

생체 임피던스를 이용한 로봇의 원격제어

김근영, 김경환, *김덕원, *김수찬
한국과학기술연구원 마이크로시스템 연구센터
*연세대학교 의과대학 의학공학교실

Teleoperation of a Robot Manipulator using Bioimpedance

Keunyoung Kim, Kyunghwan Kim, *Deok-Won Kim, *Soo-Chan Kim
Microsystem Research Center, KIST

*Dept. of Medical Eng., College of Medicine, Yonsei University
vic@kist.re.kr, kimk@kist.re.kr, kdw@yumc.yonsei.ac.kr, firmware@yumc.yonsei.ac.kr

Abstract

본 논문에서는 인간의 생체 임피던스를 이용하여 인간의 팔 운동을 추정하고자 한다. 생체 신호를 이용하여 인간의 운동을 추정하기 위해서는 먼저 생체 신호와 인간의 운동 사이의 정량적인 관계를 구해야 하며 특히, 다자유도 운동의 추정에는 생체 신호간의 간섭등을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 먼저 일자유도 운동실험을 통해 생체 임피던스와 인간 팔 관절의 회전각 사이의 선형성을 고찰한다. 그리고, 다자유도 측정시에 발생하는 근육간의 결합성과 방향성의 문제에 대해 주파수 분할 측정법을 도입하여 팔의 다자유도 운동을 추정하였다. 마지막으로, 실제의 로봇을 제어하는데 응용하였다.

I. 서론

본 논문은 로봇의 원격제어에 있어 생체 인터페이스의 가능성과 문제점을 고찰한다. 그리고, 인간의 다양한 생체신호 중에서 특히 팔 운동과 밀접한 상관성을 가진 신호를 이용하여 로봇의 원격제어 시스템을 구축하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다. 이를 위해서 생체신호의 분석에 있어서도 인간의 운동 해부학을 고려하여 측정점 등을 고려하여야 한다. 지금까지, 생체 임피던스는 사지 혈류량의 측정이나 체지방의 측정 등

생체공학의 여러 분야에서 많이 응용되어 왔다[1]. 그러나, 생체 임피던스를 인간의 운동 해석에 이용하려면 먼저 선형성에 대한 문제가 해결되어야 한다. 그리고, 다채널 생체 임피던스의 해석에 있어서는 근육간의 결합관계나 근육쌍에 의한 방향성 등 복합적인 문제점을 해결하여야 한다. 본 논문에서는 먼저 단일 채널에 대한 실험을 통해 생체 임피던스의 선형성에 대해 고찰한 다음 다중 채널 실험시에 발생하는 문제점을 해결하고 이를 바탕으로 로봇의 원격제어에 응용해 보고자 한다.

II. 생체 임피던스에 의한 1자유도 원격제어

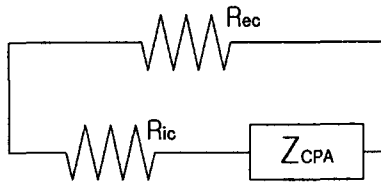
인간의 움직임을 측정하기 위해 지금까지 기계적, 광학적, 전자기적 방법 등 다양한 방법들이 연구되어 왔다. 그러나, 본 논문에서는 인간의 생체 임피던스를 이용하여 인간의 운동을 추정해 보고자 한다. 우리 인간의 팔은 근육, 피부, 뼈 그리고 혈액 등으로 구성되어 있다. 이 중에서도 특히 근육과 혈액은 낮은 저항률을 가지고 있기 때문에 팔의 움직임에 따라 근육과 혈액의 변화가 생기면 생체 임피던스도 쉽게 변화하게 된다. 기존의 연구에서는 인간의 관절각과 근육의 변화 사이에는 밀접한 상관관계가 있다는 사실이 알려져 있다[2]. 이점에 착안하여 팔의 관절각 변화를 생체 임피던스의 크기로 추정하려고 한다. 본 논문에서는 실

험을 통하여 인간의 생체 임피던스를 이용하여 팔의 관절각 추정이 가능함을 보이고 이를 이용하여 로봇의 원격제어를 구현한다.

