

낮은 샘플링 주파수를 가지는 심전도 신호를 이용한 심박 간격 추정 알고리즘

Heart Beat Interval Estimation Algorithm for Low Sampling Frequency Electrocardiogram Signal

최 병 훈*
(Byunghun Choi)

Abstract - A novel heart beat interval estimation algorithm is presented based on parabola approximation method. This paper presented a two-step processing scheme; a first stage is finding R-peak in the Electrocardiogram (ECG) by Shannon energy envelope estimator and a secondary stage is computing the interpolated peak location by parabola approximation. Experimental results show that the proposed algorithm performs better than with the previous method using low sampled ECG signals.

Key Words : Electrocardiogram (ECG), peak detection, parabola approximation

1. 서 론

현재에는 평균 수명이 길어지면서 건강에 대한 관심이 증가하고 있다. 그래서 심전도, 산소포화도, 근전도, 혈압 등 병원에 가야만 측정 가능했던 다양한 생체신호를 웨어러블 기기나 모바일 기기에서 측정할 수 있는 상용제품들이 많은 주목을 받고 있다. 특히 심전도계의 경우 심질환을 조기에 진단하거나 질환이 있거나 의심되는 환자들의 질환 관리를 위해 사용이 가능하기 때문에 심전도와 관련한 신호 처리 알고리즘의 필요성이 높아지고 있다.

기존의 Electrocardiogram (ECG) R-peak 검출 알고리즘은 다양한 방법들이 연구되어 왔지만 웨어러블 장치나 모바일 장치와 같이 한정적인 전력과 계산능력을 가진 디바이스에서 사용하기에는 부족한 부분들이 있다[1-12]. 특히 실제 R-peak를 찾는 로직에서의 정밀도는 취득된 ECG 신호의 샘플링 주파수에 좌우되는 단점이 존재한다. 낮은 샘플링 주파수로 얻어진 ECG 신호에서의 R-peak는 높은 주파수로 측정된 신호에서의 peak의 위치와 상당한 오차를 보일 수밖에 없다(그림 1). 이러한 단점을 극복하고자 본 논문에서는 웨어러블 기기 및 모바일 기기를 위한 저전력과 높은 정확도를 동시에 만족하는 R-peak 추정 알고리즘을 제안하고자 한다. 그리고 추정된 R-peak의 위치를 바탕으로 RR interval (RRI) 값을 출력하여 높은 샘플링 주파수로 얻어진 ECG 신호의 RRI값과 비교하고자 한다.

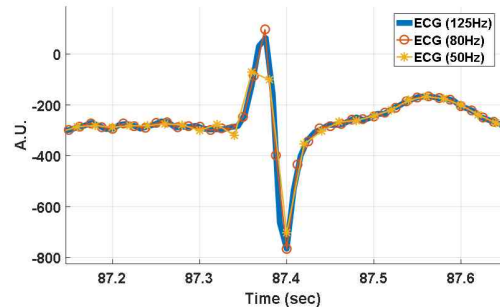


그림 1 다양한 샘플링 주기의 ECG 신호

Fig. 1 ECG signals with various sampling rate

2. 본 론

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 크게 두 단계로 나누어져 있다. 첫 번째 단계는 ECG 신호에서 R-peak의 위치를 찾기 위한 단계이고 두 번째 단계는 낮은 샘플링 주파수로 인해 발생한 오차를 줄이기 위해 parabola approximation 방법을 통해 실제 R-peak의 위치를 추정하는 단계이다. 이러한 두 단계를 통해 낮은 샘플링 주파수에서도 높은 정확도로 ECG신호에서의 RRI를 추정하고자 한다. 제안하는 알고리즘의 흐름도는 아래 그림과 같다.

2.1 R-peak 검출 알고리즘

ECG신호에서 R-peak를 검출하기 위해 다양한 방법들이 존재

* Corresponding Author : LG Electronics CTO, Korea.

