

다파장 광원을 이용한 광용적 맥파의 동잡음 제거 필터 설계

박희정*, 남재현**, 이주원*

Design of Filter to Reject Motion Artifacts of PPG Signal Using Multiwave Optical Source

Heejung Park*, Jaehyun Nam**, Juwon Lee*

요약

본 연구에서는 PPG 신호에 포함되어 있는 동잡음을 제거하기 위해 사용되는 가속도 센서를 대체하기 위한 새로운 PPG 센서와 그 신호처리 기법을 제안하며, 제안된 방법은 청색광으로부터 추정된 동잡음을 기반으로 하여 광용적 맥파의 동잡음을 제거하는 것이다. 제안된 방법의 성능을 평가하기 위해 청색광 LED와 적색광 LED, 포토센서를 이용하여 센서 프로브 설계하고 제작하였고, 제작된 센서 프로브와 적응필터를 이용하여 동잡음 제거 처리를 하였다. 실험의 결과에서는 제안된 센서와 신호처리 방법이 동잡음이 발생하더라도 신호 복원이 잘되었으며, 신호 대 잡음비도 기존의 이동평균필터 보다 4.5배 이상 향상되었다. 이 실험의 결과로부터 제안된 방법이 저가의 헬스케어 단말기 설계에 적용될 수 있을 것이다.

▶ Keywords : 모바일 헬스케어, 원격진료, 적응필터, 동잡음, 광용적 맥파, 광센서

Abstract

This study is proposed the novel PPG sensor device and the signal processing method to replace the acceleration sensor that is used to reject motion artifacts contained in photoplethysmography(PPG). The proposed method is to reject motion artifacts by an adaptive filter based on the estimated motion artifact by using a blue LED light. To evaluate the performance of the proposed method experimentally, We did design a novel sensor consisted of blue/red LEDs and photo-sensor and implemented, and then rejected the motion artifacts by using an adaptive filter and the implemented sensor. In the results of the experiments, it is shown that the proposed sensor device and signal processing can reconstruct the PPG signal despite the

•제1저자 : 박희정 •교신저자 : 박희정

•투고일 : 2014. 1. 16, 심사일 : 2014. 1. 22, 게재확정일 : 2014. 2. 3.

* 안동과학대학교 의료공학과(Dept. of Medical Engineering, Andong Science College)

** 안동과학대학교 간호학과(Dept. of Nursing, Andong Science College)

occurrence of motion artifacts, and also that the SNR was 4.5 times of moving average filter. According to the experimental results, the proposed method can be applied to design a low-cost device.

▶ Keywords : Mobile-Healthcare, Telemedicine, Adaptive filter, Motion artifacts, Photoplethysmograph(PPG), Photosensor

I. 서 론

원격진료 또는 모바일 헬스케어 서비스에 있어 환자 진단에 필요한 기본 정보는 생체 신호로부터 얻으며, 이 생체 신호의 종류로는 대표적으로 심전도(ECG), 혈압, 체온, 광학적 맥파(PPG: photoplethysmography), 호흡 등이며, 모바일 헬스케어 서비스를 위해 가장 많이 사용하는 신호는 ECG와 PPG 신호이다[1]~[5]. ECG를 측정하기 위해서는 심장 부근에 전극을 부착하여 측정하는 방식을 사용하고 있고, PPG 신호는 적외선 또는 적색 광을 손가락 또는 귓볼에 투광하여 포토 센서로 수광하여 측정하는 방식이다[5][6]. 이 신호들 중에 PPG 신호는 자율 신경균형도 측정과 스트레스 측정, 심장 상태, 고혈압, 동맥경화 등 진단함에 있어 매우 유익한 신호이다. 그러나 PPG 신호를 측정할 때 사용자 또는 환자의 움직임인 동잡음(motion artifacts)의 정도에 따라 그 측정 정밀도가 현저하게 떨어지는 현상이 종종 발생한다. 이러한 문제점이 발생하는 근본적인 요인은 PPG 신호의 주파수 대역(0.05~8Hz)과 동잡음 주파수 대역(0.01~10Hz)이 중첩되어 있고 일반적인 고역/저역 필터로 잡음을 제거하기가 어렵다[5]~[7]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 PPG 신호처리 기법이 제안되었으며, 최근에는 2차원 이동평균필터를 이용한 잡음 제거법[7]과 가속도 센서와 적응필터를 이용하여 잡음 제거 방법이 연구되었다[4]~[6]. 2차원 이동평균 필터법은 맥파의 주기성을 이용하여 2차원공간에서 앙상블 이동 평균 처리하는 방법으로 순간적인 동잡음 제거에는 우수한 성능을 보이지만, 수 초 이상의 움직임이 있는 뇌졸중 또는 오환 환자의 경우에는 만족할 만한 성능을 제시하지 못했다. 그리고 가속도 센서를 이용한 동잡음 제거법은 가속도 센서의 신호를 적응필터의 레퍼런스 신호로 사용하여 PPG 신호에 포함된 동잡음을 제거하는 방법