2.1 생체 임피던스의 특징

일반적으로 사용되는 임피던스의 측정 방법은 일정한 직류원에 그보다 크기가 작은 교류신호를 중첩하여 인체에 인가하였을 때 발생하는 전류를 측정하여 구한다. 이 때 교류 신호는 보통 1 mHz에서 100 kHz까지이다.

생체의 임피던스는 크게 세포 내부의 유동 저항(intra-cellular liquid resistance), 세포 외부의 유동저항(extra-cellular liquid resistance) 그리고, 세포막의 정전용량(cell membrane capacitance)으로 나타낼 수 있으며 그림 1은 생체 임피던스의 전기적인 등가 모델을 보여준다.



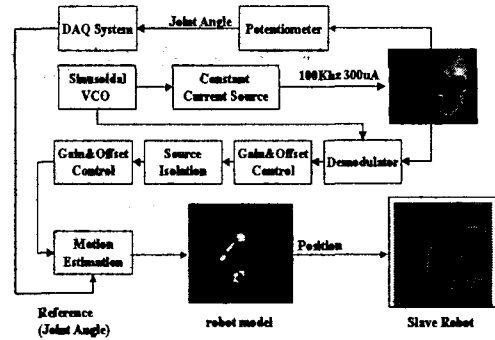
[그림 1] 생체 임피던스의 등가 모델

그림 1을 모델로 한 생체의 복합 임피던스는 다음과 같다.

$$Z = R_{ec} // (Z_{CPA} + R_{ic}) \quad (\text{식 1})$$

$$Z_{CPA} = \frac{1}{j\omega C} \quad (\text{식 2})$$

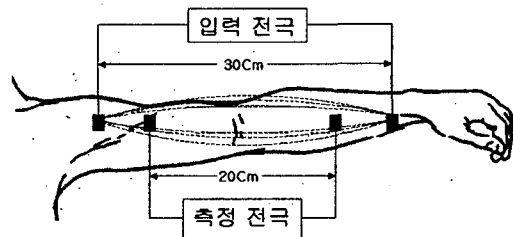
여기에서, R_{ec} 는 세포 외부의 유동저항, R_{ic} 는 세포 내부의 유동저항, Z_{CPA} 는 세포막의 정전용량을 가리킨다. Z 는 Z_{CPA} 에 의해 위상을 가지게 되므로 $Z = Z_{real} + Z_{image}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서, Z_{image} 는 생체의 중요한 전기적 특성을 나타내지만 단일 주파수를 사용한 임피던스 측정법에서는 무시할 수 있다. 생체의 임피던스 모델은 혈액, 근육, 뼈 조직이 병렬적으로 연결된 전기적 등가모델로 표현할 수 있으며 근육과 혈액이 상대적으로 낮은 저항률을 가지므로 생체 임피던스에서 지배적인 부분을 차지한다. 실험에 의하면 골격근육은 $300 [\Omega/cm]$, 혈액은 $150 [\Omega/cm]$ 인데 비해 지방조직은 $2500 [\Omega/cm]$ 의 저항률을 가진다.



[그림 2] 측정 시스템의 구성도
2.2 원격제어 시스템의 구성

인간 팔의 생체 임피던스를 측정하기 위해서는 일정한 교류 전류를 측정 부위의 양끝단에 인가한다. 측정점의 선정에 있어서는 팔의 움직임에 따라 생체 임피던스가 가장 크게 변화하는 주근육에 전극을 부착해야 한다. 팔의 움직임에 따라 근육과 혈액의 체적이 변화하고 생체 임피던스가 변화하기 때문에 양끝단의 전압을 측정하면 관절의 회전각을 추정할 수 있다.

