 관한 연구⁹⁾ 등으로 진행되고 있다. 현재 상용화되어 있는 데이터 글러브의 센서는 전선, 전자 센서, 그리고 회로 등의 부품들이 내장되어있는 형태로 장갑을 구성하는 원단 자체는 센싱 역할을 하지 않는다. 또한, 부품들을 장갑에 내장하기 위해서는 재단, 봉제, 가공 등의 복잡한 공정이 포함되어 시간과 비용이 많이 드는 등의 어려움이 따른다. 따라서 사용자가 가볍고 쉽게 착용할 수 있는 데이터 글러브에 대한 연구가 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전도성 섬유를 이용한 데이터 글러브 제작에 관한 연구가 진행되고 있으나¹⁰⁻¹⁸⁾, 부분적인 손가락에 적용시키거나, 전도성 물질을 이용하여 프린팅, 재단 및 봉제 등의 여러 과정을 거치는 시간과 노력이 요구된다.

따라서 본 연구 목적은 인간과 로봇 사이의 인터페이스 장치로서 전도성 섬유를 이용한 센서 내장형 니트 데이터 글러브를 개발하는 것이다. 개발된 니트 데이터 글러브는 손가락의 움직임에 대한 각도 변화에 따라 저항 값이 바뀌도록 전도성 원사를 이용하여 측정 가능하도록 제작하였으며, 손의 크기에 상관없이 착용 가능하게 편직(knitting)하였다. 개발된 글러브의 성능평가를 위해, 전도성 원사에 따른 성능 비교, 그리고 손가락 동작에 대한 패턴 인식 분석을 실시함으로써 니트 데이터 글러브에 대한 실용성 및 상용화 가능성을 살펴보는 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 니트 데이터 글러브에 대한 설계 및 제작 방법에 대하여 설명하고, 3장은 실험 방법에 대한 설명과 원사 종류에 따른 성능 평가 및 동작에 대한 패턴인식 평가에 대한 결과를 확인한다. 마지막으로, 4장은 본 연구에 대한 요약 및 결론에 대하여 기술한다.

2. 니트 데이터 글러브 설계 및 제작

니트 데이터 글러브는 신체 재활 훈련 및 전동 의수 제어를 위한 입력장치로서 가볍고 유연한 형태로 제작하였다. 니트 데이터 글러브는 대표적인 전도성 재료에 대한 성능을 평가하기 위하여, 은(silver)과 스테인리스(stainless) 원사로 각각 제작하였다. 손가락의 굽힘(flexion) 각도 값을 측정하는 센서 영역은 전도성 원사로 편성하였으며, 비전도성 영역은 나일론 원사를 사용하였다. 또한, 손의 크기와 상관없이 데이터 글러브는 손에 밀착되고 손가락 움직임 변화에 따라 늘어나거나 다시 원래로 회복할 수 있도록 신축성이 우수한 스판덱스(spandex)를 전체적으로 사용하였다.

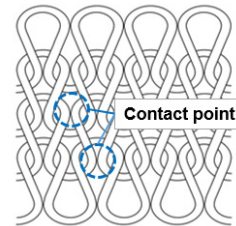
개발된 데이터 글러브 제작은 SDS one apex apparel CAD (Shima seiki) 소프트웨어를 사용하였으며, 편안한 착용감을 위하여 봉제선 없이 제작하는 홀가먼트(wholegarment) 기술을 적용하였다. 또한 노이즈 감소를 위해 센서 영역에만 전도성 원사를 편직하도록 인타샤(intarsia) 니팅 기법을 이용하였

다. 니트는 실을 고리를 형성하여 짜는 방식으로 신축성 있는 구조이다. 전도성 영역에서 인접한 루프 사이의 거리가 커짐에 따라 접촉하는 영역이 줄어드는 반면에 접촉 압력이 증가하여 접촉 저항이 낮아진다. 접촉 저항을 결정하는 요인은 Holm의 접촉 이론(Holm's contact theory)을 사용하여 계산되었으며¹⁹⁾, 다음 식과 같다.

