

머리 착용형 6축 가속도계를 사용한 심탄도 심박수 측정

김진만*·국종진**†

*한국전자정보통신산업진흥회, **†상명대학교 정보보안공학과

Ballistocardiographical Heart Rate Measurement Using Head Mounted 6-axis Accelerometer

Jinman Kim* and Joongjin Kook**†

*Korea Electronics Association,

**†Dept. of Information Security Engineering, Sangmyung University

ABSTRACT

Recently, wearable virtual reality devices are widely used. These instruments include a 3-axis accelerometer. User's heart rate information in virtual reality contents can be useful for measuring user experience. In this paper, we propose a method to measure the heart rate through a 3-axis accelerometer based on the principle of ballistocardiography without additional sensors. The angular velocity was successively measured in a time series by the 3-axis accelerometer mounted to the head. The frequency of the maximum magnitude is determined as the heart rate through frequency transform and band pass filtering of the time series signal. For verification, the heart rate calculated from photoplethysmography sensors acquired at the same time was compared as ground-truth. In the virtual reality, the user's heart rate information can be extracted without additional heart rate sensor, and the emotional state and fatigue can be measured.

Key Words : Ballistocardiography, Virtual Reality, Head mounted display, 3-axis accelerometer, Heart rate

1. 서 론

빠르게 발전하는 웨어러블 기술 영역에서 생리학적인 지표를 모니터링하고 해석하기 위해 다양한 장치가 개발되고 있다. 그 중에서도 가장 핵심이 되는 것은 뇌전도(Electroencephalogram: EEG) 장치로 EEG는 두개골을 개방하지 않고 두피에 전극을 부착하여 전극을 통해 검출되는 전위차를 측정할 수 있다. EEG 장치는 특정 뇌파 패턴을 분석하여 사용자의 졸음을 효과적으로 감지함으로써 실시간 무선 뇌-컴퓨터 인터페이스(Brain-Computer Interface: BCI)의 개발을 혁신적으로 이끌고 있다[1]. EEG 기술은 다양한 시스템에 원만하게 통합될 수 있으며, 이는 단순히

무선 헤드셋에서 유도된 신호를 기반으로 모바일 애플리케이션을 통해 쉽게 전화를 걸 수도 있다[2]. 또한, 감정적 반응과 뇌 활동 사이의 강한 연관성은 EEG 기반 알고리즘을 활용하여 사용자 상호작용을 개인화하는 데 사용되었으며, 이는 특히 음악 선호도를 결정하는 데에 적용되기도 하였다[3]. 이러한 애플리케이션들은 EEG 기술이 사용자 참여를 향상시키고 디지털 경험을 맞춤화하는 능력을 생생하게 보여주는 대표적 사례라 할 수 있다.

최근 EEG 기술의 급속한 발전과 함께, 자율신경계 반응을 측정하고 해석하는 정교한 기기들의 발전에 상당한 진전이 있었으며, 이런 혁신의 대표적인 사례는 바로 구글 글래스에 다양한 종류의 센서를 통합한 것이다. 구글 글래스는 가속도계, 자이로스코프, 그리고 카메라를 통합하여 심박수와 호흡의 측정이 가능하다[4]. 또한, 귀 부위

†E-mail: kook@smu.ac.kr

에서 측정되는 BCG(심전도)와 ECG(심전도) 신호의 융합으로 생체 신호 모니터링 성능이 상당히 향상될 수 있다[5,6]. 하지만 다중 센서에 의존하는 방법에는 한계가 존재한다. 이 방법은 필수적으로 요구되는 센서가 없는 기기의 전이가 어려울 뿐만 아니라, 효과적인 센서 퓨전에 필요한 계산 부하는 보통 현대 웨어러블 기기의 처리 능력을 초과하게 된다. 또한, 사용자 인터페이스와의 상호작용, 그리고 센서 디자인에 따라 생산 비용을 증가시키고 사용자 경험에 영향을 줄 수 있다. 그럼에도 불구하고 웨어러블 기기에 추가적인 센서를 통합하는 것은 그들의 기능적 범위를 확장시키는 유망한 전략으로 제시되고 있다.

