

# 거울치료가 가능한 착용형 팔꿈치 재활로봇

## Wearable Elbow Rehabilitation Robot Capable of Mirror Therapy

양지훈\*, 백진슬, 문인혁  
J. H. Yang, J. S. Baek, I. Moon

### 요 약

이 논문은 팔꿈치 재활 훈련에 있어서 거울치료 기법을 적용한 착용형 재활로봇을 제안한다. 거울치료는 건측의 팔꿈치 동작을 측정하여, 환측의 팔꿈치 훈련을 하는 것이다. 이를 위해 환측의 재활을 위한 착용형 장치 뿐만 아니라 건측 팔꿈치 동작을 측정하기 위한 착용형 센서도 개발하였다. 착용형 장치는 인체의 팔꿈치 구조를 고려하여 설계하였다. 착용형 센서는 굽힘센서와 광파이버를 이용한 센서를 각각 개발하여 센터의 특성을 평가하였다. 개발된 거울치료형 팔꿈치 재활로봇은 피험자의 동작에 따른 동작특성을 3차원 모션 측정장치로 평가하였다. 실험의 결과는 이 연구에서 개발된 착용형 팔꿈치 재활로봇이 적용 가능성을 보였다.

### ABSTRACT

In this paper we propose a wearable elbow rehabilitation robot applied the mirror therapy for elbow rehabilitation. To implement the mirror therapy, a data suit for measuring healthy elbow motion is developed. A powered elbow exoskeleton wearing in paralyzed arm is controlled by the measured data from the healthy elbow motion. In experiments, the elbow rehabilitation exercise by the mirror therapy is performed. From the experimental results we show the wearable exercise robot including the data suit is applicable to the mirror therapy for elbow rehabilitation.

**Keyword** : Elbow, Rehabilitation Robot, Wearable, Data Suit

## 1. 서론

뇌졸중(stroke) 환자의 55%에서 75%가 후유증으로서 팔 운동 저하가 발생한다 [1]. 뇌졸중에 의한 편마비는 지속적이고 반복적인 재활에 의해 일부 회복이 가능하다고 알려져 있다. 그러나 대부분의 환자들에게 시간적, 비용적 문제뿐만 아니라 본인과 치료사의 지속적인 노력이 필요하다 [2,3]. 반복적인 상지재활치료에 사용되는 대표적인 재활훈련기는

CPM(continuous passive motion)훈련기가 있으며, 많은 제품이 상업화되었다. QAL Medical사의 E3 Elbow CPM[4]은 팔꿈치의 굽힘(flexion)과 펴기(extension) 뿐만 아니라 80°에서 -80° 사이의 내전(adduction)과 외전(abduction)이 가능하도록 설계되었으나, 12kg이 넘는 장비 무게로 인해 장치가 침대나 의자에 설치하여 사용해야 한다는 불편한 점이 있었다. Hangzhou Zhengda Medical사의 YTK-E[5]는 스탠드형으로 0°에서 125°의 팔꿈치 운동범위 내에서 앉거나 누워서 사용할 수 있으며, 장비 하단에 바퀴가 부착되어 있어 이동하면서 사용 가능할 수 있다. 그러나 이 역시 16kg의 무게로 인해 사용시 주변의 도움이 필요하다. ORMED사[6]의 Artromot-E2는 굽힘과 펴기, 내외전이 하나의 장비로 동시 또는 개별적으로 동작이 가능하다. 많은 장점을 가지고 있으나, 무게가 28kg에 달하며 장비의 이동이 불편해 제한된 장소에 설치해서 사용해야만 하였다.

접 수 일 : 2014.04.18

심사완료일 : 2014.05.21

게재확정일 : 2014.05.27

\*양지훈 : 동의대학교 메카트로닉스공학과 졸업

백진슬 : 동의대학교 메카트로닉스공학과 졸업

문인혁 : 동의대학교 메카트로닉스공학과 교수

ihmoon@deu.ac.kr (교신저자)

※ 본 연구는 2012학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음. (과제번호 : 2012AA164)

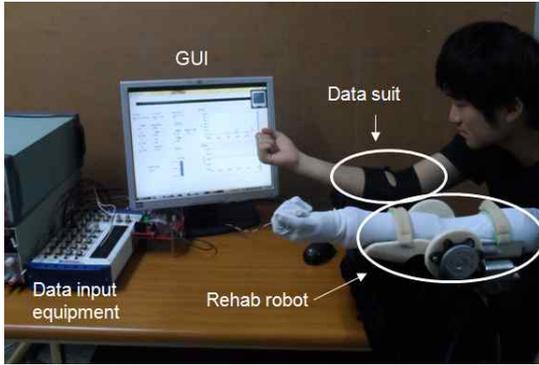


그림 1. 착용형 팔꿈치 재활로봇.

