

## 환자의 손가락 특성을 모사하는 로봇 개발

## Development of Finger Robot for Simulating Fingers with Contracture and Spasticity

하도경\*, 송민, 박형순

D. K. Ha, M. Song, H. S. Park

## 요약

본 논문에서는 손재활기기를 평가하고 신뢰도 높은 검진을 위해 검진자의 훈련용으로 사용할 수 있는 손가락 모사 로봇을 개발하였다. 먼저 실제 사람의 손가락 크기를 고려하여 손허리가락 관절(Metacarpophalangeal)과 첫마디뼈 관절(Proximal Interphalangeal)을 구동할 수 있는 메커니즘을 설계하였고 이를 통해 뇌졸중과 같은 신경 손상 환자들에게서 나타나는 경직(spasticity)과 구축(contracture)현상을 모사하는 알고리즘을 구현하여 경직과 구축의 정도를 조절하여 다양한 환자들의 특징을 구현할 수 있도록 하였다.

## ABSTRACT

In this paper, we developed a finger robot simulating spasticity and contracture which can be used as a testing bed for evaluating performance of hand rehabilitation devices while it can be also used to train clinicians for improving reliability of clinical assessment. The robot is designed for adult finger size and for independent control of Metacarpophalangeal Joint and Proximal Interphalangeal Joint. Algorithm for mimicking spasticity and contracture is implemented. By adjusting the parameters related to contracture and spasticity, the robot can mimic various patterns of responses observed in fingers with spasticity and contracture.

**Keyword** : Finger Robot, Patient simulator, Spasticity, Contracture

## 1. 서론

의학기술의 발달과 더불어 인간의 평균수명이 증가함에 따라 다양한 뇌신경계 질환을 동반하는 환자들의 수가 증가하고 있다. 뇌신경계 질환에는 뇌졸중, 파킨슨씨병, 다발성경화증, 척추손상, 뇌성마비

등 다양한 질환이 있으며, 뇌신경 계통의 손상으로 인하여 운동신경들에 문제를 일으키기 때문에 성인들에게 발생하는 장애의 중추적인 요인이 된다[1]. 뇌졸중을 포함하여 뇌신경계통 질환으로 인한 장애를 겪는 환자들은 발병 후 신체기능의 회복을 위해 재활치료를 받게 된다. 인간의 신체중 손은 일상생활의 상지작업에 있어서 중추적인 역할을 한다. 손기능의 장애는 뇌손상과 밀접하게 연관되어 있고[2] 상지의 장애현상중 손 기능 장애가 큰 부분을 차지한다. 따라서 뇌졸중과 같이 운동신경이 손상된 신경장애환자의 재활에서 손 재활은 매우 중요한 요소이다.

손 재활에 대한 높은 관심은 많은 손 재활기기와 연구들로 이어졌다. 근전도 신호(Electromyography: EMG)를 통해 근육으로 전달되는 신호를 받아 환자의 의도를 파악하여 운동을 보조해주는 근전도 기반 손 외골격 재활장치[3], CyberGlove와 Rutgers

접수일 : 2014.11.17

심사완료일 : 2014.11.23

게재확정일 : 2014.11.26

\* 하도경 : 한국과학기술원 기계공학과 석사과정

dkha1993@kaist.ac.kr (주저자)

송민 : 한국과학기술원 바이오및뇌공학과 학사과정

night@kaist.ac.kr (공동저자)

박형순 : 한국과학기술원 기계공학과 교수

hyungspark@kaist.ac.kr (교신저자)

※ 본 연구는 보건복지부 국립재활원의 재활연구개발용역사업의 일환으로 수행하였음.

