

# 생체 신호에 기반한 바이오 로봇릭스 기술

김 정 (KAIST)

## I. 서론

기계가 사람과 완벽하게 조화를 이루어 인체의 일부분을 이루거나 인체에 부착되어 신체적 능력을 확장시킬 수 있는 로봇에 대한 꿈은 많은 SF 영화/소설 등에서 친숙하게 다루어지는 주제이며 최근 미디어를 통해 우리 주위에서도 이러한 로봇의 현실화가 가능한 시대가 온 것으로 보인다. 인간의 운동 신호를 실시간으로 해석(encode) 한 후 인체의 일부분을 대체하거나 보조, 증폭하는 기기에 대한 기기는 단순히 컴퓨터 인터페이스를 넘어 의수, 의족을 제어하거나 인체의 힘을 증폭하는 군사, 원격 작업을 이용한 극한 작업 로봇의 원거리 제어에 대한 응용까지 속속 선을 보이고 있다.

이러한 새롭고 도전적인 로봇 기술에서 가장 해결이 요구되고 어려운 난제중의 한 가지는 바로 인체의 운동에서 발생하는 생체 신호(biosignal)과 외부 로봇과의 실시간 인터페이스(interface) 기술이다. 이러한 기술은 인체가 운동을 할 때, 뇌에서 생성된 운동 신호가 근육까지 전달되는 길고 복잡한 형태의 신호 경로(efferent path)에서 추출된 신호에 의해 로봇을 구동하고 반대 방향 경로(afferent path)를 통해 로봇의 촉감 등의 감각정보를 직접적으로 인식하는 것이다. 로봇은 생체 신호를 처리해서 운동 시작, 팔, 다리의 위치 또는 힘을 추정하여 사람의 동작을 보조하거나 증폭하는 역할을 수행한다.

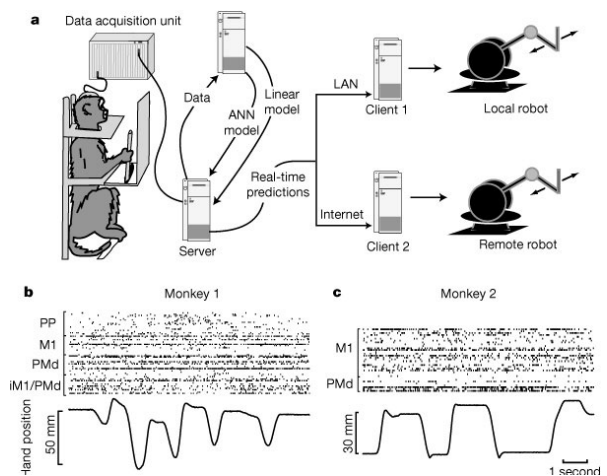
이러한 인간의 생체신호기반 바이오 로봇기술은 재활, 동작보조, 군사 및 원격제어 등에 다양하게 적용되고 있으며 시장적으로도 다빈치로 대표되는 수술용 로봇의 성공적인 상업화의 길을 갈 관련 로봇 시장에 가장 중요한 부분이 될 것이라고 예측된다. 따라서, 본 논문은 이러한 생체 신호 기반 바이오 로봇 연구의 주요한 연구 활동과 생체 신호의 종류 및

응용분야와 기술적 난제를 정리 소개하고 이러한 기술이 가야 할 바를 소개하고자 한다.

## II. 연구 동향

인간과 기계의 접속과 상호작용을 주제로 하는 많은 연구와 프로젝트들이 논문과 언론에 발표되고 있다.