최근에는 뇌신경학적인 이론을 바탕으로 절단환자에게 쉽게 발생하는 통증을 거울을 통해 가상사지(phantom limb)를 시각적으로 보여줌으로써 통증을 완화시킬 수 있다는 거울치료(mirror therapy) 기법[7]이 제안 되었다. 이 거울치료를 응용한 연구로서, 건측의 동작에 따라 환측의 동작을 모방, 유도하는 훈련을 함으로써 운동기능의 회복을 촉진할 수 있다는 연구 결과가 있었다 [8].

본 연구에서는 팔꿈치의 재활훈련에 있어서 CPM과 같은 큰 장비가 아닌, 가정에서 쉽게 착용하여 사용할 수 있는 착용형 구조를 가지면서, 건측의 운동에 따라 환측을 움직일 수 있는 거울치료의 원리를 응용한 착용형 팔꿈치 재활로봇을 제안한다. 이 로봇은 크게 건측의 팔꿈치의 움직임을 측정하기 위한 건측 팔꿈치용 데이터 슈트(data suit)와, 이 측정된 움직임을 입력으로 하는 환측의 훈련용 로봇 기구부, 그리고 사용자 인터페이스를 포함하는 제어부로 나눌 수 있다. 각각의 센서와 기구부의 설계에 대한 개념을 제시하고, 기초실험과 사용자에 의한 착용 실험을 통해 제안된 팔꿈치 재활로봇의 성능을 평가한다. 이로부터 본 연구에서 제안하는 착용형 팔꿈치 재활로봇이 뇌졸중 상지 마비환자의 재활에 적용 가능함을 보인다.

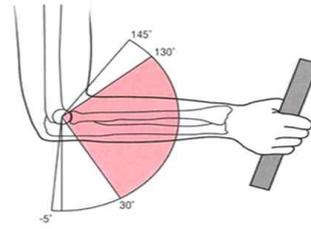
## 2. 로봇 시스템 구성

그림 1은 본 연구에서 개발된 착용형 팔꿈치 재활로봇의 구성을 보여준다. 환측의 팔꿈치에 착용하는 로봇기구부와 건측에 착용하는 데이터슈트, 그리고 제어시스템 및 사용자인터페이스로 구성되어 있다.

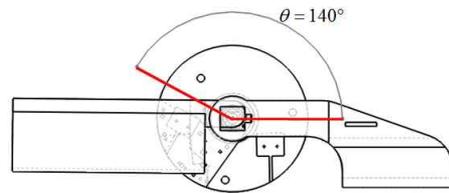
### 2.1 로봇 기구부 설계

한국인의 인체 표준DB [9]에 따르면 20세에서

100세까지 평균 팔꿈치 굽힘 범위는 134°이며 일상 생활에서는 30°에서 130°의 관절 가동범위를 가진다 (그림 2(a) 참조).



(a) human arm



(b) design of elbow part

그림 2. 동작범위.

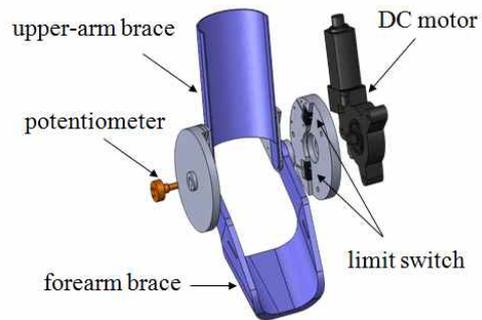
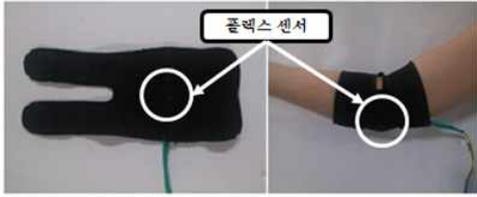


그림 3. 팔꿈치 기구부 구성.

