

손 재활 로봇 연구 동향

손 재활 로봇 연구의 목표는 손 기능 장애를 갖는 환자들을 대상으로 치료사를 대신하여 치료를 수행하는 것이다. 일반적으로 손의 운동기능 장애는 골절, 인대 손상 또는 노화에 의한 근력 소실에 의해 발생하거나 뇌졸중이나 파킨슨 병, 척수 손상 등에 의한 신경계 문제에 의해 발생할 수 있다.

■ 구광민, 장평훈*

(한국과학기술연구원)

1. 서론

손 재활 로봇 연구의 목표는 손 기능 장애를 갖는 환자들을 대상으로 치료사를 대신하여 치료를 수행하는 것이다. 일반적으로 손의 운동기능 장애는 골절, 인대 손상 또는 노화에 의한 근력 소실에 의해 발생하거나 뇌졸중이나 파킨슨 병, 척수 손상 등에 의한 신경계 문제에 의해 발생할 수 있다[1].

한국은 2000년에 이미 65세 이상 고령인구 비율이 7.2%로 증가하였으며 ‘고령화(高齡化)사회’로 접어들면서[2] 근력 소실과 신경계 문제를 갖는 환자의 수도 점차 증가하고 있다. 손의 운동기능 장애를 갖게 되는 주요 원인 중 하나로 뇌졸중을 예로 들 수 있는데, 통계청 자료에 의하면 연령이 높아질수록 뇌졸중 환자의 비율이 높아짐을 알 수 있다[3]. 세계적으로 고령화 현상으로 인한 문제점이 대두되고 있는 가운데, 한국의 고령화 속도는 세계에서 가장 빠른 것으로 나타났다. 2010년 현재 11.0%, 10년 뒤인 2020년에는 15.6%로 높아져 “고령사회”가 되고 또 10년 뒤인 2030년에는 24.3%로 “초(超)고령사회”가 될 것으로 전망했다[2](유엔은 65세 이상 인구가 총 인구의 7% 이상이면 고령화사회, 14% 이상이면 고령사회, 20% 이상이면 초고령사회로 정의하고 있다).

손 재활이 필요한 환자의 수는 점차 증가하고 있는 추세이나 치료사의 수는 부족한 실정이다. 치료사 한명 당 담당해야 할 환자 수가 증가[4]하고 있어 환자는 충분한 시간 동안 치료를 받지 못하고 있다. 또한 신경계통의 문제가 있는 환자의 경우 반복적이며 목표지향적인 치료를 장기간에 걸쳐 받아야 하므로 치료

비에 있어서도 큰 부담을 갖게 된다. 치료사의 입장에서도 물리치료와 작업치료는 치료시간 동안 환자와 일대일로 접촉해서 치료를 수행해야 하기 때문에 많은 노동력이 요구된다.

이에 대한 대안으로 손 재활 로봇/장비들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 손은 총 16자유도로 모사되는 매우 복잡한 시스템이며 그 크기가 팔이나 다리에 비해 작기 때문에 액추에이터(actuator)와 센서 등을 장착하는데 어려움이 있다. 이런 어려움에도 불구하고 손 재활 치료를 로봇으로 구현하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다. 로봇을 이용한 손 재활은 앞서 언급한 바와 같이 치료사의 노동력이 가장 많이 요구되는 분야인 물리치료와 작업치료 구현에 초점이 맞추어져 왔다.

손 재활 로봇 기술을 정리함에 있어서 실제 병원에서 수행되고 있는 치료가 로봇으로 어떻게 구현되었는지 설명하고, 그동안 제안된 재활 로봇의 흐름에 따라 로봇을 분류하고 정리하고자 한다.

2. 손 재활 로봇의 분류 및 정리

2.1 Hand CPM

환자의 장애 정도와 증상에 따라 재활 방법이 다르게 처방되지만, 기본적으로 모든 손 기능 장애 환자에게 물리치료는 필요하다. 로봇을 이용한 물리치료는 환자가 로봇의 도움을 받아 단순 반복적인 움직임을 수동적으로 수행하는 것으로 스트레칭이 여기에 포함된다. 이런 스트레칭을 돋기 위해 Hand CPM(Continuous Passive Motion) 기기가 제안되었고, 현재 많은

병원에서 사용되고 있다. Hand CPM 기기는 이름 그대로 환자가 수동적 연속 움직임을 할 수 있도록 쥐고 펴는 동작을 반복 시켜준다. Hand CPM은 손가락 골절 환자들을 위해, 회복 기간 중 계속 고정되었던 손가락을 수동적으로 움직여주는 장치로 처음 제안되었다. 이후 뇌졸중 등 신경계통의 문제가 있는 환자를 위해 속도를 조절할 수 있게 함으로써 다양하게 사용되고 있다. 이 치료를 통해 관절 가동범위를 유지 및 증가시킬 수 있고 관절 구축을 예방 할 수 있다.

