

이산 웨이블릿 변환을 이용한 QRS군 검출 알고리즘 최적화

이 근 상*, 백 용 현*, 박 영 철**

Optimization of a QRS complex Detection Algorithm Using Discrete Wavelet Transform

Keun-sang Lee* · Yong-hyun Baek* · Young-chul Park***

요 약

본 논문에서는 운동 중 실시간 구현을 위해 정확한 QRS 검출이 가능한 이산 웨이블릿 연산을 임펄스 응답으로 근사화 하여 연산량을 줄였다. 또한, 지속적인 QRS 검출로부터 부정맥, 빈맥 그리고 서맥등의 정보를 제공한다. 제안 알고리즘은 운동 중 수집된 생체신호를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 평가한다.

ABSTRACT

In this study, Discrete Wavelet Transform(DWT), which can detect more correct QRS complex, approximated through impulse response for reducing complexity to suit real-time system during exercise. Also, rhythm information, which is Arrhythmia, Bradycardia and Tachycardia, is provided through continuously monitoring QRS complex. Proposed algorithm is evaluated by computer simulation of ECG signal that is measured during exercise.

Keywords : Discrete Wavelet Transform, ECG(Electrocardiogram), QRS complex, Fast Convolution, Impulse Response

1. 서 론

심전도(Electrocardiogram : ECG) 신호는 심장에서 발생하는 전기적 활동을 기록하는 것으로 P, Q, R, S, T와 같은 특정 점들로 구성되어 있다. 이런 특정 점들은 심장의 상태를 가늠하는 척도로 사용되고 있기 때문에 정확한 특정 점 검출이 필요하다.[1]

QRS 검출을 위해 다양한 방법들이 제시되어 왔다. 특히, 주파수 영역(Frequency Domain)에서 검출하는 것이 시간 영역(Time Domain)에서 검출하는 것 보다 잡음환경에서 강인하게 QRS 검출이 가능하다.[2] 주파수 영역 검출기로는 일정한 대역폭을 갖는 필터 뱅크(Filter Bank)와 임의의 대역폭을 갖는 웨이블릿 변환(Wavelet Transform)이 있다. 이때 연

* 연세대학교 전산학과 이학박사과정(ksang2@yonsei.ac.kr)

** 교신저자 연세대학교 컴퓨터정보통신기술학부 교수(young00@yonsei.ac.kr)

접수일자 : 2010년 7월 29일, 수정일자 : 2010년 8월 16일, 심사완료일자 : 2010년 8월 28일

속 웨이블릿 변환은 구현상의 문제 때문에 이산 웨이블릿 변환(Discrete Wavelet Transform)을 이용하여 QRS를 검출한다.[3] 이러한 이산 웨이블릿은 잡음 환경에 강인하게 QRS 검출을 할 수 있지만 많은 연산량이 요구되기 때문에 실시간에는 적합하지 못하다.

이에 본 논문에서는 이산 웨이블릿 변환의 임펄스 응답(Impluse Response)를 사전에 계측하여 한 번의 필터 연산을 통해 QRS 검출이 가능하도록 하였다. 운동 중에 계측된 ECG 신호로부터 실제 이산 웨이블릿 변환을 통해 얻은 결과와 제안하는 방법을 통해 얻은 결과를 비교함으로써 그결과의 유효성을 검증하였다. 또한, 지속적인 QRS 검출과 리듬분석을 통해 사용자 상태를 분석할 수 있다. 리듬분석은 서맥과 빈맥 그리고 부정맥등과 같은 상태 정보를 제공해 준다.[4]

본 논문의 구성은 2장에서 이산 웨이블릿 변환에 대해서 설명하고 3장에서 제안하는 방법인 임펄스 응답을 이용하여 QRS군을 검출과 리듬분석에 대해서 설명한다. 그리고 4장에서는 운동 중 수집된 ECG 신호를 이용해서 실험을 실시하였다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 이산 웨이블릿 변환(Discrete Wavelet Transform)을 이용한 ECG 신호 분석

