Wavelet filter를 이용한 QRS complex와 R-wave의 검출 알고리듬

태장환[a], 송인호[a], 이두수[a], 김선일[b], 김인영[b]
[a]한양대학교 공과대학 전자공학과 신호처리연구실
[b]한양대학교 의과대학 의공학교실

An Algorithm to Detect QRS Complex and R-wave Using Wavelet Filter

J. H. Tae[a], I. H. Song[a], D. S. Lee[a], S. I. Kim[b], I. Y. Kim[b]
[a]Department of Electrical Engineering, Hanyang University
[b]Department of Biomedical Engineering, Hanyang University

e-mail : vakshi@hymail.hyu.ac.kr

Abstract

심전도에서 QRS complex와 R-wave의 검출은 부정맥 진단, 심전도의 특성점 검출 기준, heart rate variability(HRV) 측정에 있어서 중요하나, 시시각각 변화하는 생리적 변화와 여러 가지 노이즈로 인해 검출이 쉽지 않다. 제안된 알고리듬에서는 wavelet filter banks를 이용하여 대칭적 enhanced 신호와 noise 와 같은 very high frequency 성분이 제거된 ECG에 근사화 된 approximated 신호를 얻는다. Enhanced 신호로부터 QRS complex의 위치를 검출하고, 검출된 위치의 주변에서 대칭적 wavelet의 특성이 반영된 dominant한 peak의 위치정보, 즉 R wave의 후보점을 얻는다. 이 위치 정보를 이용하여 enhanced 신호에서 각 peak에서의 크기, approxi-mated 신호에서 각 peak 주변에서의 기울기 변화, 기울기 부호 등을 고려하여 R-wave의 위치를 원래의 ECG 신호에서 얻는다. MIT/BIH database에 적용한 결과 99.6%의 QRS complex 검출률과 92.9%의 R-wave 검출률을 보였다.

I. INTRODUCTION

심전도 신호에서의 QRS complex 검출은 몇가지 중요한 의미를 지닌다. 부정맥의 진단이나 S, T-wave의 검출 기준으로서 뿐 아니라, heart rate variability (HRV) 측정을 위한 단계로서 중요하다. 특히 HRV의 측정에 연속되는 R-wave 위치 간의 거리인 RR-interval이 이용되므로 QRS complex의 검출을 통한 정확한 R-wave의 위치 검출이 중요하다. 그러나 QRS complex의 검출은 쉬운 문제가 아니다. 한 환자에게서도 시시각각 바뀌는 생리학적 변화에 의해 그 형태가 바뀌고 다양한 morphologies가 존재 하기 때문이다. 이밖에도 날카로운 P, T-wave나 전원에 의한 노이즈, 근전도, 환자의 이동이나 호흡에 따른 기저선의 변화 등은 QRS complex의 검출을 더욱 어렵게 한다.

일반적으로 QRS complex의 검출은 QRS complex를 강화시키는 선처리과정과 문턱치를 적용해서 QRS complex를 결정하는 과정으로 나뉜다. 선처리과정에서는 bandpass filtering 등의 선형 필터링 방법과 derivative, square, moving window integrator 등의 비선형 신호처리 방법들을 사용하여 QRS complex를 강조한다. 또 다른 QRS complex 검출 방법으로 wavelet 변환을 이용하여 QRS complex의 주파수 대역에 해당하는 band에서 zero crossing, modulus maxima 등의 성질을 이용한 방법들이 사용되었다. 그러나 기존 연구의 대부분은 QRS complex의 위치를 검출해 내는 데에 그치고 있어서 정확한 R-wave의 peak 검출은 이루어지고 있지 않다.

본 연구에서는 wavelet filter 이용한 알고리듬을 MIT/BIH database에 적용하여 single channel에서 QRS complex를 검출하고 검출된 위치 정보를 이용하여 정확한 R-wave의 위치를 검출하고 있다.

