

EMG신호를 이용한 보철제어기의 현황과 전망

朴相暎* · 邊潤植**
(延世大 工大 教授* · 講師**)

1. 서론	4. 보철제어기의 예
2. 보철제어의 현황과 역사적 고찰	4.1 Boston Arm(BA)과 Utah Arm(UA)
3. 보철제어의 기술적인 고려사항	4.2 Saridis의 방법
3.1 신호검출	4.3 Graupe의 방법
3.2 제약조건	5. 보철제어기의 전망
4. 보철제어기의 예	6. 결론
	참고문헌

1 서론

의용생체공학(Biomedical engineering)은 국방 및 우주과학, 의료 및 보건분야, 로보트공학(Robot engineering), 스포츠과학, 인간공학, 재활공학등의 연구개발에 있어 중요한 역할을 하고 있다.

선진 산업사회를 지향하고 있는 우리 나라에서도 이 분야에 대한 연구의 필요성과 관심이 급증함에 따라 최근 의용생체공학에 대한 연구분위기가 고조되고 있으며 이 분야의 연구결과가 많이 발표되고 있다.

최근에는 운동제어 연구를 위하여 제어이론, 컴퓨터를 이용한 신호처리 기법, 생체역학 및 생체 물리학등의 방법을 이용한 새로운 실험과 모델 구성이 시도되고 있다. 이 가운데서도 기계와 동물간의 통신과 제어를 주된 개념으로 하는 사이버네틱스(Cybernetics)의 개념을 이용하여 운동시 근육부위에서 발생하는 근육전기(Myoelectricity)신호를 검출해서 처리한 근전도 신호를 이용한 팔, 다리 절단자의 대용기관의 제어(Prosthetic control),인공신경(Artificial nerve) 제조, 의료용 로보트(Biomedical robot) 설계, 원격조정기(Telemanipulator) 제어등은 좋은 예이다.¹⁾

그러므로, 여기에서는 이 중에서도 핵심이 되고있는

EMG신호를 이용한 보철제어기에 대하여 검토하고 문제점과 전망등을 제시하여 이 분야의 연구방향에 기여하고자 한다.

2 보철제어의 현황과 역사적 고찰

골격근(Skeletal muscles)에서 추출한 근육전기에 의해 제어되는 인공팔은 전자부품을 포함하는 최초의 전자의수이다. 그리고, 이런 팔들이 생체신호와 전자부품을 이용하기 때문에 바이오닉 암(Bionic Arm)이라고 불리워 지기도 한다. 이로 인해 많은 연구자들이 근전도신호를 이용한 보철제어에 대하여 상당한 관심을 갖게되었다. 그것 때문에 일반 대중이 수족절단자(Amputee)를 이해하는데 있어서는 지대한 공헌을 하였지만 근전도 보철제어기가 모든 인공 수족 문제에 있어서는 만병통치약처럼 잘못 이해되기도 하였다. 때때로 전자공학의 급속한 발전은 모든것이 가능하리라는 인상을 주었으며 오늘날 근전도 보철제어에 의한 팔의 대부분이 기술적으로는 상당히 진보되었지만 일반이 기대하는 Cybernetic limb는 아직도 요원하다.

정상적인 수족은 자신의 감지능력과 외부센서를 가지고 있으며 그것들의 복합운동은 무게가 가볍고 강력하며 신경계에의해 완벽하게 제어되는 유연한 근육으로 제어된다. 그러므로 이런 수족을 인공수족으

로 대처하는 것은 현재의 한계를 넘어선 과학과 기술의 상상력을 넓힌 개념이지만, 그럼에도 불구하고 이 분야에 많은 연구자들이 좀더 새로운 알고리즘과 방법을 개발하기 위하여 참여하고 있다.

최초로 근전도 신호를 이용하여 보철제어기를 제안한 사람은 1945년 독일의 물리학자 Reiter였다. 그는 근육전기신호(Myoelectric signal)를 이용하여 인공손의 특허를 출원하였으며, 1948년에 "새로운 전자의수"란 제목으로 학계에 발표하였다. 그러나 Reiter가 제작한 것은 전자의수라고 하기에는 너무 빈약한 상태였다. 같은해에 Bell Lab.에서 트랜지스터를 발표하고, Nobert Wiener의 "Cybernetics"가 출판되었는데 이 책은 보철제어에 많은 영향을 주었으며 Wiener의 창조적인 사고력은 보철제어발전에 크게 공헌하였다. 1955년 영국의 학자 Battye와 Nightingale 그리고 Whillis 등은 Guy's Hospital에서 Relay와 Suction Pump를 이용한 보조장치를 개발하였으며 근육전기를 보철제어에 사용함으로써 이 방법의 가능성을 실제로 보여주었다. 그후 1960년에 소련의 Kobrinski 및 그의 동료들에 의해 "생체제어의 문제점 - 자동제어와 원격제어"라는 제목의 논문을 발표함으로써 소련에서도 관심을 갖기 시작하였다. 1970년초 Mann 교수를 중심으로 한 MIT 재할공학 연구팀이 Wiener의 Cybernetics 이론에 기초를 둔 소위 "Boston Arm"을 제작하여 실용화 단계에 이르렀으며²⁾ 1970년 중반에는 Mann 교수의 제자인 Utah 대학의 Jacobson 박사팀을 중심으로 "Utah Arm"을 제작하여 학계에 발표하였다.⁴⁾ 그후 최근까지 일본, 캐나다, 이탈리아등에서 자나라연구팀들이 계속적으로 보철제어기를 제작하여 발표하고 있다.