E-mail : fleachoi@gmail.com

Received : May 11, 2018; Accepted : May 21, 2018

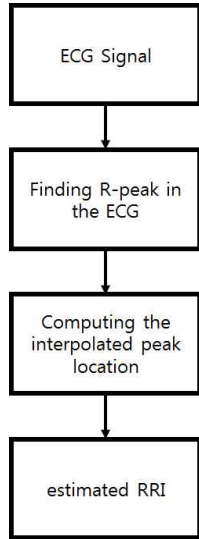


그림 2 제안하는 심박간격 추정 알고리즘
 Fig. 2 Proposed RRI estimation algorithm

한다. 이러한 방법들은 대부분 ECG신호에서 빠르게 변화하는 R-peak의 특징을 이용하기 위해 differencing 방법을 사용한다. 본 논문에서는 기존에 제안된 여러 가지 방법 중 간단하면서도 잡음에 강인한 Shannon energy envelope 기반의 알고리즘을 사용하였다. 사용된 알고리즘의 블록도는 아래와 같다

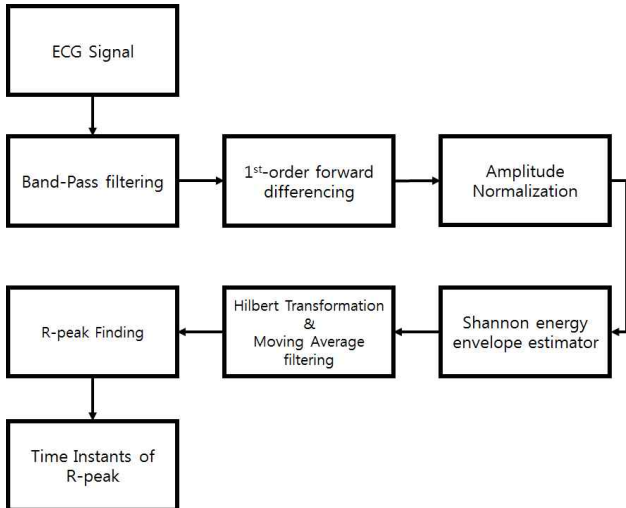


그림 3 R-peak 검출 알고리즘 블록도
 Fig. 3 Block diagram of R-peak detection algorithm

2.2 Parabola 근사법

Parabola 보간법은 Discrete Fourier Transform을 통한 주파수 스펙트럼에서 peak값을 추정하기 위해 사용되는 방법 중 하나이다[13-15]. 가장 큰 값을 나타내는 peak 점과 그 전후의 값

을 이용하여 parabola 근사화를 진행한다. 만약 가장 큰 값을 나타내는 점의 좌표가 $(0, x_0)$ 라고 하고 그 전후의 값이 각각 $(-1, x_{-1}), (1, x_1)$ 이라고 한다면 세 점을 지나는 2차식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f(x) = a(x - \delta)^2 + b \tag{1}$$

$$f(-1) = x_{-1} = a\delta^2 + 2a\delta + a + b \tag{2}$$

$$f(0) = x_0 = a\delta^2 + b \tag{3}$$

$$f(1) = x_1 = a\delta^2 - 2a\delta + a + b \tag{4}$$

$$x_{-1} - x_1 = 4a\delta \tag{5}$$

$$x_{-1} = a\delta^2 + 2a\left(\frac{x_{-1} - x_1}{4a}\right) + a + (x_0 - a\delta^2) \tag{6}$$

$$a = \frac{1}{2}(x_{-1} - 2x_0 + x_1)$$

$$\Rightarrow \delta = \frac{x_{-1} - x_1}{4a} = \frac{1}{2}\left(\frac{x_{-1} - x_1}{x_{-1} - 2x_0 + x_1}\right) \tag{7}$$

여기서 δ 는 보간법을 이용한 후의 peak의 위치이다. 위 식을 샘플링 된 데이터를 이용하여 그림으로 표현하면 아래와 같다. Parabola 근사화를 통해 낮은 샘플링 주파수를 가지는 신호에서도 peak의 위치를 보정할 수 있으며 기존의 spline과 같은 보간법과 다르게 간단한 계산식 (7)을 통해 빠르게 peak 위치를 계산할 수 있다.