다음 그림 1은 이산 웨이블릿 변환의 분해(Decomposition) 부분을 보이고 있으며, 합성(Reconstruction) 부분은 분해 구조와 대칭적인 구조를 갖고 있다. 이산 웨이블릿 변환은 저역 통과 필터(Low Pass Filter)와 고역 통과 필터(High Pass Filter)로 구성된 트리 구조를 갖고 있다.[5] 이러한 이산 웨이블릿 변환이 완벽 복원(Perfect Reconstruction)되기 위해서는 분해단과 합성단단의 필터들이 서로 QMF(Quadarature Mirror Filter)의 조건을 만족해야 한다.[4]

이산 웨이블릿 변환으로부터 ECG 신호를 분석하기 위해서는 일반적으로 8 단계(Level)의 분해를 수행한다. 이때 QRS군 주파수를 포함하고 있는 분해

단계는 3, 4 그리고 5단계이다. QRS 검출을 위해서는 3, 4 그리고 4 단계 분해 신호만을 취하여 합성시켜 주면 QRS 대역의 SNR을 크게 나타나기 때문에 QRS 검출에 용이하게 된다. 이때 QRS 검출 정확도는 99.54%를 보인다.[3]

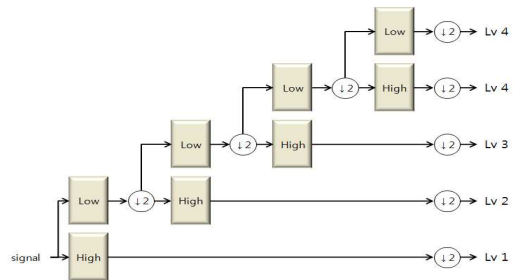


그림 1 이산 웨이블릿 변환 블록선도(분해)

III. 제안 알고리즘을 이용한 QRS 검출 및 리듬 분석(Rhythm Analysis)

제안하는 알고리즘은 다음 그림 2와 같은 구조를 갖는다. 먼저, 운동 중에 수집된 ECG 신호에 포함된 DC 성분과 고주파 영역에 포함되어 있는 잡음을 제거하는 전처리 과정과 이산 웨이블릿 변환의 임펄스 응답을 이용하여 QRS 검출을 수행하는 특정 점 검출 과정이다. 그리고 지속적으로 검출되는 QRS 정보로부터 사용자 상태를 분석하는 리듬분석 과정으로 구성되어 있다.

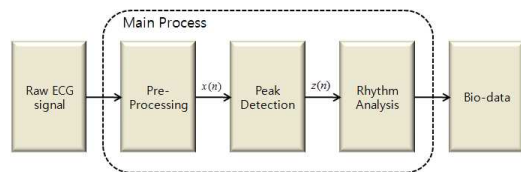


그림 2 제안 알고리즘 블록선도

3.1 임펄스 응답을 이용한 QRS 검출

2장에서 살펴보았듯이 이산 웨이블릿 연산은 QRS 검출을 위해 많은 연산량이 요구된다. 먼저, ECG 신호를 주파수 영역으로 분해 한 뒤에 QRS 대역만을 취하여 다시 합성 하는 과정을 거친다. N 단

계로 주파수 분해를 하게 된다면 QRS 검출까지는 총 $4N$ 번의 필터를 통과해야 한다. 이에 본 논문에서는 트리 구조를 갖는 이산 웨이블릿 변환의 임펄스 응답과의 합성 곱 연산을 수행 함으로써 근사화 하여 필터를 1번 통과하는 것으로 대체하였다. 다음 그림 3은 전체 이산 웨이블릿 연산을 수행한 결과와 임펄스 응답을 이용하여 근사화 한 결과를 비교한 것이다.

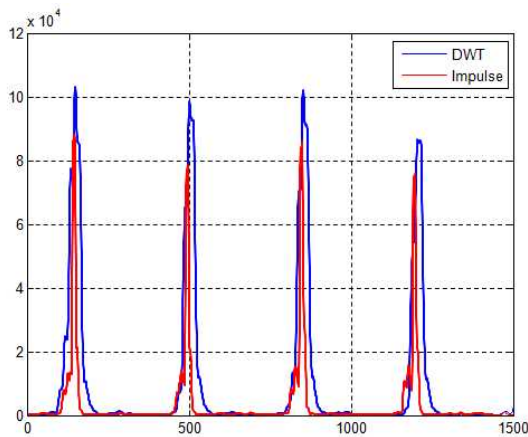


그림 3 이산 웨이블릿 연산과 임펄스 연산 결과 비교

그림 3으로부터 QRS 검출을 위해 이산 웨이블릿 결과와 임펄스 응답을 이용한 결과는 비슷한 것을 알 수 있다.