한편, 이러한 하드웨어(Hardware)가 발달하기 위하여 충분한 이론의 발달이 수반되어 왔는데 그것을 정리하면 다음과 같다.

1954년 Bigland와 Lippold는 그들의 논문에서

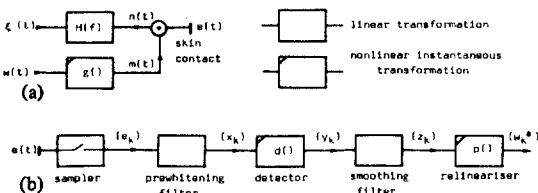


그림 1. (a) EMG 신호발생기의 모델
(b) 디지털 EMG 신호처리기의 블럭다이어그램

힘과 총 근전기활동(Integrated Electrical Activity in Human Muscles)은 비례한다고 했다. 이것은 매우 중요한 사실로서 그후 여러 연구자에 의해 증명되었다. 1970년 Kwatny 등은 EMG 신호를 Gaussian random 신호로 가정하여 해석하였는데 이것은 이후의 근전도 신호처리를 매우 편리하게 해주었다. 특히, 그들은 전력스펙트럼과 상관함수를 이용하여 근전도 신호처리를 함으로써 일반 신호처리이론을 근전도 보철제어에 응용할 수 있음을 시사하였다. 1971년 Kreifeldt⁶⁾ 등은 근전도 신호처리에 가장 적합한 필터와 검지기(detector)에 대하여 고찰하였으며 이것은 후에 1976년 Hogan과 Mann⁷⁾에 의해 이론적으로 증명되었다. 참고로 그림 1을 도시하였는데(a)는 EMG 신호 발생기의 모델이며(b)는 디지털 EMG 신호처리기의 블럭다이어그램이다.¹⁾

1970년대 후반 Graupe⁸⁾ 등은 시계열분석이론을 EMG 신호에 적용하여 기능분리 및 보철제어를 시도하여 좋은성과를 거두었으며 1982년 Saridis⁹⁾ 등은 패턴인식이론을 이용하여 보철제어를 제시하였고 Scott¹²⁾ 등의 비례제어를 위한 EMG 신호처리방법, Doerschuk¹⁰⁾ 등이 제안한 자기상관함수(Auto correlation function)와 상호상관함수(Crosscorrelation function)를 이용한 근전도해석법등이 발표되어 있다.

3 보철제어의 기술적인 고려사항

3.1 신호검출

개념적으로 EMG 신호를 이용한 보철제어는 그림 2에 나타나있는 것처럼 간단하다.

근육으로부터 추출한 근전위는 제어기에 보내지며 제어기는 동력장치(Actuator)를 구동시키고 동력장치의 출력은 휴먼오퍼레이터(Human operator)에 의해 조정되는데 이것이 바로 인간-기계 시스템을 연결하는 방법중에서 Non-manual 한 유일한 방법의 하나이다.

인체의 다른 생체전기와 마찬가지로 그림 3의 EMG 신호는 많은 세포가, 동시에 일어나는 탈분극현상

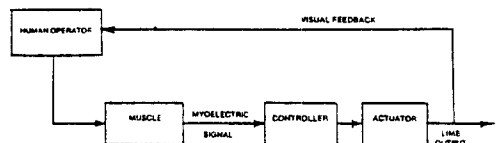


그림 2. 근육수축에 의한 근육전기 제어 블럭선도

의 결과로 볼 수 있는데 다중섬유는 단일 운동단위와 결합되어 있다. MUP (Muscle unit potential) 라고 불리는 단일 운동단위에 의한 전위는 Neuron firing (신경발화) 에 의해 발생된다.

근육수축을 포함한 운동단위로부터 추출한 MUP 는 표면EMG 신호를 형성하기위해 공간적, 시간적으로 가중되는데 이 표면 EMG 신호는 간섭패턴(Interference pattern)의 특성을 가지고 있다. 그러므로, 신호의 그래프적인 형태를 EMG (Electromyogram) 라고하며 근육전기제어 (Myoelectric control) 는 때때로 EMG 제어라고도 한다. 근육전기신호에는 근육의 기계적인 상태와 물리적인 특성이 포함되어 있는데 근육전기식 제어에 쓰이는 신호처리 방식은 근전도 해석에 쓰이는 방법과는 다르다. 일반적인 근전도 신호처리 시스템이 그림 3에 표시되어있다.³⁾

전극은 사용자의 피부에 오랫동안 붙어있는 건식 전극 (Dry electrode) 을 사용하며 증폭기는 실제로 필요한 주파수대역만 포함할 수 있는 대역통과 차동 증폭기를 사용한다.

실제로, 근육전기제어에 관한 연구는 생체정보를 효과적으로 보철제어기에 전달할 수 있는 즉, Raw fluctuation 신호를 제어신호로 처리하는 것으로 집약된다.