1 자유도 팔 운동을 추정하기 위한 실험 시스템의 구성도는 그림 2와 같다. 피험자에게는 교류 정전류(100KHz, 300uA)를 인가하여 생체 임피던스를 측정하고 이 때의 팔의 회전각을 포텐시옴터로 측정한다. 측정된 데이터를 A/D 보드(12 Bit NI DAQ)를 통해 수집하고 LabWindows/CVI 소프트웨어로 분석하였다. 먼저 측정하고자 하는 관절의 최대 굽힘 상태와 최대 펴짐 상태에서 포텐시옴터의 측정값과 생체 임피던스를 얻어 기준 임피던스를 구한다. 그리고, 측정된 임피던스를 기준 임피던스와 비교하여 상대 임피던스값을 구한다. 이렇게 해서 구해진 상대 임피던스 값을 절대적인 관절 변위에 대응시킨다. 그림 3은 관절각 측정시 전극의 부착 지점을 나타낸다.

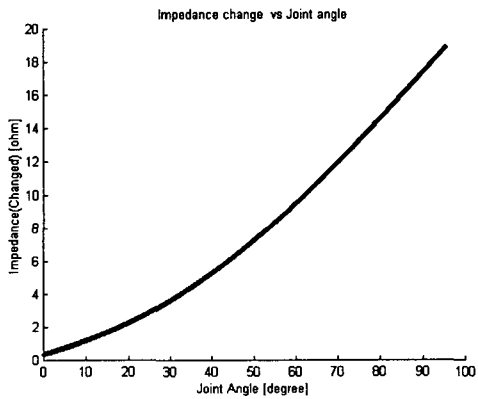


[그림 3] 임피던스 측정시 전극의 부착 위치

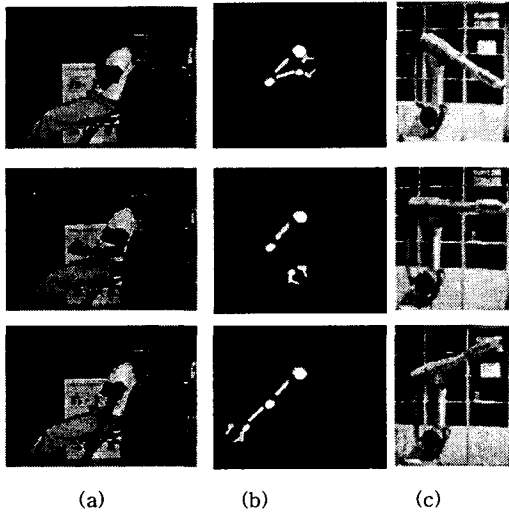
이 실험에서는 단계적으로 팔을 들어올리면서 변화하는 임피던스를 측정하였다. 실험 결과 팔의 각도 변화에 따른 임피던스 값의 변화는 상당히 선형적임을

생체 임피던스를 이용한 로봇의 원격제어

알 수 있다. 이 때의 측정 주기는 데이터 수집과 신호 처리 시간을 고려하여 100 ms로 하였다. 관절각과 생체 임피던스는 완전히 선형의 관계라고 할 수 없으나 그림 4의 최소, 최대 부분을 제외하면 양호한 선형성을 보여준다. 그림 5는 생체 임피던스를 이용하여 팔의 관절각을 추정하여 로봇을 구동한 실험 결과를 보여준다. 이 때 팔 관절이 0 도에서 120 도까지 변화하면 생체 임피던스는 0 Ω에서 20 Ω까지 증가한다. [그림 4, 5]



