
RBF 신경회로망을 이용한 심전도 신호의 잡음 필터링

이주원*, 이한욱*, 김원욱**, 강익태**, 이건기*, 김영일*

Noise Filtering of ECG signal using RBF Neural Networks

Ju-Won Lee*, Han-Wook Lee*, Weon-Ook Kim**, Ick-Tea Kang**,
Gun-Ki Lee*, Young-Il Kim*

요 약

환자의 상태 및 심장 질환 등의 진단에 있어 매우 중요한 정보신호는 심전도 신호이며, 많은 잡음이 혼입되어 있기 때문에 잡음 신호의 필터링이 매우 어렵고 잘못된 신호처리는 심전도 신호의 왜곡을 가져올 수 있다. 심전도 신호의 잡음을 필터링하기 위해 기존의 방법은 다 단계 형태로 필터를 구성하여 처리하기 때문에 신호처리 구조가 복잡하고 연산 량이 많아 처리속도가 느려진다. 이러한 문제를 개선하기 위해 인공지능의 한 기법인 RBF 신경회로망을 이용하여 간단한 구조로 심전도 신호의 필터링 방법을 제안하고, 실험한 결과 우수한 성능을 얻었다.

Abstract

The ECG signal is very important information for diagnosis of patient and a cardiac disorder. That signal is hard to filter the noise because that is mixed with a lot of noise, and the error of the filtering will distort the ECG signal. The existing method for the filtering of the ECG signal has structure that has many steps for filtering, so that structure is complex and the processing speed is slow. For the improvement of that problem, we propose the method of filtering that has simple structure using the RBF neural networks and have good results.

* 경상대학교 전자공학과(경상대학교 생산기술연구소)

** 연암공업대학

접수일자 : 1999년 8월 6일

I. 서론

의용전자공학의 발달로 정확한 생체신호의 계측과 진단에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 대표적인 생체 신호는 심장활동에서 발생하는 심전도(Electrocardiography: ECG) 신호와 근육의 전기적 인 활동으로부터 발생하는 근전도(Electromyogram: EMG), 뇌전도(Electroencephalograms: EEG) 등이다. 심장의 수축과 이완 작용에 의해 신체 표면에 발생하는 생체의 전기적 신호를 기록할 수 있도록 한 장치가 심전계라고 하며, 이때 기록한 신호를 심전도 신호라 한다^[1]. 이 신호는 심장활동에 관련된 여러 정보를 의사에게 제공하며, 의사가 심장 및 환자의 상태를 진단하는데 있어 매우 중요한 신호이며 병원의 수술실, 중환자실 등에서 광범위하게 사용되고 있다. 심전도 신호의 주파수 대역은 약 0.05~100[Hz]인데 심전계에서 획득한 심전도 신호에는 전력선 잡음 60[Hz] 잡음, 호흡에 의한 기저선 변동, 그리고 심전도 신호를 측정하기 위한 전극의 움직임에 의해 발생하는 근잡음 등이 포함되어 있다. 60[Hz] 전력선 잡음은 실제로 심전도 신호 해석시 진폭이 작은 Q파와 P파에 영향을 주어 부정맥과 심근 경색 진단에 오류를 발생시키기도 하고, 심전도 신호를 왜곡시켜 심전도 진단에 중요한 파라미터인 QRS 콤플렉스 간격이나 QT간격의 측정에 오류를 발생시킨다. 이러한 60[Hz] 전력선 잡음을 제거하기 위해 60[Hz] 대역의 대역제거필터(notch filter) 또는 60[Hz] 성분을 기준신호로 설정하여 60[Hz] 성분이 포함된 입력신호와와의 차이를 최소화 될 때까지 필터계수를 조정하는 적응 필터를 사용하기도 한다^[1]. 그리고 기저선 변동은 호흡에 의해 발생되는 1[Hz]미만의 저주파 성분의 잡음으로서 심근경색 진단 파라미터로 사용되는 심전도 신호의 ST 세그먼트와 같은 주파수 대역을 갖기 때문에 ST 세그먼트를 정확히 검출하기 위해서는 기저선 변동을 효과적으로 제거하는 것이 좋다. 이 신호는 시변의 특성을 가지기 때문에 주로 적응 필터를 사용하고 있다. 근잡음(muscle artifact)은 넓은 주파수 대역에 분포하기 때문에 잡음제거시 심전도 신호의 왜곡을 발생시킨다. 이 잡음을 제거하기 위해 주로 평균 또는 메디안 값을 이용하여 제거하기도 한다^[1]. 그러