3.2 제약조건

EMG 신호를 이용한 보철제어는 걸어서 이동하는 피검자가 사용하기때문에 많은 제약이 따르는 것은 당연하다. 우선 앞에서 언급한 전극문제가 있으며 보철제어 장래 발전에 있어서 제한요소중의 하나인 동력장치 (Actuator) 를 빼 놓을 수 없다. 만약 우리가 기능적으로 복잡한 보철기구를 만든다면 강력

하고 효율적이며 작고 가벼운 동력장치가 필요하다. 그러므로, 전자공학의 고체 (Solid - state) 혁명에 비교될 만한 기계공학의 동력장치 혁명도 한번 기대해 볼 만하다. 마찬가지로 전력저장능력도 보철제어에 있어서 필수적인데, 현재에는 니켈-카드뮴전지가 주로 사용되고있다. 이 외에 다른 제한들이 나열되어 있다.

- ① 증폭기와 전자제어장치는 보철제어기 안에서 전원을 공급할 수 있어야 한다. 즉, 그것들은 출력운동이 행해질 때 에너지가 보존될 수 있도록 거의 전력을 소비하지 않아야한다.
 - ② 증폭기는 전극잡음을 없앨수 있어야하고 모든 외적인 잡음요소도 제거할 수 있어야 한다.
 - ③ 전자시스템은 변동하는 전력공급조건 에서도 제기능을 발휘하여야하며 저전압 레벨에서도 동력장치를 동작시킬 수 있어야 한다.
 - ④ 전체 시스템은 넓은 온도범위와 습도 그리고 기계적인 충격에도 제기능을 발휘할 수 있어야 한다.
 - ⑤ 적어도 2년동안은 파괴되지 않을 수 있는 충분한 신뢰도가 요구된다.
 - ⑥ 부품설계는 대체품으로 수리할 수 있게 디자인 되어야한다.
 - ⑦ 인간과같은 형태와 외형이 바람직 하다.
 - ⑧ 기능은 쉽게 배울 수 있어야하고 가능하면 무의식 수준에서 작동되어야 한다.
 - ⑨ 인공팔의 무게는 무거워서는 안되며 오히려 정상인의 팔보다 가벼워야 한다.
 - ⑩ 보철제어 시스템의 가격은 대중이 쉽게 구할 수 있도록 적절한 선에서 결정되어야 한다.
- 현재 쓰고 있는 자유도 (Degree of freedom) 가 1인 시스템에서는 대부분 이런 제약에 직면하고 있다.

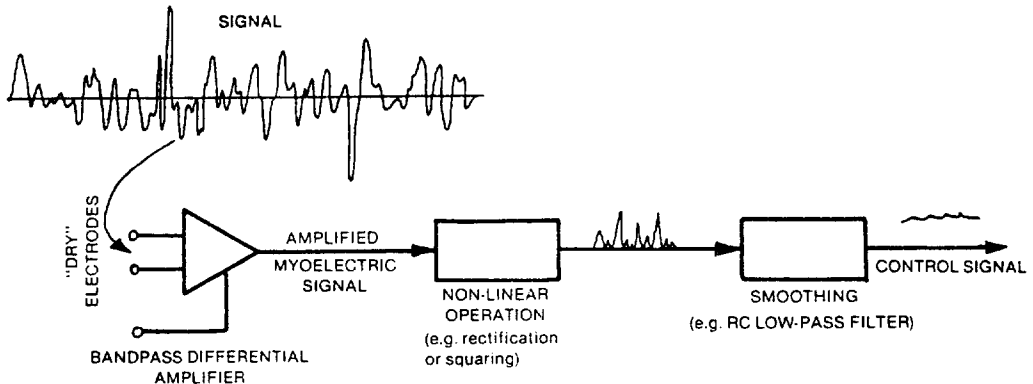


그림 3. EMG 신호의 아날로그 처리 블록선도

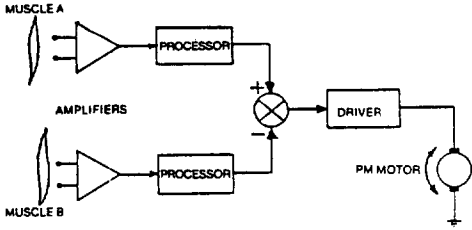


그림 4. 자유도가 1인 보철제어기

때때로, EMG 신호를 이용한 보철제어기가 다양하지 못하다고 안타까와 하지만 이런 간단한 시스템이 잘만 적용되면 수족 절단자들에게 도움을 주는 창조적인 공학의 개가라는 점에서 이런 문제들이 해결될 수 있으리라 기대된다.

대부분의 시스템들은 자유도가 1인 보철기를 제어하기 위해 2개의 근육채널을 사용한다. 상박 절단자인 경우에 팔의 이두박근과 삼두박근이 Elbow의 확장과 굴곡을 제어하기 위하여 이용되며 하박 절단자에게 있어서 손가락 굴곡(Finger flexor)과 확장(Extensor)근육그룹은 인공손을 개폐하기 위한 신호원으로서 사용되고있다. 출력모터가 멈추지 않았을때 근육전기 보철제어 시스템은 속도제어 모우드안에서 동작한다. 기본 원리가 그림 4에 나타나 있다.