합성 곱 연산은 실시간 환경을 위해 여전히 연산량 부담을 갖기 때문에 고속 합성 곱을 이용하여 연산량을 줄일 수 있다. 다음 표 1은 일반적인 합성 곱과 고속 합성 곱의 연산량을 비교한 것이다.

표 1 합성 곱과 고속 합성 곱의 연산량 비교

	합성 곱	고속 합성 곱
덧셈	$N(N-1)$	$3N\log_2 N$
곱셈	N^2	$N + \frac{3N}{2}\log_2 N$

본 논문에서는 고정된 임펄스 응답을 사용하기 때문에 고속 합성 곱의 연산은 $2N\log_2 N$ 의 덧셈과

$N + M\log_2 M$ 번의 곱셈 연산만으로도 QRS 검출이 가능하다. 다음 그림 4는 임펄스 응답을 이용해서 QRS 검출을 수행하는 특정 점 검출 알고리즘의 블록선도를 보이고 있다.

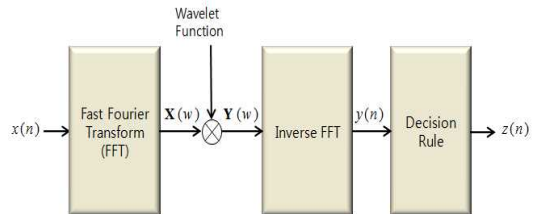


그림 4 특정 점 검출 알고리즘 블록선도

특정 점 검출 알고리즘은 전처리 과정을 거친 ECG 신호 $x(n)$ 을 FFT를 이용하여 주파수 변환하여 $X(w)$ 를 얻는다. 여기에 미리 주파수 변환된 임펄스 응답과 주파수 빈 별로 곱하여 $Y(w)$ 를 얻고 다시 역 FFT를 이용해서 $y(n)$ 을 얻는다. 이때 $y(n)$ 은 QRS 대역에서 큰 에너지를 갖게 되며 검출 법칙 (Decision Rule)에 의해 QRS를 검출하게 된다.

3.2 리듬 분석을 통한 사용자 상태 분석

본 논문에서는 부정맥(Arrythmia)을 통한 리듬 분석으로부터 사용자의 상태를 판단한다. 부정맥은 심장의 규칙적인 수축이 계속되지 못하여 발생하는 것으로 비정상적으로 빨라지는 빈맥(Tachycardia) 또는 느려지는 서맥(Bradycardia) 그리고 불규칙해지는 불규칙성 부정맥이 있다.[4] 부정맥이 발생하면 가슴 두근거림을 호소하게되고, 호흡곤란, 현기증, 실신등의 증상이 나타난다. 심한 경우에는 순간적으로 심장 기능이 완전히 마비되어 심장마비로 급사할 수 도 있다.

이에 본 논문에서는 운동 전과 후에 지속적으로 리드 분석을 수행하여 사용자의 상태를 판단함으로써 운동의 지속 여부를 결정하는 기준을 제공해 준다. 리듬 분석은 현재 BPM(Beat Per Minute)을 기준으로 120BPM 이상일 때면 빈맥, 35BPM 이하일 때는 서맥 그리고 이전 5번의 RR interval 평균 BPM의 92%에서 116% 구간을 벗어 났을 때를 부정

맥이라 정의한다. 이와 같은 리듬분석은 그림 5와 같은 순서도를 갖는다.[4]

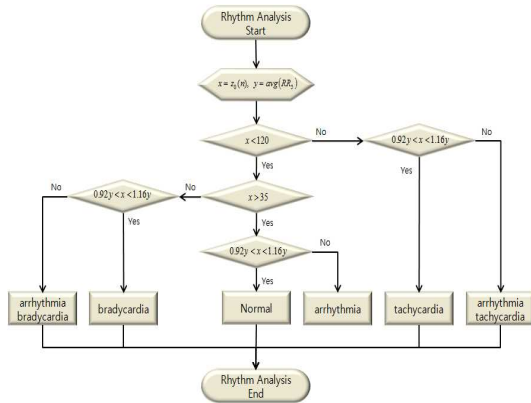


그림 5 리듬 분석을 위한 순서도

IV. 실험 및 결과

제안 알고리즘을 평가하기 위해 운동 중에 수집된 ECG 신호로부터 QRS 검출을 실시하였다. 이때 운동 전과 후에 리듬 분석을 통해 사용자의 상태를 미리 판단하고 운동의 지속 여부를 결정한다.

