

국부스펙트럼에 근거한 뇌파 스핀들 파형의 실시간 감지에 관한 연구

심신호*, 장태규**, 양원영*

* 중앙대학교 공과대학 전기공학과

** 중앙대학교 공과대학 제어계측공학과

Real-time Detection of spindle Waveforms Based on the Local Spectrum of EEG

Shin H. Shim*, Tae G. Chang**, Won Y. Yang*

* Depart. of Electrical Engineering, Chung-Ang University

** Depart. of Control and Instrumentation Engineering, Chung-Ang University

Abstract

A new method of EEG spindle waveform detection is presented. The method combines the signal conditioning in the time-domain and the analysis of local spectrum in the frequency-domain. Fast computation methods, utilizing some effective approximations, are also suggested for the design and implementation of the filter as well as for the computation of the local spectrum. The presented approach is especially useful for the real-time implementation of the waveform detection system under a general purpose microcomputer environment. The overall detection system is implemented and tested on-line with the total 24 hour data of selected four subjects. The result shows the average agreement of 86.7% with the visually inspected result.

1. 서론

사람의 뇌파(EEG, electroencephalogram)신호는 뇌의 상태와 전극의 부착위치에 따라 특성이 다른 파형들이 나타난다. 감지 대상에 포함되는 파형들중 Alpha, Beta, Sigma, Theta 들은 파형이 짧은 시구간(0.5 - 1.0초)에 나타나는 Sinusoidal Burst라는 점에서 흔히 스핀들(Spindle)이라 불린다. 이러한 스핀들 파형을 실시간에서 신뢰성있게 감지하는 것은 EEG신호의 자동해석을 위해서 매우 중요한 과제이다 [1][2]. 그러나 지금까지의 연구결과로는 사람이 눈으로 보고 판단하는 수준만큼 신뢰성 있는 파형감지 및 해독기술이 개발되어 있지 않아, 실용성에 문제가 있다. 이러한 어려움은 EEG와 같은 자연적 신호들은 RF(radio frequency) 신호등과 같은 인위적인 신호와는 달리, 일반적으로 광대역(Wideband signal) 신호이고 신호대 잡음비(SNR, signal-to-noise ratio)가 작으며 대상신호가 시시각각 변하는 데서 기인한다[3][4].

본 연구에서는 시간영역에서의 signal conditioning filter 와 주파수영역에서의 국부스펙트럼(local spectrum)해석을 함께 적용한 새로운 파형감지 기법을 제시 하였다. 기존의 주파수영역 해석 방법들은 일정 구간(30초에서 1분정도)의 신호에 대한 주파수해석을 통하여 패턴을 인식하고 분류하는 과정을 수행하였으나 본 연구에서는 짧은 시구간에 존재하는 스핀들 파형을 감지하기 위하여 국부스펙트럼(local spectrum)에 이용하였다. 기존의 주파수 해석 방법은 FFT등의 계산에 대한 부담이 커서 마이크로 프로세서를 기반으로한 실시간 자동해석 시스템에는 부적합하다는 단점이 있었으나 본 논문에서는 signal conditioning filter 및 국부스펙트럼(local

spectrum)계산 과정에 근사에 의한 빠른 계산구조를 고안하여 실시간 파형 감지 목적에 적합하도록 하였다.

이와같은 방식에 의해 설계구현된 파형감지 시스템을 실제 정상인 남자를 대상으로 적용한 결과를 제시하였다

2. 시그마 스핀들 파형 감지

시그마 스핀들은 12-16Hz의 내주기성(intra-periodicity)을 가지고 0.5-1초 정도의 구간에서 나타나는 Sinusoidal Burst 형태를 갖는 신호이다. 따라서 적절한 구간의 윈도우(window)를 취한 국부스펙트럼은 12-16 Hz의 내주기 범위에서 Mainlobe형태의 피이크(peak)를 가지게 되며 Mainlobe의 유무를 감지하여 스핀들 파형을 감지할 수 있다는 것이 제안된 파형감지 시스템의 주된 착안점이라 할 수 있다.

EEG 파형들은 언제나 배경잡음과 함께 나타나기 때문에 배경잡음을 없애 주고, 원하는 Mainlobe 형태를 뚜렷하게 하여 주는 Signal Conditioning 이 필요하다. 특히 EEG 파형들은 짧은 시구간에 동안 존재하는 과도 현상적인 신호이기때문에 필터의 과도응답 특성에 의한 파형왜곡은 심각한 문제이다. 이러한 파형왜곡을 최소화하기 위한 필터는 상대적으로 통과대역이 넓고 완만한 기울기의 천이대역특성을 갖아야 하며 식 (1)과 같은 선형위상 FIR (finite impulse response) 필터가 적합하다는 사실이 스핀들 파형을 대상으로한 여러종류의 필터에 대한 시뮬레이션 연구결과 보여졌다[5]. 이러한 필터는 실시간 처리를 위하여 8개의 지연을 위한 레지스터와 1bit shift, add, subtract 명령만으로 범용 마이크로프로세서 환경에서 구현할 수 있다.