4 보철제어기의 예

4.1 Boston Arm(BA)와 Utah Arm(UA)

그림 5²⁾는 1963년 Wiener가 제안한 "Boston 보철 연구 계획"의 시스템 구성도로서 근육전기를 얻어 인간과 보철제어기구를 제어하는 Cybernetic 시스템의 공학적 구성요소를 보여주고 있다. 이 그림은 특히 생체공학의 한 분야인 재활공학의 성격이 잘 나타나 있다. Boston Arm은 MIT의 기계공학과와 전기공학과, Harvard의 정형외과등의 팀을 이루어 만든 프로젝트의 결과이다. BA 프로젝트는 결국 보철제어에 있어서 초기 CAD의 한 응용이라고 볼 수 있다. 그림 6에 BA를 위하여 만든, 근육전기를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션이 나타나 있다. Boston Arm의 전체 블럭선도는 그림 7과 같으며 그림 8은 실제로 적용되는것을 보여준다.

1975년 Jacobson⁴⁾등은 Boston Arm 보다 우수한 팔을 개발하였다. 이 팔은 한쪽 혹은 양쪽 상박이 절단된 환자에게 적용될 수 있다.(그림 9참조)

완전한 시스템은 ① 포착(Prehension) ② 손목관절(Wrist articulation) ③ 팔꿈치굴곡(Elbow flex-

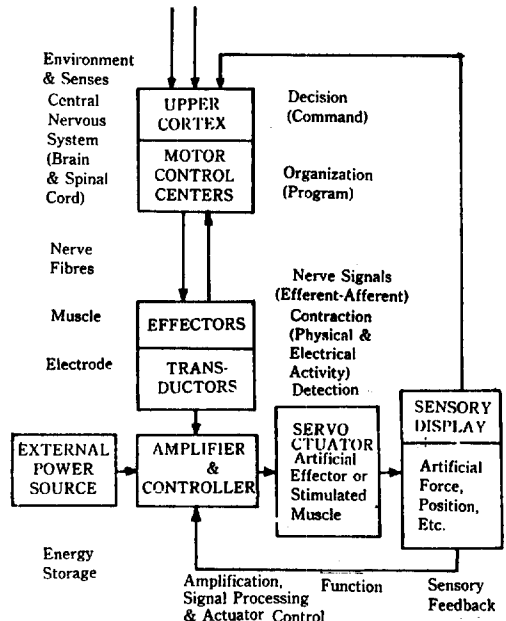


그림 5. Cybernetic 보철제어기의 블럭다이어그램

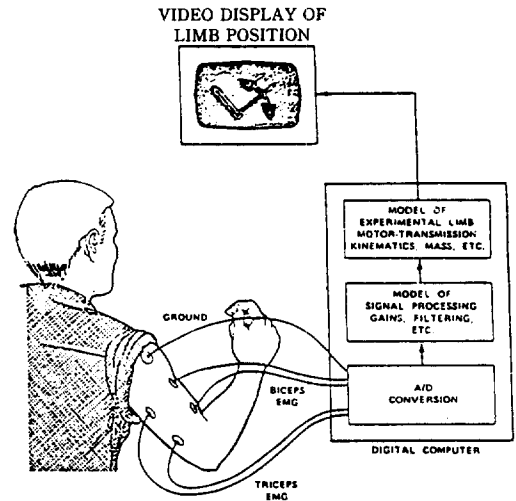


그림 6. 근육전기를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션

ion) ④ 상완회전(Humeral rotation) ⑤ 어깨굴곡 혹은 외전(Shoulder flexion or abduction)등을 포함하고있다. 이 외에도 Utah Arm은 특수한 장치가 많이 포함되어 있으나 지면관계상 여기서 생략하고, 관심이 있으신 분은 참고문헌 [4]를 참고하시기 바란다.