뇌-기계 인터페이스(Brain Machine Interface, BMI)는 뇌와 기계를 직접 연결하는 기술로 현재 많은 주목을 받고 있는 기술이다. 2000년 필자가 참여했던 Duke 와 MIT의 연구진이 영장류의 Brain Cortex로부터 침습형 전극을 통해 추출된 신호로 외부의 로봇을 구동한 세계 최초의 BMI 기술을 시연한 이래(〈그림 1〉) 소위 마음(mind)으로 제어하는 기계에 대한 많은 연구가 수행되고 있다<sup>[1]</sup>. 그 중 Univ. of Pittsburgh 와 Brown university의 연구진들은 침습 혹은 비침습적인 수단



〈그림 1〉 Duke-MIT 의 BMI 실험도 및 신호<sup>[1]</sup>

을 통해 처리한 뇌파신호를 이용해 외부 기기를 동작하는 연구가 행해지고 있으며 최근에는 단순한 외부기기의 동작에서 로봇 또는 가상환경에서의 촉각정보를 영장류의 뇌신경부에 피드백하는 연구들이 시도되고 있다. 상하지 장애인들에게 이러한 기술은 가장 유용할 것이다.

Bionic woman/man 으로 많이 알려진 의수기술은 절단된 운동 신경의 말단부를 다른 부위의 근육에 이식하여 이식된 근육으로부터 증폭된 근 전도 신호를 얻을 수 있도록 하는 이른바 TMR(Target Muscle Reinnervation) 수술에 기초하고 있으며 이는 상지부의 신경신호로 작동하는 근육의 근전도 신호로부터 복잡한 형태의 상지 운동을 추출할 수 있다는 가능성을 보여주었다<sup>[2]</sup>. 최근에는 교통사고로 하반신이 마비되어 걷지 못했던 학생이 U.C. Berkely의 Kazerooni 교수 연구팀이 개발한 외골격 장비로 인해 자신의 의지로 걸어서 U.C. Berkeley 의 졸업식에 참석한 사실은 많은 사람에게 어떻게 기술이 인간의 삶을 도울 수 있는지를 세상에 잘 보여준 예라고 할 수 있다. MIT의 Hugh Herr 연구팀은 생체 역학을 이용한 보행 에너지 분석을 통해서 사람의 걷는 효율에 근접한 발목 인공 관절을 개발했으며 주로 하지 절단 환자에게 적용할 수 있는 의족을 개발하고 있다.

이 외에 기능성 전극(Functional Electrical Stimulation) 을 이용해 직접 근육을 전기적으로 자극하여 보행이나 파지 작업등을 가능하게 하는 연구들도 수행되고 있다.

### Ⅲ. 생체 신호 측정

일상생활에서 큰 의식없이 인간은 보행을 하고, 손으로 물건을 조작하지만 이러한 현상의 뒤에는 뇌에서 신호발생, 신경에서 운동 신호 전달, 근육의 활성화, 다양한 형태의 촉각 및 감각 신호의 피드백들이 어우러진 매우 복잡한 메커니즘이 존재한다. 생체 신호(biosignal)는 외부에서 변환기(transducers)를 이용해 전기신호로 변환할 수 있는 전기적, 기계적, 화학적인 모든 형태의 생명 신호를 의미하지만 본 논문에서는 인체의 운동과 관련된 운동신경 및 골격 근육

(Skeletal muscle) 활성화에 관계된 각종 신호만을 대상으로 리뷰하고자 한다.

생체 신호는 크게 뇌, 척추에서 취득이 가능한 중추신경신호(Central Nervous Signal, 이하 CNS),와 그 외에서 취득하는 말초신경신호(Peripheral Nervous Signal, 이하 PNS)로 나눌 수 있다(〈표 1〉 참조). 또한, 인체 내부로 침습해서 신호를 추출하는 침습형 신호와 피부에서 원격적으로 취득하는 기능성 MRI(fMRI) 등의 비침습신호로 구분한다.

CNS 신호는 BMI 에서 주로 연구되는 신호로 침습형 바늘 어레이를 이용해서 대뇌 피질 표면에 전극을 삽입하여 신호를 추출하는 방식, 뇌전도(Electroencephalography, EEG)를 이용한 비침습적 방식, 그리고 이의 중간 단계인(뇌피질의 표면에서 센싱을 하나 침습은 아닌) Electrocortigram(eCOG) 등이 있다. 이러한 신호는 중추신경에서 바로 추출되기에 상하지가 절단되거나 마비된 환자에게 쓰일 수 있으나 비침습 신호의 낮은 SN비와 뇌파와 팔 다리의 움직임 사이의 연관 모델 등의 개발이 요구된다.