$$H(z) = (z^{-5} - 1)(z^{-2} + 0.5z^{-1} + 1)(z^{-1} + 1) \quad (1)$$

윈도우를 취한 신호의 국부스펙트럼은 원래 신호의 스펙트럼과 윈도우 스펙트럼의 컨볼루션이 되므로, 신호의 피이크는 메인 로우브(main lobe) 형태로 나타나게 된다. 메인로우브의 폭은 윈도우구간 T 에의해 결정되는데 T 는 시그마 스핀들의 존재구간이 약 1초인 점을 고려하여 2초로 설정하였다. 이경우 메인로우브의 폭 B_w 은 1Hz가 된다. 메인로우브 폭에 비해 주파수 해상도 Δf (N -point DFT의 경우, $\Delta f = f_s/N$)가 큰 경우에는 파형검출에 실패할 수가 있다. 따라서 단일 피이크치의 검출을 위해서는 이산푸리에변환(DFT, discrete Fourier transform)의 Δf 가 상대적으로 메인로우브의 폭 B_w 에 비하여 충분히 작아야 한다. 즉 B_w 와 Δf 는 다음의

본 연구는 한국과학재단 지원과제 91-01-00-04 에 의해 이루어 졌음.

조건 식 (2)을 만족하여야 한다.

$$\Delta f < Bw \quad (2)$$

여기서 Δf : N-point DFT일 경우 $\frac{f_s}{N}$,
 Bw : $\frac{2}{T}$

240 Hz로 샘플링된 EEG신호는 식 (1)과같은 필터를 통과하게 된다. 구현의 복잡도를 줄여주기 위해 통과된 신호를 2:1로 desimation하면 샘플링 주파수가 120 Hz인 신호를 얻게 되는데 대부분의 Power가 저주파 영역에 치우쳐 있으므로 Aliasing의 영향은 거의 없게된다. 따라서 256 point의 DFT를 수행하는 경우 Δf 는 $120/256 \approx 0.47\text{Hz}$ 가 되어 식(2)를 만족하게 된다.

$$\text{이 경우 } \frac{\sin(x \frac{\Delta f}{2} T)}{x \frac{\Delta f}{2} T} = \frac{\sin(x \times \frac{0.47}{2} \times 2)}{x \times \frac{0.47}{2} \times 2} \approx 0.674 \text{이 되므로}$$

그림 1에 나타난 바와같이 검출되는 피크치는 항상 참 피크 값의 67.4% 이상이 된다.

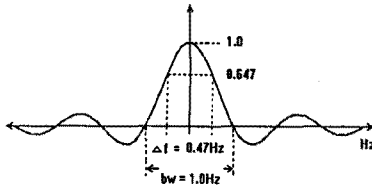


그림 1. 윈도우된 시그마스핀들의 Mainlobe 형태
 Fig 1. Shape of the mainlobe for a windowed sigma spindle.

3. 근사에 의한 국부 스펙트럼의 계산

정량적인 주파수분석을 목적으로 하는 경우에는 일반적으로 계산의 정밀도가 요구되는 반면에, 이와는 달리 파형감지를 위해 메인로우브의 유무만을 검출하고자 하는 경우에는 절대적인 오차가 일정 범위 이내에 존재한다면 계산의 정밀도에 대한 요구는 상대적으로 덜하다. 이러한점에 착안하여 허용 가능한 근사의 범위를 최대한으로 하여 실시간구현에 적합한 계산방법을 얻을 수 있다.

국부스펙트럼을 구하기 위해서 식 (3)에 나타난 바와 같이 N-point DFT를 얻는 경우, N개의 부동소수점(floating point) 복소수 곱셈연산이 필요하다.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left(\cos \frac{2\pi nk}{N} + j \sin \frac{2\pi nk}{N} \right) \quad (3)$$

범용 마이크로프로세서 환경에서 이러한 곱셈연산은 상대적으로 많은 시간을 필요로 하며 실시간 처리를 목적으로 한 시스템의 구현에 제한요소로 작용하는 경우가 흔하다. 또한 본연구에서 파형감지시스템의 구현에 사용한 Intel8097 마이크로컨트롤러의 경우 고정된 word length (16bit)의 곱셈연산은 실제 10bit으로 주어지는 A/D 변환된 데이터의 resolution을 고려할 때 불필요하며, 16bit 보다 작은 bit로 근사시킨 곱셈연산을 사용해도 정밀도의 저하가 파형감지 목적을 위한