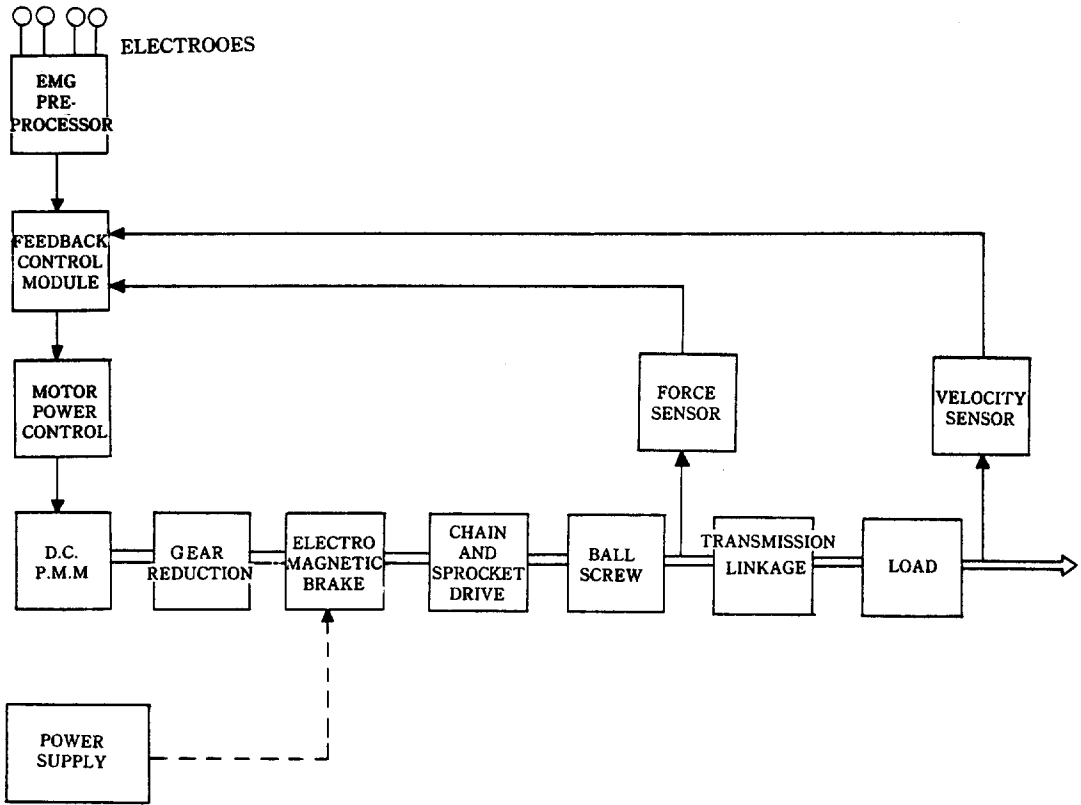


그림 7. Boston Arm의 전체시스템 블록선도



그림 8. Boston Arm의 응용 예

4.2 Saridis의 방법

패턴인식방법은 1977년 Wirta 등에 의해 적용되기는 하였으나 실제적인 설계과정을 개발하지는 못하였다. Saridis¹⁾ 등은 이점에 착안하여 다음과 같은 방법을 제시하였다. 즉, 패턴인식 방법을 사용하여 모



그림 9. Utah Arm의 응용 예

의 절단환자 (Simulated amputee)로 부터 추출한 근전도신호로 통계적인 매개변수를 구하여 패턴분류에 가장 적합한 매개변수를 구하고 이 매개변수를 사용하여 팔운동의 판정함수 (Decision function)를 구한다. 이 판정함수를 이용하여 실제 모의 절단 환자에게서 추출한 신호에 대해 판정을 하였다.

좀 더 구체적으로 표현하면, 근전도신호를 A/D 변환 시킨 다음 그중 512개의 데이터를 추출하여 평균 $X = 1/512 \sum_{t=1}^{512} v(t)$, 분산 $\sigma^2 = 1/512 \sum_{t=1}^{512} v(t)^2$, 3차 모멘트 $|\sigma^3| = |1/512 \sum_{t=1}^{512} v(t)^3|$ 및 영위교차 (Zero crossing)의 매개변수를 구하여 여러가지 기능에 대해 2차원평면에 플로팅하여 (그림 10 참조) 각 단일 기능이 어떤 군 (Cluster)을 형성하는가를 확인하고 판정함수를 이용하여 임의의 근전도가 어떤 기능에 대한 신호인가를 판정하였다.

그림 11은 보철팔의 계층적 지능제어 (Hierarchically intelligent control)의 블럭선도이다. Saridis의 제안방법이 훌륭하지만 패턴인식을 사용하기 때문에 근전도 신호의 정보를 충분히 이용할 수 없는 것이 단점으로 지적되고 있다.

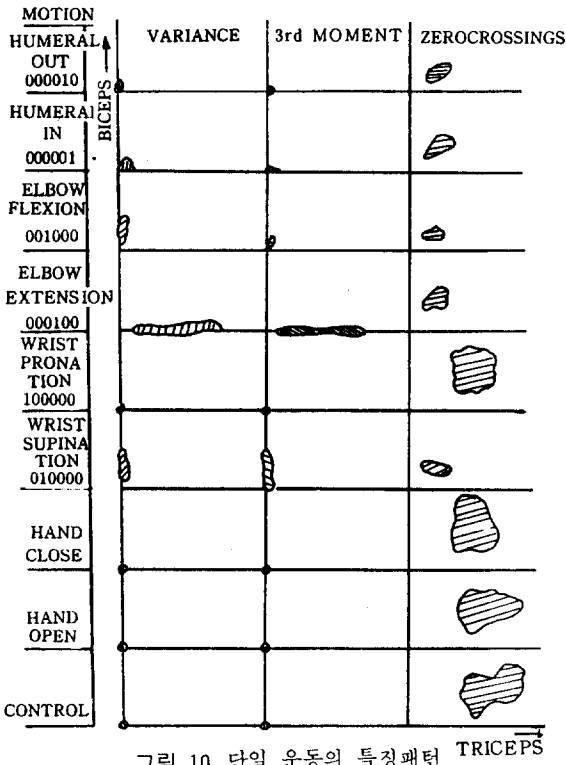


그림 10. 단일 운동의 특징패턴

4.3 Graupe의 방법

Graupe^{8),14)} 등은 근전도신호를 Stationary 사계열로 가정하고 모델을 설정한 다음 그 모델의 매개변수를 미리 구해서 기준집합으로 만들어놓고 실제 신호의 매개변수와 비교를 하였다.