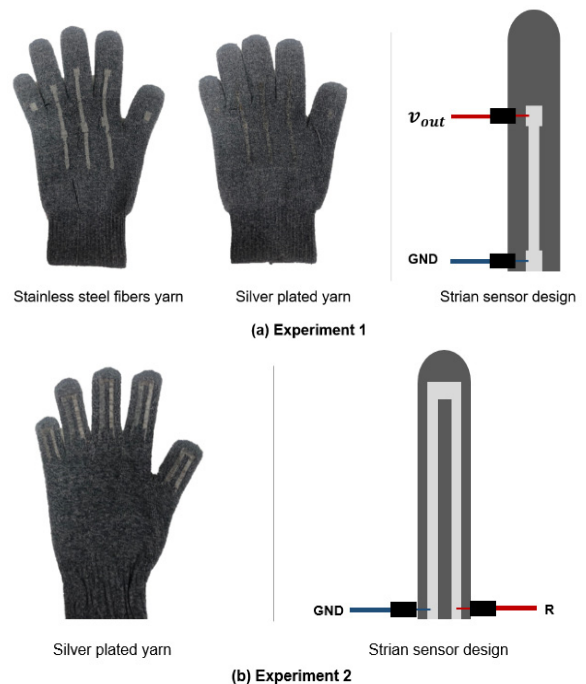
$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{n P}} \tag{1}$$

ρ 는 섬유의 저항이고, n 은 접촉 점의 수, P 는 접촉 압력, 그리고 H 는 섬유 강도이다. 전도성 섬유의 저항과 강도는 일정하지만, 접촉 점의 수와 접촉 압력은 센서의 구조와 설계에 따라 변화할 수 있다. 따라서 전도성 섬유 사이의 접촉 압력이 높아지고 접촉 점의 수가 증가하면 접촉 저항은 감소한다[Fig. 1]²⁰⁾.

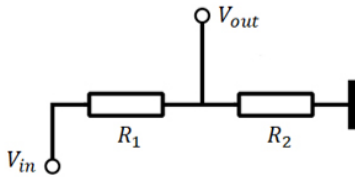
본 연구는 원사에 따른 성능 평가를 확인하기 위해, 니트 데이터 글러브의 센서 디자인을 두가지 형식(type)으로 진행하



[Fig. 1] Schematic diagram of knit design



[Fig. 2] The sensor design of the knit data glove: (a) straight type (experiment 1) (b) round type (experiment 2)



[Fig. 3] Voltage division circuit

었다. 첫째, 검지, 중지, 약지의 PIP (Proximal interphalangeal joints)와 MCP (Metacarpophalangeal joints)를 지나가도록 편직하였다 [Fig. 2(a)]. 둘째, 니트 데이터 글러브에 적합한 원사를 선정할 후, 패턴 인식을 위한 센서 설계를 진행하였으며, 전도성 원사의 양을 늘려 저항 변화를 많이 유도하기 위하여 [Fig. 2(b)]와 같이 설계하였다. 본 연구의 신호 획득 방법으로서는 전압 분배 회로를 이용하였으며, 다음 식과 같다.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{V_{out}}{V_{in} - V_{out}} \times R_1$$

[Fig. 3]은 기준 저항 R_1 과 측정하고자 하는 저항 R_2 를 연결하여 저항 사이에 걸리는 전압을 측정할 수 있다. 기준 저항 R_1 을 고정된 값으로 두고 V_{out} 을 측정하여 저항 R_2 의 값을 구한다. 측정은 아두이노 우노(UNO)를 사용하였으며, 입력전압 $V_{in} = 5V$, $V_{out} = 0 \sim 5V$, $R_1 = 1000\Omega$ 을 식 (1)에 대입하면 R_2 를 구할 수 있다.

