

학습 가능한 실시간 다단위 신경 신호의 분류에 관한 연구

김상돌, 김경환, 김성준
서울대학교 공과대학 전기공학부

Classification of Multi-Unit Neural Action Potential by Template Learning

S. D. Kim, K. H. Kim, S. J. Kim
School of Electrical Engineering, Seoul National University.

ABSTRACT

A neural spike sorting technique has been developed that also has the capability of template learning. A system of software has been written that first obtains the templates by learning, and then performs the sorting of the spikes into single units. The spike sorting can be done in real time. The template learning consists of spike detection based on the discrete Haar transform (DHT), feature extraction by clustering of spike amplitude and duration, classification based on rms error, and fabrication of templates. The developed algorithms can be implemented into real time systems using digital signal processors.

I. 서론

신경신호의 분석을 위해서는 신경 신호의 모양을 정확히 측정하고 분리를 해야 한다. 그러나, 신경에서 발생하는 신호의 모양은 신경의 종류에 따라서 각기 다양한 모습을 나타낸다. 또한 같은 뉴런일 경우에도 electrode의 종류나 위치, 근 섬유 조직의 전기적인 특성에 따라 서로 달라지게 된다. 뿐만 아니라 측정과정과 생체라는 특성 때문에 여러 종류의 noise가 생기게 된다. 이런 왜곡된 신호로부터 신경으로부터 나오는 신호를 분리해낼 필요가 있다.

이런 신호를 측정하고, 분리하는 방법에는 현재까지 여러 가지의 방법이 연구가 되었다. 그러나, 현재까지 연구된 방법은 미리 그 신경 신호의 모양에 대한 정보를 알고 있어야만 한다는 단점이 있다. 그러나, 같은 신경 신호의 모양도 측정 환경에 따라 다르게 나타나므로 신경신호에 대해서 정확한 정보를 안다는 것은 사실상 불가능하다. 또한, 기존의 연구에서는 sorting을 하는 과정에서 아주 많은 시간을 필요로 한다.

이런 문제점을 해결하기 위해서는 실험할 당시 측정된 신호를 바탕으로 해서, 그 신경 신호의 모양을 재구성해야 한다. 그리고, 그것을 통해서 그 신호를 분리, 분석을 해야 한다. 또한, 이 모든 과정이 실시간으로 되기 위해서는 이 모든 것들이 하나의 과정으로 이루어져야 한다.

이 연구에서는 구현한 시스템은 기존의 연구에서와 달리 실제 신호와 거의 흡사한 test용 신호로부터 spike를 찾아내고, 그것을 분류하여 하나의 template를 만들고, 만들어진 template를 바탕으로 하여, 실

시간에 신경신호를 sorting 하게 된다. 이 모든 과정이 이 시스템에서는 Fig.1에서와 같이 하나의 과정으로 구성이 되었다.

II. 본론

Fig.1은 신경 신호를 자동으로 처리하는 시스템을 보여주고 있다. 이 시스템은 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째 부분이 template learning이고, 두 번째 부분이 real time sorting 이다.

첫번째로 template learning을 하는 부분은 신경 신호로부터 실시간 sorting을 하는데 필요한 template feature를 만들기 위해서 learning을 하는 부분이다. 이 부분은 discrete Haar transform(DHT) detection, feature extraction, feature classification, templates making으로 나뉜다.

DHT Detection은 spike가 있는 위치를 찾아내는 부분이다. Feature extraction은 그 찾아낸 신호에서 신경 신호를 분리하는데 기준이 되는 primary feature를 찾아내는 부분이며, feature classification은 위의 primary feature를 가지고 clustering을 통해서 spike들을 분리하는 부분이며, 이 분리된 spike들을 통해서 template를 만들게 된다.

두 번째의 부분인 real time sorting은 첫 번째 부분에서 만들어진 template를 바탕으로 해서 실시간 분류를 하는 부분이다.

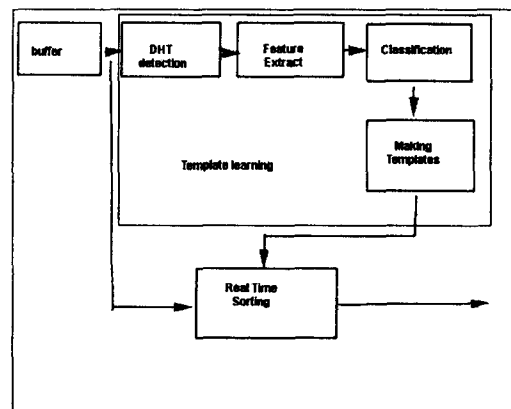


Fig.1 시스템의 구성도

A. Discrete Haar Transform

Haar transform 을 통해서 만들어진 신호를 spike 가 있는 time에 아주 큰 값을 가지게 된다. Fig2.(a)와 같은 신호를 Haar Transform하면 Fig2.(b)와 같은 신호가 되고 이 신호를 적당한 값으로 thresholding하여 inverse Haar transform하면, Fig2.(c)와 같이 된다.Fig.2 (c)의 신호로부터 zero-crossing의 방법에 의해서 spike를 정확하게 찾을 수 있다.[1]

