

혈관 통과 시간을 활용한 이중 결정론적 심음 분석 알고리즘 개발에 관한 연구

이수민¹, 웨이첸^{2,3}, 김인철^{4,5}, 이미란⁶, 박희준^{2*}

계명대학교 일반대학원 의학과 의용공학전공¹

계명대학교 의과대학 의용공학과²

주식회사 클레어오디언스³

계명대학교 의과대학 내과학교실⁴

계명대학교 동산병원 심장내과⁵

대구대학교 컴퓨터정보공학부 컴퓨터공학전공⁶

Development of a Dual Deterministic Model Based Heart Sounds Analysis Algorithm Using Vascular Transit Time

Soomin Lee¹, Qun Wei^{2,3}, Incheol Kim^{4,5}, Miran Lee⁶, Heejoon Park^{2*}

Dept. of Biomedical Engineering, Graduate School of Medicine, Keimyung University, South Korea

Dept. of Biomedical Engineering, School of Medicine, Keimyung University, South Korea

Clairaudience co., Ltd., South Korea

Dept. of Internal Medicine, School of Medicine, Keimyung University, South Korea

Dept. of Cardiologist, Keimyung University Dongsan Hospital, South Korea

Dept. of Computer and Information Engineering, Daegu University, South Korea

* hjpark@kmu.ac.kr

Abstract

Identification of the first and second heart sounds (S1 and S2, respectively) are important and the most fundamental methods for cardiovascular disease prevention and early diagnosis. Although various conventional methods have been proposed for this purpose, the invasive method is difficult to use in daily life, and the method using a single channel has an issue in which accuracy needs to be improved. This paper proposes the dual deterministic model based on blood vessel transit time (VTT) by using multi-modal signals (PPG and PCG). To evaluate the performance of the proposed model, a total of twenty healthy subjects participated in the experiments for PCG and PPG data collection. As a result, the average accuracy of applying the proposed method to the database showed robust performances of 99.4% in S1 identification and 98.6% in S2 identification.

1. 연구 배경

심혈관질환, 암, 폐렴 등 질병으로 인한 사망 원인 중 심혈관질환은 매년 1-2위를 차지하며 주요 사망 원인으로 자리 잡고 있다[1-2]. 이를 예방 및 조기진단하기 위해서 일상생활에서도 지속적인 심장 상태 관찰을 통해 위험 인자를 파악하는 것이 중요하다.

심장 상태 관찰을 통해 위험 인자를 파악하는 방법 중 보편적인 검사 방법은 관상동맥 조영술이다[3]. 이는 가느다란 관을 동맥 혈관에 삽입하기 때문에 정확하지만, 해당 검사를 수행하는 대상자는 당일 금식 및 일정 시간 행동 제약과 같은 불편함이 있으며, 침습적인 검사 방법이므로 일상에서 간편하게 검사하는 것은 불가능하다.

일상생활에서 검사하는 방법에는 심장 박동에 따른 생체신호 변화를 측정 및 분석하는 방법이 있으며, 이를 활용하여 심장의 이상징후를 분석하는 연구가 활발하게 수행되고 있다. M. Abdollahpur 등은 심음도(PCG) 데이터를 활용하여 심장 상태의 정상과 비정상을 분류할 수 있는 방법을 제안했다[4]. 이는 일상생활에서 심음을 측정함으로써 심장 상태를 관찰하고 분석할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, PCG는 S2 파를 검출하는데 전처리 및 특징 추출 과정이 복잡하기 때문에 신호 처리 및 분석을 위해 긴 시간이 소요되어 실시간 시스템으로 적용하기에는

한계가 있다. T. Pereira 등은 웨어러블 기기를 통해 PPG 데이터를 수집하여 부정맥 진단을 위한 알고리즘을 제안했다[5]. 이를 통해 대상자가 보행 중이거나 수면 상태라도 실시간 부정맥 진단이 가능하며, 모바일 환경에서 데이터 취득에 제한이 있는 심전도(ECG)를 대체할 수 있는 목적으로 제안되었다. 하지만 PPG만 활용하여 심장 상태를 분석하는 것은 한계가 있으며, 취득 데이터 셋이 충분하지 않기 때문에 성능을 일반화하기는 어렵다.