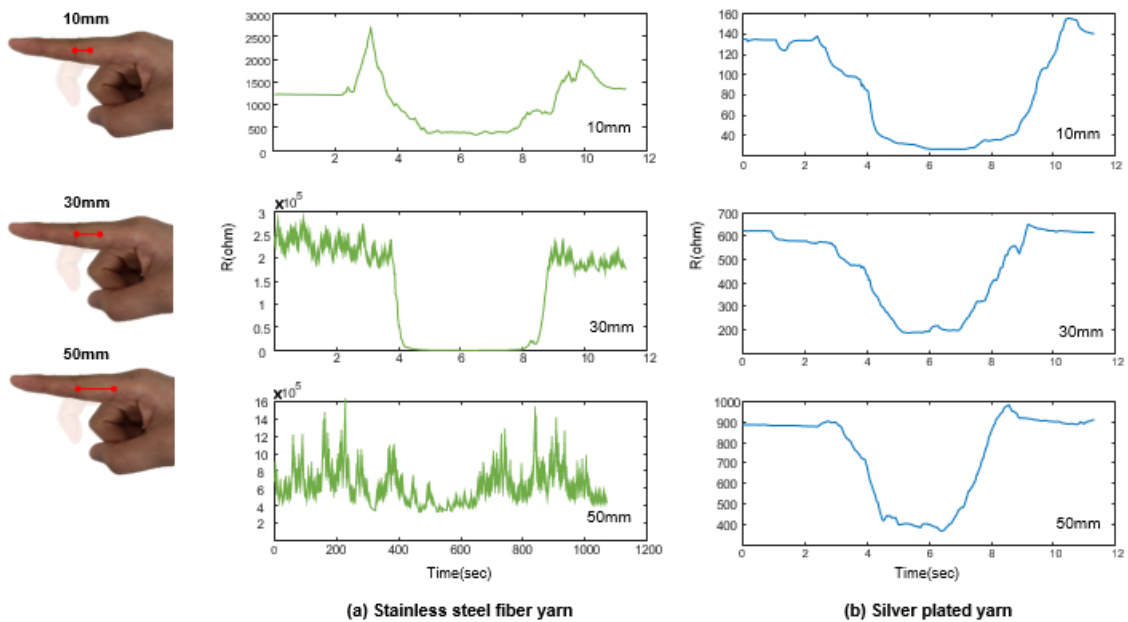
3. 실험 방법 및 결과

3.1 실험대상 및 방법

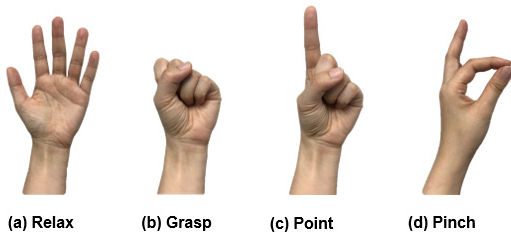
본 연구는 한양대학교 기관 생명윤리위원회(the Institutional Review Board: IRB)에서 2019년 7월(HYI-16-05508) 최종 승인을 받은 후에 진행하였다. 연구 대상은 건강한 성인 남녀 5명을 선정하였고, 실험 방법 및 절차에 대하여 피험자에게 충분한 설명을 제공한 후 동의 하에 진행하였다. 피험자는 앉은 상태에서 오른손에 니트 데이터 글러브를 착용하였으며 연구자의 지시에 따라 진행하였다.

본 실험은 전도성 원사 종류에 따른 성능 평가와 패턴 인식 분류로 나누어 진행하였다. 첫째, 니트 데이터 글러브에 대하여 대표적인 전도성 섬유인 은과 스테인리스 원사에 대한 비교 평가를 실시하였다. 측정 위치 및 동작은 손가락에 대하여 DIP (Distal Interphalange)관절과 PIP (Proximal Interphalange)관절의 굴곡(flexion)과 신전(extension) 동작에 대하여 [Fig. 4]와 같이 10 mm, 30 mm, 50 mm 간격을 두고 저항 값의 변화를 측정하였다.

둘째, 은사와 스테인리스 원사 사이의 비교 평가결과를 기반으로 데이터 글러브로 사용하기에 적당한 전도성 원사를 선택하고 다섯 손가락에 센서를 삽입하여 제작한 후에 손 동작에 대한 분류 실험을 진행하였다. 사람이 일상생활을 하기 위해 필요한 움직임이라고 판단되는 동작인 주먹(grasp), 포인트(point), 핀치(pinch)와 휴식(rest)을 포함한 4가지 동작을 [Fig. 5]와 같이 선정하였다. 피험자는 오른쪽 손에 니트 데이터 글러브를 착용한 후, 연구자의 신호에 따라 4가지 동작에



[Fig. 4] Resistance variations during flexion and extension of index finger, (a) stainless steel fiber yarn, (b) silver-plated yarn



[Fig. 5] Four postures for pattern classification

대하여 10초 동안 각각 3회씩 반복 측정하였다. 4가지 동작들 간의 차이를 알아보기 위해 각각 3번씩 반복 측정된 자료에 대하여 분산분석(ANOVA)을 실시하였다. 니트 데이터 글러브의 다섯 손가락에서 측정된 데이터는 저주파통과필터(low-pass filter)를 적용하여 노이즈를 상당 부분 제거하였다. 측정된 저항 값 R 의 범위와 연고자 하는 손가락 각도에 대하여 최댓값과 최솟값을 지정하여 각 손가락마다 측정 저항 값 R 에 매핑되는 추정 각도 θ 를 다음 식을 이용하여 구한다.

$$\theta = \frac{R - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \times (\theta_{max} - \theta_{min}) + \theta_{min} \quad (3)$$

니트 데이터 글러브의 실용성을 알아보기 위해, 패턴 인식 평가를 실시하였다. 본 연구에 사용된 기계학습 방법은 다층 퍼셉트론(MLP, Multi-layer perceptron)이며, 입력 층(input layer)은 다섯 손가락에서 측정된 저항 값이다. 또한, 출력 층의 노드는 4가지 동작으로 선정하였으며, 활성 함수는 ReLU와 Softmax를 사용하였다. 니트 데이터 글러브에서 측정된 신호처리 및 분석은 MATLAB R2018a (Mathworks, Natick, MA, USA), IBM SPSS Statistics version 21 (IBM Corp., Chicago, IL, USA), PyCharm Edu 2018.3을 사용하였다.