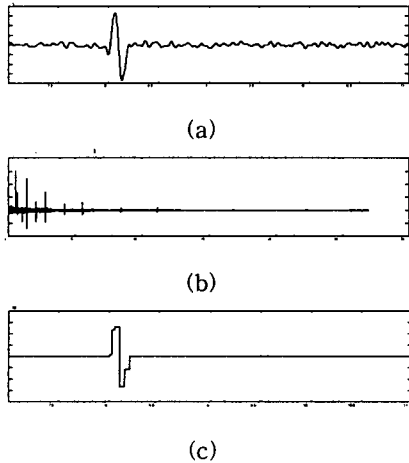


Fig.2 Haar transform을 이용한 spike의 Detection

B. Feature Extraction and Classification

신호의 모양을 분석하는데 쓰이는 Feature들은 여러 가지가 있을 수 있다. 그러나, Fig. 3에서와 같이 대표적으로 생각 할 수 있는 것이 peak to peak time, peak to peak amplitude 그리고, width 이다.

Fig.4는 세가지 feature에 따라서 그것들이 분포하는 모양을 3차원의 평면에 나타낸 것이다. Fig.4에 나타나듯이 feature들의 분포 특성에 따라서 Euclidean clustering 의 방법이나 , Mahalanobis clustering , arbitrary clustering의 방법이 사용될수 있다.[2]

현재 이 연구에서는 Euclidean clustering의 방법 과 feature로서는 peak to peak time과 peak to peak amplitude 2개를 사용했다. width를 넣으면 정확성도의 향상에 비해, 성능이 너무 떨어진다. 실험 결과의 Fig.7은 이 방법을 통한 clustering을 보여준다.

C. Real Time Sorting

real-time sorting에 쓰이는 방법은 두 가지 방법이 사용되었다. 그 첫 번째 방법이 바로 위의 classification에서 사용한 clustering 이고, 두 번째는 rms error를 이용하여 sorting 하는 방법이다.

첫 번째 방법은 시스템의 신호를 learning 하는 부분에서 이미 template 가 생성되었을 때 그 비교 기

준이 되는 template의 feature를 가지고 비교하는 것이다. 그러나, classification에서 가장 시간의 소모가 많기 때문에 그리 효과적인 방법은 아니다

두 번째 방법인 rms error를 통한 sorting은 일종의 matching filter로써 classification 에 의해서 생성된 template vector T_i 와 시간 영역에서 sampling 된 신호 s_i 사이의 rms error를 측정하여, 그 값이 적당한 threshold값 보다 작을 때 신호를 찾아내는 방법이다.

또한, 위의 rms error의 계산에 있어서 매우 중요한 요소는 곱셈의 개수이다. 위의 경우 적어도 곱셈을 k번(template의 sampling 횟수) 해야 한다. 즉, time domain에서 한 sampling time을 지나는 동안 k번의 곱셈을 해야 하는 부담을 가지게 된다. 이 경우 실험결과 template를 peak 점을 기준으로 해서 down sampling 해도 결과에는 거의 관계가 없음을 알 수 있다.