이를 바탕으로 본 연구에서는 그림 2(b)와 같이 로봇 기구부가 0°에서 140°사이의 가동범위를 가지도록 설계하였으며, DC모터를 장착하여 굽힘과 펴 동작시 동력보조가 가능하도록 하였다. 이때 모터의 회전축은 인체의 팔꿈치 관절(elbow joint)에 일치하도록 설계하였다. 그리고 팔꿈치 기구부는 펴와 굽힘의 최대 각도 위치에 리미트 스위치를 부착하여 최대각도 이상 동작이 되지 않도록 하였다. 이것은 제어의 이상이나 시스템상의 오류가 발생하더라도 인체의 가동각도 내에서 멈추도록 함으로써 사용자에게 발생할 수 있는 상해를 최소화하는 안전장치이다 (그림 3 참조). 팔꿈치의 회전각도는 기구부의 회전 중심위치에 설치된 회전 포텐셔미터(rotary-type potentiometer)로 측정할 수 있도록 설계하였다. 제작된 프로토타입은 2.5kg의 무게를 가졌다.



(a) 데이터슈트의 설계



(b) 굽힘 에러

그림 4. 플렉스 센서를 이용한 프로토타입



그림 5. 프로토타입 팔꿈치 각도 센서.

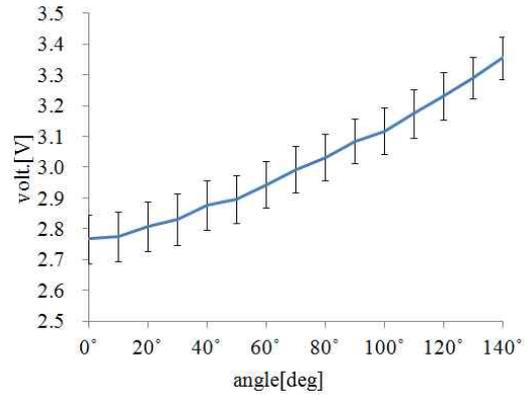


그림 6. 팔꿈치 각도 센서 출력 특성

## 2.2 팔꿈치용 데이터슈트(data suit)

[10]의 연구에서는 상지 편마비 환자의 재활훈련 시, 건측의 손동작을 입력하기 위한 장치로서 플렉스센서(flexible sensor)를 이용하여 손가락 5 자유도와 손목 2자유도를 측정할 수 있는 데이터글로브(data glove)를 제안하였다. 이를 응용하여 우리는 팔꿈치용 데이터 슈트(data suit)를 개발하였다. 플렉스 센서는 굽힘각도에 따라 저항값이 변하는 특성을 가지고 있어, 이 저항값의 변화를 측정함으로써 굽힘 각도를 추정할 수 있다.

그림 4는 본 연구에서 1차로 개발하였던 팔꿈치용 데이터슈트이다. 그러나 반복적으로 굽힘과 펴 동작을 수행하게 되면 데이터 슈트가 굽혀진 상태에서 완전히 펴지지 않거나, 원상태로 복원되지 않아 각도측정에 에러가 발생하는 문제점이 있었다 [11]. 이것은 스트립형태의 플렉스센서 자체의 구조적인 문제라고 볼 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 광섬유를 이용하여 구조적으로 굴곡에 대해 내구성이 뛰어나면서도 인체에 유연하게 부착할 수 있는 각도센서와 이를 이용한 데이터슈트를 개발하였다. 특히 광섬유의 광굴절율의 변화 특성을 이용하기 때문에 보다 정밀한 굽힘각도를 측정할 수 있다.

### 2.2.1 팔꿈치 각도센서(elbow angle sensor)

본 연구에서는 적외선 LED와 광섬유를 이용하여 팔꿈치 각도를 측정할 수 있는 팔꿈치 각도 센서를

개발하였다. 팔꿈치 각도 센서는 일정한 광량의 적외선 LED를 광섬유 종단에 수직으로 배치하고, 그 반대편에 수광부를 마주보도록 배치한 후, 광섬유의 굽힘에 따른 광굴절율의 변화에 따라 수광부의 전류가 변화되는 것을 감지하도록 하였다[12]. 기존의 연구에서는 플라스틱 광섬유를 이용하여 무릎관절 각도 측정용 광섬유 각도센서를 제안하기도 하였다 [13]. 그러나 광섬유를 이용한 각도 측정용 센서는 굴곡각에 따른 광량의 변화를 정확하게 검출할 수 있어야한다.

본 연구에서는 먼저 신체가 움직일 때 수·발광부와 연결된 광섬유가 탄성력에 의해 접촉한 위치가 흔들리지 않도록 적외선 LED와 수광용 다이오드를 광섬유와 정확하고 단단하게 고정하였다. 그림 5는 광섬유와 적외선 LED, 그리고 수광용 다이오드를 케이스로 고정하여 제작한 프로토타입 팔꿈치 각도센서를 보인다.