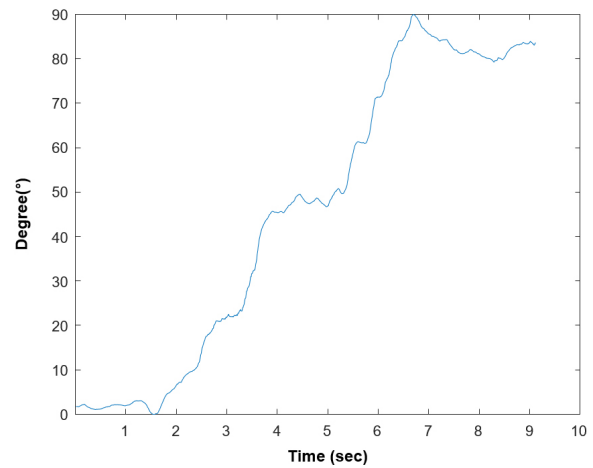
3.2 실험결과

3.2.1 원사에 따른 비교 평가

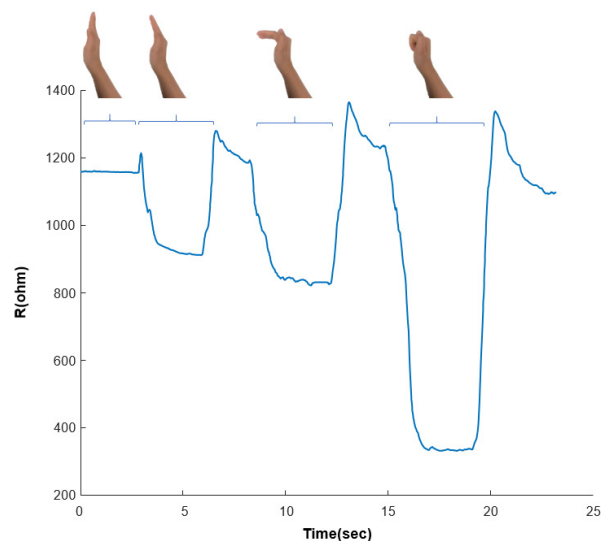
니트 데이터 글러브의 센서에 대한 성능을 평가하기 위하여, 대표 전도성 원사인 스테인리스 원사와 은사를 이용하여 측정 거리에 대한 저항 값을 측정하였다. 피험자는 오른쪽 손에 니트 데이터 글러브를 착용하였고 주먹 동작을 실시하였다. [Fig. 4]는 측정 거리 10 mm, 30 mm, 50 mm일 때 검지의 굴곡 후 신전 운동시에 측정되는 저항 값이다. 두 원사 모두 측정 거리가 멀어질수록 저항 값이 증가하였으며, 동작 시 저항 값이 감소하는 것을 확인하였다. 스테인리스 원사로 제작된 데이터 글러브는 [Fig. 4(a)]에서 보여지듯이 측정 거리가 멀어질수록 노이즈의 영향을 많이 받았다. 상대적으로 은사는 측정

거리에 따른 노이즈 영향이 크지 않았다. 따라서 손가락 또는 손목 등 관절을 지나도록 제작해야 하는 니트 데이터 글러브에는 은사로 제작된 데이터 글러브가 보다 적합할 수 있음을 확인하였다.