Master II-ND haptic glove를 이용한 가상현실 기반 운동 시스템[4], 모바일기반 손 재활 프로그램과 이를 위한 Data glove[5], 기기의 운동궤적을 사용자의 손과 일치시킨 착용형 재활훈련기기[6], 손가락의 각 joint를 독립적으로 구동하여 굽힘 운동과 신전 운동을 보조하는 외골격 로봇장치[7] 등 많은 손 재활 기기들이 연구되었다. 이러한 재활기기는 외력을 가하는 장치이기 때문에, 돌발 상황이나 여러 가지 특수한 상황들을 고려하여 사용자의 안전을 보장할 수 있어야만 한다. 하지만, 이러한 재활기기와 시스템의 안전성을 평가하는 기준과 기술에 대한 연구는 재활기기 개발연구에 비해 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 손 재활기기들의 안전성을 평가할 수 있는 평가 플랫폼의 개발에 대한 소개를 하고자 한다.

최근 활발히 개발되고 있는 재활기기들의 안전성을 평가하는 플랫폼 외에도 환자들을 검진하는데 있어서 신뢰도를 높일 필요성이 대두되고 있다. 뇌신경손상 환자들은 운동신경의 손상 정도에 따라 정상인들과 다른 운동 특성을 보인다. 환자개개인의 운동능력과 장애증상들은 주로 임상치료사 혹은 의사와 같은 평가자들의 주관적인 판단에 의해 진단되어 진다. 예를 들어, Ashworth Scale[3], Modified Ashworth Scale(MAS) [4]는 널리 쓰이는 경직도 평가 기준이다. 이는 평가자가 환자의 관절을 순간적으로 움직이며 근육의 긴장도를 주관적으로 판단하여 증상의 정도를 평가하게 한다[8]. 이러한 평가 기준들은 보편적으로 사용되고 있지만, 정성적인 검진일 수밖에 없어서 신뢰도가 낮다는 것이 널리 알려져 있다. 이에 최근 팔꿈치에서의 경직도를 정량적으로 나타내어 모사한 Haptic Elbow Spasticity Simulator(HESS)라는 팔꿈치 경직도 모사 로봇이 정성적인 느낌을 표준화하기 위한 목적으로 개발된 바 있다[9]. 이를 통해 의사들과 임상치료사들은 환자의 팔꿈치에서 나타나는 경직을 학습하여볼 수 있고, 정량적인 수치를 알 수 있어 더 신뢰도 높은 검진을 진행할 수 있다. 손에는 보편적으로 경직(spasticity)과 구축(contracture) 현상이 나타나는데 환자들을 검진함에 있어 평가자들이 더 신뢰도 높은 검진을 할 수 있도록 환자의 손 특성을 정량적으로 모사하여줄 수 있는 로봇이 필요하다. 따라서 본 논문에서 개발한 손가락 로봇을 이용하여 환자의 증상들을 모사한다면 앞서 기술한 여러 가지 돌발 상황에 대한 재활기기의 안전성평가 외에도 환자들의 특성을 검진자들이 학습할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서 먼저 재활기기들의 안전성을 평가하

고, 의사와 임상치료사들의 교육과 검진을 보조하는 목적에 맞는 손가락 로봇의 설계를 기술하고자 한다. 이어서 신경손상환자들에게서 나타나는 대표적인 현상인 경직과 구축을 모사하는 알고리즘을 구현하고 그 실험결과를 보이고자 한다.

본 논문은 다음과 같은 순서에 따라 구성되어있다. 두 번째 장에서는 손가락 로봇의 설계에 대해 기술하고, 세 번째 장에서는 손가락의 경직과 구축을 모사하는 알고리즘과 이에 대한 실험에 대해 언급할 것이다. 네 번째 장에서는 실험 결과를 보이고 마지막으로 다섯 번째 장에서 결론을 맺는다.

## 2. 본론

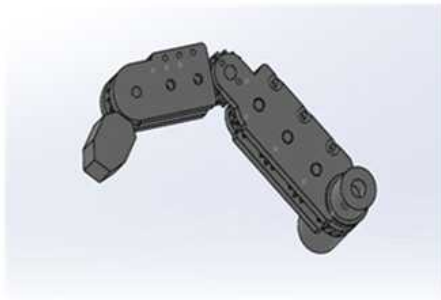
손가락 로봇은 재활기기들의 안전성을 평가할 수 있도록 일반인의 손가락과 유사해야 하며 검진자들이 경직과 구축현상을 느낄 수 있도록 설계되어야 한다. 검진자가 손가락을 잡고 마찰 등의 저항을 느끼지 않으며 자유롭게 움직일 수 있도록 역구동성이 높아야 한다.