성능을 크게 저하시키지 않는다. 특히 계수를 약 5bit로 까지 precision을 낮춘 계산이 허용 된다면 가장 큰 장벽인 floating point 곱셈연산을 Add 와 Shift로만 구현 할 수 있어 실시간 처리를 위한 시스템 구현에 매우 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 식(3)의 계산에 필요한 계수 $\cos \frac{2\pi nk}{N}$ 와

$$\sin \frac{2\pi nk}{N}$$

들을 5 bit precision으로 근사시킨 후, 룩업테이블

(look-up table)에 저장함으로써 DFT를 shift, add, 및 subtract 연산만으로 계산하도록 하였다. 이와 같은 근사화는 계수자체에 대한 오차범위가 최대 3.125%까지 허용한 것이다. 그림 2에 floating point 곱셈연산에 의한 국부스펙트럼과 마이크로컨트롤러에서 이루어지는 근사를 허용한 국부스펙트럼을 비교한 예를 보았다. 또한 파형감지 목적을 위해서는 모든 성분들에 대해 계산할 필요없이 파형의 내주기 범위(12~16Hz) 즉, X(26)~X(34)의 값들만 계산하면 되므로 실시간 처리 목적에 매우 효율적이다.

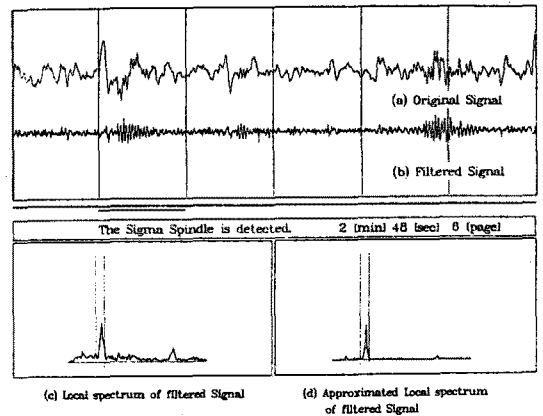


그림 2. (a) 시그마 스피들이 포함된 EEG 신호
 (b) 필터를 통과한 EEG 신호
 (c) Floating point 곱셈연산에 의한 국부 스펙트럼
 (d) 근사를 허용한 국부 스펙트럼

Fig 2. (a) EEG signal with sigma spindles.
 (b) Filtered EEG signal.
 (c) Local spectrum of filtered EEG signal.
 (d) Approximated local spectrum of filtered signal.

4. 실험 및 결과

파형감지 시스템의 전체적인 구성은 A/D 변환, 필터, 파형감지 기능들을 수행하는 전단처리 프로세서와, A/D 변환된 데이터를 저장하고 전단처리 프로세서에 프로그램 다운로드 및 통신역할을 담당하는 주 컴퓨터부로 이루어진다. 전단처리 시스템은 Intel 8097HB μ -controller를 사용하여 설계 구현하였고, NIHON KOHDEN사의 8 channel polygraph-chart EEG machine을 사용해서 신호를 채집하였다. 각 채널당 샘플링 주파수는 240Hz로 하고, 국제 10-20 전극 부착기준에 따라 frontal, central, occipital 등 3채널의 EEG 신호와 1채널의 EOG 신호를 약 6시간씩 만 23세~25세의 남자 4인을 대상으로 수면 상태에서 채집하였다.

위에 기술한 4 채널의 신호들은 육안적 해석을 위해 polygraph-chart에 기록되고 전단처리 프로세서에 의해 샘플링된 데이터는 주 컴퓨터인 80386 type PC의 하드디스크에 저장된다. 본 논문에서 설계한 파형감지 시스템이 실시간에서

시그마 스피들 파형을 감지하고, 이것을 polygraph-chart 중 이에 기록한 예를 그림 3에 보였다. 채널 1, 2, 3, 4는 뇌표피에 부착한 Electrode에서 얻은 수~수십 μV 신호를 EEG 기계의 전단증폭기를 통하여 직접 종이에 기록한 것이다. 채널 5는 전단처리 프로세서에서 필터된 Central 채널의 신호를 기록하였고, 채널 6은 전단처리 프로세서에 의해 Central 채널에서 나타나는 시그마 스피들을 실시간에서 감지한 것을 기록한 것이다. 이 그림에 보인 polygraph-chart는 한 페이지로서 20초 구간에 해당한다. 따라서 한 실험 대상에 대하여 약 6시간 가량의 신호가 처리되므로 이를 기록한 polygraph-chart는 한 실험 대상당 총 1000 페이지에 이른다.