그다음 매개변수벡터법 (Parameter vector method) 혹은 병렬필터링법 (Parallel filtering method)을 사용하여 기능분리를 하였다. (그림 12, 13 참조)

Graupe의 방법은 신호의 시간추이에 대한 정보를 처리하기때문에 신호의 모든 스펙트럼을 해석할 수 있으며 한쌍의 전극으로 얻은 신호의 정보를 충분히 처리할 수 있고 기능분리에 있어서도 통계값을 사용하기때문에 합리적인 방법으로 알려져 있다. 그러나

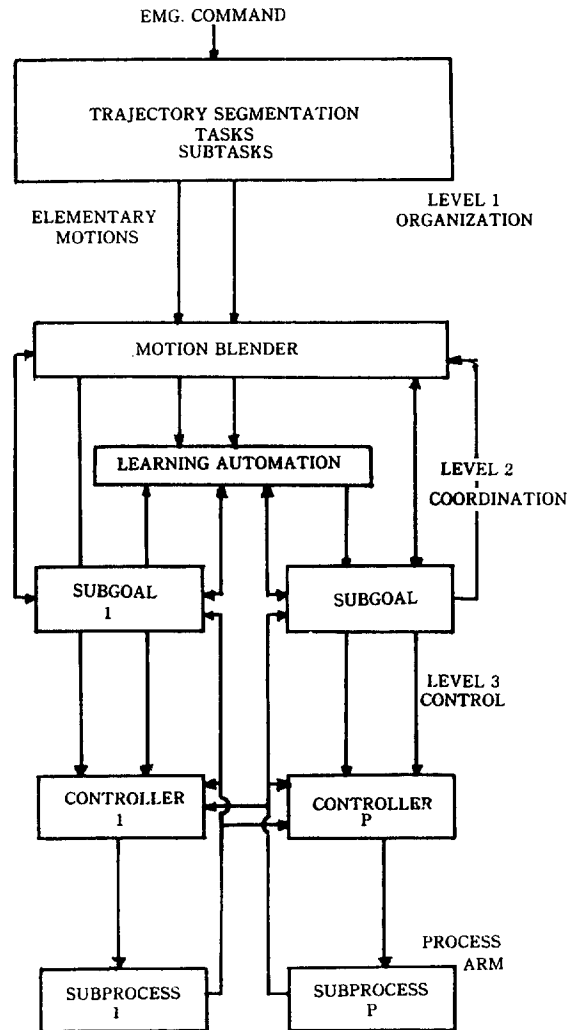


그림 11. 보철팔의 계층적 지능제어.

이방법도 자기회귀 모델의 최적 차수선택 혹은 신호의 안정성(Stationarity) 등 문제점이 남아있다.

그림 14는 전체 시스템의 블럭선도이다. 그러므로, 보철제어기가 더 빠르고 정확하게 기능을 분리할 수 있는 새로운 알고리즘과 실험기법들이 계속 연구되고 있다.

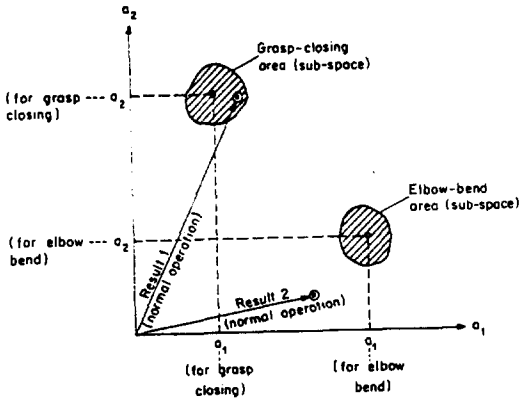


그림 12. 매개변수 벡터법

5 보철제어의 전망

앞에서 언급한 임상기술의 상태는 지난 15년동안 발전한 근육전기 제어연구의 결과이다.

앞으로는 근육전기 제어장치에 디지털 기법이 더 사용될 것이 기대되며 마이크로컴퓨터에 요구되는 전력공급이 작아지게 될 것이다. 더우기, 근전도 보철 제어기는 스웨덴의 공학자들의 선도(Lead)에 의해 어림이 절단자에게도 적용될 것이며 현재의 시스템보다 덜 복잡하고 더 값싼 시스템이 개발될 것이다. 몸으로 움직이는 (Body operate) 부분을 갖는 근전도 제어 요소와 위치 제어요소 (Position servo-control) 와의 혼합보철시스템을 얻기 위한 수동적 장치를 병렬로 확장시켜서 기능을 상실한 절단자들의 요구에 부응하도록 많은 노력이 요구된다. 다리 절단도 근전도신호를 이용하여 여러가지 기능을 제어할 수 있게 될 것이다. 한편, 보철제어와 로보틱스는 아주 밀접한 관계를 가지고 있으며 이것을 살펴보면 로보트 혁신에 두가지 두드러진 테마가 있다.