현재까지 상용화된 Hand CPM은 네 손가락과 엄지 손가락의 동시 움직임을 고려하지 않고 있다. 환측(affected side)이 원 손이나 오른손에 상관없이 사용 가능하게 하기 위해서는 양손에 모두 착용 가능하도록 해야 하는데 엄지손가락을 포함한 움직임을 고려하면 양손 착용이 힘들어지기 때문이다. 예를 들어 손바닥 부분이 고무로 코팅된 작업용 장갑을 생각해 봤을 때, 원 손용 장갑을 오른손에 착용할 수 없는 것과 같다. 설계의 어려움 때문에 현재까지 상용화된 Hand CPM을 통한 엄지손가락 재활은 그럼 1의 좌측과 같이 네 손가락을 재활하는 것과 동일한 방법을 이용해, 엄지손가락만을 따로 연결하여 수행할 수 있게 하였다.

엄지손가락 움직임을 따로 고려함으로써 한 기기로 원손과 오른 손이 다친 환자 모두가 사용할 수 있는 기구학적 구조를 갖추게 되었지만, 엄지의 역할이 중요한 일상생활 동작 등을 훈련하기에는 한계가 있다. 즉, Hand CPM 기기는 물리치료에 초점을 맞추고 쥐었다 펴는 반복적인 손동작을 구현하였는데 의미가 있다.

2.2 손 팔 일체형 로봇

손 기능 장애 환자에게는 일상생활 동작을 훈련하는 것이 매우 중요하다. 재활의 목표는 환자 독립적으로 일상생활을 불편 함 없이 수행할 수 있도록 장애를 최소화하는 것이기 때문이다. 회복될 수 있다는 의지와 치료의 흥미를 북돋기 위해서, 환자가



그림 1. Hand CPM (좌)Otto Bock의 Waveflex (우)Kinetic의 Maestra.

발병 전에 일상생활에서 실제로 많이 수행했던 동작들을 훈련 한다. 이를 작업치료라 한다. 발병 후에 수행하기 어려워진 동작들을 훈련하게 되면서 병세가 호전되어가는 것을 스스로 느낄 수 있고, 이를 통해 성취감을 얻게 된다.

일상생활 동작을 수행할 때 팔 동작과 손 동작을 모두 수반하게 되므로 자연스러운 일상생활 동작을 수행하기 위해서는 손과 팔의 동시 움직임이 구현되어야 한다. 이에 따라 팔만 재활하는 로봇에 손을 함께 고려한 재활 로봇이 제안되었다. 팔 재활 로봇은 손 재활 로봇에 비해 많은 연구들이 진행되어왔다. 팔은 손에 비해 크기가 크기 때문에 액추에이터와 센서를 장착함에 있어 손 재활 로봇보다 용이하기 때문이다.

손과 팔을 동시에 고려하고 있는 로봇으로는 IntelliArm[5]과 RUPERT[6]가 있다. 앞으로 손과 팔을 동시에 재활 할 수 있는 로봇을 손 팔 일체형 로봇으로 명명하도록 한다. 이 손 팔 일체형 로봇은 손 재활에 대한 필요성을 인식하고 손 재활 기능을 구현하였지만 많은 미흡함을 나타낸다. IntelliArm의 경우 4절 링크 메커니즘을 적용하여 MCP (metacarpal)관절만 60° 정도 움직일 수 있다. 손가락의 관절가동범위를 많이 구현하지 못하였으며, 일상생활에서 많이 사용하고 있지 않은 동작만을 수행할 수 있다.



그림 2. 손 팔 일체형 로봇 (좌)IntelliArm, (우)RUPERT.