이며[4]~[6], 필터링 성능도 만족스럽게 여러 연구에서 제시하고 있으나, 가속도 센서의 가격이 고가이기 때문에 모바일 헬스케어 단말기 가격 상승의 문제점이 발생할 뿐만 아니라 가속도 신호를 동잡음 신호와 형상에 맞게 변환시켜야 하는 처리가 필요하다. 따라서 본 연구에서 가속도 센서를 사용하지 않고 청색광과 적색광의 LED를 이용한 PPG 신호처리 기법을 제안한다. 제안된 방법은 먼저 피부 침투 깊이가 낮은 청색 파장의 투광 전력을 제어하여 이로부터 수광된 신호로부터 동잡음을 추정하고, 이 추정된 동잡음 신호를 토대로 적색 광으로부터 수광한 PPG 신호에 포함된 잡음을 적응필터로 제거하는 방식이다. 제안된 방식의 성능과 그 효용성을 검증하기 위해 실험에서 손가락 구부림, 손가락 충격, 손목 움직임 등의 다양한 동잡음을 인위적으로 가하여 신호 대 잡음비(SNR) 성능을 분석하고, 그 결과로부터 가속도 센서 방법을 제안된 방법으로 대체 가능함을 제시하였다.

II. PPG 센서와 동잡음 제거필터 설계

PPG 신호에는 여러 가지의 동잡음을 포함하고 있으며, 이 동잡음으로 인하여 측정 정밀도가 현저하게 떨어지는 현상이 발생된다[7][9][10]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에는 가속도 센서를 이용한 동잡음 제거 방법이 제시되었으나, 이 방법은 센서의 가격이 고가이고 가속도를 동잡음으로 변환하는 복잡한 연산처리 과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 가속도 센서를 대체할 수 있는 새로운 센서와 신호처리 기법을 제안하며, 새로운 센서는 적색광과 청색광원으로부터 반사되는 광을 포토센서로 수광하는 구조로서 적색 광은 피부의 침투 깊이가 깊어 혈류의 흐름인 맥파 신호를 측정하고, 청색광원은 청색광의 피부에 침투하는 깊이가 낮고 피부의 표면 반사가 매우 커[12] 동잡음 신호를 측정할 수 있게 한 것이다. 이 두 신호를 토대로 적응필터링을 처리

하여 동잡음을 제거하도록 한 것이며, 전반적인 동잡음 제거의 과정을 그림 1에 나타내었다.

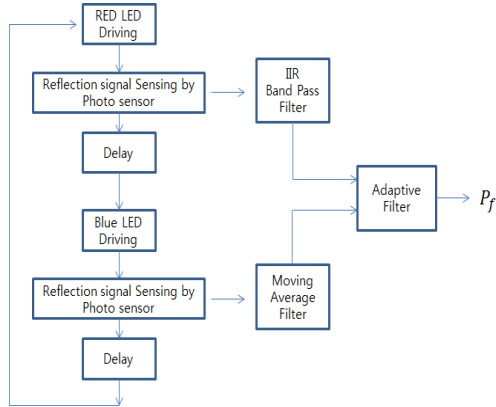


그림 1. 제안된 동잡음 제거 필터의 구조
Fig. 1. Structure of the proposed method to reject motion artifacts.

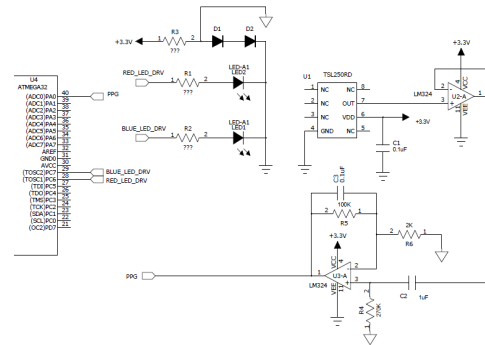
이 처리과정의 전체적인 흐름은 적색광과 청색광을 교대로 구동함과 동시에 혈관 또는 피부에 반사되어 오는 광을 포토 센서로 측정하며, 측정된 신호를 대역통과필터와 이동평균필터로 잡음을 제거한 다음, 적응필터로 동잡음을 제거하는 과정으로 이루어져 있다.