[그림 4] 임피던스와 변화와 관절각과의 관계



[그림 5] 임피던스를 이용한 로봇의 원격 조종, (a) 팔 운동, (b) 가상 로봇, (c) 실제 로봇

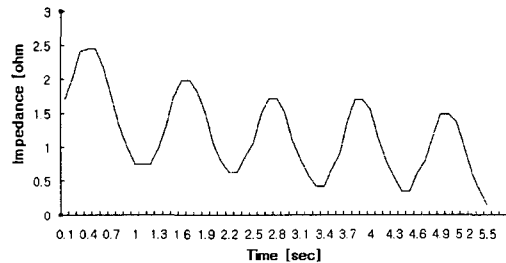
III. 생체 임피던스에 의한 다자유도 원격 제어

생체 임피던스의 1 자유도 측정에 대해서 알아보았다. 그러나, 실제 인간의 움직임은 많은 자유도를 가진

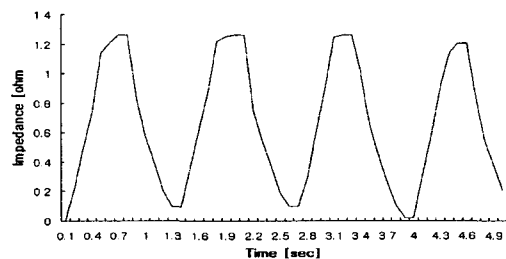
복합적인 구조를 가지고 있다. 따라서, 인간의 움직임 을 종합적으로 검출하기 위해서는 다자유도 측정 시스템이 요구된다. 그래서, 앞서 소개한 측정 시스템을 이용하여 다자유도 시스템을 구성해 보았다. 그러나 다자유도의 측정시에는 1 자유도에서는 고려하지 않았던 많은 문제점이 발생하게 된다. 먼저 다자유도 운동 시 다른 근육의 운동에 의한 측정점에서의 정전류원의 변화가 발생하게 된다. 이 뿐만 아니라 인간 근육 구조에 기인한 여러 근육간의 커플링 문제, 그리고 운동의 방향에 따라 임피던스 값이 반전되는 방향성의 문제가 그것이다. 다자유도 시스템에서는 이러한 문제점을 해결하여 인간의 복합적인 움직임을 추출할 수 있는지의 여부와 그 방법에 대한 연구를 수행하였다.

① 다자유도 운동에 따른 간섭 현상의 해결책

단일 정전류원을 사용하였을 경우에 각 관절의 움직임에 따른 임피던스 변화가 다른 관절의 정전류원을 변화 시켜 임피던스들 사이의 결합 현상(coupling)이 발생한다. 따라서 정확한 임피던스를 측정하기가 어렵게 된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 각 측정점 마다 별도의 정전류원을 구성하고 서로간의 간섭을 최소화 하기 위해서 정전류원의 입력 주파수를 각각 분할해서 측정하였다. 이렇게 함으로써 실제 각 측정점 간의 결합현상을 방지 할 수 있다[그림 6, 7,



[그림 6] 단일 주파수 측정시의 복합 운동



[그림 7] 주파수 분할시의 복합운동

8]. 그림 6은 어깨 운동(모음, 벌림)과 팔꿈치 운동(굽

힘, 폼)을 동시에 행하였을 때 어깨 부위에서 측정된 생체 임피던스를 나타낸다. 어깨를 일정한 변위로 반복 운동하여도 팔꿈치 운동의 간섭을 받아 어깨 임피던스의 오프셋이 변화함을 알 수 있다. 이와 같이, 단일 주파수를 이용한 측정 방법에서는 근육간의 간섭을 배제할 수 없기 때문에 관절각을 독립적으로 추정할 수 없다. 그림 7은 그림 6과 동일한 운동을 하면서도 주파수를 100 KHz, 90 KHz로 분할하여 측정한 것으로 그림 6에 비해 오프셋의 변동이 줄어든 것을 알 수 있다. 그림 8은 인가 주파수에 따라 변화하는 생체 임피던스를 나타낸 것이다.