- 채널 1 : Frontal
- 채널 2 : Central
- 채널 3 : Occipital
- 채널 4 : EOG
- 채널 5 : Filter output
- 채널 6 : 파형감지기 출력

그림 3. 파형감지기가 시그마 스피들을 실시간에서 감지하고, polygraph-chart에 기록한 예

Fig. 3. Illustration of Sigma spide detection recorded on the polygraph-chart in real-time by the front-end waveform detection system

표 1은 4 명을 대상으로 각 실험 대상당 약 6시간씩 처리한 결과가 기록된 polygraph-chart를 가지고 사람의 육안에 의해 시그마 스피들을 감지한 결과와 전단처리 프로세서에서 자동으로 감지된 결과를 비교하여 보여준 것이다. 자동감지 시스템의 성능을 평가하기 위한 지표로서 감지율(detection ratio)과 오감지율(false detection ratio)을 다음과 같이 정의 하였다.

$$\text{감지율} = \frac{\text{동시에 감지한 파형수}}{\text{육안에 의해 감지한 파형수}} \times 100 [\%]$$

$$\text{오감지율} = \frac{\text{시스템이 감지한 파형수} - \text{동시에 감지한 파형수}}{\text{육안에 의해 감지한 파형의 수}} \times 100 [\%]$$

표 1. 육안으로 처리한 결과와 시스템에서 자동으로 감지한 결과의 비교표.

Table 1. Comparison table of the detection results analyzed by the automated system and visual inspection

대 상	육안으로 감지된 파형수	기계로 감지된 파형수	동시에 감지된 파형수	감지율 [%]	오감지율 [%]
1	568	689	520	91.5	29.8
2	664	728	586	88.3	21.4
3	1254	1403	1110	88.5	23.4
4	548	534	413	75.4	22.1
총계	3034	3354	2629	86.7	23.9

표 1에서 나타내었듯이 감지율은 최소 75.4%에서 최고

91.5%에 이르고 전체 평균 감지율은 86.7%에 이르는 결과가 얻어졌다. 또한 각 실험 대상별 오감지율도 평균 23.9% 안팎에 이르는 비교적 고른 결과들이 얻어졌다.

본 실험결과에는 크기가 큰 파형(델타파형)들이 나타나는 구간도 통계에 포함하였다. 이러한 구간에서는 육안에 의한 감지자체에 대한 신뢰도가 낮기 때문에 자동감지 시스템의 성능평가에서 이 구간을 제외시키면 평균감지율은 90% 이상에 이르고 오감지율도 훨씬 낮아지는 것을 기대할 수 있다. 이러한 결과는 훈련된 전문가들 사이에서의 일치도(agreement)가 90% 정도인 것을 고려할 때 상당히 우수한 것으로 평가할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 국부스펙트럼(local spectrum)에 의한 주파수해석을 적용하는 새로운 파형감지 방식을 제시하였다. Signal Conditioning 필터와 DFT 계산과정에 근사를 허용한 알고리즘을 이용하여 실시간에서 시그마 스피들 파형을 자동으로 감지하는 시스템을 설계 구현하였다. 파형감지 시스템은 실시간 처리에 적합하도록 전단처리 프로세서와 주컴퓨터의 복수 프로세서를 사용하여 설계 구현하였다. 설계 구현된 자동감지 시스템으로 네 명의 실험 대상에 대하여 총 약 24시간의 신호를 처리하여 성능평가를 수행하였다. 육안에 의해 감지한 결과와의 일치도는 평균 86.7%에 이르는 우수한 결과가 보여졌다. 앞으로 광범위한 대상 신호들의 성능평가를 통하여 파형감지의 일치도를 향상시키고 다른 파형들에 대한 감지기를 설계하는 연구와 이러한 정보들을 가지고 훈련된 사람들이 인식 및 분류하는 기능을 대신할 수 있는 지능적인 컴퓨터 기술을 확립하기 위한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

6.참고문헌

- [1] A. S. Gevins, C. L. Yeager, S. L. Diamond, J. P. Spire, G. M. Zeitlin, and A. H. Gevins, "Automated Analysis of the Electrical Activity of the Human Brain (EEG): A progress report", Proceedings IEEE, vol. 63, No. 10, Oct. 1975, pp. 1382-1399.
- [2] J. R. Smith, "Automated Analysis of Sleep EEG Data", Chapter 4, Handbook of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, Vol.2, Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York, 1986, pp. 131-147.
- [3] A.S. Gevins, "Pattern Recognition of Human Brain Electrical Potentials," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 2, No. 5, Sept. 1980, pp. 383-404.
- [4] A. Isakson, A. Wennerberg, and L. H. Zetterberg, "Computer Analysis of EEG Signals with Parametric Models," Proc. IEEE, Vol. 69, No.4, Apr. 1981, pp. 451-461
- [5] 조 재희, 장 태규, 양 원영, "EEG 신호의 파형 감지를 위한 Signal Conditionig 필터에 관한 연구", 대한전기학회 학술포발대회 논문집, pp. 311-313, 1992