II. METHODS

알고리듬은 wavelet filter banks를 이용하여 얻어진 두 신호를 이용하여 QRS complex 와 R-wave를 검출하게 된다. 5초의 심전도 신호를 Biorthogonal mother wavelet을 기반으로 decomposition 하여 얻어진 wavelet 계수들 중에서, QRS complex의 주파수 영역(5~45Hz)에 해당하는 계수를 recons-truction하여 대칭적 특성을 보이는 enhanced 신호 (*E_sig*)을 얻고, 45 Hz 이상의 high frequency noise 를 제거한 approximated 신호(*A_sig*)는 noise 이외의 주파수 영역에 해당하는 계수들을 reconstruction하여 얻는다. Enhanced 신호는 QRS complex의 검출과 R-wave peak의 위치가 될 수 있는 후보점을 찾는 데에 쓰이고, approximated 신호는 후보점 주변에서 기울기를 계산하여 이를 이용하여 R-peak를 찾을 때 사용된다. 그림 1에 제안된 알고리듬의 개략적인 구성을 나타내었다.

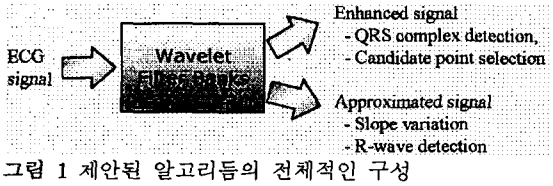

그림 1 제안된 알고리듬의 전체적인 구성
Fig. 1 The scheme of proposed algorithm

a. Wavelet Filter Banks / Filtered Signal

본 연구에서는 심전도 신호의 여러 모양, 선형성 등과 복원된 신호에서의 대칭성 등을 고려하여 biorthogonal wavelet filter 3.9를 사용하였다. 다음 그림 2에 차례대로 biorthogonal wavelet filter 3.9의 decomposition, reconstruction wavelet function을 나타냈다.

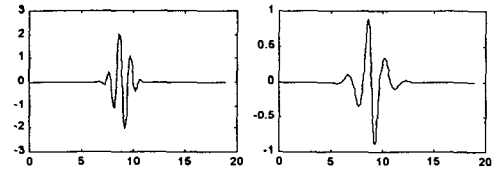

그림 2 Biorthgonal 3.9의 decomposition/reconstruction wavelet function
Fig. 2 Decomposition/reconstruction wavelet function of biorthgonal 3.9

이를 이용하여 5초 간격으로 입력된 심전도 신호를 2^5 레벨까지 decomposition 하였고, enhanced 신호는 5~45Hz, approximated 신호는 0~45Hz에 해당하는 wavelet 계수들을 reconstruction하여 구했다. 다음 그림 3에서는 심전도에 빈번하게 나타나는 파형들에 대해서 원래의 심전도 파형과 enhanced 신호를 나타내었다. QRS complex의 주변에서 대칭적 특성이 강조되어 나타나는 우세한 peak들을 볼 수 있는데, 이 peak들은 각각 QRS complex의 Q, R, S-wave를 반영하고 있으므로 이들을 R-wave의 후보점으로 생각할 수 있으며, 만약 이들 중 단순히 최대값을 찾는다면 R-wave 검출에 실패할 수 있다.

