

유사 주기성을 이용한 PFS 펄스 신호의 동잡음 제거

이한욱*, 전중창**, 정원근***

Removing the Motion Artifacts in the Pulse Signal Detected from the PFS Using the Quasi-periodicity

Han-Wook Lee*, Joong-Chang Chun**, Won-Geun Jeong***

요약 모바일 헬스케어 환경에서는 정확한 생체 정보를 실시간으로 측정하는 것과 함께, 저전력의 장치를 설계하는 것이 무엇보다 중요한 관건이다. 본 논문에서는 저전력 특성을 갖는 피에조 펄스 센서(PFS)를 이용하여 손목의 요골 동맥으로부터 심장의 동기 신호인 맥파를 측정하는 방법을 제안하였다. 생체 신호처리에 있어서 문제점은 동잡음의 존재이다. 본 연구에서는 맥파 신호의 동잡음을 제거하기 위해서 일반적으로 적용되는 참조신호를 이용한 적응 필터링 외에 펄스 신호의 유사 주기성을 이용한 주기 이동 평균 필터 방법을 추가로 적용하였다. 시뮬레이션 및 실험 결과 PFS 신호에 유사 주기성을 이용함으로써 적응 필터 이후에도 존재하는 동잡음을 완벽히 제거할 수 있음을 확인 하였다.

Abstract For the mobile healthcare environment, it is important to measure the exact biomedical signals in real time, and another key point is to design mobile healthcare devices with low power consumption. In this paper, we propose a method in which the piezo film sensor(PFS), having a low power characteristic, is used to measure the pulse signal synchronized with the heart rate from the radial artery. The critical issue in the bio-signal processing is the existence of the motion artifacts. To dissolve this problem, we have applied the periodic moving average filter using the quasi-periodicity of the pulse signal in addition to the conventional method of the adaptive filtering using the reference signal. Results of simulation and experiments are presented to confirm that the quasi-periodicity of the PFS signal can be used to eliminate completely the motion artifacts which still appears after the adaptive filtering.

Key Words : biomedical information, piezo film sensor, pulse, ubiquitous healthcare

1. 서론

고령화 사회로의 진입과 삶의 질 향상에 대한 욕구는 의료 서비스 패러다임을 질병의 진단과 치료에서 예방과 관리로 자연스럽게 변화시키고 있다. 이를 위해서는 지금까지의 정확한 생체 정보의 측정을 목표로 했던 휴대용 건강 상태 모니터링 시스템들의 형태도 좀 더 생활 친화적인 형태로 개발되기를 요구되어지고 있다. 지금까지 모바일

헬스케어 환경에서 심박수와 SpO2 등의 생체 정보를 검출하기 위해 가장 많이 사용해 온 센서는 광센서이고 수년간 광센서를 모바일 헬스케어 환경에 사용하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다 [1]-[4]. 특히 스마트 watch의 출현으로 스마트 watch를 착용한 사람의 손목으로부터 광센서로 레코딩된 PPG(Photoplethysmography) 신호를 사용한 헬스케어와 피트니스용 스마트 밴드는 산업계와 학

This work was supported by Gyeongnam National University of Science and Technology Grant in 2016.

*Department of Electronic Engineering, Gyeongsang National University

**Corresponding Author : Department of Electronic Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology(jcchun@gntech.ac.kr)

***Smart Electronics, Daegu Campus of Korea Polytechnic

Received December 03, 2016

Revised December 13, 2016

Accepted December 15, 2016

계의 새로운 연구 주제가 되었다[5]. 그러나 모바일 헬스케어 환경에서는 저전력 시스템에 대한 요구가 계속되고 있다. 이에 본 논문에서는 모바일 헬스케어 환경에 사용할 수 있도록 저전력 센서인 피에조 필름 센서(Piezo Film Sensor: PFS)를 이용하여 손목의 노동맥(Radial artery)으로부터 심장 박동에 동기한 맥파 신호를 검출하고 검출된 신호의 신뢰성을 확보하여 모바일 헬스케어 시스템에 적용하기 위하여 신호에 포함된 동잡음 제거 방법을 제시하고자 한다.