보고되어 있는 성인 남성의 평균 손가락 (검지 혹은 중지) 길이와 너비를 고려하여[10] 손가락 로봇의 전체 길이를 90mm로 결정하였으며 두께와 넓이는 각각 18.8mm와 14mm로 설계하였다. 첫마디 (Proximal Phalanx)를 64mm, 중간마디 (Middle Phalanx)와 끝마디 (Distal Phalanx)를 각각 34mm와 16mm로 설계하였다.

독립적인 움직임과 출력 힘이 작은 끝마디뼈 관절 (Distal Interphalangeal(DIP))은 제어를 하지 않고 수동적으로 움직이며 관절의 강성을 작은 고무줄로 조절할 수 있도록 설계하였다. 첫마디뼈 관절 (PIP)과 손허리가락 관절(MCP)에서는 독립적으로 토크를 생성할 수 있도록 두개의 DC 모터를 장착하였다. MCP 관절을 구동하는 모터는 직접 관절에 연결하여 장착하였지만 PIP 관절의 경우는 손가락의 자유로운 움직임을 방해하지 않기 위하여 MCP 관절구동 모터의 반대편에 정렬하여 장착하여 기어를 통해 동력이 전달되도록 설계하였다.

성인 남성의 손가락 힘[11]에 비해 환자들의 경우 생성할 수 있는 힘이 약하다는 것과, 구축과 경직 현상으로 생성되는 저항 토크를 고려하여 손가락 끝의 최대 힘은 20N, MCP 관절의 최대 토크는 1Nm, PIP관절의 최대토크는 1Nm를 갖도록 설계하였다. PIP 관절에 가해지는 최대토크를 고려하여 동력을 전달하는 기어는 충분한 강성을 갖도록 선정하였다 (GEABN0.8-16-7-B-4, 한국미스미). 각 관

절에 필요한 최대 토크를 고려하여 DC모터 (RE30, Maxon Motor Inc.)를 선정하였고 각 관절의 회전각을 측정하기 위해 인코더를 장착하였다. 각각의 모터는 모터드라이버(ADS 50/5, Maxon Motor Inc.)의 전류제어모드에서 구동되도록 하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 1. (a) 손가락 로봇의 외형 (b) 손가락 로봇의 내부 (c) 제작된 손가락 로봇

### 3. 손가락 특성 모사

설계된 손가락 로봇이 구축, 경직 그리고 구축과 경직이 혼합된 증상을 모사하도록 Labview (National Instruments Inc.)를 이용하여 모사 알고리즘을 설계하였다.

구축은 근육 혹은 인대에 영구적인 수축이 일어나 해당 관절의 변위에 따른 저항력을 보이는 현상을 일컫는다. 마치 부족한 운동량 혹은 적은 근육

사용으로 인하여 근육이 굳어버린 것과 비슷한 결과를 보인다. 구축 현상이 변위에 따른 저항력을 보이기 때문에 MCP 관절과 PIP 관절의 각도 변화를 인코더로 측정하여 그 각도에 비례하는 토크를 운동 반대방향으로 주도록 모터를 제어하였다. 그리고 특정 각도 이상에서는 힘이 더 이상 늘어나지 않도록 하는 포화 각도를 정하였다. 각도 변화량에 따른 토크 계수와 포화 각도 또한 사용자가 지정할 수 있도록 하여 사용자가 원하는 구축 특성을 모사할 수 있도록 하였다 (그림2).

