1990年度 大韓醫用生體工學 春季 學術大會 論文集 90/5

2^{nd} order maximum entropy method를 이용한 근피로도의 측정에 관한 연구

조 승 진 김 민 수 이 금 원 김 경 기* 김 선 일** 박 홍 식 이 강 목***

* 한양대학교 공과대학 전자공학과 ** 한양대학교 의과대학 계량의학교실
*** 한양대학교 의과대학 재활의학교실

A study on monitoring of fatigue using the 2^{nd} order maximum entropy method

S.J. Cho, M.S. Kim, K.W. Lee, K.G. Kim,* S.L. Kim,** H.S. Park, K.M. Lee,***

* Dept. of Electronic Eng., Hanyang Univ.
** Dept. of Medical Information & Management, Hanyang Univ.
*** Dept. of Rehabilitation Medicine, Hanyang Univ.

ABSTRACT

In this study, the degree of spectral transfer to lower frequency caused by accumulation of Latic acid inside the muscle is estimated the convintional dip analysis, zero-crossing method and FFT method have intrinsic errors and estimation problems in case of severe noise.

The new spectral analysis method using "2^{nd} order Maximum Entropy Method" was applied to estimate mean frequency and we confirmed that this new method yields fast and reliable estimation over the FFT method.

1. 서 론

근육이 수축할 때 EMG(근전도)신호는 운동단위(motor unit)들의 자극에 의한 근섬유 전위의 시공간적인 합으로써 Random 신호의 형태를 나타낸다.

근육이 지속적으로 수축하게되면, 체내에서 latic acid (젖산)의 축적에 의하여 근섬유의 전도속도가 감소되어 EMG (근전도)신호의 주파수 성분은 고주파에서 차차 저주파로 천이하게 된다. 이러한 현상을 이용하여 근피로도를 측정할 수 있는데, 본 논문에서는 Frequency Parameter 해석법에 의존하였다. Frequency parameter 해석법에 의한 근피로도의 측정은 EMG (근전도) 신호의 PSD(Power Spectrum Density)로부터 측정하는데, 여기에는 중간주파수(median frequency), 평균주파수(mean frequency), spectrum 의 대역폭(bandwidth frequency)등의 변수들이 있다.

본 연구에서는 2^{nd} order Maximum Entropy Method를 이용하여 EMG신호의 PSD (Power Spectrum Density) 로부터 평균주파수(mean frequency)를 구함으로써 보다 신속 정확하게 근피로도를 구하려 한다.

Power Spectrum 으로부터 평균주파수(mean frequency)는 다음과 같이 구해진다.

$$\int_0^{f_{med}} Sm(f)\, df = \int_{f_{med}}^{\infty} Sm(f)\, df$$

$$f_{mean} = \frac{\int_0^f f S_m(f)\, df}{\int_0^f S_m(f)\, df}$$

$S_m(f)$: EMG PSD(Power spectrum density)

f_{med} : median frequency

f_{mean} : mean frequency

위의 식에서도 알 수 있듯이 frequency parameter 해석법에 의한 근피로도의 측정은 블럭단위의 data를 처리하므로 실행시간이 매우 저하되며, 필연적인 잡음(noise)이 수반되는 단점이 있다.

그러므로 본 연구에서는 DT (Data Translation)사의 DT 2821 board를 이용, 실행시간을 단축했으며, Mean frequency 를 구하는데 있어 2^{nd} order maximum entropy method 를 적용, PSD (Power Spectrum Denwsity)로부터 잡음(noise)에 강하고 보다 신속, 정확한 mean frequency 를 구함으로써 근피로도의 측정시간을 단축하고 정확성을 향상시켰다.

2. MEM (Maximum Entropy Method)을 이용한 spectral estimate

Nyquist구간 $-f_c < f < f_c$ 에서의 real주파수뿐만 아니라 모든 복소주파수 평면에 까지도 확산시켜서 볼때 어떤 실제의 추출된 함수 $x_k = x(t_k)$에 대한 Z-평면에서의 FFT Power Spectrum estimate 는

$$P(f) = \left| \sum_{K=-N/2}^{N/2-1} x_k Z^K \right|^2 \qquad (1)$$

이다.

식(1)은 시간영역에서 유한구간에서만이 적용되므로 식(1)은 함수 $x(t)$의 실제 Power spectrum 이 아니고 단지, estimate 만을 의미한다.

실제의 power spectrum 은

$$P(f) = \left| \sum_{K=-\infty}^{\infty} x_k Z^K \right|^2 \qquad (2)$$

이다.

식(2) 즉, 함수 $x(t)$의 power spectrum 은 무한개의 x_k 의 값에 의존하는 무한 Laurent급수를 의미하며 일명 Moving Average (MA) model 이라 일컫는다. 만약 식(2)를 분모를 가진 형태로 표현한다면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P(f) \simeq \frac{1}{\left| \sum_{-M/2}^{M/2} b_k Z^K \right|^2} = \frac{a_0}{\left| 1 + \sum_{K=1}^{M} a_k Z^K \right|^2} \qquad (3)$$

여기서 계수 a_k 들은 Z 가 단위원 상에 존재한다는 사실하에 b_k 로부터 정할수 있다. 또한 b_k 들은 식(3)의 멱급수확장이 식(2)의 첫번째 M+ 1 항들과 같다는 조건하에 결정되어질 수 있다.