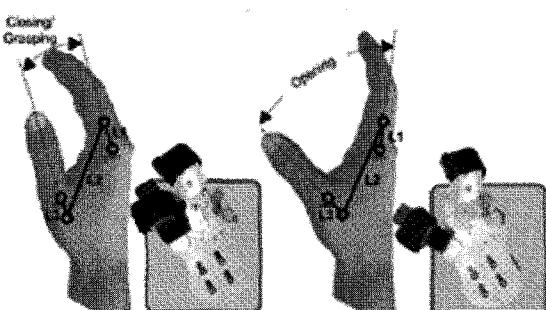


그림 3. IntelliArm의 손 움직임 구현.

RUPERT의 경우 손의 독립적인 움직임은 불가능하며 손목과 손이 항상 같이 움직일 수 있는 구조로 되어있다. 일체형 로봇에서 강조하고 있는 것은 팔과 손의 상호 협조 기능과 공동운동(synergy) 완화이다. 뇌졸중 환자의 경우 일반적으로 상지의 굽힘 균육이 더 발달하게 되기 때문에 팔과 손 전체에 걸쳐 굽혀있는 자세를 유지하게 된다. 이를 굽힘 공동운동(flexor synergy)라 한다. 따라서 어깨-팔꿈치-손목-손가락에 걸쳐 전체적으로 펼쳐 주는 스트레칭을 통해 공동운동을 완화시킬 수 있다.

손 팔 일체형 로봇에서 손 기능이 미흡한 이유는 팔 재활 로봇 끝단에 장착되게 되는 손 재활 부분이 로봇의 가반중량(payload)으로 작용하기 때문이다. 손은 팔보다 더 많은 자유도로 구성된 매우 복잡한 시스템으로써 손을 완벽하게 구현 할수록 더 많은 액추에이터와 센서가 필요하게 되는데 이는 중량의 증가로 이어지게 된다. 현재까지의 일체형 로봇에서 손 재활 부분은 무게의 제약을 받게 되기 때문에 제한적인 손동작만을 수행할 수 있다.

손은 팔보다 관절 수가 많고 크기도 작기 때문에 섬세한 동작을 수행하기 위해서는 팔 재활에 비해 일반적으로 더 오랜 시간이 걸린다. 현재까지 제안된 일체형 로봇은 손 기능에 많은 제약이 있기 때문에, 일상생활 동작을 위한 손 기능을 훈련할 수 있는 로봇이 점차 필요하게 되었다.

2.3 손 재활 로봇

손 재활 로봇은 로봇과 환자의 손이 어떻게 접촉하고 있느냐에 따라 위의 그림 4와 같이 손 끝 접촉 방법과 관절 접촉 방법 두 가지로 나눌 수 있다[7]. 손 끝 접촉 방법의 경우 액추에이터에서 연결된 기구학적 구조가 손가락 끝 부분과 접촉하는 방법이다. 앞서 언급한 Hand CPM 기기와 손 팔 일체형 로봇은 모두 손 끝 접촉 방법을 이용해 손가락의 움직임을 간략히 1자유도로 모사하였다. 손가락 관절 접촉 방법은 손가락의 관절마다 모터 등의 액추에이터를 연결하여 모든 관절을 각각 제어할 수 있는 방법이다.

2.3.1 손 끝 접촉 방법

한 손 가락은 MCP 관절에 2자유도와 DIP (Distal Interphalangeal) 관절에 1자유도 PIP (Proximal Interphalangeal) 관절에 1자유도를 갖는데, DIP와 PIP는 공동운동을 하기 때문에 총 3자유도로 모사될 수 있다. 이 3자유도를 다 구현하지 않고, 손가락을 굽히고 펴는 동작에서 손가락 끝 부분의 궤적만을 모사하여 1자유도로 간략화시킨 방법이 손 끝 접촉 방법이다.

그림 5의 Rutgers의 MasterII-ND[8]가 그 예이다. MasterII-ND

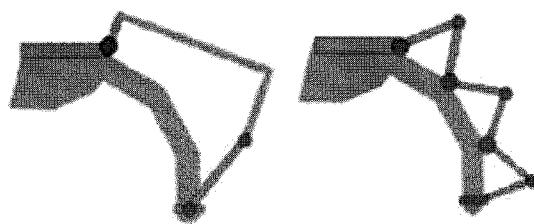


그림 4. (좌) 손 끝 접촉 방법, (우) 손가락 관절 접촉 방법.