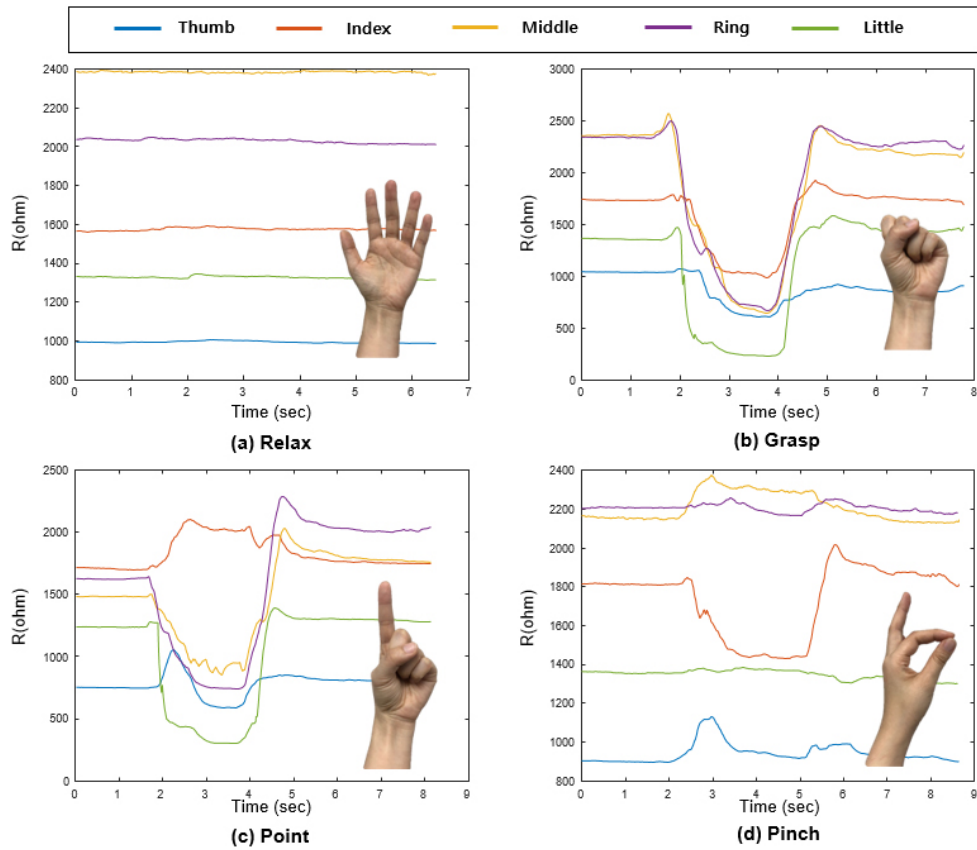
따라서 니트 데이터 글러브 제작을 위해 측정 거리에 영향을 많이 받지 않는 은사에 대하여 추가 실험을 실시하였다. [Fig. 6]은 은사 니트 데이터 글러브를 이용하고 식 (2)와 (3)을 활용하여 저항 값을 추정 각도로 매핑한 결과이다. 또한, 손 동작에 따른 사용자 의도를 파악하기 위하여 손가락 각도와 손 동작에 대한 추가 실험을 실시하였다. 손가락의 각도에 대한 저항 변화를 알아보기 위하여, 중지에 대하여 굴곡(flexion)의 정도에 따른 저항을 측정하였다. 굴곡의 각도가 커짐에 따라 저항이 낮게 측정되었으며 그 결과는 [Fig. 7]과 같다.



[Fig. 6] Angle estimation from the knit data glove according to the slow finger flexion, where the silver-plated yarn was used



[Fig. 7] Resistance variation according to the movements of the hand

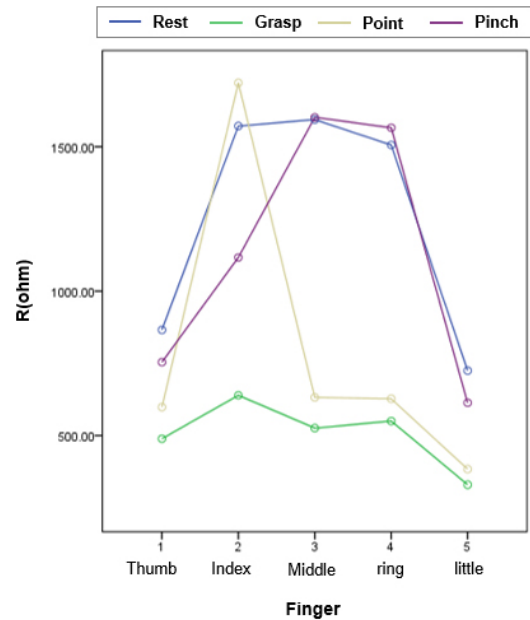


[Fig. 8] Resistance variations during flexion and extension of index finger, (a) stainless steel fiber yarn, (b) silver-plated yarn

3.2.2 동작 패턴 인식 평가

니트 데이터 글러브의 실용성을 검증하기 위해 [Fig. 5]에서 제시된 4가지 동작에 대하여 패턴 인식 평가를 실시하였다. [Fig. 8]은 4가지 동작에 대해서 저항을 측정된 결과이다. 손가락의 굽힘 정도에 따라 동작 간 차이를 확인할 수 있다. 주먹 동작에선 모든 손가락의 저항이 낮게 측정되었다. 또한, 포인트 동작은 검지를 제외한 나머지 손가락에서 낮게 측정되었으며, 검지의 저항은 증가하였다. 이는 검지를 제외한 손가락이 굽힘 동작일 때, 검지는 포인트 동작을 유지해야하기에 신전 (extension) 움직임이 있어 전도성 원사의 접촉 점의 수가 줄어들어 접촉 압력이 낮아지며 저항 값이 증가한다.