제작한 프로토타입 센서의 출력특성을 조사하였다. 그림 6은 굽힘각도에 따른 출력 전압을 나타낸다. 이 실험의 결과에서 각도가 증가함에 따라 출력 전압이 선형적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있었으며, 표준편차는 0.076 이었다.

### 2.2.2 데이터 슈트(data suit)

본 연구에서는 유연하면서도 보다 정밀한 굽힘

각도를 측정할 수 있는 굽힘 각도센서와 이를 적용한 데이터 슈트를 개발하였다.

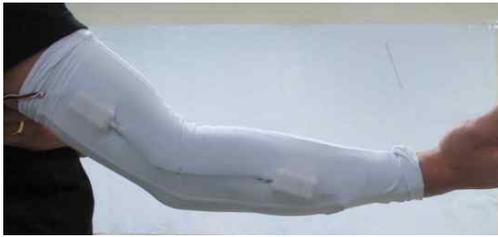


그림 7. 팔꿈치 착용한 데이터 슈트.

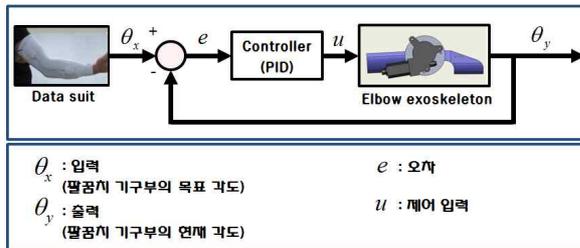


그림 8. 팔꿈치 재활로봇 제어시스템.

그림 7은 본 연구에서 개발한 광섬유를 이용한 데이터 슈트를 착용한 사진이다. 굽힘 각도센서의 양쪽 끝이 각각 팔의 전완부와 상완부에 부착되도록 하였으며, 광섬유는 팔꿈치 관절에 부착되어 굽힘 각도를 측정하도록 하였다. 그리고 반복적인 팔꿈치의 굽힘과 펴는 동작에 의해서도 각도 측정 센서가 구조적인 변형이 없이 유지가 되며, 또한 측정 데이터의 오차도 커지지 않도록 제작하였다.

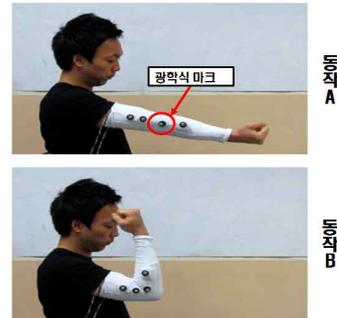
### 2.3 제어시스템

거울치료를 구현하기 위해, 건축에 착용한 데이터 슈트로 환측에 착용한 재활로봇의 동작 각도를 생성하여 팔꿈치 기구부의 각도를 제어하는 제어시스템을 구현하였다.

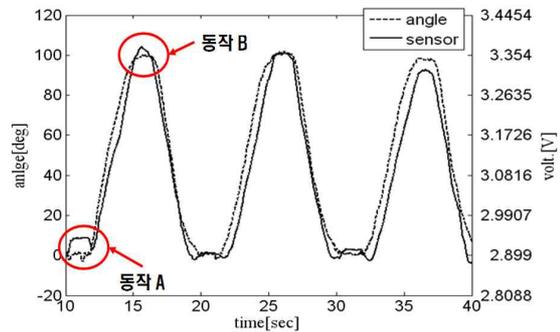
그림 8은 본 연구에서 제안하는 거울치료를 위한 팔꿈치 재활로봇의 전체 제어블록도이다.  $\theta_x$ 는 데이터 슈트로부터 입력되는 목표각도이고,  $\theta_y$ 는 팔꿈치 재활로봇으로부터 나오는 출력각도이다.  $e$ 는 제어 오차이다. 팔꿈치 기구부의 각도는 PID제어기로 제어하였으며, 제어주기는 10msec였다. 여기서 PID 제어기의 출력은 팔꿈치 기구부가 목표 각도에 수렴하도록 제어입력  $u$ 를 출력하는데, 이는 PWM신호로 출력되어 전류를 제어한다.



그림 9. 3차원 모션측정장치.



(a) 팔꿈치 굽힘, 펴는 동작



(a) 팔꿈치 각도 측정 결과

그림 10. 동작에 따른 데이터 슈트의 출력 결과.