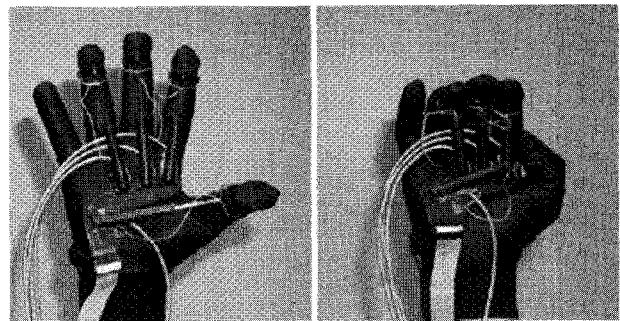


그림 5. Rutgers MasterII-ND의 움직임 구현.
(좌)신전(extension), (우)굽곡(flexion)

는 액추에이터로 공압 실린더를 사용하여 중량을 줄일 수 있고 사람 손과 접촉 시에 공압에 의한 하드웨어적 유연성이 구현된다. 손가락을 개별적으로 움직일 수 있기 때문에 피아노를 치는 것과 같은 움직임을 구현할 수 있으며 한 손가락에 최대 16N의 힘을 작용할 수 있다.

이 로봇의 단점은 구동부가 손바닥 안쪽에 있기 때문에 손가락을 완전히 굽힐 수가 없어 손을 편 때 완전한 손가락 관절가동범위를 구현할 수 없다. 또한 구동부를 움켜쥐는 형태가 되므로 실제 물건을 편 수 없다. 일상생활 동작 훈련을 수행하고자 할 때는 가상현실(VR)을 이용한 방법 등을 사용해야 한다. 실제 물건을 편 수 있게 하기 위해 구동부를 손등에 배치한 예로 앞서 언급한 RUPERT를 들 수 있다. RUPERT는 손 등 쪽에 구동부를 배치하여 손바닥의 공간을 확보하였고 실제 물건을 편 수 있는 형태로 설계 되었다.

손 끝 접촉 방법의 장점 중 하나는 길이 조절이 편리하다는 것이다. 손 등에 모터를 배치한 2 Finger Exoskeleton[7]은 엄지손가락과 다른 한 손가락의 움직임을 손 끝 접촉 방법으로 구현하였다. (그림 6) 접촉하는 링크의 길이만 조절하면 손가락의 길이가 다른 다양한 환자들도 길이 조절을 통해 간편하게 착용할 수 있다. 착용하는 형태의 로봇에서는 길이 조절이 반드시 필요하다. 로봇의 관절과 사람의 해부학적 관절이 정확히 일치 되지 않을 경우 후 로봇의 구동 과정 중에 사람의 관절에 무리를 줄 수 있

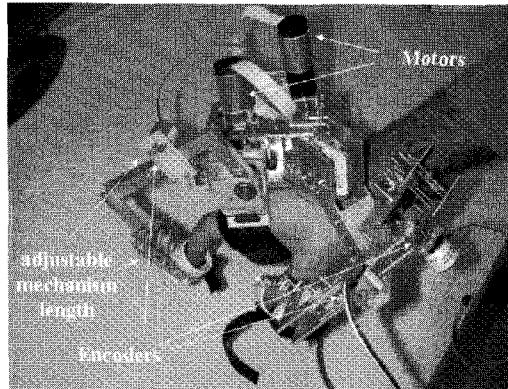


그림 6. 2 Finger Exoskeleton의 길이 조절 부분.

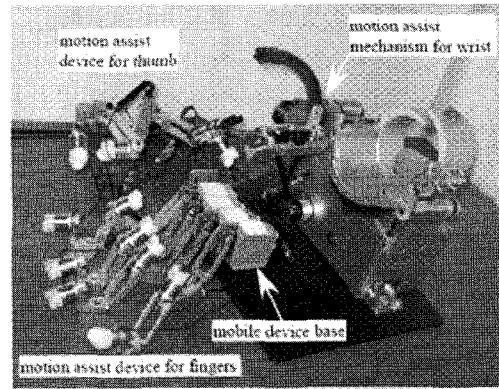


그림 7. Gifu University의 손 재활 로봇.

으며 원하는 동작이 잘 구현되지 않을 수 있기 때문이다.

2.3.2 손가락 관절 접촉 방법

손가락 관절 접촉 방법에 대한 연구는 정상인의 손가락 움직임을 완벽하게 구현하는데 초점이 맞춰지고 있다. 한 손가락을 3자유도로 모사하고 엄지손가락을 4자유도로 모사하여 각 관절의 독립적인 움직임을 가능하게 하였으며 다양한 일상생활 동작을 구현할 수 있게 하였다.