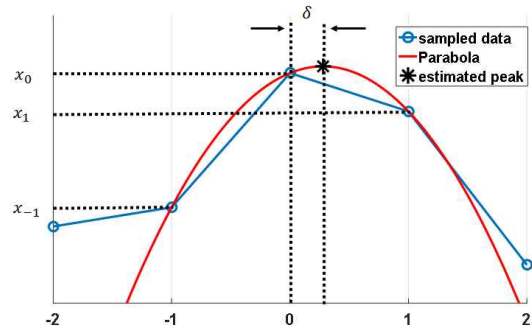


그림 4 Parabola 근사법을 이용한 peak 검출
 Fig. 4 Peak detection method based on parabola approximation

2.3 성능 검증 방법

제안된 알고리즘의 성능검증을 위해 IEEE Signal Processing Cup 2015 데이터베이스를 사용하였다. IEEE Signal Processing Cup 2015 데이터베이스는 운동 중 측정된 ECG 신호를 비롯하여 Photoplethysmography 센서 신호와 가속도 센서 신호가 포함되어 있다. 20개의 데이터 set 중 4개의 데이터 set을 사용하였고

측정된 ECG 신호가 125Hz로 샘플링 되어 cubic spline 보간법을 이용하여 1kHz로 보간하여 기준 신호로 사용하였다. 그리고 낮은 샘플링 신호를 만들기 위해 기준 ECG신호를 down-sampling하였다.

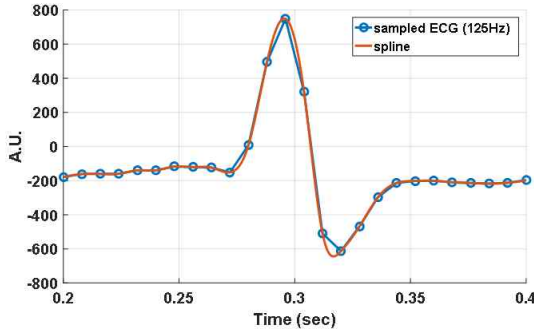


그림 5 ECG 신호
Fig. 5 ECG signal

낮은 샘플링 주파수 신호에를 이용한 peak 검출 알고리즘의 성능 비교를 위해 기준 ECG 신호에서 측정된 RRI, SDNN, RMSSD 값과 알고리즘에서 출력된 값을 비교하였다. 각각의 지표들은 root-mean-squared error (RMSE)를 통해 비교하였다. RRI, SDNN, RMSSD, RMSE는 각각 아래 수식을 통해 구하였다.

$$RRI(n) = R_{peak}(n+1) - R_{peak}(n) \quad (8)$$

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=2}^N \left[RRI(n) - \frac{1}{N-1} \sum_{n=2}^N RRI(n) \right]^2} \quad (9)$$

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=3}^N [RRI(n) - RRI(n-1)]^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (estimated X_i - refence X_i)^2} \quad (11)$$

여기서 X_i 는 RRI와 SDNN, RMSSD값을 나타냄.

3. 결 론

본 논문에서는 IEEE Signal Processing Cup 2015 데이터베이스에서 4데이터 set을 이용하여 1kHz 샘플링 주파수를 가지는 기준 ECG신호를 발생시키고 기존 peak 검출 알고리즘을 통해 RRI와 SDNN, RMSSD값을 구하였다. 그리고 50Hz~200Hz로 down-sampling된 ECG신호를 이용하여 기존 방법과 제안된 방법을 이용하여 각각 RRI, SDNN, RMSSD값을 구하고 기준 ECG 신호를 이용한 결과 값과의 RMSE를 구하여 알고리즘을 비교하였다.