PFS는 진동이나 힘을 가했을 때 가해진 힘의 크기에 비례하여, 압전 결정에 압력이나 비틀림을 주어 전압이 발생하는 얇고 가벼운 센서이다. PFS는 여러 분야에서 진동감지, 충격감지, 스피커 등의 용도로 사용되고 있고, 최근 의료용으로 전자 청진기, 맥박 감지, 환자 감지용 침대 센서 등의 용도로 사용되고 있다[5]. 저전력 모바일 시스템에 대한 요구가 커짐에 따라 헬스케어 분야에서도 PFS를 이용하여 펄스 신호를 검출하고, 검출된 신호와 심전도 및 PPG 신호와의 동기성, 특징점 등에 대한 연구가 필요한 상황이다. 이를 위해서는 PFS로부터 검출된 펄스 신호의 동잡음을 제거하는 방법에 관한 연구가 우선적으로 선행되어야 한다. 이에 본 논문에서는 PFS를 통해 심박에 동기한 펄스 신호를 검출하고, 검출된 펄스 신호에 포함된 사람의 움직임에 의한 잡음인 동잡음을 제거하기 위한 방법을 제시한다.

2. 본론

광센서에 의한 PPG 신호와 PFS로부터 검출한 펄스 신호를 그림 1에 나타내었다. 최근까지 심박수 검출 등 다양하게 이용되고 있는 PPG신호는 심박에 동기하여 발생하는 혈류량의 용적 변화에 의한 신호이고, PFS에 의한 펄스 신호는 노동맥의 박동을 직접 센싱한 신호이다. 그림 2에 나타난 것처럼 PFS에 의한 펄스 신호는 PPG 신호에 비해 주파수 스펙트럼의 분포가 다양하고, 신호의 모양도 복잡하여 신호처리가 어렵다. 그러나 PPG신호

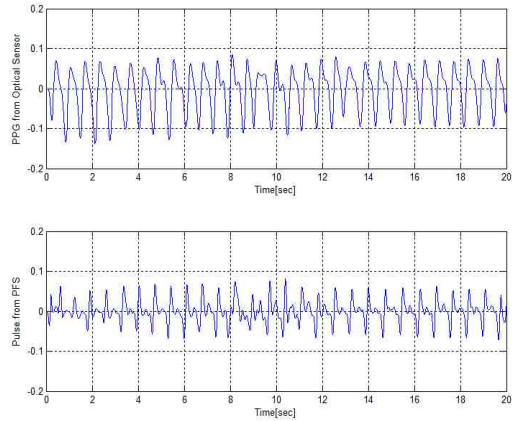


그림 1. 광센서 PPG 신호 및 PFS 펄스 신호

Fig. 1. Optical PPG signal and PFS pulse signal

와 달리 광잡음에 영향을 받지 않고 심장 박동에 동기한 펄스 신호의 검출점이 명확하므로 사용자의 움직임에 의한 동잡음만 정확히 제거할 수 있다면 PFS에 의한 펄스 신호를 이용하여 심박수와 HRV 등의 생체 정보 측정이 가능할 것으로 기대된다.

2.1 동잡음 제거 방법

헬스케어 장비들이 모바일화 되면서 동잡음의 진폭은 커지고 주파수 스펙트럼의 분포도 다양해져 혼입된 동잡음을 제거하기 어렵다. 이에 생체 신호의 동잡음을 제거하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다[7][8]. 이러한 연구들은 진폭이 크고, 주파수가 생체 신호의 주기보다 큰 동잡음을 제거하기에는 적합하지만, 동잡음 참조 신호를 획득하기 위한 모듈이 커서 휴대형 장치에 적용하기 어렵거나[7] 진폭이 크고 생체 신호의 주기보다 큰 주기를 갖는 동잡음 제거 이후 검출율을 높이기 위하여 후처리 과정이 필요하다[8].