다음 그림 6은 12km로 트레드밀(Treadmill)을 뛰었을 때 약 10초 동안 수집된 ECG 신호로 잡음의 영향으로 인해 왜곡이 발생하는 것을 볼 수 있다.

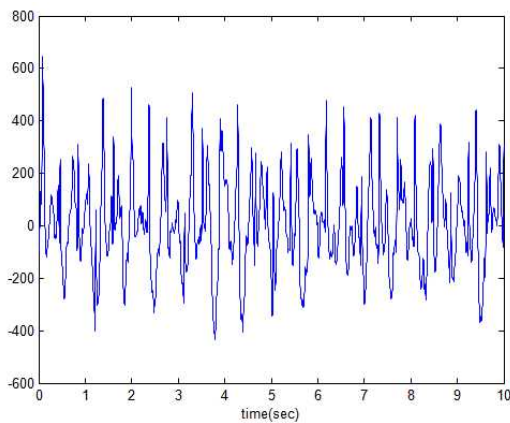


그림 6 운동 중 수집된 ECG 신호

이때, 제안 알고리즘을 이용하여 QRS 검출을 실

시하였으며, QRS의 R peak 검출을 실시하였으며, 다음 그림 7과 같은 결과를 보이고 있다.

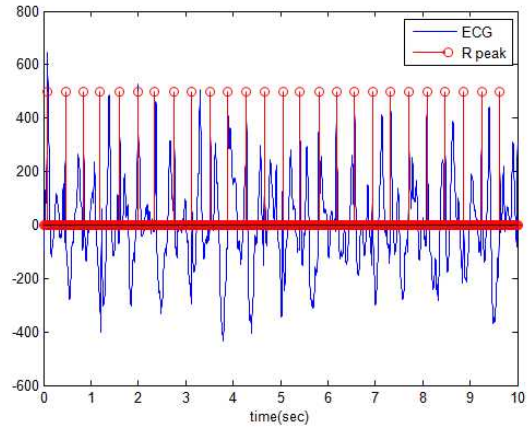


그림 7 운동 중 R peak 검출

그림 7에서 R파들이 등간격으로 검출되는 것을 확인 할 수 있다. 이때, 큰 피크들은 QRS뿐만 아니라 잡음에 의해 비정상적으로 큰 진폭을 갖는 T파도 포함되어 있음에도 불구하고 제안 알고리즘은 T파가 아닌 QRS 파만 검출하는 것을 결과로부터 확인하였다.

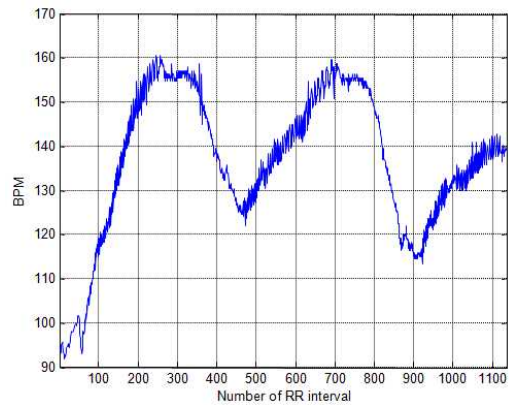


그림 8 운동 중의 BPM의 변화

리듬분석을 위해 심장질환이 있는 사람을 대상으로 실험을 수행해야 하지만 위험 부담이 크기 때문에 제안 알고리즘의 성능 평가를 위해 3km부터

12km까지 약 10분 동안 반복적으로 운동하는 환경에서 리듬분석을 실시하였다. 다음 그림 8은 운동 중 검출한 QRS로부터 BPM(Bit Per Minute)을 측정한 것이다.

심장 질환이 없는 실험대상자를 선정하였기 때문에 부정맥 질환은 나타나지 않아야 하며 운동 중에 빈맥이 나타나야 하지만 서맥은 나타나지 않아야 한다. 이러한 결과를 예측하였을 때 리듬 분석의 결과는 다음 그림 9와 같다.