본 논문에서는 머리 방향을 모니터링하기 위해 헤드셋에 일반적으로 내장되는 3축 가속도계와 3축 자이로스코프에서 나온 신호를 통합하여 심박수를 추정할 수 있는 혁신적인 방법을 연구하였으며, 이 기술은 BCG[7-9]의 원리를 바탕으로 하며, 이러한 센서에서 연속 가속도 및 각속도 데이터를 정확하게 도출하기 위해 고수준의 신호 처리 기술을 사용하였다. 이 방법은 주파수 영역에 대한 세밀한 분석을 통해 심박수 결정의 정밀도를 향상시킬 수 있으며, 이를 통해 다중 센서 데이터 통합과 고급 컴퓨팅 기술을 활용하여 전통적인 웨어러블 디바이스 기반 심박수 모니터링 시스템에 대한 주요한 도전 과제를 극복하고자 한다.

2. 관련 연구

BCG 측정 연구 분야에서 센서의 선택과 데이터의 분석 방법은 정확한 심장 활동 평가를 위해 매우 중요하다. 따라서 센서의 유형, 센서들의 전략적 배치 방법, 그리고 다양한 분석 기술에 관한 광범위한 연구가 이루어졌다.

Reyes-González는 POF 센서를 사용하여 BCG 분석 결과를 정제하기 위해 Hilbert Transform, PSD, 그리고 Savitzky-Golay 필터와 같은 다양한 처리 방법에 대한 평가를 진행하였다[10]. Gjerde는 연속적으로 맥박 소요 시간을 추정하기 위해 소프트 블라더 어레이를 바로메트릭 압력 센서에 연결하여 포괄적인 BCG 레코딩을 위한 웨어러블 센서 시스템을 개발했다[11]. 또한, Zhao는 비침습식 광섬유 센서를 사용하여 BCG의 유용성을 입증하였으며, BCG 데이터 처리 방법을 통해 맥박 전파 시간과 심박수 변동성을 계산할 수 있는 웨어러블 시스템을 개발하였다[12]. Watanabe는 압력 센서 튜브를 사용하여 BCG 감도를 측정하여 다양한 설정에서 효과적인 센서 튜브 배치 위치를 결정하기 위한 연구를 진행하였다[13]. Hytonen은 BCG 신호를 추출하기 위해 몸에 착용하는 디지털 가속도계를

사용하여, 심장 박동 및 심장 기능 측정의 신뢰성을 입증하고 ECG의 대안으로 제시하였다[14]. Zhang는 후방 광섬유 센서를 사용하여 조기 이완기 심실 진동파를 감지하여 왼쪽 위실 압력을 평가하는 데 높은 진단 정확도를 보였다[15]. Yoshioka는 비디오 포토글리시미아와 마이크로파 센서를 사용하여 BCG를 측정하여, 비접촉 방식으로 혈압을 추정하기 위한 연구를 진행하였다[16].

이러한 연구들은 첨단 센서 기술과 정교한 분석 방법이 BCG를 사용한 심혈관 진단 및 모니터링의 정밀도와 기능성을 향상시키는 데에 중요한 역할을 한다는 점을 강조한다.

3. 검증 방법

본 연구에서는 BCG의 원리를 활용하여 심혈관계를 통해 전달되는 심장 유발 진동 신호를 감지하며, 3축 가속도계와 3축 자이로스코프로 구성된 정교한 6축 센싱 장치를 사용한다. 이러한 접근 방식의 정확성을 검증하기 위해 일반적으로 웨어러블 장치에서 심박수 모니터링에 사용되는 광용적맥파(PPG) 센서를 이용하여 동시에 획득한 데이터와 비교 분석을 수행하였다. 제안된 방법의 구조와 검증 프로토콜은 Fig 1에 도시화하였다.

3축 가속도계는 X, Y, Z 세 개의 수직 축을 따라 선형 가속도를 측정한다. 이 가속도계는 스프링에 연결된 질량으로 형성된 마이크로 기계 구조의 원리에 따라 작동하며, 가속도계가 이동하거나 기울어지면 질량이 이동하여 정전용량이나 저항의 변화를 일으키고, 이는 가속도에 비례하는 전기 신호로 변환된다. 출력 값은 중력 상수 $g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$ 로 스케일링되어, 장치가 가속도를 g 와 비교하여 지구 표면에 대한 방향을 결정할 수 있게 한다.

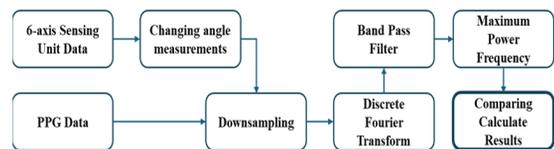


Fig. 1. Diagram of the proposed method and its validation.