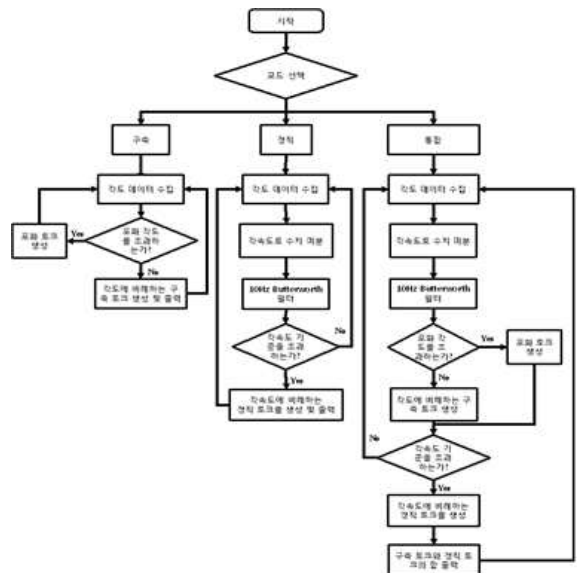


그림 2. 구축, 경직, 통합 알고리즘의 플로우 차트

경직은 근육의 긴장이 증가되어 갑작스런 동작에 강한 반발력을 내는 현상을 일컫는다. 일정 속도 이하의 느린 운동에 대해서는 아무 현상도 일으키지 않지만, 빠른 운동의 경우 운동 도중에 갑자기 근육이 굳어버리는 듯한 현상을 보인다. MAS에서는 1 초 동안 갑작스럽게 관절을 회전시켜 환자의 근육이 굳는 정도를 통해 경직도를 판단한다. 경직 현상에서 나타나는 토크의 크기에 대해서는 아직 정량적인 데이터가 존재하지 않기 때문에 문헌에 기술된 경직의 특징에 기반을 두어 알고리즘을 구현하였다. 우선 경직 현상에서 빠른 속도에서 갑작스럽게 큰 반발력을 낸 후, 천천히 그 반발력이 감소한다는 현상에 기반을 두어 exponential 함수를 이용하여 경직 토크 함수를 구성하였다. 경직 현상은 속도에 따라 다르게 나타나기 때문에 경직 유발 각속도를 지정하여 줄 수 있도록 하였다. 각속도는 인코더로 얻은 데이터를 수치적으로 미분하고 10Hz의 butterworth 필터를 사용하여 계산하였다. 손가락

로봇의 각속도가 경직 유발 각속도를 넘은 경우, 각속도에 비례하여 경직 토크 함수에 따라 관절에 토크를 가해주었다. 구축과 마찬가지로, 경직 유발 각속도와 토크 계수를 지정할 수 있게 하였고 경직 토크 함수 또한 내부 계수를 바꾸어 줄 수 있어 사용자가 다양한 경직 특성을 모사할 수 있도록 하였다 (그림2).

뇌졸중 환자의 경우 구축과 경직현상이 동시에 나타나는 것이 일반적이다. 이에 따라 경직과 구축을 통합한 알고리즘을 만들었다. 이 두 현상은 독립적이라고 가정하였고 따라서 토크의 크기는 구축 알고리즘을 통한 토크와 경직 알고리즘을 통한 토크의 합으로 나타내었다 (그림2).

#### 4. 결과

그림3의 구축 현상을 살펴보면, 관절의 각도에 비례하여 토크가 생성되는 것을 알 수 있다. 그림3 맨 아래의 관절의 각도-토크 그래프를 살펴보면, 반대방향으로의 변위가 발생하여 토크가 발생하지 않은 경우를 제외하면, 그 기울기가 2.8498Nm/rad으로, 실제 입력된 값으로 계산된 비율인 2.7978Nm/rad에 약 1.86%의 에러 만을 보인다.

그림4의 경직현상을 살펴보면, 경직 유발 각속도가 넘는 순간 모터가 이 각속도에 비례하는 경직 토크를 생성하는 것을 볼 수 있다. 지정해준 함수대로, 이 경직 토크는 exponential로 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림5는 통합 알고리즘에 대한 실험이다. 통합 알고리즘에서도 경직 유발 각속도가 넘는 순간 경직 현상이 보이지만, 구축이 함께 일어나면서 토크 값은 더 커진다. 그리고 경직 토크에 구축 현상으로 인한 토크가 합쳐져 그림4와 다른 형태의 토크 개형을 보인다.