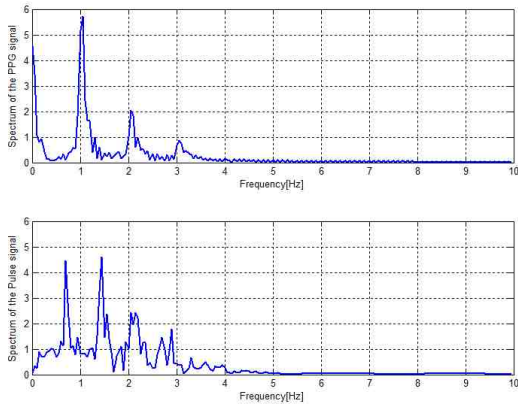


그림 2. PPG 신호 및 PFS 펄스 신호의 주파수 스펙트럼
 Fig. 2. Frequency spectrum of the PPG signal and the PFS pulse signal

그림 3에 본 논문에서 제시한 동잡음 제거 방법에 대한 블록도를 나타내었다. 본 논문에서는 연구 결과를 모바일 헬스케어 필드에 적용하기 위하여 펄스 신호의 획득 위치를 손목으로 결정하였다. 손목에 위치한 노동맥에 PFS를 위치시키고, 노동맥 파에 의한 심장 박동 동기 신호인 펄스 신호를 검출하였다. 직접 손목에 접촉한 PFS로부터 펄스 신호를 얻고, 스펀지를 덧대어서 펄스 신호의 영향을 없앤 PFS로부터 얻은 신호를 동잡음 참조 신호로

사용하였다. 두 신호를 증폭하고 대역통과 필터링한 후, 적응필터의 입력신호로 사용하였다.

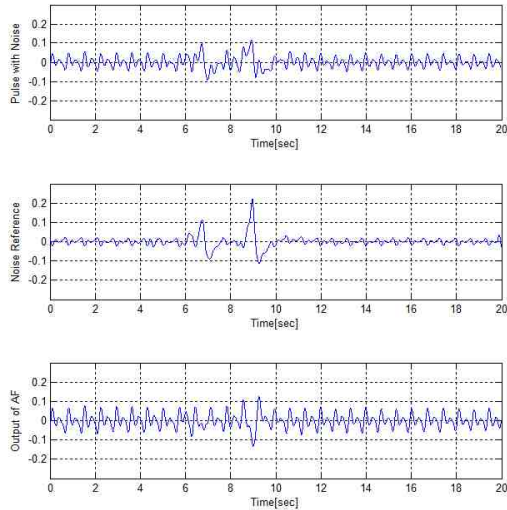


그림 4. 적응필터링 결과
 Fig. 4. Results of the Adaptive filter

2.2 적응필터

지금까지 생체 신호의 동잡음 제거를 위해 적응필터를 적용한 많은 연구가 진행되어 왔다[7]-[10]. 본 논문에서는 이러한 연구 중 PFS를 사용하여