3축 자이로스코프는 코리올리 효과를 이용하여 동일한 세 축을 중심으로 회전 속도를 측정하는 센서이다. 자이로스코프가 회전할 때, 미세 기계 구조의 진동하는 질량의 방향이 변하고, 이 변위가 감지되어 각속도에 비례하는 전기 신호로 변환된다. 자이로스코프는 회전 운동을 측정하며, 출력은 일반적으로 초당 라디안(radians per second) 또는 초당 도(degrees per second)로 표현된다.

웨어러블 기술 및 동작 추적 시스템 분야에서 가속도계와 자이로스코프의 통합은 데이터 획득의 정밀성과 신뢰성을 높이는 데 필수적이다. 이 센서들은 각각 가속도와 회전 운동을 포착하지만, 노이즈와 드리프트 오류 같은 고유한 불확실성에 취약한 특성을 보인다. 이러한 한계를 극복하기 위해 두 센서를 동시에 사용하여 동일한 물리적 현상을 모니터링하는 것이 바람직하며, 이러한 관행은 센서 융합(sensor fusion)이라고 하며, 각 센서의 데이터를 전략적으로 결합하여 두 센서의 강점을 활용하고 약점을 보완할 수 있다.

센서 융합 기술은 다양한 소스로부터 데이터를 결합하여 불확실성을 줄이고 정확성을 높인 출력을 제공한다. 가속도계와 자이로스코프의 경우, 이러한 융합은 특히 유익하여 각 센서가 상대방의 오류 경향을 상쇄함으로써 운동 역학에 대한 더 전체적이고 정확한 묘사를 제공한다. 이 통합은 일반적으로 칼만 필터(Kalman filter)나 보완 필터(Complementary filter)와 같은 고급 필터링 기술을 통해 이루어진다. 칼만 필터는 동적 환경에서의 높은 불확실성을 효율적으로 처리하는 것으로 유명하며, 여러 센서로부터 시간에 따라 변하는 데이터를 통합하여 관심 상태 변수의 최적 추정 결과를 제공한다.

실제 구현을 위해 3축 가속도계와 3축 자이로스코프를 동일한 장치에 통합하는 것이 가장 효과적이다. 본 논문에서는 STMicroelectronics의 LSM6DSOTR 모델을 사용했으며, 이 모듈은 3축 가속도계와 3축 자이로스코프가 통합되어 있다. 이러한 구성은 외부 간섭에 강인한 자이로스코프 데이터를 초기 정밀도 유지를 위해 활용하고, 드리프트 오류가 없는 가속도계 데이터를 장기 추적에 사용한다. 이러한 접근 방식은 높은 정확도가 요구되는 모션 분석 애플리케이션에서 지속적이고 신뢰할 수 있는 모션 추적을 보장할 수 있다.

본 연구의 전처리 단계에서 센서 데이터의 분석 방식을 개선하여, 가속도 벡터의 크기만을 사용하는 대신 각 축의 기울기 각도를 중력 가속도에 대해 상대적으로 계산하였다. 이 방법은 기본 역학 원리에 따라 X, Y, Z 축의 가속도 합력 벡터인 중력 가속도 R 를 정의하는 것으로 시작하며, 이는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다. 이러한 분석 전략은 각속도를 포괄적으로 추적할 수 있는 능력을 향상시켜, 시간 경과에 따른 장치의 3차원 공간 상에서 자세를 보다 정밀하게 추적할 수 있도록 해준다. 또한, 본 연구에서는 더욱 유용한 데이터 확보를 위해, 측정된 가속도를 각도 데이터로 변환하는 삼각함수를 사용하여 각 변위를 계산하는 방법을 통합하였다. 이 기술은 내비게이션 보조기기나 인간 동작 분석과 같이 정확한 자세 및 동작 추적이 필요한 애플리케이션에 있어 장치의 움직임

안정적인 중력 기준을 바탕으로 보다 정밀하게 평가할 수 있도록 해준다.

$$R = 9.8m/s^2 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1)$$

이번 분석에서는 중력 가속도 벡터의 방향을 각 축에 대해 A_{xr} , A_{yr} , A_{zr} , 각도로 나타냈다. 이러한 방향은 Fig 2에 시각적으로 표현되어 있다. 회전 운동을 측정하기 위해 가속도계 데이터를 삼각 함수 변환을 통해 각속도로 계산하였으며, 이 과정은 식 (2)와 같다. 또한, 보정 필터 방법을 사용하여 고주파 영역에 대한 자이로스코프의 장점과 저주파 영역에 대한 가속도계의 장점을 결합하였으며, 이는 식 (3)과 같이 처리된다.