나 이러한 기법은 각각의 기능을 다 단계로 필터를 구성하여 심전도 신호를 처리하므로 많은 연산시간이 소요되고, 각 필터의 기능의 성능에 따라 후단처리에 왜곡을 줄 수가 있으며, 각 필터들의 파라미터가 증가되어 파라미터를 조정하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 60[Hz] 전력선 잡음, 기저선 변동, 근잡음 등을 동시에 제거하기 위해 비선형 신호처리에 우수한 성능을 보이는 인공지능의 기법인 RBF(Radial Basis Function) 신경회로망을 이용하여 다 단계 형태의 신호처리가 아닌 간단한 구조로 심전도 신호의 잡음을 필터링하고 그 결과를 제시하였다.

II. RBF 신경망 필터

RBF 신경회로망은 다층 신경회로망을 대신해서 함수 근사화나 제어응용에 인기를 끌고 있다. 그 이유는 구조가 간단하고, 바라는 목표점에 대한 수렴속도가 빠르며 수학적 배경이 잘 확립되어 있기 때문이다. 이 신경회로망은 1989년 무디(Moody)와 다켄(Darken)에 의해 제시되었고, RBF 함수의 종류로는 가우시안, thin-plate-spline, 다중-2차 방정식 등이 있다^[15]. 본 연구에서는 가우시안(gaussian) 함수를 가진 RBF 신경회로망을 사용하였고 그 특징으로는 지역적인 특성의 학습과 새로운 패턴(pattern) 입력이 추가되어도 추가된 부분만 학습이 가능하다^[15]. RBF 신경회로망의 학습 알고리즘은 지도학습(supervised learning)으로서 패턴 군들에 대하여 가우시안 함수의 중심과 폭을 결정할 수 있게 학습하기 때문에 심전도 신호에서 잡음의 분산 및 추정을 쉽게 얻을 수 있다. 따라서 RBF 신경망을 이용하여 적응필터를 구성하면 그림 1과

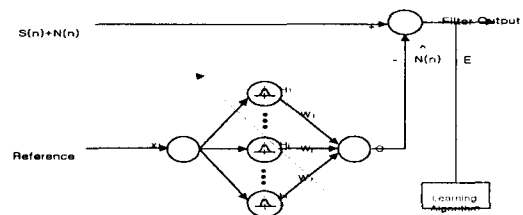


그림 1. RBF 신경망 필터

같고, 구조는 1개의 참조신호 입력, 가우시안 함수로 구성되어 있는 J개의 은닉층, 선형 활성화 함수를 가진 1개의 뉴론을 가진 출력층으로 구성되어 있다.

RBF 신경망 필터의 적응 필터링 알고리즘은 필터의 입력신호 $I(n)$ 에 혼입된 잡음신호 $N(n)$ 를 참조(reference) 신호 $N_R(n)$ 을 기반하여 가우시안 함수의 파라미터인 중심과 폭 그리고 가중치들을 학습으로 조정하여 잡음을 추정하며, 추정한 잡음 $\hat{N}(n)$ 을 입력신호 $I(n)$ 와 감산하므로써 원하는 $S(n)$ 를 얻을 수 있다.

$$I(n) = S(n) + N(n) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E(n) = \text{FilterOutput} = S(n) + N(n) - \hat{N}(n) \quad \dots\dots\dots (2)$$

그림1에서 RBF 신경망 필터 입력층 뉴론의 입력 신호는 참조신호 $N_R(n)$ 로서, 잡음신호 $N(n)$ 과 상관관계가 있는 신호이다.

$$x_1 = N_R(n) \quad \dots\dots\dots (3)$$

그리고 참조신호 x_1 에 대한 j번째 은닉층 뉴론의 출력 H_j 는 식(4)와 같다.

$$H_j = \exp\left[-\frac{(x_1 - m_{j1})^2}{\sigma_{j1}^2}\right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서 m_{j1} 은 입력에 대한 j번째 RBF 함수의 중심값이며, σ_{j1} 는 입력에 대한 j번째 RBF 함수의 폭이다. 그리고 출력층 뉴론의 출력은 추정잡음 $\hat{N}(n)$ 을 출력한다.

$$\hat{N}(n) = \left(\sum_{j=1}^J w_j H_j\right) + 1 \quad k = 1, 2, \dots, K \quad \dots\dots\dots (5)$$