따라서 본 논문에서는 일상생활에서 심장 상태를 분석하기 위한 방법으로 혈관 통과 시간(Vascular Transit Time, VTT)을 활용한 심음 분석 이중 결정론적 알고리즘(Dual Deterministic Model Algorithm)을 제안한다. 결정론적 알고리즘은 특정 신호가 입력되면 언제나 동일한 과정을 거쳐서 일정 결과를 도출하는 알고리즘으로써, 신뢰성이 높으며 실시간 모니터링에 적합하다. 또한 제안한 알고리즘은 단일 생체신호만 활용할 때 나타나는 한계를 극복하고자 심장박동으로 인해 발생하는 PCG와 PPG를 동시 수집하였다. 이후 순환계통 특성 기반의 상관관계 분석을 통해 VTT를 계산함으로써 심음 분석의 정확도를 높이고자 한다.

2. 제안하는 방법

정상적인 심장박동으로 인해 발생하는 소리인 심음은 S1과 S2를 의미한다. S1은 방실 승모판과 삼첨판의 순차적인 폐쇄로 인해 수축기 초기에 발생하는 소리로 주파수 범위는 10~200Hz에 해당하며, S2는 대동맥판과 폐동맥판의 폐쇄로 인해 이완기 초기에 발생하는 소리로 주파수 범위는 20~250Hz에 해당한다[6]. 그리고 심장박동에 의한 혈류량의 변화에 따라 나타나는 광적 신호인 PPG는 0.5~5Hz의 주파수 범위를 갖는다[6].

PCG와 PPG의 생리학적 상관관계를 분석한 결과, PPG의 수축기 피크 근처에서 통상적으로 S2가 감지되었다. 이는 심장 수축으로 인해 흘러나온 혈액이 말초혈관까지 전달될 때 일정 시간이 소요되기 때문이며, 이를 혈관 통과 시간인 VTT라고 정의한다. 본 논문에서는 VTT를 기반으로 실시간 심음 분석 이중 결정론적 알고리즘을 제안한다.

그림 1은 VTT를 활용한 실시간 심음 분석 이중 결정론적 알고리즘의 순서도이다. 제안한 알고리즘은 동시 측정된 PCG와 PPG의 상관관계 분석을 통해 나타나는 VTT를 활용하여 심음 분석을 하고자 병렬 구조로 설계하였다. 또한 PCG와 PPG 모두 동일한 주파수 대역에서 측정된 노이즈를 제거하기 위해 Envelope 기반 기술인 식(1)의 3차 Shannon Energy를 적용하였다.

$$SE_data = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_{(i)}|^3 \log |x_{(i)}|^3 \quad (1)$$

SE_data는 3차 Shannon Energy 기반의 계산식을 적용한 신호의 데이터이고, N은 20ms 구간 내에서 처리된 정규화된 신호이며, x는 Band-pass filter를 통해 전처리된 신호이다.

이를 통해 얻은 데이터로 PCG 신호에서는 적응형 임계값을 적용하여 S1과 S2의 세그먼트를 추출하였으며, PPG 신호에서는 수축기 피크를 감지하였다. 이후 S1이 감지되는 시점과 PPG 신호의 수축기 피크가 감지되는 시점을 분석한 VTT를 활용하여 심음을 분석하였다.