식(1)과 식(3)의 차이점은 식(1)은 단지 Nyquist 구간에서의 실 frequency 에서 Zero만을 갖고 식(3)은 Z 단위원상에 pole 들을 가질 수 있다는 것이다.

Data 군으로부터 계수 a 와 a_k 들을 정하기 위해 다음의 과정을 진행한다.

추출된 함수 x_k 의 lag_j 에서 Autocorrelation 을 averaging 함으로 표현하면

$$\phi_j \equiv \langle x_i x_{i+j} \rangle \qquad (4)$$

$$\text{for } j = \ldots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \ldots$$

이 된다.

이 때 유한개의 data $x_0 - x_N$ 가 주어졌다면 식(4)의 estimate 는

$$\phi_j = \phi_{-j} \simeq \frac{1}{N+1-j} \sum_{i=0}^{N-j} x_i x_{i+j} \qquad (5)$$

$$\text{for } j = 0, 1, 2, \ldots, N$$

로 나타내어 진다.

즉, M + 1 data point 로부터 N + 1 개의 다른 lags j 에서 autocorrelation 을 estimate 할 수 있는 것이다.

Wiener - Khinchin이론에서 보면

$\mathrm{Corr}(x, x) \longleftrightarrow |G(f)|^2$ --- (Wiener-Khinchin이론)

Autocorrelation의 Fourier Transform 은 Power spectrum 과 같다.

Z-transform 에서 보면 Autocorrelation 의 Fourier Transform 은 Z 내에서의 Laurent급수와 꼭 같다.

그러므로 식(3)은 다음과 같이 변형할 수 있는 것이다.

$$\frac{a_0}{\left| 1 + \sum_{K=1}^{M} a_k Z^K \right|^2} \simeq \sum_{j=-M}^{M} \phi_j Z^j \qquad (6)$$

order 또는 pole 의 수 M 은 최대 Data 의 수 N 까지 가능하며, 총 autocorrelation 의 수를 나타낸다. 식의 오른쪽은 Z^{-M} 에서 Z^{M} 사이 이외에는 zero 이지만 왼쪽은 그렇지 않다. 그러므로 MEM 은 매우 뾰족한 모양의 spectral 에 아주 정교한 특징을 나타낸다. 또한 식에서 볼 수 있듯이 autocorrelation 과 계수 a , a_k 는 linear (선형)적인 관계가 있음을 알 수 있다.

만약 M 의 값을 최대 Data N만큼 크게 잡으면 이 MEM estimate 는 N log N 의 계산이 필요한 FFT 방법보다 더 늦다. 그러나 뾰족한 spectral 모양의 갯수와 비슷하게 M 의수를 잡으면 FFT 를 이용한 방법보다 훨씬 빠르다.

3. 시스템 구성 및 실험방법

3.1 시스템 구성

EMG (근전도)신호를 검출하기 위한 전극은 전극면이나 신체의 움직임에 따르는 잡음에 대하여 안정한 특성을 갖는 Ag-Agcl 전극을 사용하였으며 전극의 간격은 약 10 mm로 하였다. 또한 A/D변환기의 sampling주파수는 1024Hz로 하였다. 빠른 Data 의 전송을 위해 DT 2821 board의 DMA (Direct Memory Access)방식을 채택하였다. 또한 출력 channel 은 16개의 channel 중 channel[0] 한개만을 사용하였으며 유한시간내 계속적인 data의 전송을 위해 continuous mode 를 사용하였으며 data 의 손실을 막기위해 data를 hard disk 에 저장시키는 방법을 채택하였다.

3. 2 실험방법

EMG (근전도)신호를 검출하기 위하여 전극을 이두박근에 약 10 mm 의 간격을 두고 부착시켜서 팔을 90 로 한 상태에서 1kg , 3 kg , 5kg , 7 kg의 무게를 각각 20분씩의 차이를 두고 손바닥위에 올려놓고 정확히 60초씩 61,440 개의 data를 DMA 방식을 이용 PC 의 memory 에 저장시켰다.

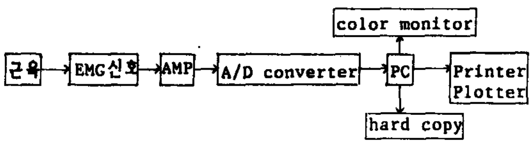
단, 이 때의 data는 A/D변환된 4digit형태로 저장되었다. (예, 2048 = 0V 를 의미)

계산을 돕기위해 각 data 를 120블럭 data (블럭당 512개의 data point)로 분할, 저장시켰다.

빠른 근피로도를 유도하기 위해서는 100% MVC(Maximum Voluntary contraction)으로 힘을 주어야 하나, 1분 동안 100%의 MVC를 행한다는 것은 매우 어려움이 따르므로 위와같은 측정방법을 채택했다.