첫째는 인간 팔이 확장함에 따라 발전하는 원격매니퓰레이터 (Telemanipulator)이며 둘째는 인간 사용자와 전혀 물리적인 연결이 없는 로보틱스이다. 즉, 로보트는 명령을 따르고 원격매니퓰레이터는 제어된

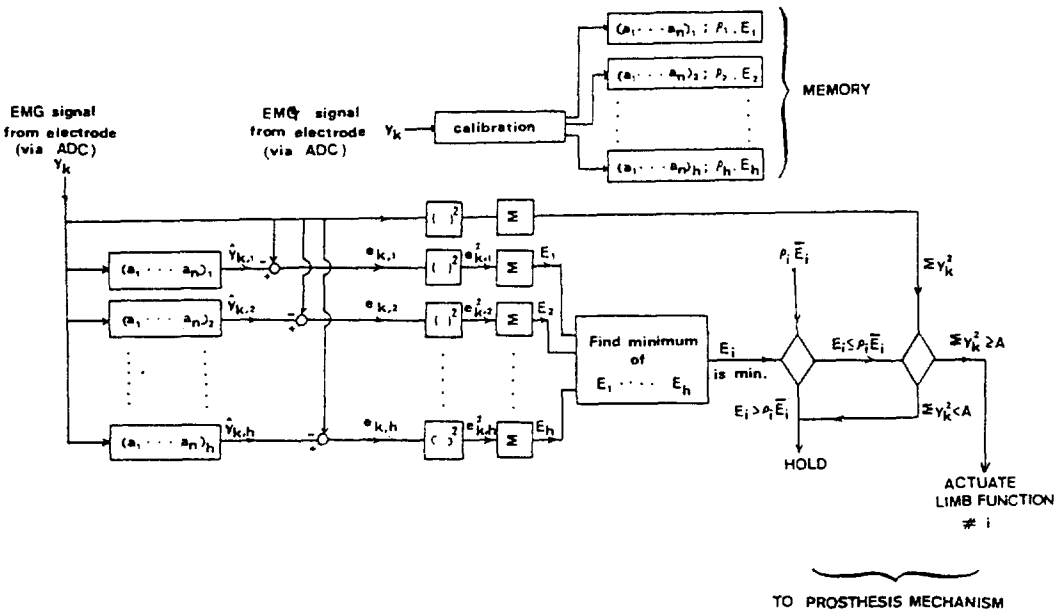


그림 13. 병렬 필터링법

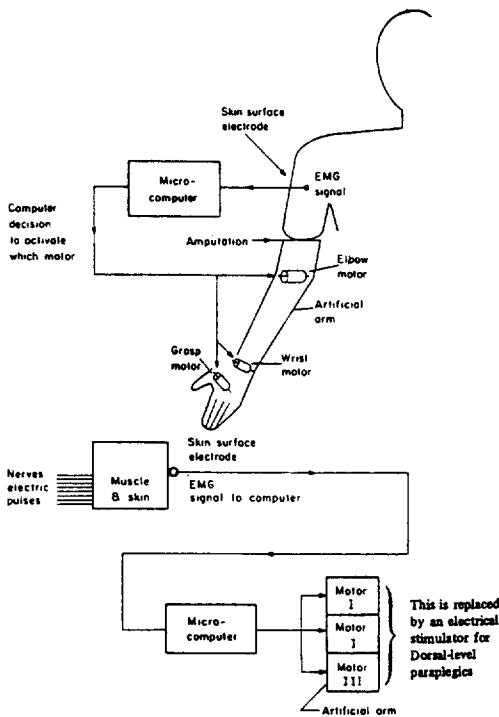


그림 14. 보철제어 시스템의 전체 블록선도.

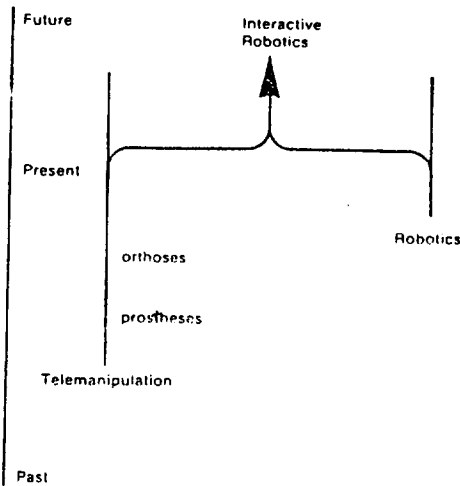


그림 15. 상호작용 로봇(Interactive robot)

다. 이 두가지 방향이 결국은 한방향으로 유도되는데 이것이 바로 상호작용 로보틱스(Interactive robotics)이다. 재활용 로보트는 바로 상호작용 로보틱스의 한 응용이라고 볼 수 있다. 이에 관한 그림이

그림 15에 도시되어있다.¹⁵⁾

그림에서 보는 바와 같이 보철제어기와 로보틱스는 필수 불가결의 관계에 있다. 즉, 보철 제어기가 발전하면 이에따라 로봇도 상당히 발전하게 될 것이며 서로 상호보완을 해 줄 것이라고 생각한다. 그러므로, 로봇 공학에 있어서도 생체공학적인 측면을 간과해서는 안될 것이다.⁵⁾

인간의 생활수준이 향상되고 모든 주위의 것들이 편리해지며 경제생활이 안정됨에 따라 인간은 건강과 복지생활에 대하여 상당한 관심을 갖게 되었다. 이렇게 하여 생성된 학문이 재활공학(Rehabilitation engineering)인데 최근에 들어서 활발한 진전을 보이고 있다.³⁾ 우리 주위에 불구자나 장애자들에게 대한 관심이 고조됨에 따라 그들을 위한 시설이나 환경이 절실히 요구되고있는 실정이다. 우리나라에서도 어느 정도 관심이 증가되고 있는 실정이지만 앞으로 더 많은 관심과 노력이 그들에게 필요하다. 그런 측면에서 볼때 보철제어기의 전망은 상당히 밝으며 로봇 공학의 발전, 그리고 불구자와 장애자들의 복지생활을 위해서도 적극 지원해야 할 것이다.