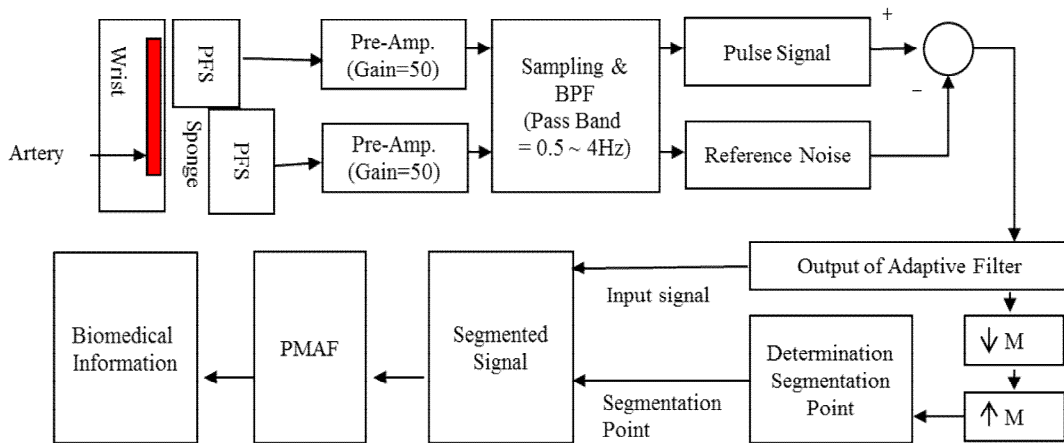


그림 3. 제안된 시스템의 블록도
 Fig. 3. Block diagram of the proposed system

펄스 신호를 검출한 후, 적응 필터링한 방법[8]을 적용하여 필터링해 본 결과 진폭이 크고 펄스 신호의 주기보다 큰 주기를 갖는 동잡음 제거에는 우수한 성능을 보이지만 주파수 대역이 겹치는 구간의 동잡음이 완벽하게 제거되지 않음을 그림 4의 결과를 통해 확인할 수 있었다. 그림 4에 PFS를 통해 검출한 동잡음이 유입된 펄스 신호와 참조신호용 PFS에 의해 검출한 동잡음 참조 신호, 적응 필터링의 결과 신호를 차례로 나타내었다. 6~10초 구간에 발생한 동잡음을 적응 필터링으로 제거한 결과 우수한 출력파형을 얻을 수 있었지만, 8~10 구간은 동잡음이 완벽하게 제거되지 못한 것을 확인할 수 있다. 이에 본 논문에서는 펄스 신호의 주파수 대역과 겹치는 동잡음을 제거하기 위하여 펄스 신호의 유사주기성을 이용하여 후처리 과정을 진행함으로써 펄스 신호를 생체 신호로 응용할 수 있는 신뢰성을 확보할 수 있었다.

2.3 유사 주기성을 이용한 동잡음 필터

기존의 PPG 신호의 동잡음을 제거하기 위해 PPG 신호의 유사주기성을 이용한 연구들이 진행되어왔다[10][11]. PFS에 의한 펄스 신호도 PPG 신호와 같이 심장 박동에 동기된 유사 주기신호이다. 본 논문에서는 적응 필터링을 통해 완전히 제거되지 못하는 펄스 신호와 동일한 주파수 대역에 존재하는 동잡음을 제거하기 위해서 펄스 신호의 유사주기성을 이용하여 주기 이동 평균 필터(PMAF: Periodic Moving Average Filter) 방법[11]을 적용하였다. PMAF 방법의 경우 주기 이동 평균 필터로서 신호의 주기를 정확하게 분리하는 것이 매우 중요한 포인트다. PFS에 의한 펄스 신호의 모양이 PPG 신호에 비해 복잡하여 최대-최소값을 찾아 주기를 분리하는 PMAF 방법을 바로 적용하기는 어렵다. 이에 정확한 주기 분리 점을 검출하기 위해 펄스 신호를 n 차 데시메이션하여 심박수 주파수 성분만 남긴 후, 데시메이션된 신호를 다시 n 차 인터폴레이션을 적용하여 원 신호와 같은 샘플 수를 갖는 펄스 신호의 주기 분리 점을 검출할 수 있다. 이 주기 분리 점을 원신호에 적용

함으로써 정확한 주기를 분리할 수 있다. 분리된 각 주기를 단위로 PMAF를 적용하면 적응필터로 제거되지 않았던 펄스 신호와 주파수 대역이 겹치는 동잡음을 제거할 수 있다.

그림 5에 손목에 직접 부착한 PFS로부터 얻은 동잡음이 유입된 입력신호와 스펀지를 덧댄 PFS로부터 얻은 적응 필터의 참조 신호, 적응 필터의 출력 신호, PMAF 필터링 과정을 거친 최종 출력 신호를 차례대로 나타내었다. 최종 출력 신호의 경우 적응 필터에서 제거되지 않은 8~10초 구간의 동잡음이 완벽하게 제거되었음을 확인할 수 있다.