일본 Gifu university에서 제작된 로봇[9]의 경우(그림 7) 손을 16자유도로 구성하여 손가락 모든 관절의 개별적 움직임이 가능하다. 손목의 2자유도를 포함하여 로봇의 자유도는 총 18자유도이다. 일상생활 손 동작 수행에서 가장 중요한 역할을 하는 엄지손가락의 움직임도 완벽하게 구현되어 있어 자연스러운 일상생활 동작이 가능하다. 하지만 모터와 센서의 수가 증가함에 따라 무게가 증가하여 환자의 손으로 지탱하기에는 어려움이 있다. 이 로봇은 테이블 같은 곳에 올려놓고 사용하도록 설계되어 있다. 환자가 입는 형태의 로봇이 아니기 때문에 착용 후 실제 환경에서 실제 물건을 쥔는 등의 일상생활 동작은 수행 할 수 없으나 가상현실을 이용한 훈련을 수행할 수 있다.

재활치료에 있어서 중요한 훈련 중 하나는 근력 강화 훈련이다. 쥐는 동작은 되더라도 균력이 부족하면 실제 물건을 쥔는 등 일상생활 동작을 구현할 때 어려움이 따른다. 균력을 강화시키기 위해서는 환자의 자발적, 능동적 움직임 수행이 효과적이다. 따라서 능동적인 움직임 구현을 위해서 다양한 방법들이 로봇에 적용되고 있다.

가장 일반적으로 사용되는 것은 임피던스(혹은 컴플라이언스) 제어와 음성 지시를 이용하는 방법이다. 예를 들어 컵을 쥔는 동작을 훈련할 경우, 로봇은 환자에게 음성으로 훈련할 작업

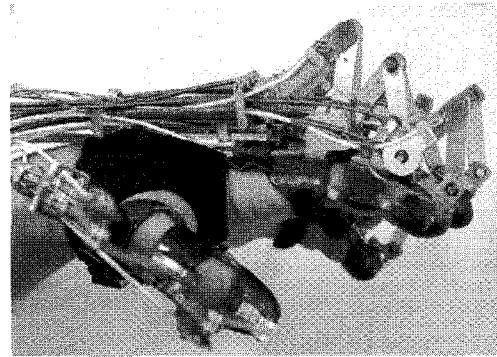


그림 8. Hand Exoskeleton.

을 전달하고 환자는 이를 통해 어떤 작업을 수행해야 할지를 인지하게 된다. 인지된 작업을 환자 스스로의 힘으로 수행하려고 시도하게 되는데, 이 때 로봇은 환자가 수행해야 할 작업을 돋는다. 이 작업의 관절 경로(joint trajectory)는 로봇에 저장되어 있어야 한다. 각각의 작업들에 대해서 환자에게 적합한 임피던스를 구현하여 무리를 주지 않으면서 환자를 도울 수 있다. 임피던스 제어를 구현하기 위해서는 토크 센서가 필요하다.

또한 토크 센서를 이용하여 환자가 의도하는 움직임을 파악하여 환자가 하고자 하는 능동적인 움직임을 할 수 있도록 돋는 방법이 있다. 이 방법은 로봇에 저장된 관절 경로만을 돋는 것이 아니라 환자의 의도를 파악하여 움직이는 것으로 무(無)토크 제어(zero torque control)라고도 한다. 토크 센서를 사용하는 것 외에 환자의 의도를 파악하는 또 다른 방법으로 환자의 활성화된 근육을 감지하는 근전도(eletromyography:EMG) 센서를 이용하기도 하는데 그림 8의 Hand Exoskeleton[10]이 그 예이다. Hand Exoskeleton은 총 20자유도로 구성되어 있으며, 한 손가락을 4자유도로 구현하였다. 각 관절마다 각도 센서와 손가락 끝단에 힘

센서가 부착되어 있으며 16개의 근전도 센서가 사용되었다. 이러한 관절 접촉 방식의 로봇은 많은 액추에이터와 센서로 구성되기 때문에 각 관절의 개별적인 움직임이 가능하며 물리 치료와 일상생활 동작 훈련을 충실히 수행할 수 있다. 반면 환자 개인적으로 사용하기에는 매우 고가의 장비이며 길이 조절이 쉽지 않아 환자가 착용하기에 불편하다는 단점을 갖는다.