### 3. 실험 및 결과

본 연구에서 개발한 데이터 슈트를 착용하여 그 출력특성과 팔꿈치 재활로봇과 연동하여 동작을 제어하는 실험을 수행하였다. 먼저 긴장한 피검자가 건축의 팔에 데이터 슈트를 착용하고, 동시에 팔꿈치 관절, 상완, 그리고 전완부에 각각 마크를 부착하여 3차원 모션측정장치(EagleEye, MotionLab Co.)로 팔꿈치 관절각도를 측정하여 비교하였다 (그림 9 참조).

그림 10은 팔꿈치 펴는(동작 A)과 굽히는(동작 B) 동작을 수행하였을 때 3차원 모션측정장치에 의해 측정된 팔꿈치 각도와 데이터 슈트로 측정된 팔꿈치의 각도를 비교한 결과이다. 점선은 그림 9의 3차원 모션측정장치에 의해 측정된 각도이며, 실선은 데이터 슈트에서 측정된 결과이다. 굽힘 각도 센서의 기

초실험에서 얻은 측정오차의 범위내에서 각도가 출력되는 것을 확인할 수 있었다.

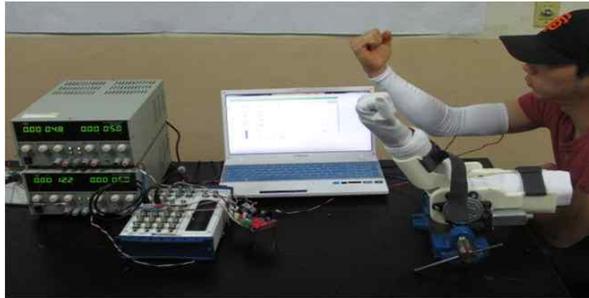


그림 11. 데이터 슈트 연동 로봇 제어.

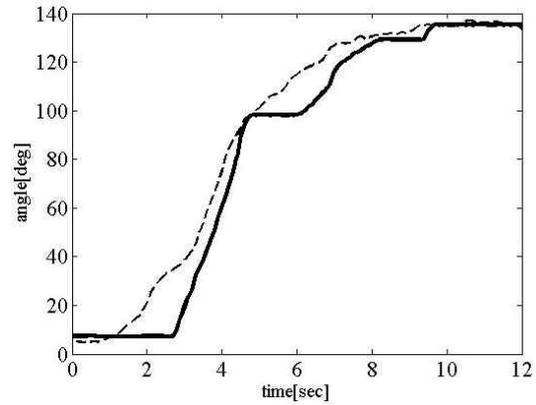


그림 13. 팔꿈치 재활 로봇 제어결과

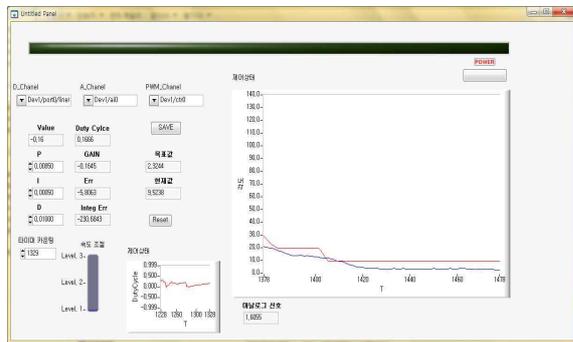


그림 12. 실험용 GUI.

건축에 착용한 데이터 슈트의 동작에 따라 환측에 착용한 팔꿈치 재활로봇의 동작제어를 실험하였다(그림 11 참조). 이 실험에서는 실시간으로 데이터를 확인할 수 있도록 그림 12와 같은 GUI도 개발하였다.

그림 13은 데이터 슈트의 입력에 따른 기구부의 동작을 나타낸 그래프이다. 점선은 데이터 슈트로부터 입력되는 명령각도이며, 실선은 기구부의 제어된 결과이다. 기구부의 제어가 약간의 지연 시간을 가지지만, 명령각도에 수렴하고 있음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 상지 편마비 뇌졸중 환자의 팔꿈치 재활을 위한 거울치료 재활훈련용 로봇을 제안하였다. 팔꿈치 관절의 굽힘과 펴는 동작의 재활 훈련의 방법으로, 우리는 건축의 움직임에 의해 환측의 움직임의 훈련을 유도하는 거울치료 기법을 적용하였다. 이를 위해 데이터 슈트와 팔꿈치 로봇의 기구부를 설계 및 제작하였다.