1. PPG 센싱부 설계

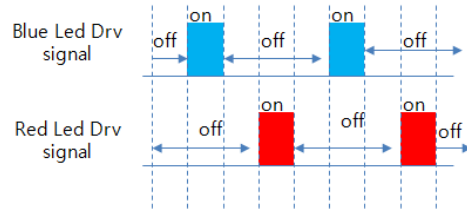
PPG 신호를 측정하는 원리는 식(1)과 같이 Beer-Lambert법칙을 기반한 것으로 적색 또는 적외선의 광 전력 $L_p(t)$ 을 인체에 투광하면 반사되거나 투과되어 오는 수광량 $s(t)$ 를 측정하는 방식이다[5]~[7][10]. 이 수광 신호 $s(t)$ 는 동맥혈의 혈류량 $S_p(t)$ 에 따라 변화하고, 환자의 움직임인 동잡음 $m(t)$ 에도 거리 변화가 발생하여 변한다.

$$s(t) = I_p(t)e^{-\Delta L} = L_p(t)e^{-S_p(t)+m(t)} \quad (1)$$

본 논문에서는 광용적 맥파를 측정하기 위한 센싱 회로를 그림 2(a)와 같이 설계하였다.



(a) Interface circuit



(b) LED driving scheme

그림 2. 센서 인터페이스 회로와 LED 구동법
Fig. 2. Sensor interface circuit and LED driving method

설계된 그림 2(a)의 회로는 마이크로컨트롤러의 디지털 출력 포트에 660[nm] 파장의 적색 LED와 470[nm] 파장의 청색 LED를 그림 2(b)와 같이 T -주기 간격으로 교대로 점등 제어하여 이때 반사되어 오는 광 신호를 파장 대역이 300[nm]~1100[nm]인 수광센서 TSL250RD로 센싱하도록 하였고, 그리고 고주파 잡음과 호흡잡음, 직류성분 등을 제거하기 위해 차단주파수가 각각 0.6Hz, 15Hz인 이차로그형 1차 능동 대역통과필터를 OP-Amp로 설계하여 잡음을 제거하도록 하였으며, 필터링된 신호는 마이크로컨트롤러의 A/D변환 입력 포트에 입력하였다.

2. 적응필터 설계

본 연구에서는 그림 3와 같이 동잡음 제거를 위한 필터로 일반적으로 많이 사용되는 Haykin[11]이 제안한 적응필터를 사용하였다.

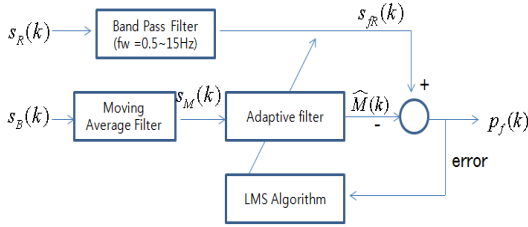


그림 3. 동잡음 추정과 제거를 위한 적응필터 구조
Fig. 3. Structure of an adaptive filter for estimating and filtering the motion artifacts.

동잡음 추정기는 청색광이 피부의 침투 깊이가 작고 피부의 표면 반사가 매우 큰 특징을 이용한 것으로 청색 LED 광을 피부에 투광하였을 때 수신된 광을 식(2)와 같이 N -차 이동평균필터(moving average filter)로 고주파 잡음을 제거한 신호 $S_M(t)$ 을 적응필터의 참조 신호로 입력하였으며,

$$S_M(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} m(k-n), \quad k : \text{sampling number} \quad (2)$$

이 적응필터는 적색 광으로부터 수신된 신호 $s(t)$ 를 고주파 잡음 및 직류성분을 제거를 위한 0.5~15Hz 대역을 가진 IIR 구조의 대역통과필터를 필터링한 신호 $s_{fR}(k)$ 를 입력하여 식(3)에서 식(6)의 과정으로 필터 처리를 하게 하였다.