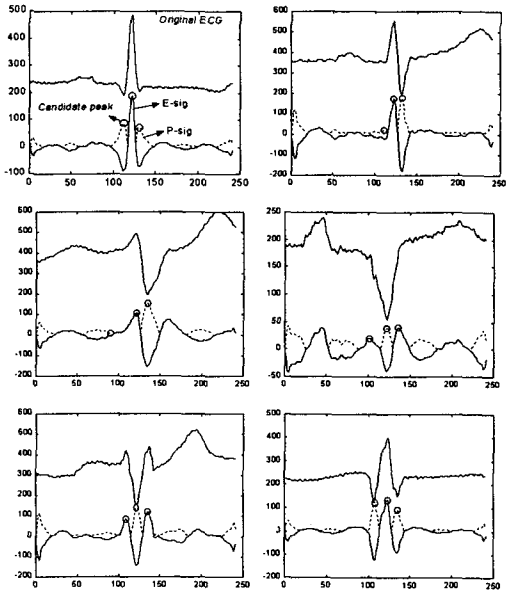

그림 3 빈번한 심전도 파형에 대한 enhanced 신호
윗쪽 신호; 원래 심전도,
아래쪽 신호; enhanced 신호 (실선), 절대값(점선), 후보점(0)
Fig. 3 QRS complex occurred frequently in ECG
Upper; original ECG
Down; Enhanced signal *E_sig* (solid), absolute valued *P_sig* (dotted), candidate points (0 mark)

그림 4에는 원래 심전도 신호와 필터링 결과로 만들어진 approximated, enhanced 신호를 나타냈다.

b. QRS Complex Detection

5초 간격으로 입력된 enhanced 신호(*E_sig*)에 절대값을 취하고(*P_sig*) 해당 구간의 평균의 2배를 문턱치1(*TH1*)로 잡아 peak들을 검출한다. 이때 refractory period를 고려하여 peak 사이의 간격이 200msec 이상 되도록 한다. 검출된 peak들 중에서 크기가 문턱치1의 2배인 문턱치2(*TH2*)를 넘는 peak들에 대해서는 '1'로, 그렇지 않은 peak들에 대해서는 '0'으로 label을 준다. 검출된 peak들로 구해진 RR interval은 이전 20개의 RR-interval 평균의 반과 비교되어 그 미만이 되고 label이 '0'인 peak는 제거하여 false positive를 줄인다.

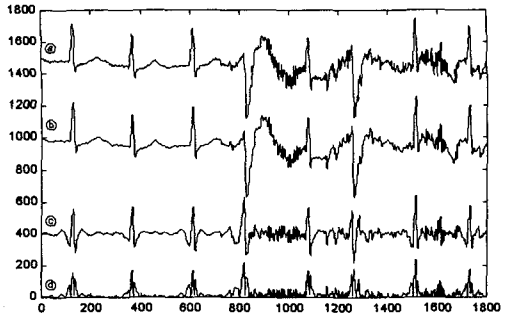

그림 4 ⓐ원래 심전도, ⓑApproximated 신호, ⓒEnhanced 신호, ⓓEnhanced 신호의 절대값
Fig. 4 ⓐOriginal ECG, ⓑApproximated signal (*A_sig*), ⓒEnhanced signal(*E_sig*), ⓓabsolute value of E_sig(*P_sig*)

그림 5에는 QRS complex 검출에서의 문턱치 적용과 최종 검출된 위치를 차례대로 나타낸다. *TH1*, *TH2*가 *E_sig*의 절대값에 적용되고, *TH1* 이상의 peak는 검출되지만, 이전의 RR-interval과 비교되어 noise로 인한 peak들은 제외된다.

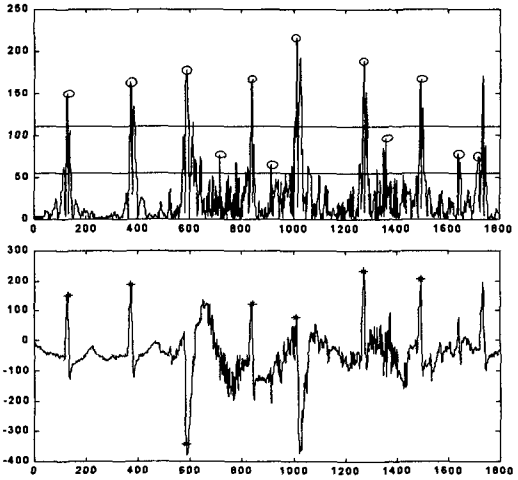

그림 5 QRS complex detection의 단계별 신호 파형
윗쪽 신호; *P_sig*와 *TH1*, *TH2*, 검출된 peak
아랫쪽 신호; RR-interval을 고려한 후 최종 검출 위치
Fig. 5 Signal at each step of QRS complex detection algorithm
Upper; *P_sig*, *TH1*, *TH2* and detected peaks
Down; Finally detected peaks after considering RR-interval