먼저, 데이터 슈트에 사용되는 굽힘 각도센서는 내구성이 높으면서도 유연성을 가질 수 있도록 광과이어를 이용하여 제작하였으며, 실험을 통해 센서의 특성을 조사하였다. 이 결과 팔꿈치 굽힘 각도센서는 0.076도의 작은 표준편차만을 나타내었다. 이를 이용하여 데이터 슈트를 개발하였고, 실험 결과 이전 연구에서 문제가 되었던 반복 동작시 발생하던 센서의 물리적 변형과 이에 따른 측정 오차의 문제를 해결하였다.

그리고 프로토타입 데이터 슈트와 팔꿈치 재활로봇을 연동하여 동작하도록 제어시스템을 구성하였다. 이 실험의 결과, 데이터 슈트가 측정한 각도로 팔꿈치 재활로봇이 제어되는 것을 알 수 있었다.

그러나 사람의 팔꿈치 동작은 3차원 공간에서 이루어지는 반면, 로봇 기구부는 2차원 공간에서 1차 유도 동작이 가능하다. 이것은 사람의 동작을 완벽하게 구현하지 못한다는 것을 의미한다. 그리고 제작된 로봇 기구부는 팔이 착용되는 각도가 사람 팔의 굽힘과 펴는 동작의 각도와 일치되지 않아 착용성이 좋지 않았다.

향후에는 사용성평가를 통해, 보다 착용이 용이하면서도 인간의 팔 굽힘펴는 동작과 흡사한 인체 중심의 설계 개선이 필요하다.

### 참 고 문 헌

[1] Olsen Ts. "Arm and leg paresis as outcome predictors in stroke rehabilitation," Stroke, vol. 21, pp. 247-251, 1990

[2] J.C. Perry, J. Rosen and S. Bums, "Upper-limb powered exoskeleton design," IEEE Trans. on Mechatronics, vol. 12, no. 4, pp. 930-935, 2008

[3] D.E. Barkana, F. Wang, J. Das, NSarkar and T.E. Groomes, "A step toward increasing auto main in robot-assisted rehabilitaion," in Proc. IEEE Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp. 930-935, 2008

[4] QAL Medical, <http://www.qalmedical.com>

[5] Hangzhou Zhengda Medical, <http://www.zd1991.com>

[6] ORMED, <http://ormedortho.com>

[7] V.S. Ramchandran, D. Roger-Ramachandran, "Synaesthesia in phantom limbs induces with mirrors," Proc. Royal Society of Biological Science, vol. 263, pp. 377-386, 1996

[8] G. Yavuzer, et. al, "Mirror therapy improves hand function in subacute stroke: A randomized controlled trial," Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, vol. 89, iss. 3, pp. 393-398, 2008

[9] <http://sizekorea.kats.go.kr>

[10] 박찬영, 문인혁, "상지마비 재활훈련로봇용 데이터글로브의 개발," 한국재활복지공학회 논문지 제2권 제1호, pp. 45-49, 2008.

[11] 김호권, 양지훈, 문인혁, "거울치료가 가능한 착용형 팔꿈치 재활 훈련로봇," 한국재활복지공학회 정기학술대회논문집 제6권 제2호 pp.172-173, 2012

[12] 백진슬, 양지훈, 배주환, 문인혁, "거울치료가법을 이용한 팔꿈치 재활훈련로봇용 팔꿈치 데이터 슈트 개발," 한국재활복지공학회 춘계학술심포지엄 제7권 제1호 87-88, 2013

[13] 김선근, 신상훈, 전다영, 홍승한, 심혁인, 장경원, 유욱재, 이봉수, "보행장애 진단을 위한 무릎관절 각도 측정용 광섬유 각도센서," 전기학회논문지, 제62권 7호, pp. 1009~1013, 2013



**양 지 훈**

2014년 2월 동의대학교 메카트로닉스공학과 졸업(학사)  
2014년 - 현재 JPI Health-care 제 2연구소 전 기전자 개발팀 근무

관심분야 : 재활로봇, 인터페이스 연구



**백 진 슬**

2014년 2월 동의대학교 메카트로닉스공학과 졸업(학사)  
2014년 - 현재 CSK 서비스 3부 근무

관심분야 : 재활로봇, 센서 인터페이스 응용



**문 인 혁**

1999년 일본 Osaka 대학 전자제어기계공학과 졸업 (공학박사)  
2002년-2005년 재활공학연구소 책임연구원  
2005년 - 현재 동의대학교 교수

관심분야 : 바이오메카트로닉스, 재활로봇 및 복지기기, 재활보조기기 표준화