$$X = [S_M(k), S_M(k-1), \dots, S_M(k-N_A - 1)]^T \quad (3)$$

$$\hat{M}(k) = e(k) = s_{fR}(k) - W(n)X(n) \quad (4)$$

$$W(n) = W(n) + \frac{\mu e(k)X(n)}{X(n)^T X(n)} \quad (5)$$

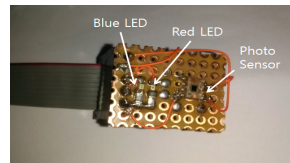
$$\mu = \frac{\mu_0 \|X(n)\|^2}{\|X(n)\| + \epsilon(k)} \quad (6)$$

여기서, $W(n)$ 은 필터계수이고, μ_0 는 초기 학습상수이며, $\epsilon(n)$ 은 제어 파라미터, N_A 은 적응필터의 차수이다.

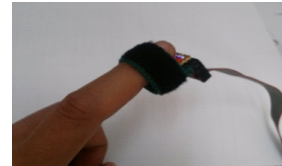
III. 실험 및 성능평가

본 논문에서 제안한 기법의 성능을 평가하기 위해 하드웨어 성능 분석과 적응 필터링 및 심박수 변이율 평가를 실시하였다. 하드웨어 성능 분석에서는 제안된 그림 2의 회로도와 구동 방법을 토대로 Atmel사의 CPU인 ATmega32-16Mhz, 660(nm) 파장의 적색 LED, 470(nm) 파장의 청색 LED를

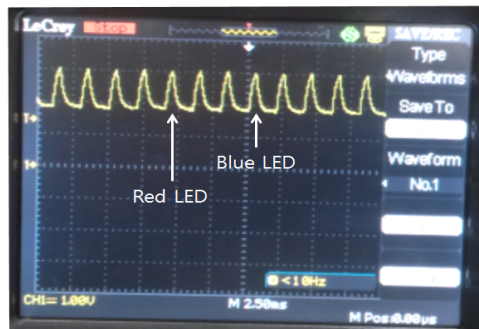
이용하여 그림 4(a)와 같이 구현 하였다. LED 구동은 각 채널당 50Hz(구동 주기 $T=20ms$) 샘플링을 기준으로 구동하였으며, LED 구동 상태를 오실로스코프로 관측한 결과 그림 4(c)와 같이 원활하게 구동됨을 확인 하였다. 그리고 심박수가 85(bpm)인 정상인을 대상으로 본 연구에서 구현된 PPG 센싱 프로브(그림 4(a))를 그림 4(b)와 같이 착용하여 PPG 신호와 동잡음 추출을 실험하였다. 이 실험에서 두 광원으로부터 수광된 신호를 측정된 결과, 그림 5(a)와 (b)와 같이 원활하게 수광됨을 확인하였다. 특히, 그림 5(b)와 손가락 두드렸을 때 청색 LED 광으로부터 수광된 신호를 추출하였고 이 신호가 동잡음 신호임을 알 수 있었으며, 이는 본 논문에서 제안한 청색 광원의 신호를 적응필터의 잡음 신호로 사용할 수 있음을 확인하였다. 적응필터의 성능을 분석하기위해, 구현된 하드웨어 실험에서 발생된 수광센서의 신호를 CPU내부의 10비트 ADC 변환기로 각 채널당 50Hz 샘플링 주파수로 신호를 획득하고, RS232의 19200[bps] 속도로 PC에 측정 데이터를 전송하였다.