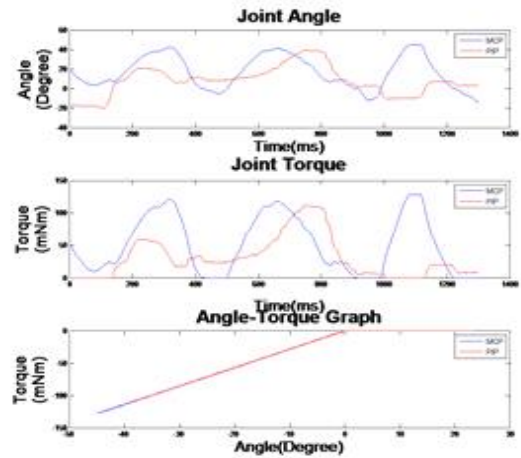


그림 3. 구축 알고리즘 실험 결과

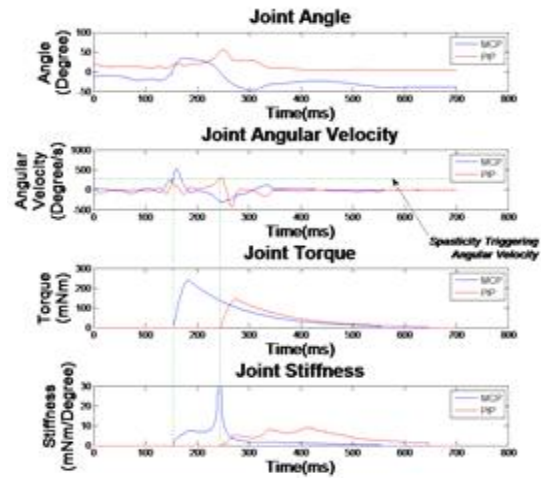


그림 4. 경직 알고리즘 실험 결과

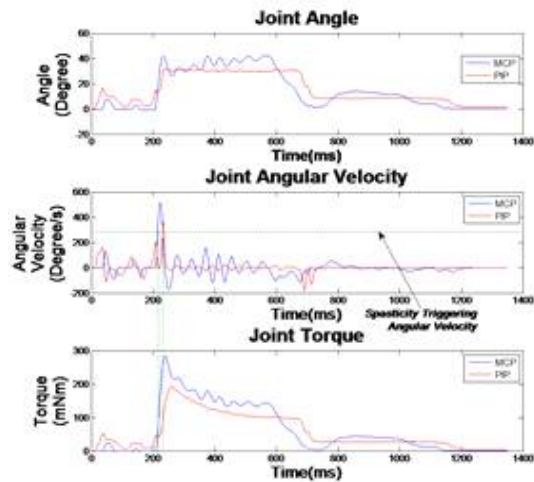


그림 5. 통합 알고리즘 실험 결과

## 5. 결론

손가락 로봇을 통해 환자의 손가락에서 나타나는 경직과 구축 현상을 구현할 수 있었으며, 각각의 현상에 대해 특성 값들을 조절하여 다양한 환자들의 손가락 특성을 모사할 수 있도록 하였다. 이 로봇은 다양한 환자들의 특성을 고려하여 손가락 재활 장치 등의 안전성을 평가할 수 있고 더 나아가서 정량적인 평가 기준을 만드는 데 기여할 수 있을 것이라 기대된다. 또한, 의사 혹은 임상치료사들과 같은 평가자들이 경직과 구축현상에 대한 임상평가에 앞서서 손가락 로봇에 모사되는 환자 특성을 경험해봄으로써 모든 검사자가 일관성 있는 검진을 하게 되어 검진 및 평가의 신뢰도가 향상 될 수 있을 것으로 판단된다.

추후, 실제 환자들의 관절 데이터와 토크 데이터를 이용하여 실제 환자 손가락에서의 구축과 경직에서 나타나는 토크를 로봇에 구현할 것이다. 그리고 이 손가락 로봇을 확장하여 손가락의 굽힘과 펴기 뿐만 아니라 벌림과 모음까지 모사하여 환자의 손 전체의 특성을 모사하는 로봇으로 확장하고 팔꿈치, 손목등과 결합하여 전체 팔을 모사하는 로봇으로 확장할 것이다.