4가지 동작에 대하여 니트 데이터 글러브의 다섯 손가락에서 측정된 저항 값들의 평균을 나타낸 결과는 [Fig. 9]와 같다. 측정된 저항 값은 대략 200~1,550 Ohm 사이로 4가지 동작 차이를 확인하였다. 휴지기 동작에서 대체로 저항 값이 높았으며, 손가락 굽힘이 가장 큰 주먹(grasp) 동작일 때 가장 낮게 나타났다. 포인트 동작에서는 굽힘이 없는 검지의 저항 값이 가장 높았으며, 나머지 손가락은 주먹 동작과 유사한 값이 나타났다. 핀치 동작에서는 엄지와 검지를 제외한 나머지 손가락의 저항 값이 휴지기 상태와 유사함을 알 수 있었으며, 이러한



[Fig. 9] Average resistance values according to four hand postures and fingers

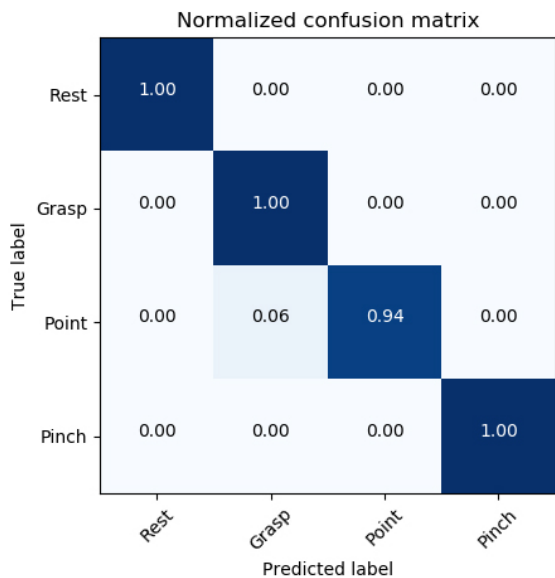
차이는 센서 역할을 하는 전도성 섬유에의 접촉에 따른 저항 값의 변화로 보여진다. 또한, 다섯 손가락에 대한 동작 차이를

[Fig. 9]에서 명확하게 보여준다. 엄지(thumb)와 소지(little finger)의 경우 저항 값의 변화가 크지 않았으며, 검지(index)와 중지(middle finger)의 경우 동작에 따른 저항 변화가 컸다. 특히 검지의 경우, 동작에 따라 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 휴지기를 기준으로 다섯 손가락에 대한 저항 값은 엄지와 소지가 나머지 손가락에 비해 낮게 측정되었는데, 이는 전도성 센서의 길이에 따른 차이로 보여진다. 이러한 결과에 대하여, 니트 데이터 글러브의 동작들 간의 신호 차이를 확인하기 위하여 반복 측정 분산분석을 실시하였고, 4가지 동작 간에 유의한 차이가 있음을 알 수 있었다($p < 0.001$).

더 나아가 5명의 피험자에 대하여 분류 정확도 검증을 실시하였다. 피험자는 오른쪽 손에 글러브를 착용한 후, 4가지 동작에 대하여 10초 동안 각각 3회 반복 측정 하였으며 이를 통해 12,000개의 데이터 세트를 얻었다. 다섯손가락에서 측정된 저항 값을 기계 학습에 사용할 수 있도록 데이터를 가공하였고, 다층 퍼셉트론 알고리즘을 적용하여 학습과정을 수행하였다. [Table 1]은 5명의 피험자에 대한 패턴 분류 학습을 실시한 결과이다. 모든 피험자는 90% 이상의 높은 인식률로 전체 평

[Table 1] Success rate of posture classification [Unit %]

	Sub. 1	Sub. 2	Sub. 3	Sub. 4	Sub. 5	Total
Rest	100	99	100	100	100	99.8
Grasp	100	100	100	71	100	94.2
Point	100	100	70	100	100	94
Pinch	66	73	100	100	67	81.2
Total	91.5	93	92.5	92.75	91.75	



[Fig. 10] Confusion matrix of four postures for five abled-bodied subjects, where all the data acquired from five subjects are combined

균 92.3%이다. 4가지 동작에 대해서, 휴지기는 99.8%로 가장 높은 인식률을 나타냈으며, 핀치(pinch) 동작이 81.2%로 가장 낮게 확인되었다. 핀치 동작을 제외한 나머지 3가지 동작에서는 90% 이상의 높은 인식률이 나타났다. 마지막으로, 전체 피험자의 60,000개(=12,000×5명) 데이터를 통합하여 동작 패턴 분류 실험을 수행하였다. 그 결과, 전체 인식률은 98.5%로 높게 나타났으며, 포인트 동작(94%)을 제외한 4가지 동작은 100%로 높은 인식 성능을 보였다[Fig.10]. 전체 피험자에 대한 인식률은 개별 인식률과 크게 차이가 나지 않고 비슷한 성능으로 확인되었다.