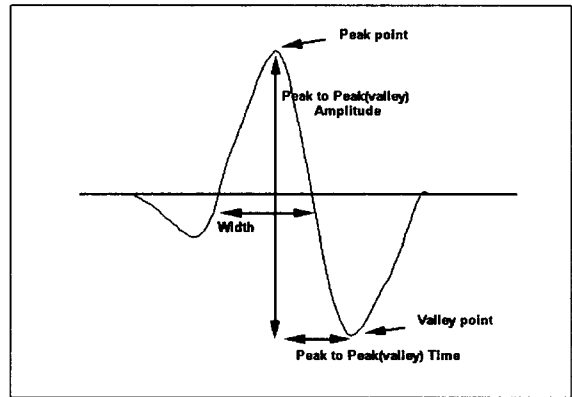


Fig.3 신경에서 나오는 신호의 feature들

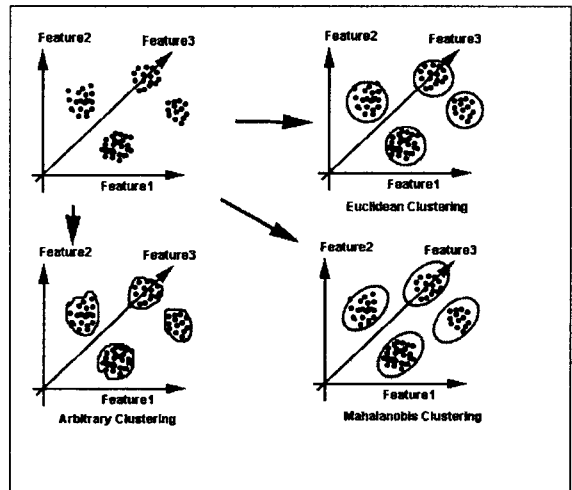


Fig.4

feature들에 따른 여러 가지 clustering을 하는 방법

III. 실험 결과

A. Neural signal

Aplysia abdominal ganglion에서 측정된 신호에서 하나의 spike를 시간영역에서 Feature들을 변화시켜서 sample을 만들고, 여기에 SNR이 5가 되도록 모의 신경 신호를 만들어 그 결과를 Fig.5에 보였다.

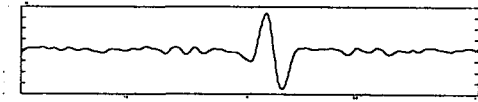


Fig.5 noise를 가하여 SNR이 5가 되도록 만든 신호

B. Spike Detection

Fig. 5의 spike train 들에서 DHT를 통해서 spike를 detection한 결과를 Fig. 6에 보였다. SNR을 5로 할 때 세 개의 single unit에서 나온 신호들이 변형되는 모습을 보여준다. SNR이 5일 때 noise는 unit의 template 모양의 변화에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 Fig.6이 보여준다.

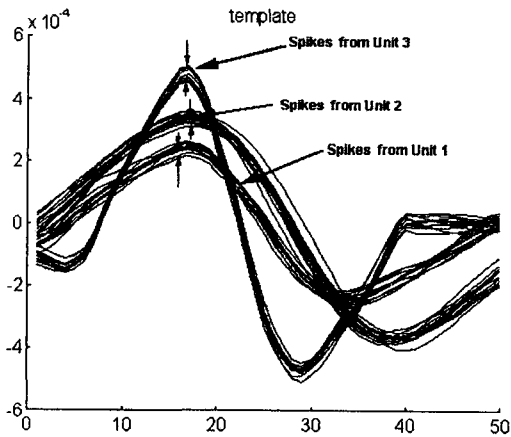


Fig.6 test 신호에서 DHT detection과 extraction과정을 거쳐서 나온 spikes

C. Classification

Fig.7은 Fig.6의 Spikes의 primary feature인 peak to peak time과 peak to peak amplitude를 2차원의 평면에 표시한 것이다. Fig.4에서 나타난 세 가지 방법 중에서 Euclidean clustering의 방법을 통해서 clustering을 했다. Fig.7에서 반지름 안에 있는 feature들은 하나의 class로 분류가 되었다.

Classification한 결과를 바탕으로 해서 한 class에 속하는 spike들의 평균을 하면 Fig.8과 같은 최종적인 template가 만들어진다. 위의 과정을 통해서 single unit의 spike 모양을 알 수 있다.

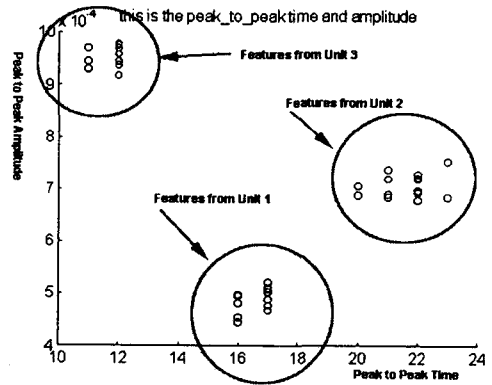


Fig.7 Fig.6의 spike들의 feature들을 2차원 평면에 투시한 것이다. 위에서 원은 위의 unit들에서 나온 신호를 clustering (classification)하는데 허용되는 최소한의 반지름이다.

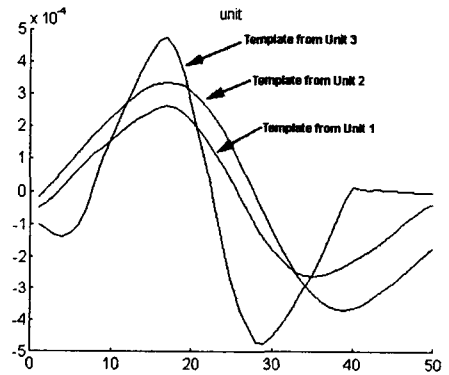
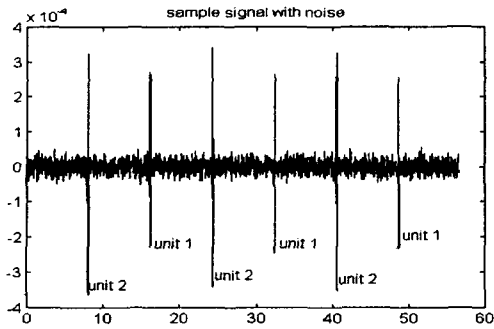