RBF 신경망 필터를 학습시키기 위한 학습 알고리즘은 추정 잡음 $\hat{N}(n)$ 과 입력신호 $I(n)$ 와의 오차 $E(n)$ 을 최소화하는 최적의 m_{j1} , σ_{j1} , w_j 를 구하는 것이며, 이들 파라미터는 LMS(Least Mean Square)의 경사 하강법으로 구할 수 있다.

$$E(n) = \frac{1}{2} [I(n) - \hat{N}(n)]^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

RBF 신경망 필터의 출력 오차가 최소가 되기 위한 학습 알고리즘은 아래의 식들로 이루어지며, 신경회로망의 출력층은 델타학습규칙과 같다. 출력 에러에 대한 출력층의 가중치 변화량은 다음 식으로부터 조정된다.

$$w_j \leftarrow w_j + \Delta w_j \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta w_j = \eta_w \frac{-\partial E}{\partial w_j} = \eta_w (I(n) - \hat{N}(n)) H_j \quad \dots\dots\dots (8)$$

출력 Error에 대한 가우시안 함수의 중심 변화량 Δm_{j1} 를 구하면, 다음과 같다.

$$m_{j1} \leftarrow m_{j1} + \Delta m_{j1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta m_{j1} = -\eta_m \frac{\partial E}{\partial m_{j1}} = 2\eta_m (I(n) - \hat{N}(n)) w_j H_j \frac{(x_1 - m_{j1})}{\sigma_{j1}^2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

그리고 출력 Error에 대한 가우시안 함수의 폭 변화량 $\Delta \sigma_{j1}$ 는 식(12) 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{j1} \leftarrow \sigma_{j1} + \Delta \sigma_{j1} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\Delta \sigma_{j1} = -\eta_\sigma \frac{\partial E}{\partial \sigma_{j1}} = 2\eta_\sigma (I(n) - \hat{N}(n)) w_j H_j \frac{(x_1 - m_{j1})^2}{\sigma_{j1}^3} \quad \dots\dots\dots (12)$$

여기서 η_w , η_σ , η_m 는 학습 상수이다. 모멘텀 (momentum) 항은 학습 알고리즘에 추가할 수 있으며 이 방법은 일반적인 방법과 같다. 그리고 학습 상수는 1차원적인 최적 알고리즘 또는 경험으로 통하여 얻을 수 있다. RBF 신경망의 구조는 가우시안 함수를 가지고 있기 때문에 생체에서 발생하는 심전도 신호와 잡음 신호의 분산을 쉽게 추정할 수 있고, 잡음 신호의 필터링에 대하여 우수한 결과 얻을 수 있다.

Ⅲ. 심전도 신호의 잡음 필터링

본 연구에서 심전도 신호의 잡음을 제거하기 위한 구조는 그림 2에 나타내었으며, 먼저 환자의 피부에 부착된 전극(electrode)으로부터 발생된 심전도 신호를 증폭 후 차단주파수 f_c 가 100[Hz]인 저역통과 필터를 통과한 신호를 AD(Analog to

Digital) 변환기를 이용하여 신호를 측정 후 RBF 신경망으로 필터링 하였고, 그 결과를 컴퓨터로 모니터링 하였다.

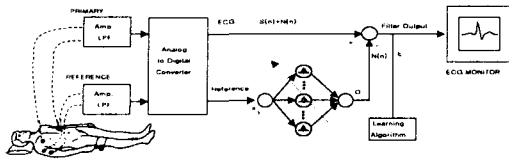
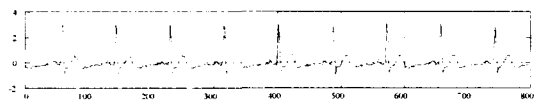


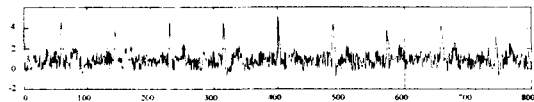
그림 2. 심전도 신호의 잡음 필터링 시스템 구조

IV. 실험 및 고찰

본 연구에서 제안한 방법으로 심전도 신호를 필터링하기 위해 입력층 뉴론 1개, 은닉층 뉴론 7개, 출력층의 뉴론 1개의 신경망 구조를 사용하였으며, 학습 상수 η_w , η_o , η_m 는 각 0.1, 0.01, 0.01로 설정하였다. 그리고 필터링 해야 할 신호 $I(n)$ 는 환자로부터 발생하는 심전도 신호를 저장한 Kontron Medical사의 Arrhythmia Simulator 994에서 발생시켰고, 본 연구에서 사용된 심전도 신호는 정상인의 심전도 신호이다. 시뮬레이터에서 발생하는 신호는 정상인의 심전도 신호, 최대 $1[Vp-p]$ 60[Hz]의 전력선 잡음, $1[Vp-p]$ 의 랜덤 잡음형태인 근잡음 신