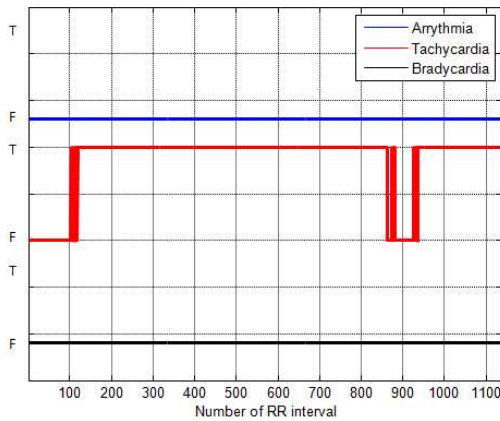


그림 9 리듬 분석

그림 9의 위에서부터 부정맥, 빈맥 그리고 서맥을 나타내는 그래프로 이와 같은 질환이 발생 하였을 때는 발생(T), 발생하지 않음(F)를 보인다. 그림 8과 비교해 보았을 때 빈맥은 약 120BPM 이상일 때 나타나는 것을 알 수 있다.

이러한 실험 결과들로부터 제안 알고리즘은 12km 이상의 운동 중에도 정확한 QRS 검출이 가능하며, 이것으로부터 정확한 리듬분석을 수행 할 수 있다. 비록 리듬분석은 운동 전과 후에 시행 되어야 하지만 고강도 운동 중에도 정확한 결과를 얻는 것으로 부터 안정시에도 정확한 리듬분석이 가능함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 99.54%의 검출 정확도를 보이는 이산 웨이블릿 연산의 임펄스 응답을 이용하여 한

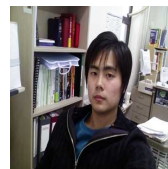
번의 필터 연산으로 이산 웨이블릿 연산을 근사화 하여 연산량을 줄이고 실시간 연산이 가능하도록 하였다. 또한, 운동 전 후에 리듬 분석을 통해 운동 지속 여부를 결정하는 정보를 제시하였다. 제안 알고리즘의 성능 평가를 위해 고강도 운동 중 수집된 ECG 신호로부터 QRS 검출과 리듬분석을 수행하였다. 실험 결과로부터 운동 중에도 정확한 QRS 검출 및 리듬 분석이 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. Pan, W.J. Tompkins, "A Real-time QRS detection algorithm", IEEE trans. Biomed. Eng., Vol. 24, 139-146, 1991
- [2] Köhler, B.U., Hennig, C., Oehlmeister, R.: The principles of software QRS detection. Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE 21(1) (2002) 42 - 57
- [3] M. Rudnicki, P. Strumillo "A Real-Time Adaptive Wavelet Transform-Based QRS Complex Detector", Springer, pp. 281-289, 2007
- [4] Tompkins, W.J., "Biomedical Digital Signal Processing" Prentice-Hall International, Inc. (1993)
- [5] Gilbert Strang, Truong Nguyen, "Wavelets and filter Banks", Wellesley, MA, Wellesley Cambridge Press, 1996

저자약력

이 근 상 (Lee Keun Sang)



2006년 연세대학교 컴퓨터정보통신
기술학부 공학사

2010년 연세대학교 전산학과
이학석사

2010년-현재 연세대학교 전산학과
이학박사 과정

<관심분야> 디지털 신호처리, 음성/오디오 신호 처리, 적응 필터, ECG

백 용 현 (Baek Yong Hyun)



2009년 연세대학교 컴퓨터 정보
통신 기술학부 공학사
2009년-현재 연세대학교 전산학과
이학석박사통합과정

<관심분야> 디지털 신호처리, 음성/오디오 신호
처리, 적응 필터, PPG

박 영 철 (Park Young Chul)



1986년 연세대학교 전자공학과
공학사
1988년 연세대학교 전자공학과
공학석사
1993년 연세대학교 전자공학과
공학박사

2002년-현재 연세대학교 컴퓨터정보통신 공학부 교수

<관심분야> 디지털 신호처리, 음성/오디오 신호
처리, 적응 필터, 3D 오디오