6 결론

지금까지 EMG 신호를 이용한 보철제어의 역사적 고찰과 기술적인 고려사항, 실제적인 예, 그리고 전망등에 관하여 살펴 보았는데 “근육이 세계를 움직인다.”는 말처럼 근전도신호는 인간-기계 상호연결에 무한한 잠재성을 보여주기때문에 앞으로 이분야에 많은 연구가 필요하리라 생각된다. 더욱이, 앞으로 몇년 안에는 근육전기 제어(Myoelectric control)외에 신경으로부터 추출된 제어신호를 이용한 신경전기제어(Neuroelectric control)도 가능하리라 믿는다.³⁾ 특히, 근전도 신호처리에 관한 연구결과는 실제로 로봇제어에 기여를 하고 있는데 그 예로 Saridis의 연구결과를 들 수 있겠다. 그러므로, 근전도 신호처리에 관한 연구는 산업용 로봇 개발에도 크게 도움이 될 것이다.^{14), 16)}

최근의 첨단과학 즉, 전자공학, 컴퓨터공학, 제어공학, 반도체공학, 기계공학, 생체공학을 위시한 각 기술분야의 급격한 진보와 생리학, 체육학등 기초분야의 높은 관심은 멀지않은 장래에 보철팔 제어뿐만 아니라 “Bionic Person” 혹은 “Artificial Man”을 가능하게 할 것이다.

이 글은 EMG 신호를 이용한 보철제어의 여러가지 측면을 검토했으나 아직도 이 분야의 많은 연구가 남아있다.

참고문헌

- (1) "Whatever happened to cybernetics", IEEE spectrum, Vol. 19, No. 4, 24, 1982.
- (2) R.W. Mann, "Cybernetic limb prosthesis; the ALZA distinguished lecture", Ann. Bio. Eng., 9:1-43, 1981.
- (3) "Rehabilitation engineering", IEEE EMB, Vol. 1, No. 4 Dec. 1982.
- (4) S.C. Jacobson et al "Development of the Utah Artificial Arm" IEEE BME, Vol. 29 No. 4. April 1982.
- (5) "로보틱스 특집" 대한전자공학회지 제 10 권 제 6 호 1983년 12월
- (6) J.G. Kreifeldt, "Signal versus noise characteristics of filtered EMG used as a control source", IEEE Trans. BME. Vol. 18, No. 1, 1971.
- (7) N. Hogan and R.W. Mann, "Myoelectric signal processing; Optimal estimation applied to electromyography. Part II: Experimental demonstration of optimal myoprocessor performance", IEEE Trans. BME. Vol. 27, July 1980.
- (8) D. Graupe, J. Salahi and K.H. Kohn, "Multifunctional prosthesis and orthosis control via microcomputer identification of temporal pattern difference in single site myoelectric signal", J. Biomedical Engineering, Vol. 4, Jan. 1982.
- (9) G.N. Saridis and T.P. Gootee, "EMG pattern analysis and classification for a prosthetic arm", IEEE Trans. BME. Vol.-29, No. 6, June 1982.
- (10) P.C. Doerschuk, D.E. Gustafson and A.S. Willsky, "Upper extremity limb function discrimination using EMG signal analysis", IEEE Trans. BME. Vol.-30, No. 1, Jan. 1983.
- (11) G.N. Saridis, "Intelligent robotic control", IEEE Trans. AC. vol. 28, No. 5, May 1983.
- (12) H.B. Evans, Z. Pan, P.A. Parker and R.N. Scott, "Signal processing for proportional myoelectric control", IEEE Trans. BME. Vol.-31, No. 2, Feb. 1984.
- (13) G.C. Filligoi and P. Mandarini, "Some theoretic results on a digital EMG signal processor", IEEE Trans. BME. Vol.-31, No. 4, April 1982.
- (14) D. Graupe, Time series analysis, identification and adaptive filtering, Robert E. Krieger Publishing Company, 1984.
- (15) L. Leifer, "Rehabilitative robots." Robotic Age, Vol. 3, No. 4 May/June 1981.
- (16) G.N. Saridis, "Robotic control to help the disabled" in 'Recent Advance in Robotics', pp. 37-67, John Wiley & Sons, 1985.
- (17) 최광현, 변윤식, 박상희, "EMG 신호에서의 비례 제어 신호 추정에 관한 연구" 대한의용생체공학회지 제 5 권 제 2 호 1984년 12월.
- (18) 박상희, 김도윤, 변윤식, "시계열 분석을 이용한 근전도 신호의 기능분류에 관한연구" 연세논문총제 21집 1985년 5월.
- (19) 박상희, 변윤식, 김광순, 김원기, "전력스펙트럼을 이용한 근전도 신호의 주파수 해석" 대한의용생체공학회지 제 6 권 제 1 호 1985년 6월.
- (20) 변윤식, 다기능 보철제어를 위한 근전도 신호식별, 박사학위논문, 연세대학교 대학원 (1985)