4. 결 론

본 연구는 로봇 의수 제어 및 재활 훈련용 니트 데이터 글러브를 개발하는 것에 목표를 두었다. 니트 데이터 글러브는 전도성 섬유를 이용하여 손가락 관절 부위를 지나가도록 제작하였으며, 봉제가 필요 없는 홀가먼트 평기를 이용하여 공정을 최소화 하였다. 기존의 복잡한 공정과 센서를 삽입해야 하는 형태의 데이터 글러브와는 다르게 접착, 후 가공, 봉제 등이 필요하지 않다. 또한, 센서를 포함하여 데이터 글러브는 섬유로 제작되어 유연하고 가벼운 특성을 지니며, 니트 구조가 지니고 있는 신축성으로 다양한 손 크기에 대응할 수 있다.

이렇게 개발된 데이터 글러브에 대한 성능 평가를 위해, 원사의 종류에 따른 성능평가 및 동작 패턴인식 평가를 실시하였다. 먼저, 대표적인 전도성 원사인 스테인리스 원사와 은사에 대하여 성능 평가를 실시하였으며, 측정 길이가 멀어짐에 따라 은사로 제작한 데이터 글러브가 노이즈에 대하여 안정적인 저항 값을 보였다. 또한, 우수한 성능의 은사로 제작된 데이터 글러브를 이용하여 4가지 손 동작에 대한 다섯 손가락의 저항 값 비교를 수행하였다. 모든 동작에 대하여 다섯 손가락의 저항 값이 확연히 다르게 나타났으며, 눈으로도 쉽게 구별이 가능하였다. 또한, 획득된 데이터에 대한 동작 패턴인식 평가 결과로 높은 인식 성능을 확인하였다.

이러한 결과를 통해 가볍고 저비용 제작이 가능한 니트 데이터 글러브가 다양한 로봇분야에서 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] C. Y. Park and I. H. Moon, "Development of a Data Glove for Rehabilitation Robot for Upper Extremity Paralysis," *Journal of Rehabilitation Welfare Engineering & Assistive Technology*, vol. 2, no.1, pp. 45-49, 2009, [Online], <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200915262488333.page>.