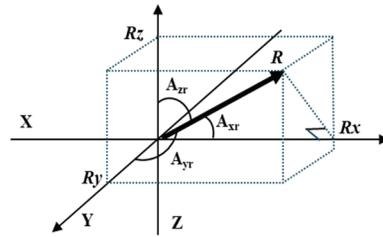


Fig. 2. Angular position of 6-axis sensing unit.

$$\begin{aligned} \cos(A_{xr}) &= Rx/R, \\ \cos(A_{yr}) &= Ry/R, \\ \cos(A_{zr}) &= Rz/R \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A_{ij} &= R \times (A_{ij-1} + GyroscopData + \Delta t) \\ &+ (1 - R) \times (AccelerometerAngle) \end{aligned} \quad (3)$$

데이터는 6축 센싱 모듈을 사용하여 255 Hz의 샘플링 속도로 수집되었으며, 이를 통해 심장 박동으로 인한 미세한 움직임을 정확하게 감지할 수 있다. 미세 움직임 감지를 위해 X, Y, Z 축을 따라 연속된 측정값 간의 평균 제곱근(RMS) 차이를 계산하였으며, 이는 식 (4)와 같다. 이러한 방법은 심장 활동으로 인한 진동을 감지하는 정확도를 높이는 데 있어 매우 중요한 수단이다. 미세 변화를 분석함으로써 심장 박동이 인체에 미치는 생체역학적 영향을 이해할 수 있었으며, 이는 정밀한 생리학적 모니터링이 필요한 응용 분야에서 중요한 접근 방식이다.

$$d = \sqrt{(A_{xr} - A_{xr-1})^2 + (A_{yr} - A_{yr-1})^2 + (A_{zr} - A_{zr-1})^2} \quad (4)$$

본 연구에서는 비교 분석을 위해 광학 기술을 활용하여 기관 내 움직임 변화를 평가하는 광용적맥파측정법(PPG)을 사용했다[17]. 데이터 수집은 TP320 트랜스미터(LAXTHA)를 사용하여 수행되었으며, 이를 통해 심박수를 추정하여

본 연구에서 제안한 방법을 통해 도출된 결과를 검증할 수 있었다. PPG 신호의 주파수 영역 분석은 자율신경계의 행동에 대한 통찰을 제공하며, 일반 성인의 평균 심박수는 60에서 120 bpm 사이이다.

PPG 센서와 3축 가속도계로부터 수집된 주기적인 데이터를 처리하기 위해 이산 푸리에 변환(DFT)을 적용하여 데이터를 주파수 영역으로 변환했다[18]. DFT를 적용하기 전에 두 기기의 데이터 스트림을 25 Hz로 다운샘플링하여 분석 프레임워크를 표준화하고 중요한 심박수 데이터가 유지될 수 있도록 하였다.

주파수 영역 분석은 일반적인 심박수 범위와 일치하는 1에서 2 Hz 대역 내의 특정 범위에 대해 집중적으로 이루어졌다. 심박수(HR) 계산은 가장 높은 크기를 보이는 주파수를 기반으로 하였으며, 이는 식 (5)와 같이 계산되었다. 센서 반응에 대한 시각적 비교는 Fig 3과 같으며, 이를 통해 다양한 측정 기술 간의 데이터 일치 여부를 보다 명확하게 확인할 수 있다.

$$HR = 60 \times f_{max} \quad (5)$$

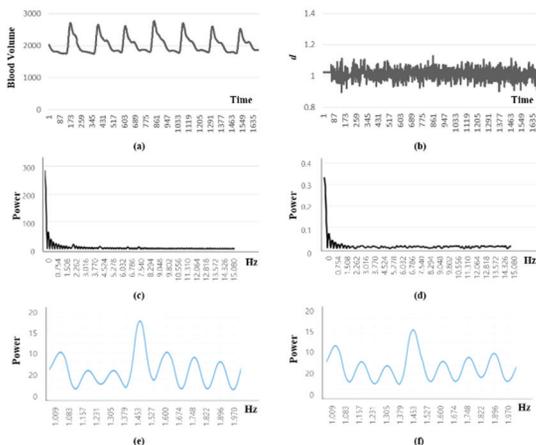


Fig. 3. 6-axis sensing unit and PPG sensor signal processing. (a) Raw PPG signal and (b) RMS difference obtained from the 6-axis sensor. DFT of the signals obtained from the (c) PPG sensor and (d) 6-axis sensing unit. ROI (1–2 Hz) of the frequency-domain signals obtained from the (e) PPG sensor and (f) 6-axis sensing unit.