(a) LEDs and Photo sensor

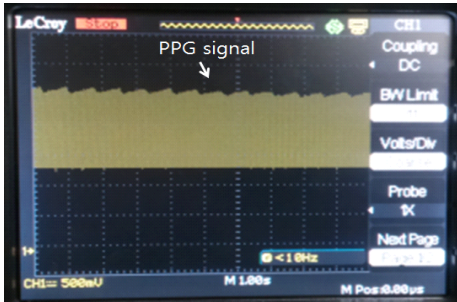


(b) Worned sensor probe

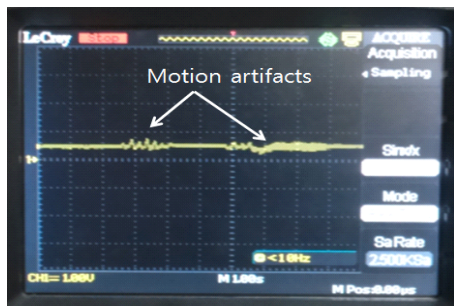


(c) LED driving

그림 4. 구현된 센서 브로브와 LED 구동
Fig. 4. Implemented sensor probe and LED driving



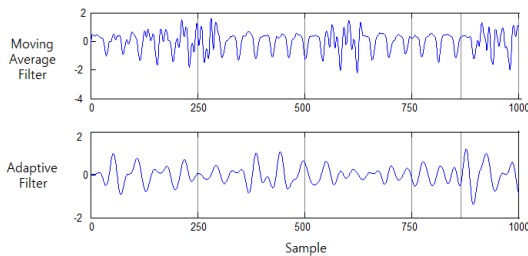
(a) received PPG signals



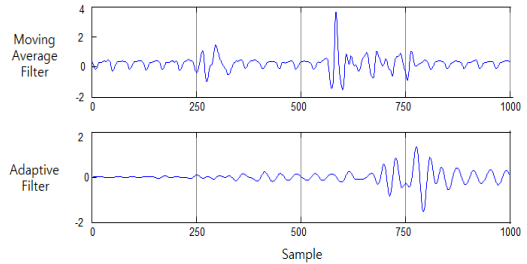
(b) photo signal received by using blue LED

그림 5. 수신된 PPG 신호와 동잡음 신호
Fig. 5. Received PPG signals and motion artifacts signal.

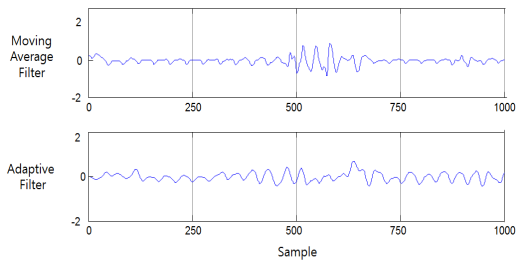
그리고 PC에서는 수신된 데이터는 Mathworks사의 Matlab으로 작성된 6차 IIR구조의 대역통과필터(대역 주파수: 0.5~20Hz), 50차 이동평균필터, 초기 상습상수가 $\mu_0 = 0.05$ 인 5차 적응필터에 순서적으로 입력하여 신호처리를 하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다.



(a) Outputs of filters for tap motion



(b) Outputs of filters for bending motion



(c) Outputs of filters for wrist motion

그림 6. 다양한 동잡음에 대한 필터의 출력
Fig. 6. Outputs of filters for various motions

그림 6에 제시된 실험의 결과는 손가락 두드림, 손가락 상하 구부림, 손목 움직임(좌우회전) 등을 1~2회 정도로 인위적으로 가하여 필터링과 결과를 나타낸 것이며, 그림 6(a)의 결과에서 손가락 두드림인 동잡음을 원활하게 제거함을 알 수 있었고, 손가락 구부림에 대한 동잡음 제거 결과인 그림 6(b)에서는 손가락 구부림이 클때도 잡음 제거 성능이 양호함을 알 수 있었다. 손목 움직임의 결과인 그림 6(c)에서 손목 움직임이 폭이 클때 필터의 출력이 다소 떨어지는 현상을 보였으나 맥파 최대치 검출 가능하였다. 그리고 그림 6의 (a)에서 (c)까지 이동평균 필터의 필터 차수로 인하여 위상 지연이 발생되었으나 맥파 최대점 주기에는 영향을 주지 않았다. 그리고 그림 6의 결과를 토대로 정량적인 필터의 성능을 평가하기 위해 식(7)과 같이 필터링 이전의 신호(S_p)와 필터링 후의 신호(S_f)의 차를 잡음(N)으로 간주하고, 신호 대 잡음비(SNR)를 측정하여 표 1에 나타내었으며, 이 결과에서도 제안된 방법이 동잡음 제거에 관한 성능이 가장 많이 사용되는 이동평균 필터보다 4.5배 이상의 성능을 보였다.

$$SNR = 10\log_{10}(S_p - S_f)^2 / N^2 \quad (7)$$

표 1. 신호 대 잡음비 비교분석표
Table 1. Analysis of Signal to noise ratio comparison

Motion	Moving average filter(dB)	Proposed Method (Multiwave Sensor Probe + Adaptive Filter)(dB)
Tap	2.1	8.3
Bending	2.5	4.1
Wrist Swing	0.2	2.3
mean	1.6	7.35

IV. 결 론

본 논문에서는 모바일 헬스케어 단말기에 사용되는 생체 신호들 중에 하나인 PPG 신호 처리에 관한 연구로서 PPG 신호 처리의 문제점인 동잡음을 제거하기 위해 다과장 센서 프로브의 구조와 필터링 기법을 제안하였고, 그 성능 분석하기 위해 인위적으로 다양한 동잡음을 가하여 성능을 분석하였다. 이 결과, 본 논문에서 제안된 기법의 성능이 우수함을 알 수 있었으며, 이 결과로부터 가속도 센서를 제안된 방법으로 대체 가능함을 확인하였다. 따라서 본 연구의 방법을 헬스케어 단말기에 적용한다면 환자의 움직임에서도 보다 정확한 신호 측정이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2013년 전문대학교육역량강화 사업의 지원으로 이루어졌음.