② 생체 임피던스가 갖는 방향 모호성의 해결책

그림 9는 어깨 운동 시의 임피던스를 나타낸 것으로, 앞으로 굽히거나(최소점의 왼쪽 부분) 뒤로 퍼거나(최소점의 오른쪽 부분) 동일한 임피던스 값을 갖는 두 위치가 존재한다는 실험 결과를 보여준다. 측정점에 따라서는 임피던스의 값만으로는 관절각을 추정할 수 없는 경우가 발생한다. 이 때는 앞뒤 어깨 세모근의 임피던스를 동시에 측정하여 운동의 방향성을 구분하거나, 사전에 팔 운동이 방향성을 갖지 않도록 하면 이러한 문제점을 해결할 수 있다. 그림 10은 후자의 방법을 이용하여 어깨 운동의 방향 모호성을 제거한 방법이다.

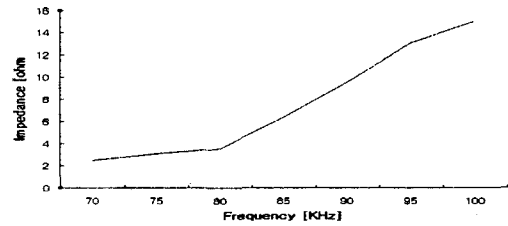
IV. 결론

본 논문에서는 생체 임피던스를 측정하여 팔 운동을 추정하고 이를 로봇의 원격 제어에 응용하였다. 특히 생체 임피던스를 이용하여 팔의 다자유도 운동을 추정하였으며 이 때 발생하는 간섭 현상과 방향 모호성을 해결하는 방안을 제안하였다.

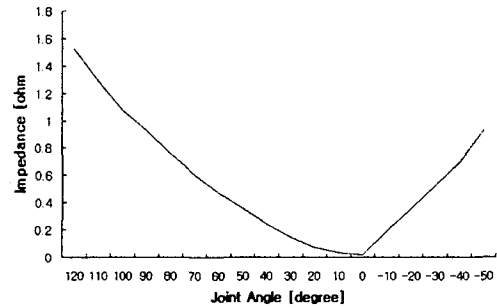
지금까지 생체 임피던스는 사지 혈류량이나 체지방 분석 등에 응용되어 왔으나 본 논문에서는 특이하게 Human Motion Capturing System과 로봇 제어에 응용한 점이 주목할 만하다. 생체 인터페이스는 아직 해결해야 할 연구 과제가 산적해 있으나, 새로운 휴먼 인터페이스라는 관점에서 추후의 연구가 기대된다.

참 고 문 헌

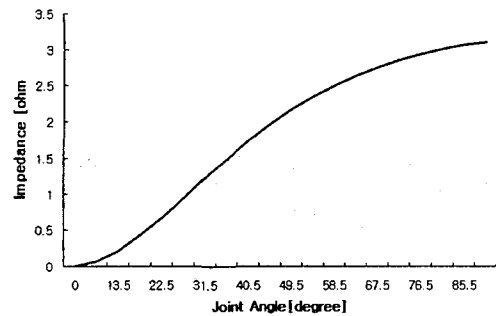
[1] Lee E, Baker, "Principles of the impedance technique", IEEE-Engineering in Medicine and Biology Magazine, March. 1989
 [2] Y. Yamamoto, T. Nakamura, T. Kusuhara and



[그림 8] 인가 주파수에 따른 생체 임피던스의 변화



[그림 9] 생체 임피던스가 갖는 방향 모호성



[그림 10] 어깨 운동의 방향 모호성을 제거한 후의 임피던스 측정(기준 임피던스는 최대로 편 위치)

Adli, "Consideration of Conditions Required for Multi-Channel Simultaneous Bioimpedance Measurement", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, May. 1998
 [3] Keunyoung Kim, Deok-Ho Kim, Yeonkoo Jeong, Kyunghwan Kim, Jong-Oh Park, "A Biological Man-Machine Interface for Teleoperation", Proceedings of the 32nd ISR, April. 2001
 [4] Soo Chan Kim, Ki Chang Nam, Deok Won Kim, Younkoo Jeong, Keunyoung Kim, Kyunghwan Kim, "Human arm motion detection system for robotic Teleoperation using electrical bio-impedance method", ICEBI, 1999