3. 결론 및 추후 과제

손 재활 로봇은 로봇 공학과 재활 의학이 결합된 연구의 산물이다. 로봇 공학자들은 재활 현장에서 꼭 필요로 하는 점이 무엇인지 사용자의 입장에서 연구방향을 결정해야 한다. 현재 연구는 현장에서 시행되는 치료를 로봇을 통해 효과적으로 구현하기 위한 방향을 모색하며 진행되어 왔으며 많은 진전을 이루었다. 재활 치료에서 가장 중요한 것 중 하나는 환자에게 회복에 대한 동기를 지속적으로 부여하는 것이다. 이를 위해 로봇은 환자가 착용하고 사용하기 편리해야 하며 회복되고 있는 정도를 환자가 알 수 있도록 평가해줄 수 있어야 한다.

향후 손 재활 로봇은 일상생활 동작을 훈련하는 차원을 넘어서 손의 운동기능 장애를 갖고 있는 사람들이 자유롭게 일상생활을 수행할 수 있는, 하지를 예로 들면 휠체어와 같은 일상 생활에 이르게 될 것이다. 손 재활 로봇은 꼭 필요한 기능만을 갖추어 집에서 재택치료의 용도로 사용될 수 있을 것이다. 이를 위해서는 액추에이터와 센서의 성능 향상과 가격 절감이 필요하다. 정상인의 손가락 움직임을 완벽히 모사하는 것도 중요하지만 환자가 실제로 재활 치료를 로봇을 통해 수행할 수 있도록 로봇의 구조를 단순화하고 제작비용 등을 낮출 수 있는 방법을 고려하는 것이 필요하다.

참고문헌

- [1] J.J. Dias, K.C. Chung, M. Garcia-Elias, S.R. Sabapathy, and J.B. Tang, "Recommendations for the improvement of hand injury care across the world", *Injury, Int. J. Care Injured*, vol. 37, pp. 1078-1082, 2006.
- [2] 통계청, "2009 한국의사회지표- 부양 비 및 고령화지수," 2009.
- [3] 통계청, "사망원인통계연보[전국편]-성,연령,사망원인별 사망률," 2008.
- [4] "급성기 뇌졸중 적절성 추구 평가결과," 건강보험심사평가원, 2009.
- [5] H. S. Park, Y. Ren, and L. Q. Zhang, "IntelliArm: an exoskeleton for diagnosis and treatment of patients with neurological impairments," in proc. 2nd Biennial IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2008.
- [6] T. G. Sugar, H. Jiping, E. J. Koeneman, J. B. Koeneman, R. Herman, H. Huang, R. S. Schultz, D. E. Herring, J. Wanberg, S. Balasubramanian, P. Swenson, and J. A. Ward, "Design and Control of RUPERT: A Device for Robotic Upper Extremity Repetitive Therapy", *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 336-346, 2007.
- [7] P. Stergiopoulos, P. Fuchs, and C. Laurgeau, "Design of a 2-Finger Hand Exoskeleton for VR Grasping Simulation", Research paper of PERF-RV Project, A5 Action.
- [8] TM Bouzit, G Burdea, G Popescu, and R. Boian, "The Rutgers Master II-new design force-feedback glove", *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 7, no. 2, 2002.
- [9] S. Ito, H. Kawasakia, Y. Ishigureb, M. Natsumec, T. Mouria, and Y. Nishimoto, "A design of fine motion assist equipment for disabled hand in robotic rehabilitation system," *Journal of the Franklin Institute*, 2008.
- [10] A. Wege, and A. Zimmermann, "Electromyography Sensor Based Control for a Hand Exoskeleton", in proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, 2007.

● 저자 약력



구광민

- 2008년 KAIST 기계공학과 졸업.
- 현재 KAIST 기계공학과 석·박사 통합과정.
- 관심분야 : Hand rehabilitation, Robot manipulator design, Torque sensor design.



장평훈

- 1974년 서울대학교 기계공학과 졸업.
- 1977년 서울대학교 기계공학과 석사.
- 1987년 MIT 기계공학과 박사.
- 현재 KAIST 기계공학과 교수.
- 관심분야 : Robust nonlinear control , Impedance Control, Redundant Manipulators