PNS 신호는 상하지에서 위치한 잔존 근육과 신경이 있는 경우에 유용하게 쓰일 수 있다. 이러한 신호는 실제의 근육의 수축에 관계된 잔존 신경, 근육 신호를 사용할 수 있는 장점이 있으며 연구에 가장 많이 쓰이는 신호로는 근육의 전기적 활성을 나타내는 근전도(Electromyogram, EMG)가 있다<sup>[3]</sup>. EMG 는 피부에서 측정이 가능할 뿐만 아니라 해당 근육의 활성화도와 직접적인 연관이 있어서 가장 많이 검토되고 있으나 표면의 전기적 접촉에 예민하고 시간에 따라서 변화하는 이른바 피로도에 대한 모델링이 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 근수축시 발생하는 근육 표면의 진동을 측정하여 수축정도를 파악하는 근진동(Mechanomyogram, MMG)에 대한 연구도 많이 수행되고 있다<sup>[7]</sup>. MMG는 근섬유 미소 진동신호를 측정하는 것으로 EMG보다 저주파 대역이며 센서-피부 접촉면에 덜 민감한 장점이 있다. 그 외 운동신경부에서 추출되는 신경전도(ENG)등에 대한 연구가 진행되고 있으며 이러한 신호들은 근전도에 비해 각각의 장단점을 가지고 있다.

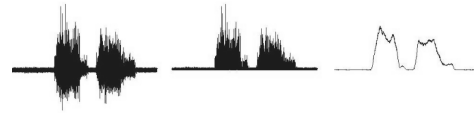
〈표 1〉 바이오 로봇에서 고려되는 생체 신호의 종류 및 특성

이름	약어	종류	획득부위	침습도
Electromyogram	EMG	PNS	근육, 피부(sEMG)	중간~낮음
Electroneurogram	ENG	PNS	신경	높음(Cuff electrode)
Electroencephalogram	EEG	CNS	두피	낮음
Mechanomyogram	MMG	PNS	피부	높음
Electrocortigram	eCoG	CNS	뇌피질 표면	중간
Brain Cortex signal		CNS	뇌에 이식한 전극	가장 높음
Functional MRI	fMRI	CNS	외부	가장 낮음

### IV. 동작 의도 인식 및 물리적 인간-로봇 상호작용(pHRI)

생체 신호가 영상 신호등에 비해 유리할 수 있다고 추정하는 이유는 바로 전기역학적 지연(Electromechanical delay, EMD)의 존재이다. 뇌에서 운동 신호의 발현이 된 후 실제 인체에서 운동이 발생하기까지의 시간을 말하며 일반적으로 50 ~ 100 msec 의 크기를 가진다. 즉 실제 운동이 발생하기 전에 생체 신호가 선행하고 이를 이용하여 운동을 예측할 수 있는 가능성이 있다. 다양한 형태의 센싱 방법을 통해 생체 신호가 추출된 후 다음 단계는 신호를 동작 의도(motion intention)로 변환하는 것이다<sup>[4]</sup>. 동작의도추출이란 생체 신호에 기반하여 팔 다리의 운동 시점, 관절 각도 및 인체의 힘을 실시간으로 추정하는 기술을 의미한다. 신호 처리 관점에서 보면 고주파수의 측정된 생체 신호를 각종 신호처리를 통해서 인체의 동작 의도 신호에 해당하는 저주파의 신호를 생성하는 것이다. <그림 2>