(a) Original 심전도 신호



(b) 랜덤 잡음(근잡음)이 혼입된 심전도 신호



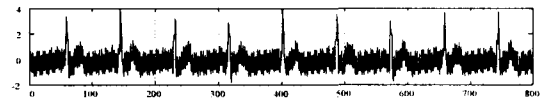
(c) 신경망에 의한 필터링 출력

그림 3. 심전도신호+랜덤신호 필터링

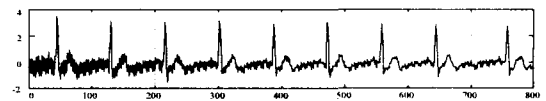
호, 기저선 동요 신호가 각각 발생된다. 이 신호들을 조합하여 제안된 구조에 입력하였고, 잡음 신호를 RBF 신경망의 입력에 참조신호로 입력하였다. 그리고 입력 신호의 샘플링 주파수는 200[Hz]와 8[Bit] A/D변환기에 의해 데이터를 얻어 컴퓨터에서 온라인으로 필터링한 결과를 그림 3, 그림 4, 그림 5, 그림 6에 나타내었으며, 필터링 결과 0.937[%] 평균 오차율을 얻었다. 그림 5의 결과에서 제안된 방법의 출력은 기저선 동요에도 출력이 변화되지 않는 것이 큰 특징으로 나타났다.

V. 결론

환자의 상태 및 심장 질환 등을 진단에 있어 매우 중요한 정보신호인 심전도 신호는 많은 잡음이 혼입되어 있기 때문에 잡음 신호의 필터링이 매우 어렵고, 잘못된 신호처리는 심전도 신호의 왜곡을

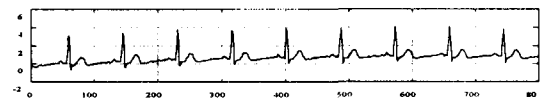


(a) 60[Hz] 전력선 잡음이 혼입된 심전도 신호



(b) 신경망에 의한 필터링 출력

그림 4. 심전도 신호 + 60[Hz] 전력선 잡음 필터링

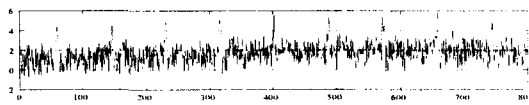


(a) 기저선이 동요된 심전도신호

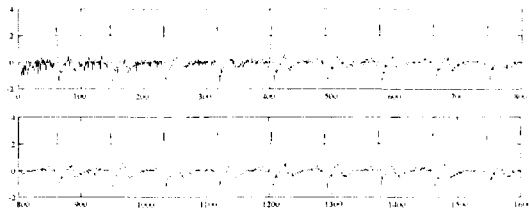


(b) 신경망에 의한 필터링 출력

그림 5. 심전도 신호 + 기저선 동요 필터링



(a) 심전도 신호 + 60[Hz] 전력선 잡음 + 기저선 동요 신호



(b) 신경망에 의한 필터링 출력

그림 6. 심전도 신호 + 60[Hz] 전력선 잡음 + 기저선 동요 필터링

가져올 수 있다. 현재 연구된 심전도 신호의 필터링 기법은 다단계 형태로 필터를 구성하여 처리하기 때문에 신호처리 구조가 복잡하고 연산 량이 많기 때문에 처리속도가 느려진다. 이러한 문제를 개선하기 위해 잡음 신호의 분산을 필터링 환경에 따라 적응하여 추정할 수 있고, 구조 간단한 인공지능의 한 기법인 RBF 신경회로망을 이용하여 필터링 한 결과 우수한 특성을 얻었고, 다단계의 필터링 기법보다 신호처리의 구조를 간단하게 구현할 수 있어 필터링 과정의 복잡성을 단순화 시켰다. 그리고 RBF 신경망은 심전도 신호의 기저선 변동에도 필터의 출력에 영향이 없기 때문에 심전도 신호처리에 매우 적합하다는 것을 알 수 있었다.