연속적인 data 의 전송(DMA방식)을 위해 다음과 같은 ATLAB 의 continuous mode 를 사용하였다.

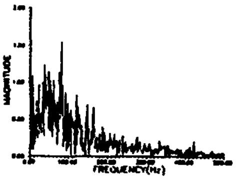
ATLAB software(continuous mode)에 의해 받아들여진 data를 이용, mean frequency 를 구하고, 이것을 PC 에 전시할 때(display)까지의 전체 시스템의 블럭선도는 다음과 같다.



(전체 시스템 블럭선도)

4. 실험결과 및 고찰

팔에 어떤 부하를 가하기 전, 즉 피로하지 않은 상태의 power spectrum 과 부하를 가한 후 피로한 상태의 power spectrum 이 그림 1, 그림 2에 있다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 피로가 진행됨에 따라 (latic acid의 증가) power spectrum 이 고주파대에서 저주파대로 천이되는 과정을 확실히 볼 수 있다.



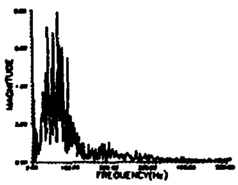
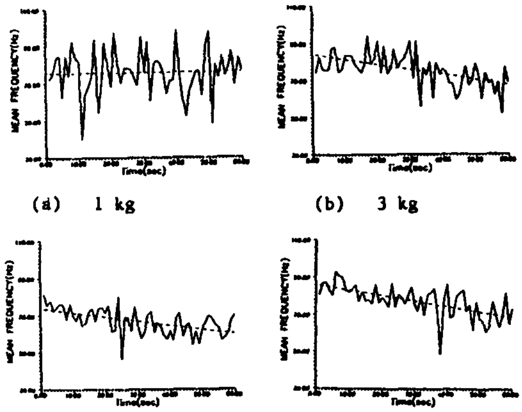


그림 1. 피로하기 전 상태 그림 2. 피로한 상태

다음의 도식들은 부하 1kg, 3kg , 5kg , 7kg 각각에 대해 각 1분씩 20분간의 휴식시간을 두고 EMG를 측정해 FFT 를 사용한 periodogram, 6th order AR model 과 2nd order MEM 의 방법들을 사용해 구한 mean frequency 들이다.

1kg 의 부하에 대해서는 거의 주파수의 천이현상이 나타나 있지않다. 그 이유는 1kg 정도의 부하는 1분 안에 근피로를 유발할 정도가 되지 못하기 때문이다.



(a) 1 kg (b) 3 kg

(c) 5 kg (d) 7 kg

그림 3. mean frequency

근피로도를 측정하기 위한 평균주파수를 구해 본결과(그림 3) 모두가 주파수의 천이현상이 일어나고 있다.

또한 그림에서 볼 수 있듯이 더 무거운 부하 일수록 주파수의 천이현상 즉 근피로도가 빨리 나타남을 알수있다.

각 부하들에 대한 mean frequency 들을 구한 그림에서

볼 수 있듯이 2nd order maximum entropy method에 의해 구해진 mean frequency는 근의 피로도가 진행됨에 따라 고주파에서 저주파로 천이되는 현상을 정확히 확인할 수 있었다.

보통 EMG 신호의 mean frequency 의 검출은 AR model 로 행하고 있으나 이 AR model 은 정확한 order 를 결정해 주지 못하면 정확한 평균주파수를 구하기 어렵다는 단점이 있으며 또한 Noise 에 대단히 약하다.

본 연구에서 제안한 2nd order maximum entropy method 로 할 경우 단한번에 mean frequency를 구함으로써 계산의 반복을 피할 수 있었으며 또한 잘.못된 order 의 선택으로 인한 문제점과 Noise에 의한 부정확도의 문제도 해결할 수 있었다.

결 론

본 논문에서 2nd order maximum entropy method 로써 FFT에서 발생하는 noise과다 때의 leakage, aliasing 그리고 AR 모델에서 잘못된 차수(order)의 결정으로 인한 정상주파수의 왜곡, 그리고 PSD를 평균과정에서 소비되는 시간의 문제점을 해결하였다.

따라서 PC 를 이용한 간편함과 2nd order maximum entropy method 에 의해 구한 mean frequency로써 보다 정확하고 빠르게 근피로도를 측정 함으로써 신경근육계통의 질병이나 이상을 정확하게 진단할 수 있으며 동시에 스포츠과학에 많은 응용을 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Oppenhime, Willsky with Yong, "Signals and systems."
2. S.Lawrence Marple, Jr, "Digital spectrum Analysis with Application."
3. Papoulis, "Probability, Random Variables, and Stochastic Process."
4. Popoulis, "Signal Analysis."
5. Cecil Hershler, Morris Milner, "An optimality criterion for processing Electromyo graphic (EMG) signals relating to Human Locomotion", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. BME-25, No. 5, September, 1978.
6. Glan Carlo Filligói, Paolo Mandrarini, "Some Theoretic Results on a Digital EMG signal processor", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol.BME-31, No.4, April, 1984.