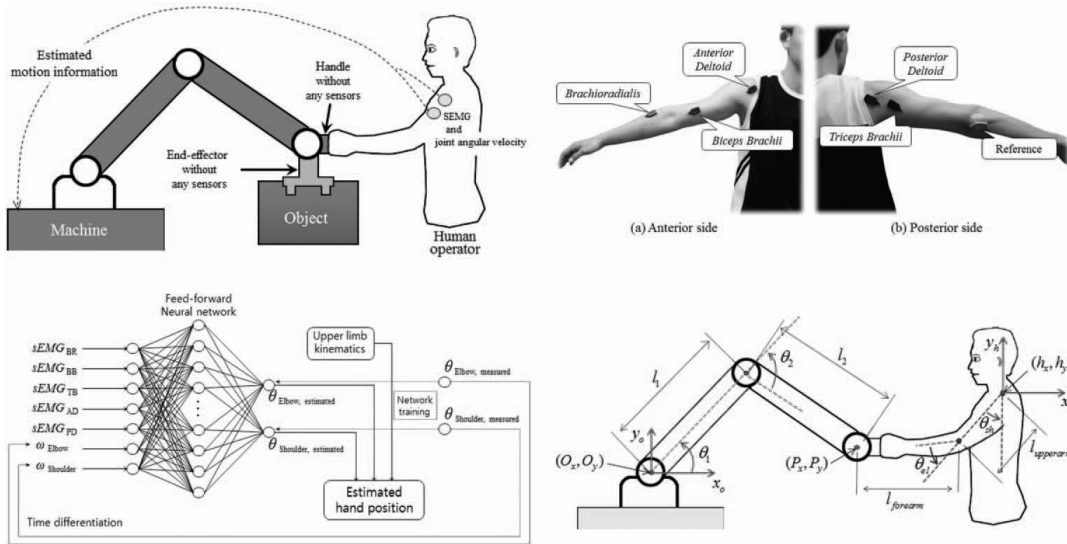
근전도(sEMG) 혹은 근진동(MMG)의 경우에서 볼수 있듯이 생체 신호는 S/N비가 낮으며 실시간으로 인한 빠른 신호



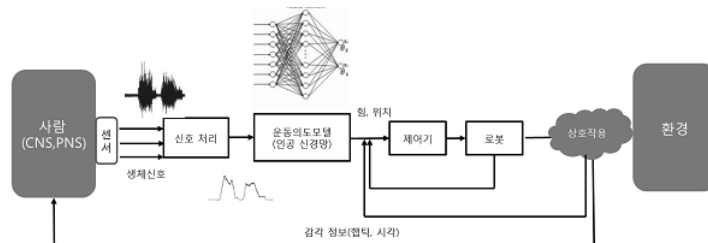
<그림 2> 전방삼각근(Deltoid anterior)에서 추출한 raw EMG와 신호처리 결과

처리 계산시간을 요구한다. 이러한 동작 의도를 추출하는 방법은 인공 신경망(ANN)등의 기계 학습 알고리즘을 통해서 훈련을 통해 데이터와 운동의 의도를 연결시키는 방법과 생체 역학적 모델을 이용하여 인체의 힘을 계산하는 방법이 있다. 현재는 신경-근육-골격(Neuro-muscular-skeletal) 계의 실시간 모델링은 아직 어렵기 때문에 현재는 ANN을 설계하고 이를 생체 신호와 운동 데이터를 이용해서 이를 훈련하여 사용하는 방법이 많이 쓰이고 있다. <그림 3>은 본 연구실에서 연구한 표면근전도(sEMG)와 인경신경망 알고리즘을 이용한 상지부위의 관절 위치를 추출하는 기술을 보여주고 있다.

추정된 힘을 로봇에 의해 보조 또는 증폭하는 기술은 이른바 물리적 인간-기계 상호작용의 영역이다. <그림 4>는 이러



<그림 3> KAIST 생체 기계연구실에서 연구중인 표면 근전도를 통한 상지 관절 위치 추정 연구 개념도, 전극 부착위치, 인공신경망, 실험 장치



<그림 4> 생체 신호에 의한 바이오 로봇의 개념도

한 바이오 로봇 시스템의 블록 다이어그램을 보여주고 있다. 그러나 이러한 바이오 로봇을 이용한 pHRI의 설계는 기존의 선형 제어 이론에서 많이 알려진 Root locus, bode plot, Nyquist 등의 이론을 적용하기 어려운 어려움이 있다. 그 이유는 환경과의 상호작용이 다시 제어 시스템에 영향을 미치는 구조이기 때문이다<sup>[6]</sup>.