그림 6은 기준 ECG에서 구하 RRI 값과 50Hz로 down-sampling된 ECG 신호에서 R-peak를 검출하여 구한 RRI, 그리고 제안된 알고리즘을 통해 구한 RRI값을 출력한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 낮은 샘플링 주파수에서 오직 peak값만을 사용하여 RRI를 구하게 되는 1개 샘플끼리의 시간차로 인해 큰 오차가 발생하게 된다. 하지만 제안된 방법을 통해 peak의 위치를 보정해주게 되면 그 오차를 줄일 수 있다. 또한 그림 7은 50Hz로 샘플링된 ECG신호에서 출력한 RRI와 기준 ECG신호에서 출력한 RRI의 블랜드-앨트먼 도표이다. 50Hz로 샘플링된 신호에서의 RRI 오차는 0.11 ± 9.00 이고 제안된 알고리즘의 오차는 0.11 ± 5.07 로 나타났다. 이 도표를 통해서도 제안된 알고리즘이 오차를 줄이는데 효과적인 방법임을 확인할 수 있다.

그림 8~그림 10은 각각 기존 R-peak만을 구하는 방법과 제안된 방법을 통해 계산한 RRI, SDNN, RMSSD값을 기준 ECG신호를 이용하여 측정된 값과의 RMSE를 구한 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 기존의 알고리즘의 경우에는 샘플링 주파수가 높아지면 RRI, SDNN, RMSSD값의 오차가 작아진다. 즉 낮은 샘플링 주파수에서는 기존 알고리즘의 경우 큰 오차를 피할수 없다. 하지만 제안된 알고리즘의 경우 parabola 근사법을 통해 peak값을 보상해 줌으로써 낮은 샘플링 주파수에서의 오차가 높음 샘플링 주파수에서의 오차와 큰 차이가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

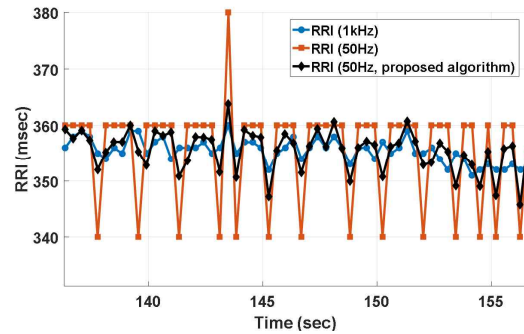


그림 6 RRI
Fig. 6 RRI

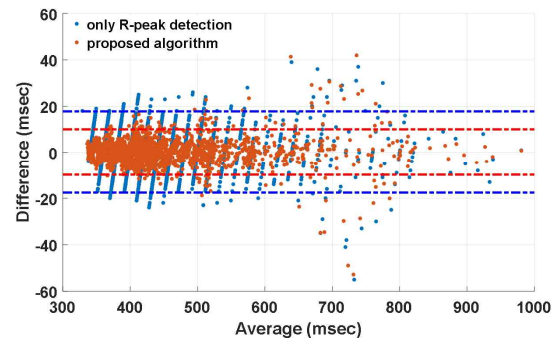


그림 7 블랜드-앨트먼 도표
Fig. 7 Bland-Altman plot

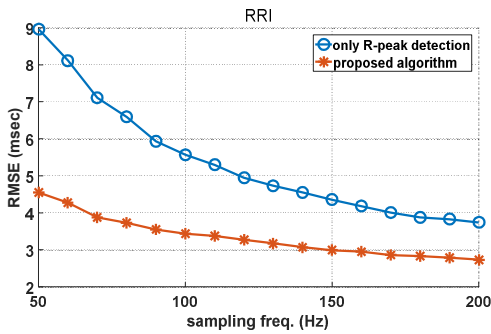


그림 8 RMSE (RRI)

Fig. 8 RMSE (RRI)

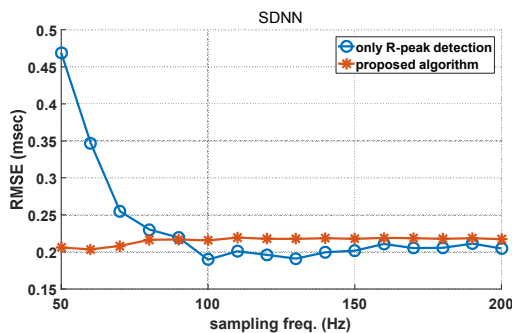


그림 9 RMSE (SDNN)