참고문헌

[1] Yoon, G., Lee, J. Y., Jeon, K. J., et al, "Development of a compact home health monitor for telemedicine", *Telemed. J. E. Health*, Vol. 11, Issue6, pp. 660-667, January, 2005.

[2] M. Folke, L. Cernerud, M. Ekstrom, B. Hok, "Critical review of non-invasive respiratory monitoring in medical care", *Medical & Biological Engineering & Computing*, Vol. 41, Issue 4, pp.377-383, July, 2003.

[3] J. Muhlsteff, O. Such, R. Schmidt, M. Perkuhn, H. Reiter, et al, "Wearable approach for continuous ECG and activity patient-monitoring", *Engineering in Medicine and Biology Society*, 26th

Annual International Conference of the IEEE, Volume 1, Issue 1-5, pp. 2184 - 2187, Sept. 2004.

[4] Wan-Young Chung, S. Bhardwaj, A. Purwar, Dae-Seok Lee, R. Myllylae, "A Fusion Health Monitoring Using ECG and Accelerometer sensors for Elderly Persons at Home", *Proceeding of Engineering in Medicine and Biology Society*, 29th Annual International Conference of the IEEE, Issue 22-26, pp. 3818-3821, Aug. 2007.

[5] Ram, M.R., Madhav, K.V., Krishna ,E.H., "A Novel Approach for Motion Artifact Reduction in PPG Signals Based on AS-LMS Adaptive Filter", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 61, Issue 5, pp. 1445-1457, May, 2012.

[6] Boreom Lee, Jonghee Han, Hyun Jae Baek, Jae Hyuk Shin, Kwang Suk Park, Won Jin Yi, "Improved elimination of motion artifacts from a photoplethysmographic signal using a Kalman smoother with simultaneous accelerometry", *Physiological Measurement*, Vol. 31, No. 12, pp.1585-1603, October, 2010.

[7] Han-Wook Lee, Ju-Won Lee, Won-Geun Jung, and Gun-Ki 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, December, 2007.

[8] I. Brown and A. A. Adams, "The ethical challenges of ubiquitous healthcare", *International Review of Information Ethics*, Vol. 8, No. 12, pp. 53-60, 2007.

[9] J. W. Lee, W. G. Jung, G. K. Lee, et all, "Design of filter to reject motion artifact of pulse oximetry", *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 26, Issue 3, pp. 241-249, May, 2004.

[10] Ju-Won Lee, Jae-Hyun Nam, "Design of Filter to Reject Motion Artifacts of PPG Signal by Using Two Photosensors", *J. Inf. Commun. Converg. Eng.* Vol. 10, No. 1, pp. 91-95, Mar. 2012.

- [11] Simon O. Haykin, "Adaptive Filter Theory",
Prentice Hall, pp. 365-372, 2002.
- [12] Daniel Barolet, "Light-Emitting Diodes (LEDs)
in Dermatology", Seminars In Cutaneous
Medicine and Surgery, Vol. 27, No. 4, pp.
227-238, Dec., 2008.

저 자 소 개



박 희 정
 2004: 충북대학교
 컴퓨터공학과 공학박사
 현 재: 안동과학대학교
 의료공학과 부교수
 관심분야: 의료영상처리, 신호처리
 Email : hjpark@asc.ac.kr



남 재 현
 1998: 명지대학교
 컴퓨터공학과 공학박사
 현 재: 안동과학대학교
 의료공학과 부교수
 관심분야: 의료영상처리, 의료정보처리
 Email : jhnam@asc.ac.kr



이 주 원
 2003: 경상대학교
 전자공학과 공학박사
 현 재: 안동과학대학교
 의료공학과 조교수
 관심분야: 의료영상처리, 신호처리,
 모바일헬스케어
 Email : jwlee@asc.ac.kr