## V. 기술적 도전

현재 이러한 기술들의 실현이 가까운 듯 보이지만 아직도 많은 난제가 남아있다. 현재 기술로도 생체신호를 통해 컴퓨터, 가전 제품 등을 조작하는 것은 가능하다. 그러나, 로봇이 느끼는 정보의 직접적인 신경 피드백 (이러테면 촉각 정보)에 대한 연구, 생체 신호를 실제 팔 다리의 힘 정보로 변환하는 연구, 외부 환경과의 상호 작용에 대한 안전성에 대한 연구는 현재의 기술로도 아직 도전적 기술로 분류할 수 있다.

또한 생체 신호는 많은 경우에 시간에 따라서 신호의 특성이 변화하는 경우가 많은데 이에 대한 모델링이 필요하다. 예로서 근전도의 경우 시간이 지남에 따라 근피로에 영향을 받아서 같은 부하에 대해 대해 다른 신호값을 보여주는 경향을 보이게 되는데 이는 근전도를 이용한 외골격 장비의 제어 등에서는 안정성 문제의 소지가 될 수 있다.

운동 의도 인식 방법은 현재 앞에서 기술한 바와 같이 ANN 을 많이 쓰고 있으나 이러한 방법은 훈련된 데이터에 대해서는 높은 성공률을 보이고 있으나 훈련되지 않은 데이터의 예측이 어려운 단점이 있어 앞으로는 신경생체역학의 발전에 따라 모델을 이용하여 결과를 추정하는 이른바 Myoprocessing 방법도 많이 시도될 것으로 판단된다.

영화에서처럼 사람이 로봇을 통해 외부의 무거운 물건을 가볍게 들고 움직이는 것이거나 조작하는 것이 pHRI 응용의 대표적인 예이나 연구에 의하면 사람의 힘을 무한대로 확장할 수 있는 것이 아니다. Colgate와 Hogan 의 연구에 의하면 안정성을 확보한 로봇을 통한 임의의 힘 증폭(또는, 체감 질량의 감소)은 어떠한 기구와 제어기의 조합으로도 불가능함을 증명하였다. 현재 가장 보수적으로 쓰이는 투명성 (Passivity theory)에 따르면 로봇에 의한 하중의 감소량은 50% 미만으로 증명되었다. 즉 현재의 기술에 의하면 2Kg 의 물건을 로봇을 통해서 1Kg처럼 사용자에게 느끼게 할 수는 있으나 그 이상의 질량 감소는 안정성을 확보하면서 할 수 없음을 의미한다. 따라서, 제어 이론과 각종 수학 도구를 이용해서 pHRI 시스템의 안정성에 대한 깊은 연구가 요구되어지고 있으며 제어 이론의 새로운 분야가 될 것으로 기대된다.

## VI. 향후 전망

앞으로의 로봇 연구의 추세는 인간과 로봇간의 거리는 점점 좁혀지고 상호 교환하는 에너지의 크기는 점점 더 증가할 것으로 판단된다. 다시 말하면 로봇과 인간이 분리되어 영상/음성 교환에 근거한 감정적, 인지적인 HRI 상호 작용에서 양자가 물리적으로 결합되어 공동의 일을 수행하거나 인간의 절단되거나 약화된 신체의 일부분을 대신할 수 있는 로봇기술이 시연될 것이다.