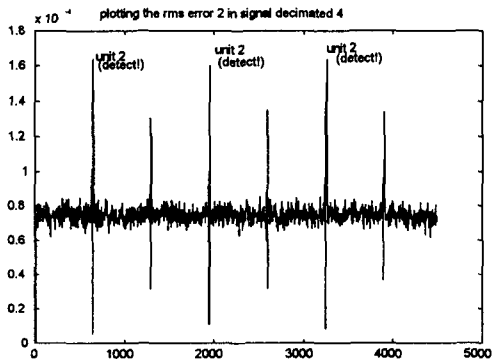
Fig.8 Fig.6의 spike 들로부터 구한 template들. 이것은 이후 realtime sorting 에 사용된다.

D. Real Time Sorting

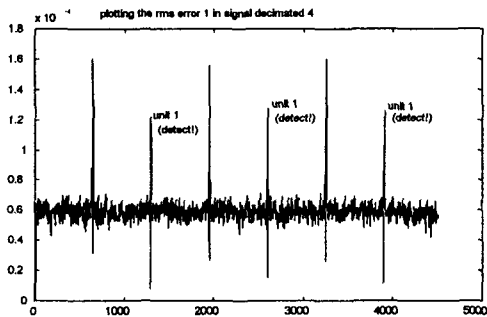
ems error의 방법을 통해서 spike를 찾는 과정은 Fig.9의 (a),(b),(c)에 나타내었다. Fig.9 (a)는 A의 과정에서 만든 신호들 중에서 unit 1과 unit 2가 train으로 되어 있는 sample signal이다. 여기서도 마찬가지로 SNR은 5이다. 이 신호의 경우 sampling frequency가 너무 커서 계산하는데 시간이 많이 걸리게 된다. 그래서, 그 신호를 4배로 down sampling을 하여 ems error를 구했다. unit 2에 대한 결과가 Fig.9 (b)이고, unit 1에 대한 결과가 Fig.9 (c)이다. 이 경우 각 single unit의 신호가 검출되었다는 것은 ems error 값이 threshold값인 0.2×10^{-4} 이하일 때이다. 이 경우 4배로 down sampling 되어도 각 single unit의 신호를 sorting 하는 데는 무리가 없다.



(a) unit 1과 unit 2가 순서대로 섞인 신경 신호



(b) unit 2와 신경 신호와의 rms error 값이 월등히 작은 곳이 바로 그 unit의 신호이다.



(c) unit 1 과 신경 신호와의 rms error
Fig.9 rms를 이용한 신경신호의 실시간 sorting

해서 구현하면 성능이 훨씬 좋아진다. 그러나, template를 learning 하는 부분에서는 아직도 시간이 많이 소요가 되므로 개선을 해야 한다.

위의 system은 sorting에서 error가 없이 아주 탁월한 성능을 발휘한다. 좀더 나은 system의 구현을 위해서는 실제 신호를 가지고, SNR 이 작은 신호에 대해서도 신뢰성이 있는지 실험을 해야 할 것이다.

기존의 연구에서 template를 형성하기 위해서 template를 learning하는 과정을 수동으로 했지만, 이 시스템에서는 이 과정들을 모두 자동으로 구현하였다. 또한, learning하는 과정에서도 시간적인 측면에서 아주 많은 향상을 보였다.

參 考 文 獻

- [1] XIAOWEI YANG , "A Totally Automated System for the Detection and Classification of Neural Spikes", *IEEE Transactions on Biomedical Eng.*, vol. 35, no. 10 ,October 1988
- [2] Bruce C. Wheeler "Multiple Unit Neural Spike Sorting" , in press,1997
- [3] Eleanor V. Goodall and Kenneth W. Horch "Separation of Action Potentials in Multiunit Intrafascicular Recordings", *IEEE Transactions on Biomedical Eng.*, vol. 39, no 3 ,March. 1992.
- [4] MOSHE ABELES and MOISE H. GOLDSTEIN "Multispikes Train Analysis", *Proceedings of the IEEE*, vol. 65 , no. 5 , May 1977
- [5] DAVID J. ANDERSON and MANNING J. CORREIA "The Detection and Analysis of Point Processes in Biological Signals", *Proceedings of the IEEE*, vol. 65 , no. 5 , May 1977

IV. 결론

위의 시스템은 입력된 신호로부터 시스템 스스로 spike를 찾아서 분류하고, 그것을 통해서 template를 아주 잘 만들어 냈다. 그리고, 그 만들어낸 template를 바탕으로 해서 rms error를 이용하면 신호로부터 아주 빠른 시간에 정확하게 sorting을 할 수 있다.

그리고, 이 시스템은 digital signal processor를 통