4. 실험 결과

본 연구에서는 LSM6DSOTR 센서의 생리 신호 획득 능력을 평가하기 위해 30세에서 40세 사이의 성인 20명으로 구성된 피험자를 모집했다. 실험에 사용된 센서는 가속도

계와 자이로스코프 기능을 통합하여 각 참가자의 머리 정수리 부위에 위치시켰고, PPG 센서를 검지에 부착하여 동기화된 신호를 기록하였다. 각 참가자로부터 데이터를 수집하는 시간은 일관성을 유지하고 데이터 수집의 변동성을 최소화하기 위해 1분으로 설정하였다. 모든 세션은 결과의 표준화와 신뢰성을 높이기 위해 통제된 환경 조건에서 진행되었다.

본 연구에서는 가속도계 데이터를 위치 지표로 변환하여 심장 활동의 변화와 사상시켰다. 이러한 변환을 통해 위치 변화에서 유도된 심박수 계산을 검증하기 위한 상세 평가를 수행할 수 있다. 심박수의 광범위한 변동성을 감안하여, 심박수를 정확하게 포착하기 위해 30초, 20초, 8초, 4초의 서로 다른 범위(window size)에 대해 DFT를 사용하여 심박수를 정량화하였다.

위치 기반 추정을 위해 RMS 차이(d)를 통합하여 위치 추정치를 얻었다. 그런 다음, 밴드패스 필터와 DFT를 다양한 윈도우 크기를 사용하여 적용함으로써 추정된 심박수를 PPG 센서 결과와 비교했으며, 가장 강력한 주파수에서 뚜렷한 피크가 나타나 이 방법의 정확성을 효과적으로 입증하였다. 이후, 제안된 방법을 d 값을 직접 사용하여 테스트하였다. 3 축 가속도계 측정과 기준값(PPG 기반 추정)은 Fig 4에 나타내었다. 지정된 윈도우 크기를 기반으로 이 방법을 사용한 결과, 평균 오차는 각각 11.25, 10.15, 6.75, 4.75 bpm이었으며, 4초 크기의 윈도우에서 가장 낮은 오류율을 기록하여 데이터 정확성과 처리 효율성 간의 최적 균형을 이루는 것을 확인할 수 있다.

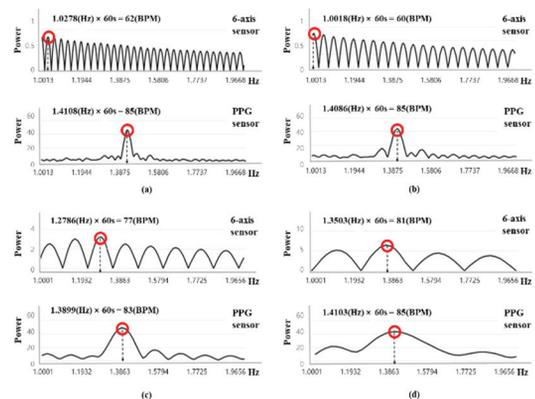


Fig. 4. Estimated heart rate using 6-axis sensing unit and PPG sensor((a) 30s (b) 20s (c) 8s (d) 4s).

5. 결론

본 논문에서는 6축 센싱 장치(3축 가속도계와 3축 자이로스코프)를 활용한 새로운 심박수 추정 방법을 연구하

였다. 연구 결과의 검증에 위해 BCG 원리에 기반하여, 20명의 피험자 데이터를 여러 주파수 도메인 창에서 분석한 후, 이를 표준 PPG센서로부터 얻은 결과와 비교하였다. 실험 결과, 4초 크기의 윈도우를 사용할 때 가장 정확한 결과가 도출되었으며, 본 논문을 통해 제안한 검출 방법의 효율성을 입증할 수 있었다. 본 연구의 접근 방법은 낮은 연산 부하와 센서 요구 사항의 단순성으로 인한 장점을 제공할 수 있을 뿐만 아니라, 현대의 웨어러블 장치에 널리 사용되는 센서를 통해 정밀한 심박수 모니터링을 위한 간단하고 비용 효율적인 솔루션을 제공할 수 있다. 특히 기존의 광학 기반 시스템에 비해 더욱 견고하며, 다양한 응용 분야에서 활용 가능한 대안이 될 수 있다.