따라서 심장 진단 분야에 제안된 심전도 필터링 방법을 적용시 우수한 결과 얻을 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] 안창범, 우응제, 윤영로, 이경중, *생체신호처리 연구의 현황과 전망*, J. Biomed. Eng. Res. Vol. 20, No. 2, 119-138, 1999
 [2] 이재준, 송철규, *심전도 신호의 잡음 제거를 위한 적응 필터 설계*, 의공학회지, 제13권 제2호, 1992

[3] 박광리, 이경중, *ST 세그먼트 검출성능향상을 위한 중속 적응필터의 설계*, 의공학회지, 제16권 제4호, 1995.
 [4] Ajitkumar P. Mulavara, William D. Timmons, *Electrical Impedance Cardiography Using Artificial Neural Networks*, Annals of Biomedical Engineering, Vol. 26, pp. 577-583, 1998
 [5] Eiji Uchino, Shin Nakamura, Takesi Yamakawa, *Nonlinear Modeling and Filtering by RBF Network with Application to Noisy Speech Signal*, Information sciences 101, pp. 177-185, 1997
 [6] Chin-Teng Lin, Chia-Feng Juang, *An adaptive Neural Fuzzy Filter and Its Applications*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol. 27, No. 4, August 1997
 [7] Zeeman Z. Zhang, Nirwan Ansari, *Structure and Properties of Generalized Adaptive Neural Filters for Signal Enhancement*, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 7, No. 4, July 1996
 [8] Ki Yong Lee, *Complex Fuzzy Adaptive Filter with LMS Algorithm*, IEEE Transactions on Signal Processing. Vol. 44, No. 2, February 1996
 [9] D. Bhattacharya, A. Antoniou, *Design of Equiripple FIR Filters Using a Feedback Neural Network*, IEEE Transactions on Circuits and Systems-II : Analog and Digital Signal Processing, Vol. 45, No. 4, April 1998
 [10] Yu-Min Cheng, Bor-Sen Chen, *Nonuniform Filter Bank Design with Noises*, IEEE Transactions on signal Processing, Vol. 46, No. 9, September 1998
 [11] Chang-Shing Lee, Yau-Hwang Kuo, *The Important Properties and Applications of the Adaptive Weighted Fuzzy Mean Filter*, International Journal of Intelligent Systems, Vol. 14, pp. 253-274, 1999

- [12] Ashraf A. M. Khalaf, Kenji Nakayama, *A Cascade Form Predictor of Neural and FIR Filters and Its Minimum Size Estimation Based on Nonlinearity Analysis of Time Series*, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E81-A, No. 3, March 1998
- [13] Elsayed A. Soleit, *A fast adaptive recursive filter*, INT. J. Electronics, 1997, Vol.. 82, No. 4, pp. 327-333
- [14] Metin Akay, "Biomedical Signal Processing", Academic Press. 1994
- [15] Chin-Teng Lin, C. S. George Lee, "Neural Fuzzy Systems", Prentice-Hall, Inc. 1996

이 주 원(Ju-Won Lee)

- 1997년 2월 : 진주산업대학교 전자공학과(공학사)
- 1999년 2월 : 한국해양대학교 대학원 전자통신공학과(공학석사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 경상대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학
- *주관심분야 : 디지털신호처리, 의용생체신호처리, 신경회로망, 퍼지논리

이 한 옥(Han-Wook Lee)

- 1999년 2월 : 경상대학교 전자공학과(공학사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 경상대학교 대학원 전자공학과 석사과정 재학
- *주관심분야 : 디지털신호처리, 의용생체신호처리, 의료영상처리

김 원 옥(Weon-Ook Kim)

- 1979년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1981년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 1994년 2월 : 경상대학교 대학원 전자공학과 박사과정수료
- 1984년 ~ 현재 : 연암공업대학 전자과 교수
- *주관심분야 : 신경망, 인공지능, 음성신호처리, 병렬분산처리

강 익 태(Ick-Tae Kang)

- 1981년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1983년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 1995년 3월 : 경상대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 1983년 ~ 1988년 : 전자통신연구소 연구원
- 1988년 ~ 현재 : 연암공업대학 컴퓨터정보기술과 교수
- *주관심분야 : 시각정보처리, 패턴인식, 신경회로망

이 건 기(Gun-Ki Lee)

- 1985년 ~ 현재 : 경상대학교 전자공학과 교수, 경상대학교 생산기술연구소 연구원
- 기타약력 : 학회논문 Vol. 3, No.1 참조
- 주관심분야 : 디지털신호처리, 의용생체신호처리

김 영 일(Young-Il Kim)

- 1979년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1981년 8월 : 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 1985년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 1987년 ~ 현재 : 경상대학교 전자공학과 교수
경상대학교 생산기술연구소 연구원
- *주관심분야 : 디지털신호처리, 음성신호처리, 음성인식