특히 우리나라의 경우 저출산고령화로 인하여 이미 전국이 고령화 사회(전체 노인인구수가 7%이상)로 진입했으며 일부 지자체는 노인인구가 20% 이상인 초고령화사회로 진입한 실정이다(조선일보, 2011.5.31.일자). 통계에 따르면 2026년에는 전국이 초고령화사회로 진입할 것으로 예상되며 그 추세는 점점 더 빨라지고 있다. 그러므로 이러한 노인 인구의 약화된 신체기능의 부양 및 삶의 질 확보는 이미 심각한 국가적 문제이다. 이를 해결하기 위해 노인들의 비침습 생체신호에 기반한, 삶의 질에 큰 영향을 주는 손,팔의 상지기능 보조와 이동성과 독립성을 보장해줄 수 있는 하지 보행보조 기술의 개발이 시급한 실정이다. 현재 교과부 주도로 2010년에 출범한 공공 안전 복지 연구 개발 등의 연구 사업이 진행 중이나 더 많은 국가적 관심과 노력이 필요할 때다.

앞서 기술한 당면 기술은 전술한 고령화와 장애인의 삶의 질 문제로 인해 예상보다 빠르게 시장이 형성될 것으로 예측하고 있다 또한, 이미 침습형 생체신호를 추출하는 각종 인터페이스 기술을 이미 상당 수준의 상업성과 시장이 형성되고 있다. 그러나 주의 할 것은 언론이나 인터넷 상에서 넘쳐나고 있는 기술 들이 많은 경우에 충분한 안전성이 검증이 되지 않은 형태로 사회적 주목(publicity)과 시장 선점을 이유로 발표되고 있는 점이다. 한 예로 2010 년 오스트리아의 고전압에 의해 두팔을 잃은 21세의 청년에게 TMR 수술과 신경신호로 구동되는 첨단 의수를 이식하여 일상생활뿐만 아니라 자동차 운전까지 가능하게 하였지만 불과 수개월 후에 이 청년이 자동차 사고로 사망하는 일이 발생했다. 정확한 사인은 공개되지 않았으나 검증이 부족한 기술의 조급한 일반인 대상의 적용이라는 면에서는 많은 교훈을 우리에게 주고 있다. 그러나, 만약 이러한 기술의 적용에 성공한다면 사회적인 영향은 아주 클 것으로 생각된다. 절단 또는 마비 환자들은 손실되었던 팔, 다리의 기능을 회복할 수 있으며 뇌졸중, 파킨슨씨병 등의 신경 퇴화성 질병으로 고통 받는 노인들의 재활 및 삶의 질 향상에 큰 기여를 할 것이다.



## 참고문헌

- [1] Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates, J. Wessberg, J Kim, M. A. L. Nicolelis et al. Nature 408, 361-365.
- [2] Targeted reinnervation for enhanced prosthetic arm function in a woman with a proximal amputation: a case study, Kuiken TA et al. Lancet. 2007 Feb., 3;369(9559):371-80.
- [3] A critical review of interfaces with the peripheral nervous system for the control of neuroprostheses and hybrid bionic systems, X. Navarro et al. Journal of the Peripheral Nervous System 10:229-258 (2005).
- [4] Intention Reading is Essential in Human-Friendly Interfaces for the Elderly and the Handicapped, Z. Zenn Bien et al. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol.52, No.6, Dec., 2005.
- [5] Real-Time Upper Limb Motion Estimation From Surface Electromyography and Joint Angular Velocities Using an Artificial Neural Network for Human-Machine Cooperation, Suncheol Kwon, Jung Kim, IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION TECHNOLOGY IN BIOMEDICINE, Vol.15, No.4, July, 2011.
- [6] Complementary Stability and Loop Shaping for Improved Human-Robot Interaction, Stephen P. Buerger and Neville Hogan IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, Vol.23, No.2, Apr., 2007.
- [7] Feasibility of using an artificial neural network model to estimate the elbow flexion force from mechanomyography Journal of neuroscience methods, 194(2), 2011.



김 정

1991년 KAIST 기계공학과 학사.  
 1993년 KAIST 기계공학과 석사.  
 2003년 MIT 기계공학과 박사.  
 1993년~1999년 고등기술연구원 연구원.  
 2003년~2004년 Yantric Inc.  
 2004년~현재 KAIST 기계공학과 부교수.  
 <관심분야> Medical Robotics, Haptics, Rehabilitation robotics, Biosignal processing, Surgical simulation