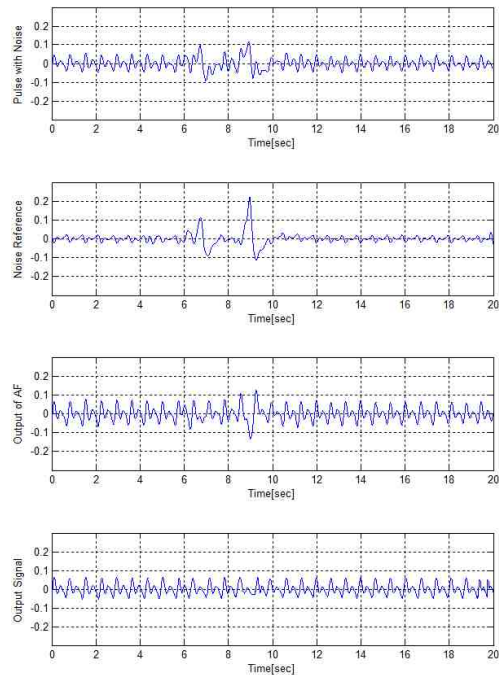


그림 5. 동잡음이 제거된 결과
Fig. 5. Results showing motion artifacts removed

3. 실험 및 결과

PFS를 손목에 착용하고 일상생활에서 빈번히 발생하는 세 가지 동잡음(반복적인 손가락의 움직임과 손의 움직임, 손목 비틀기)을 유발시켜 만든

신호로 실험하였다. 펄스 신호 검출을 위한 PFS는 MSI Sensor사의 SDT1-028K를 사용하였으며, OP Amp를 이용하여 50배 증폭한 후 Agilent사의 DSO7054A를 이용하여 추출한 펄스 신호를 MathWorks사의 Matlab(Ver. 7.6(R2008a))으로 시뮬레이션하였다. 샘플링 주파수는 200Hz로 하였고, 0.5~4Hz대역 10차 버트워스 대역통과 필터로 필터링한 후, 적응 필터를 적용하였다. 적응 필터의 차수는 40차, 수렴율은 0.05로 하였다.

PMAF 처리를 위한 과정으로 주기 분리를 위한 데시메이션과 인터플레이션의 차수는 각 50으로 하였으며, PMAF의 차수는 7차로 하여 시뮬레이션 하였다.

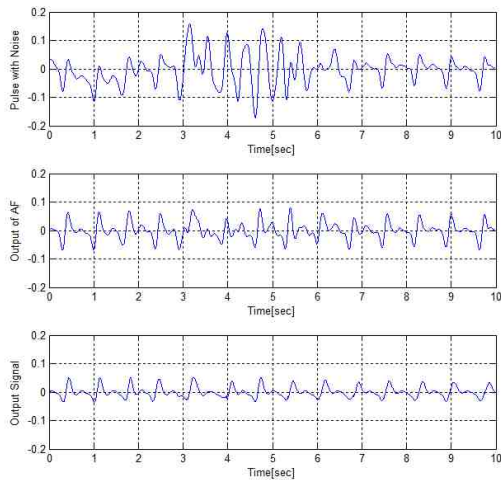


그림 6. 손가락 움직임에 의한 동잡음 제거 결과
Fig. 6. Reduction of motion artifacts from finger movement

먼저 손가락의 반복적인 움직임에 의해 발생하는 동잡음의 제거 결과를 그림 6에 나타내었다. 3~6초 사이에 발생시킨 동잡음을 적응필터링 한 결과 완전히 제거되지 못한 부분을 PMAF 처리를 추가함으로써 완벽히 제거된 것을 확인할 수 있다. 손의 움직임에 의해 발생한 동잡음의 제거 결과를 그림 7에 그리고 손목 비틀기에 의해 발생한 동잡음 제거 결과를 그림 8에 나타내었다. 모두 일상생활에서 빈번히 발생하는 동잡음으로서 적응 필터

링으로 완벽하게 제거하지 못했던 동잡음을 PMAF 방법을 추가함으로써 완벽하게 제거할 수 있음을 확인할 수 있다.