c. R-wave Peak Detection

Enhanced 신호는 QRS complex의 주변에 대칭적 wave의 특성이 반영된 우세한 peak를 갖게 된다. 이 peak의 위치는 ECG 신호에서 R-wave 위치의 후보가 된다. 각 후보점은 QRS complex의 위치 ±100 msec에서의 peak점들로서 *P_sig*로부터 구해진다. 이렇게 얻어진 각 후보점에서 ±40msec에서의 기울기를 approximated 신호(*A_sig*)로부터 구한다. 여기서 얻어진 기울기와 peak의 크기 등의 정보를 이용하여 각각의 후보점들 중에서 어느 것이 R- wave에 의한 것인지를 판별하여, 원래의 심전도 신호에서 R-wave의 위치를 찾아낸다.

먼저 peak 주위에서의 기울기, 기울기 변화의 비, 기울기의 부호를 이용하여 R-wave로서 충분히 뾰족한 peak만을 골라낸 후 peak의 크기와 기울기 변화로 R-wave를 결정한다.(그림 6)

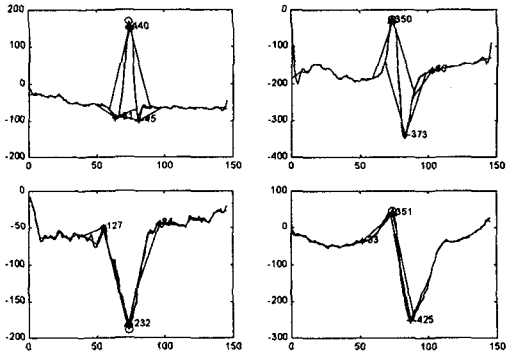

그림 6 후보점에서의 기울기 변화와 크기로 R wave를 검출하는 경우
Fig. 6 R-wave detection case using signal *information* such as slope, amplitude, and etc., and detected R-wave (O mark)

만약 충분히 뾰족한 peak가 없을 경우에는 각 peak에서 기울기 변화의 대략적인 추이를 보고 파형의 최소점이나 최대점을 검출한다. 아래 그림 7에서 '0', '-1', '1'은 그 위치에서 기울기의 변화 추이를 나타낸다. '0'인 경우는 해당 peak를 기준으로 기울기의 부호가 반대로 바뀌는 경우이고, '-1'일 때는 기울기가 계속해서 감소하는 경우, '1'일 때는 증가하는 경우이다. 이러한 추이에 대한 정보로 대략의 QRS complex의 모양을 알아낼 수 있고, R wave의 위치를 구할 수가 있다.

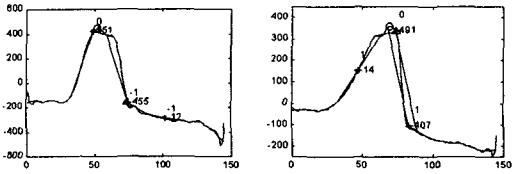

그림 7 기울기의 추이를 이용한 R-wave 검출 결과
Fig. 7 Detected R-wave using slope trend information

기울기의 대략적인 추이로도 판단이 어려운 경우에는 QRS complex의 검출 위치를 R-wave 위치로 했다.(그림 8)

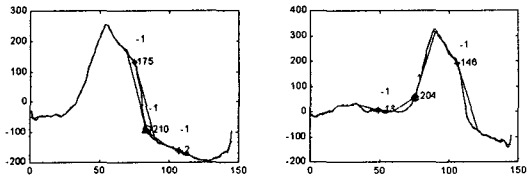

그림 8 QRS complex의 모양을 추정하기 어려운 경우. QRS complex의 검출 위치를 R-wave 검출위치로 잡음
Fig. 8 QRS complex can't be estimated by slope trend