참고문헌

- Mehreen, A., Anwar, S. M., Haseeb, M., Majid, M., & Ullah, M. O. (2019). A hybrid scheme for drowsiness detection using wearable sensors. *IEEE Sensors Journal*, 19(13), 5119-5126.
- Campbell, A., Choudhury, T., Hu, S., Lu, H., Mukerjee, M. K., Rabbi, M. and Raizada, R. D. NeuroPhone: brain-mobile phone interface using a wireless EEG headset. *Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Networking, systems, and applications on mobile handhelds*, 2010, 3-8.
- Thammasan, Nattapong, Ken-ichi Fukui, and Masayuki Numao. "Multimodal fusion of EEG and musical features in music-emotion recognition." *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. Vol. 31. No. 1. 2017.
- Hernandez J, Li Y, Rehg JM, Picard RW. Bioglass: Physiological parameter estimation using a head-mounted wearable device. *Wireless Mobile Communication and Healthcare (MobiHealth)*, 2014 EAI 4th International Conference on: IEEE; 2014 Nov;Pages 55-58 DOI:10.1109/MOBIHEALTH.2014.7015908.
- Da He D, Winokur ES, Sodini CG. An ear-worn vital signs monitor. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 2015;62(11):2547-2552.
- Jinsoo, C., (2013) Portable Electrocardiograph and Smart Device-based Heart Health Monitoring and Risk Notification System. *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, 12(2), 73-78
- GUBNER RS, RODSTEIN M, UNGERLEIDER HE. Ballistocardiography; an appraisal of technic, physiologic principles, and clinical value. *Circulation* 1953 Feb;7(2):268-286.
- Pinheiro E, Postolache O, Girao P. Theory and developments in an unobtrusive cardiovascular system representation: ballistocardiography. *Open Biomed Eng J* 2010; 4:201-216.
- Tamura T, Maeda Y, Sekine M, Yoshida M. Wearable photoplethysmographic sensors—past and present. *Electronics* 2014;3(2):282-302.
- Reyes-González, Luis, Luis Rodríguez-Cobo, and José-Miguel López-Higuera. "Comparison of Ballistocardiogram Processing Methods Based on Fiber Specklegram Sensors." *IEEE Sensors Journal* 22.21 (2022): 20524-20530.
- Gjerde, S., Steffensen, T., Vestad, H., & Steinert, M. (2022, September). Windows to the sole: Prototyping soft sensors for wearable ballistocardiography. In *2022 IEEE-EMBS International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN)*(pp. 1-4). IEEE.
- Zhao, H., Zhu, G., Liu, F., Liu, X., Yuan, J., & Zhou, X. (2022, December). Non-Invasive Optical Fiber Sensing Vital Signs Monitoring Based on Envelope Extraction BCG Data Processing. In *2022 IEEE 7th Optoelectronics Global Conference (OGC)*(pp. 124-127). IEEE.
- Watanabe, K., Kurihara, Y., Kobayashi, K., & Suzuki, K. (2020). Ballistocardiogram (BCG) measurement by a differential pressure sensor. *IEEE Sensors Journal*, 21(6), 8583-8592.
- Hytonen, R., Tshala, A., Schreier, J., Holopainen, M., Forsman, A., Oksanen, M., ... & Jähne-Raden, N. (2020, December). Analysing ballistocardiography for pervasive healthcare. In *2020 16th International Conference on Mobility, Sensing and Networking (MSN)*(pp. 86-91). IEEE.
- Zhang, L., Cai, P., Deng, Y., Lin, J., Chu, Z., Shi, Q., ... & Wang, B. (2021). Ballistocardiography to identify high left atrial pressure in patients with heart failure. *Annals of Palliative Medicine*, 10(7), 8155168-8158168.
- Yoshioka, Mototaka, and Souksakhone Bounyong. "Analysis of pulse transit time derived from imaging photoplethysmography and microwave sensor-based ballistocardiography." *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 2020.
- TPP320 [Internet]. Available from: <http://www.laxtheshop.kr/goods/view?no=6>.
- Weinstein S, Ebert P. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform. *IEEE transactions on Communication Technology* 1971;19(5):628-634.

접수일: 2024년 5월 15일, 심사일: 2024년 6월 17일,
게재확정일: 2024년 6월 21일