- [2] G. R. Naik, A. Acharyya, and H. Y. Nguyen, "Classification of finger extension and flexion of EMG and Cyberglove data with modified ICA weight matrix," *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Chicago, IL, USA, pp. 3829-3832, 2014, DOI: 10.1109/EMBC.2014.6944458.
- [3] Y. M. Zhou, D. Wagner, K. Nuckols, R. Heimgartner, C. Correia, M. Clarke, D. Orzel, C. O'Neill, R. Solinsky, S. Paganoni, and C. J. Walsh, "Soft Robotic Glove with Integrated Sensing for Intuitive Grasping Assistance Post Spinal Cord Injury," *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, QC, Canada, pp. 9059-9065, 2019, DOI: 10.1109/ICRA.2019.8794367.
- [4] F. Sebelius, L. Eriksson, C. Balkenius, and T. Laurell, "Myoelectric control of a computer animated hand: A new concept based on the combined use of a tree-structured artificial neural network and a data glove," *Journal of medical engineering & technology*, vol. 30, no. 1, pp. 2-10, 2006, DOI: 10.1080/03091900512331332546.
- [5] S. Lee, Y. Choi, S. Yang, G. Y. Hong, and Y. Choi. "Development of Multi-DoFs Prosthetic Forearm based on EMG Pattern Recognition and Classification," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 14, no. 3, pp. 228-235, Sept., 2019, DOI: 10.7746/jkros.2019.14.3.228.
- [6] S. Seyedin, P. Zhang, M. Naebe, S. Qin, J. Chen, X. Wang, and J. M. Razal, "Textile strain sensors: a review of the fabrication technologies, performance evaluation and applications," *Materials Horizons*, vol. 6, no. 2, pp. 219-249, 2019, DOI: 10.1039/C8MH01062E.
- [7] Y. Li, X. Miao, and R. K. Raji, "Flexible knitted sensing device for identifying knee joint motion patterns," *Smart Materials and Structures*, vol. 28, no. 11, Oct., 2019, DOI: 10.1088/1361-665X/ab4afe.
- [8] S. Lee, B. Jamil, S. Kim, and Y. Choi, "Fabric Vest Socket with Embroidered Electrodes for Control of Myoelectric Prosthesis," *Sensors*, vol. 20, no. 4, 2020, DOI: 10.3390/s20041196.
- [9] K. Suzuki, K. Yataka, Y. Okumiya, S. Sakakibara, K. Sako, H. Mimura, and Y. Inoue, "Rapid-response, widely stretchable sensor of aligned MWCNT/elastomer composites for human motion detection," *Acs Sensors*, vol. 1, no. 6, pp. 817-825, 2016, DOI: 10.1021/acssensors.6b00145.
- [10] J. Lee, H. Kwon, J. Seo, S. Shin, J. H. Koo, C. Pang, S. Son, J. H. Kim, Y. H. Jang, D. E. Kim, and T. Lee, "Conductive fiber-based ultrasensitive textile pressure sensor for wearable electronics," *Advanced materials*, vol. 27, no. 15, pp. 2433-2439, 2015, DOI: 10.1002/adma.201500009.
- [11] E. Ayodele, S. A. R. Zaidi, Z. Zhang, J. Scott, Q. Kong, and D. McLernon, "Weft Knit Smart Data Glove," *IEEE 16th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN)*, 2019, [Online], <http://eprints.whiterose.ac.uk/145383/1/Weft%20Knit%20Glove.pdf>.
- [12] H. Ryu, S. Park, J. J. Park, and J. Bae, "A knitted glove sensing system with compression strain for finger movements," *Smart Materials and Structures*, vol. 27, no. 5, 2018, DOI: 10.1088/1361-665X/aab7cc.
- [13] W. Zhang, J. Z. Yu, F. Zhu, Y. Zhu, Z. Yang, N. G. Ulu, B. Arisoy, and L. B. Kara, "High Degree of Freedom Hand Pose Tracking Using Limited Strain Sensing and Optical Training," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 19, no.3, 2019, DOI: 10.1115/1.4043757.
- [14] S. Sundaram, P. Kellnhofer, Y. Li, J.-Y. Zhu, A. Torralba, and W. Matusik, "Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove," *Nature*, vol. 569, pp. 698-702, 2019, DOI: 10.1038/s41586-019-1234-z.
- [15] X. Han, X. Miao, X. Chen, G. Jiang, and L. Niu, "Research on finger movement sensing performance of conductive gloves," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 14, 2019, DOI: 10.1177/1558925019887622.
- [16] A. Tognetti, N. Carbonaro, G. Zupone, and D. De Rossi, "Characterization of a novel data glove based on textile integrated sensors," *2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, New York, NY, USA, pp. 2510-2513, 2006, DOI: 10.1109/IEMBS.2006.260574.
- [17] G. H. Büscher, R. Kõiva, C. Schürmann, R. Haschke, and H. J. Ritter, "Flexible and stretchable fabric-based tactile sensor," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 63, pp. 244-252, 2015, DOI: 10.1016/j.robot.2014.09.007.
- [18] Z. Shen, J. Yi, X. Li, M. H. P. Lo, M. Z. Q. Chen, Y. Hu, and Z. Wang, "A soft stretchable bending sensor and data glove applications," *Robotics and biomimetics*, vol. 3 no, 1, 2016, DOI: 10.1186/s40638-016-0051-1.
- [19] R. Holm, *Electric contacts: theory and application*, 4th ed., Springer-Verlag, 1967, DOI: 10.1007/978-3-662-06688-1.
- [20] O. Atalay, W. R. Kennon, and M. D. Husain, "Textile-based weft knitted strain sensors: Effect of fabric parameters on sensor properties," *Sensors*, vol. 13, no. 8, pp.11114-11127, 2013, DOI: 10.3390/s130811114.



이 슬 아

2017 한양대학교 의류학과(박사)
현재 한양대학교 ERICA 공학기술연구소
연구원

관심분야: 웨어러블 센서, 스마트 텍스타일 & 디자인



성 민 창

2019 한양대학교 ERICA 전자공학부
(공학사)
현재 한양대학교 전자공학과(석박사
통합과정)

관심분야: 딥러닝, 컴퓨터 비전, 로봇 제어



최 유 나

2019 순천향대학교 전자정보공학과(공학사)
현재 한양대학교 전자공학과(석사과정)

관심분야: 생체신호 처리, 로봇 제어



배 지 현

2008 North Carolina State University,
Textile Technology & Management
(박사)
2016 삼성전자종합기술원
현재 한양대학교 의류학과 부교수

관심분야: 직물 기반 센서, 스마트 텍스타일



차 광 열

2020 한양대학교 ERICA 로봇공학과
(공학사)
현재 한양대학교 전자공학과(석사과정)

관심분야: 소프트 로봇, 로봇제어



최 영 진

2002 POSTECH 기계공학과(공학박사)
2005 KIST 지능로봇연구센터 선임연구원
현재 한양대학교 ERICA 전자공학부 교수

관심분야: 로봇제어, 생체신호처리