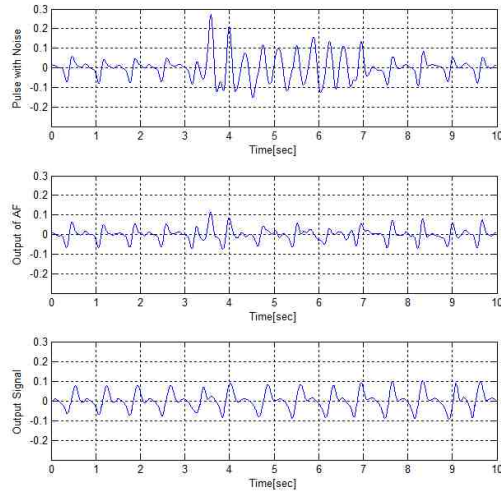


그림 7. 손 움직임에 의해 발생한 동잡음 제거 결과
Fig. 7. Reduction of motion artifacts from the hand movement

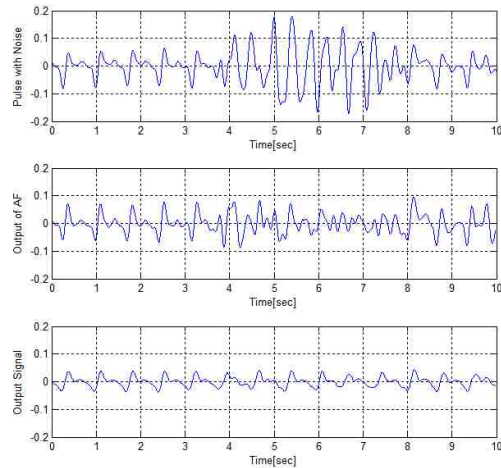


그림 8. 손목 비틀기에 의한 동잡음 제거 결과
Fig. 8. Reduction of motion artifacts from wrist twisting

본 논문의 실험용 회로에 3.3V를 인가하여 전류를 측정하여 전력을 확인해 본 결과, PFS를 적용

한 회로에서의 전력은 26.4mW, 광센서를 적용한 회로에서의 전력은 46.2mW였다. 이로써 광센서에 비해 본 논문에서 제안한 PFS에 의한 펄스 신호 검출 방법으로 모바일 헬스케어 환경에 적용한다면 시스템의 배터리 성능 향상에 기여할 것으로 생각된다. 또한 본 논문에서 제안한 방법의 신뢰성과 광센서 대비 성능 검증을 위해 기존 광센서에 의한 PPG 신호로부터 얻은 심박수와 제안된 방법인 PFS 센서에 의한 펄스 신호로부터 얻은 심박수의 심박수 변화도를 측정하여 비교하였다. 심박수 변화도는 식(1)과 같이 각 주기의 심박수를 계산하여 그 주기 이전의 심박수와 차분을 L주기만큼 평균함으로써 구하였다.

$$Var_{HR} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (HR(l) - HR(l-1)) \quad (1)$$

Var_{HR} : 심박수 변화도 (단위 : beats/min)
 $HR(l)$: l번째 주기의 심박수 (단위 : beats/min)
 L : 측정하고자 하는 펄스의 개수

표 1에는 본 논문에서 제안된 방법과 PPG 신호로 얻은 심박수를 이용한 심박수 변화도를 비교하였다. 한쪽 손으로는 손가락, 손, 손목의 움직임에 의한 동잡음 신호를 발생시킨 결과와 반대편 손은 움직이지 않고 실험한 결과를 Not Moving란에 표시하였다. 세 가지 동잡음에 의한 결과의 평균값을 Average란에 표시하였으며, 동잡음에 의한 결과의 평균값 Average(B)와 움직이지 않은 반대편 손에서 측정하여 동잡음이 유입되지 않은 결과인 Not Moving(A)란의 값 간의 차를 B - A란에 표시하였다. B - A의 결과가 적은 값일수록 동잡음을 잘 제거한 것이라고 볼 수 있다. 표 1의 결과를 보면 본 논문에서 제안한 방법과 PPG 신호에 의한 방법이 각각 2.59와 2.58로 비슷한 수준임을 확인할 수 있다. 이것은 본 논문에서 사용한 PFS 센서가 저전력이고, 더욱 단순한 시스템 설계가 가능함에도 불구하고 기존의 PPG신호를 이용한 방법

과 비슷한 수준의 성능을 보임을 확인할 수 있는 결과이다.