Fig. 9 RMSE (SDNN)

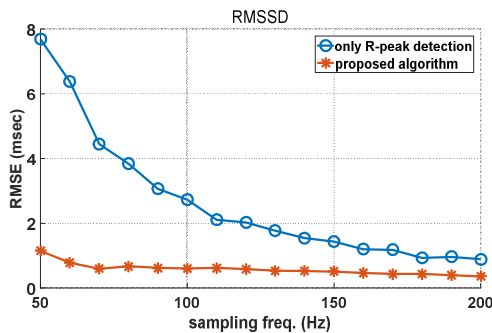


그림 10 RMSE (RMSSD)

Fig. 10 RMSE (RMSSD)

References

- [1] Pan, Jiapu, and Willis J. Tompkins, "A real-time QRS detection algorithm", *IEEE transactions on biomedical engineering* 3 (1985): pp. 230-236.
- [2] Benitez, Ds S., et al. "A new QRS detection algorithm based on the Hilbert transform", *Computers in Cardiology 2000. IEEE*, 2000.
- [3] Huang, Boqiang, and Yuanyuan Wang. "Detecting QRS complexes of two-channel ECG signals by using combined wavelet entropy", *Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2009. ICBBE 2009. 3rd International Conference on. IEEE*, 2009.
- [4] Friesen, Gary M., et al. "A comparison of the noise sensitivity of nine QRS detection algorithms", *IEEE Transactions on biomedical engineering* 37.1 (1990): pp. 85-98.
- [5] Li, Cuiwei, Chongxun Zheng, and Changfeng Tai. "Detection of ECG characteristic points using wavelet transforms", *IEEE Transactions on biomedical Engineering* 42.1 (1995): pp. 21-28.
- [6] Nimunkar, Amit J., and Willis J. Tompkins. "R-peak detection and signal averaging for simulated stress ECG using EMD", *Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE. IEEE*, 2007.
- [7] Sasikala, P., and R. Wahidabanu. "Robust r peak and qrs detection in electrocardiogram using wavelet transform", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications-IIACSA* 1.6 (2010): pp. 48-53.
- [8] Sufi, Fahim, Qiang Fang, and Irena Cosic. "ECG RR peak detection on mobile phones", *Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE. IEEE*, 2007.
- [9] Makwana, Nikunj Hasmukhbhai, et al. "Hilbert transform based adaptive ECG R-Peak detection technique", *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 2.5 (2012): p. 639.
- [10] Manikandan, M. Sabarimalai, and K. P. Soman. "A novel method for detecting R-peaks in electrocardiogram (ECG) signal", *Biomedical Signal Processing and Control* 7.2 (2012): pp. 118-128.
- [11] Sadhukhan, Deboleena, and Madhuchhanda Mitra. "R-peak detection algorithm for ECG using double difference and RR interval processing", *Procedia Technology* 4 (2012): pp. 873-877.
- [12] Kew, Hsein-Ping, and Do-Un Jeong. "Variable threshold method for ECG R-peak detection", *Journal of medical systems* 35.5 (2011): pp. 1085-1094.
- [13] Voglewede, P., Parabola approximation for peak determination. *Global DSP Mag.* 3:13-17, 2004.
- [14] Jacobsen, Eric, and Peter Kootsookos. "Fast, accurate frequency estimators [DSP Tips & Tricks]", *IEEE Signal Processing Magazine* 24.3 (2007): pp. 123-125.
- [15] Baek, Hyun Jae, et al. "Reliability of the Parabola Approximation Method in Heart Rate Variability Analysis Using Low-Sampling-Rate Photoplethysmography", *Journal of medical systems* 41.12 (2017): p. 189.

저 자 소 개



최 병 훈 (Byunghun Choi)

1974년 4월 4일생. 2009년 서울대학교 협동과정 의용생체공학 전공 졸업(공학박사). 2009년~2016년 삼성전자 무선사업부 연구원, 2017년~현재 LG전자 CTO부분 인공지능연구소 책임 연구원

Tel : 031-216-3487

E-mail : fleachoi@gmail.com