III. RESULTS

제안한 알고리듬을 MIT/BIH arrhythmia database에 적용시킨 결과 109,465개의 beat 중에서 118개의 false negative(FN), 296개의 false positive(FP)로 약 99.6%의 QRS complex 검출 결과를 얻었다. 두 개의 채널중 하나의 채널(MLII)에 알고리듬을 적용했고, QRS complex 검출은 annotation 파일과 150msec 내에서 일치할 때, R-wave의 검출은 QRS complex 검출이 된 beat 중에서 annotation과 8msec (3 samp-les) 내에서 일치할 때를 true positive(TP)로 정의하였다. 150 msec 안에서 QRS complex를 검출하지 못하였을 경우는 무조건 false negative로 정의하였고, 150 msec 밖의 QRS complex가 아닌 부분을 검출하였을 경우는 false positive로 정의하였다. 평가 지표는 detection rate (D), sensitivity (Se), positive predictivity (+P), 세가지를 이용했고, 다음 식(1)~(3)으로 계산했다.

$$D = 100 - \frac{\#\text{ of FN} + \#\text{ of FP}}{\#\text{ of Total Beats}} \times 100 \qquad (1)$$

$$Se = \frac{\#\text{ of TP}}{\#\text{ of TP} + \#\text{ of FN}} \times 100 \qquad (2)$$

$$+P = \frac{\#\text{ of TP}}{\#\text{ of TP} + \#\text{ of FP}} \times 100 \qquad (3)$$

QRS complex와 R-wave peak의 검출 결과는 다음 표 1과 같다.

표 1 QRS complex 및 R-wave 검출 결과표

	D (Detection Rate)	Se (Sensitivity)	+P (Positive Predictivity)
QRS complex detection	99.6%	99.89%	99.73%
R-wave detection	92.9%	-	-

IV. CONCLUSIONS

본 연구에서는 single channel 심전도에서 QRS complex를 검출하고, 더 정확한 RR-interval 측정을 위해 R-wave를 검출하는 알고리듬을 제안했다. wavelet filter banks를 이용하여 심전도 신호를 QRS complex가 강조된 신호와 근사화된 신호를 얻고, synthesis filter의 특성에 따라 R-wave의 위치가 될 수 있는 후보점을 검출하였다. 각각의 후보점에서 적당한 조건을 만족시키는 점을 찾아 R-wave의 위치를 구했다. Annotation file과 비교하여 99.6%의 QRS complex 검출률을 보였고, 92.9%의 R-wave 검출률을 보였다.

V. ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 한국 과학재단 2000년도 특정기술연구 (과제명 : 휴대용 생체신호계측 및 분석연구) 지원하에 수행되었음.

VI. REFERENCES

[1] Thakor NV, Webster JG, Tompkins WJ : "Estimation of QRS Complex Power Spectra for Design of a QRS Filter", *IEEE Trans. Biomed. Eng.* Vol. BME-31, No. 11, pp. 702-705, 1984.

[2] Pan J, Tompkins WJ : "A Real-Time QRS Detection Algorithm", *IEEE Trans. Biomed. Eng.* Vol. BME-32, No. 3, pp. 230-236, 1986.

[3] Li C, Zheng C, Tai C : "Detection of ECG Characteristic Points Using Wavelet Transform", *IEEE Trans. Biomed. Eng.* Vol. BME-42, No. 1, pp. 21-28, 1995.

[4] Kadambe S, Murray R, Boudreaux-Bartels GF : "Wavelet Transform-Based QRS Complex Detector", *IEEE Trans. Biomed. Eng.* Vol. BME-46, No. 7, pp. 838-848, 1997.