표 1. 심박수 변화도
 Table 1. Heart rate variation

Motion	Heart rate variation(beats/min)	
	PPG	Proposed method
Not Moving(A)	5.96	6.11
Finger	6.73	6.88
Hand	9.53	9.71
Wrist	9.36	9.51
Average(B)	8.54	8.70
B - A	2.58	2.59

4. 결론

본 논문에서는 모바일 생체 정보 처리 장치에 적용하기 위하여 저전력 센서인 PFS를 적용하여 심박 신호 측정을 위한 펄스 신호를 검출하였다. 본 논문에서 제안한 PFS센서를 이용한 방법은 기존의 광센서를 이용한 PPG 신호에 의한 방법에 비해 저전력으로 설계할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 본 논문에서 적용한 방법으로 동잡음을 제거함으로써 심박수 등 생체 정보 획득에 있어 기존의 PPG 신호를 이용한 방법과 대등한 수준의 성능을 확보할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 방법을 적용한다면 모바일 헬스케어 장치의 배터리 성능 향상에 기여할 것으로 기대된다.

REFERENCES

[1] Zhilin Zhang, "Photoplethysmography-based heart rate monitoring in physical activities via joint sparse spectrum reconstruction", *IEEE Transaction On Biomedical Engineering*, Vol. 62, NO. 8, pp. 1902, August, 2015.

[2] J.Y. Lee, "The potion artifacts reduction from the PPG based on EWMA", *The Journal of Digital Policy &*

Management, Aug., 2013.

[3] B. S. Kim and S. K. Yoo, "Motion artifact reduction in photoplethysmography using independent component analysis", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 53, Issue3, March 2006.

[4] J.G. Webster, Design of pulse oximeters, Taylor & Francis Group, New York, 1997.

[5] Zhilin Zhang, "Photoplethysmography-based heart rate monitoring in physical activities via joint sparse spectrum reconstruction", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 62, No. 8, pp. 1902, August 2015.

[6] Sensor Products Division, Piezo Film Sensors Technical Manual, Measurement Specialties, inc. 1999.

[7] J. H. Kang, B. H. Cho, J. Lee, Y. Chee, I. Y. Kim, S. I. Kim, "A Study on Accelerometer Based Motion Artifact Reduction in Photoplethysmography Signal", *Journal of Biomedical Engineering Research*, vol. 30, no. 1, pp. 369-376, 2007.

[8] H. W. Lee, H. Seo, W. G. Jung, D. B. Jang, G. K. Lee, "Detection the biomedical information using the piezo film sensor", *Korea Institute of Information & Electronic Communication Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 14-21, Sep. 2010.

[9] B. Lee, J. Lee, "Design of motion artifacts filter of PPG signal based on kalman filter and adaptive filter", *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 986-991, April, 2014.

[10] H. Park, J. Nam, J. Lee, "Design of filter to reject motion artifacts of PPG signal using multiwave optical source",

Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol. 19, No. 2, February 2014.

[11] H. W. Lee, J. W. Lee, W. G. Jung, and G. K. Lee, "The Periodic Moving Average Filter for Removing Motion Artifacts from PPG Signals", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 5, no. 6, pp.701-706, 2007.

저자약력

이 한 욱(Han-Wook Lee)

[정회원]



<관심분야>

- 1999년 2월 : 경상대학교 전자공학과 (공학사)
 - 2001년 2월 : 경상대학교 전자공학과 (공학석사)
 - 2009년 2월 : 경상대학교 전자공학과 (공학박사)
 - 2009년 2월 ~ 현재 : 경상대학교 전자공학과 강사
- 신호처리 및 시스템, IT Healthcare

전 중 창(Joong-Chang Chun)

[종신회원]



<관심분야>

- 1983년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 - 1991년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 - 1995년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 - 2003년 2월 ~ 현재 : 경남과학기술대학교 전자공학과 교수
- 안테나 및 전자장 이론, 이미지 처리, 무선 네트워크

정 원 근(Won-Geun Jeong)

[정회원]



<관심분야>

- 2000년 경상대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2004년 경상대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2006년 2월 ~ 2011년 2월 : 경남도립남해대학 초빙 부교수
- 2011년 3월 ~ 2014년 1월 한국국제대학교 조교수
- 2014년 2월 ~ 현재 : 한국폴리텍 VI대학 조교수

신호처리, 시스템, 하드웨어