## 참 고 문 헌

[1] Gresham G, Duncan P, Stason W, Adams H, Adelman A, Alexander D, et al. "Post-Stroke Rehabilitation," Rockville, MD: U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service, Agency for Health Care Policy and Research, 1995

[2] Wilson F. "The hand: how its use shapes the brain, language, and humanculture," New York: Pantheon; 1998.

[3] Ashworth, B. "Preliminary trial of carisoprodol in multiple sclerosis," Practitioner, 192, pp.540 - 542, 1964

[4] Bohannon, R. W., & Smith, M. B. "Interrater reliability of a modified Ashworth scale of muscle spasticity," Physical Therapy, 67(2), 206 - 207, 1987

[5] Marcello Mulas, Michele Folgheraiter and Giuseppina Gini, "An EMG-controlled Exoskeleton for Hand Rehabilitation," in Proc. 9<sup>th</sup> IEEE International Conference on

Rehabilitation Robotics, Chicago, IL, USA, pp.371-374, June. 2005

[4] Sergei V. Adamovich, Alma S. Merians, Rares Boian, Jeffrey A. Lewis, Marilyn Tremaine, Grigore S. Burdea, Michael Recce, Howard Poizner, "A virtual reality based exercise system for hand rehabilitation post-stroke: transfer to function," Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 7:4936-9. 2004

[5] 임현미, 이종하, 박희준, 백남중, 구정훈, "모바일 기반 손 재활 프로그램 개발," 2013 한국재활복지공학회 정기학술대회 논문집, pp.73-74, Oct. 2013

[6] 배주환, 문인혁, "뇌졸중 환자용 동력보조형 상지재활훈련기의 설계," 재활복지공학회논문지, 제5권, 제1호, 한국재활복지공학회, pp.79-85, 2011

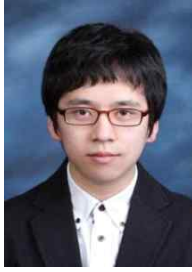
[7] T.T. Worsnopp, M.A. Peshkin, J.E. Colgate, and D.G. Kamper, Member, IEEE, "An Actuated Finger Exoskeleton for Hand Rehabilitation Following Stroke," in: Proc, IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, IEEE, Noordwijk, The Netherlands, pp.896-901, 2007

[8] A D Pandyan, G R Johnson, C I M Price, R H Curless, M P Barnes, H Rodgers, "A review of the properties and limitations of the Ashworth and modified Ashworth Scales as measures of spasticity," Clin Rehabil;13(5):373-83, Oct. 1999

[9] Hyung-Soon Park, Jonghyun Kim, Diane L. Damiano, "Development of a Haptic Elbow Spasticity Simulator (HESS) for Improving Accuracy and Reliability of Clinical Assessment of Spasticity," IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 361-370, 2012

[10] 정화식, 정형식, "한국인의 손 치수 및 특성에 관한 연구," 대한인간공학회지 제22권 제2호, pp. 29-44, May. 2003

[11] Didomenico A, Nussbaum M, "Measurement and prediction of single and multi-digit finger strength," Ergonomics. 15:46(15):1531-48, Dec. 2003



**하 도 경**

2014년 2월 한국과학기술원  
기계공학과 졸업(학  
사)

2014년 - 현재 한국과학기술  
원 기계공학과 석  
사과정

관심분야 : 재활공학, 로봇제어



**송 민**

2010년 - 현재 한국과학기술  
원 바이오및뇌공  
학과 학사과정

관심분야 : 재활공학, 생체신호처리



**박 형 순**

1994년 2월 한국과학기술원  
정밀공학과 졸업(학  
사)

1996년 2월 한국과학기술원  
기계공학과 졸업(석  
사)

2004년 2월 한국과학기술원  
기계공학과 졸업(박  
사)

2014년 - 현재 한국과학기술  
원 기계공학과 교  
수

관심분야 : 재활공학, 로봇제어