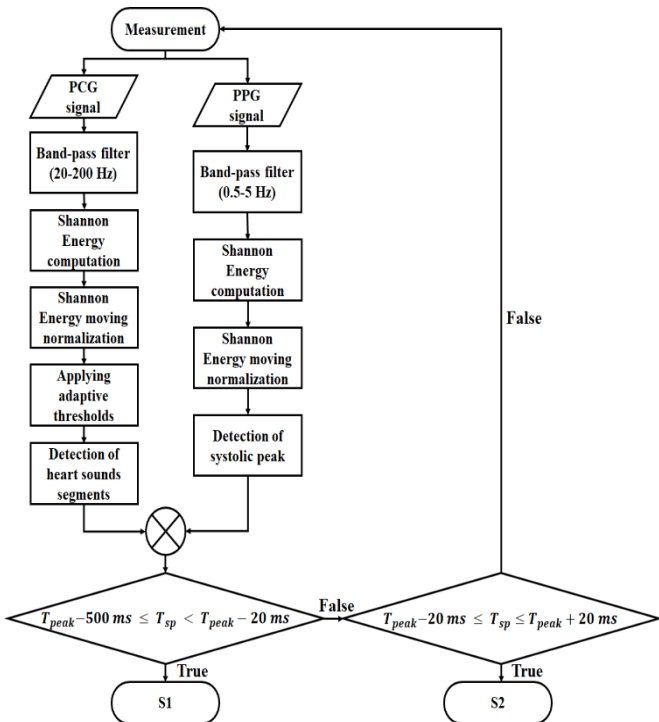


그림 1. 제안한 알고리즘인 VTT를 활용한 실시간 심음 분석 이중 결정론적 알고리즘 순서도

3. 데이터 수집 실험

제안한 알고리즘의 성능평가를 수행하기 위해 동시 측정된 PCG와 PPG를 수집하고자 심혈관질환이나 기저질환이 없는 건강한 성인 남녀 20명(남자:10명, 여자:10명, 연령 범위: 24-30세)를 대상으로 그림 2의 개념도와 같이 데이터 획득 실험을 수행했다. 그림과 같이 삼첨판이 위치한 피험자의 왼쪽 가슴 표면에 음향 센서(TSD108A, BIOPAC), 왼손 중지 손가락에 PPG 센서(TSD200C, BIOPAC)를 부착하였다. 또한 피험자의 긴장을 완화시키기 위해 적정 온도인 25°C 및 습도 50%를 유지한 독립적인 공간에서 편한 자세로 의자에 앉아 충분한 휴식을 취한 후 10분간 데이터를 획득하였다.

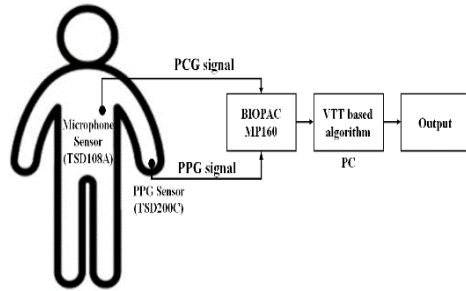


그림 2. 제안한 알고리즘 성능평가를 위한 개념도

4. 결과

그림 3은 데이터 수집 실험을 통해 획득된 피험자 1번의 PCG와 PPG의 데이터를 제안하는 알고리즘을 적용한 결과 데이터의 예시이다. 빨간색 그래프는 PCG의 원시 데이터를 의미하며, 보라색 그래프는 PPG의 원시 데이터를 의미한다. PCG의 S2는 PPG의 수축기 피크 근처에서 검출되고 있으며, 제안하는 방법을 통해 S1과 S2를 검출한 시점은 파란색 도트로 표시되었다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 정량적인 결과는 식 (2)의 정확도 (Accuracy)로 산출하였다.

$$Acc. = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100 [\%] \quad (2)$$

Acc.는 정확도, True Positive (TP)는 참이라고 예측한 값의 참값, True Negative (TN)는 거짓이라고 예측한 값의 참값, False Positive (FP)는 참이라고 예측한 값의 거짓 값, False Negative (FN)는 거짓이라고 예측한 값의 거짓 값을 의미한다. 예측값은 측정된 PPG 신호를 이용하여 계산한 평균 심박수(Heart Rate, HR)인 71bpm으로 설정하였다.

피험자 20명을 대상으로 제안한 알고리즘을 적용한 결과, S1과 S2 모두 평균적으로 약 70개를 식별하였으며, 표 1에서와 같이 각각 99.4%, 98.6%의 심음 분석 정확도를 나타내었다.

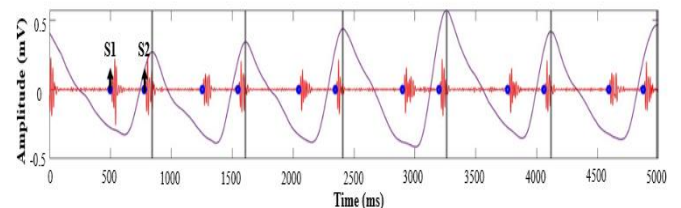


그림 3. 제안한 알고리즘을 적용한 예시 (피험자 1번 데이터 중 0~5초까지 활용)

표1. 제안한 알고리즘의 심음 분석 정확도 평가 결과

Sub No.	HR [bpm]	VTT based algorithm			
		S1		S2	
		Value [EA]	Acc. [%]	Value [EA]	Acc. [%]
1	70	70	100	69	98.6
2	68	67	98.5	65	95.6
3	72	71	98.6	71	98.6
4	76	76	100	76	100
5	70	70	100	70	100
6	67	67	100	66	98.5
7	73	73	100	72	98.6
8	69	68	98.6	68	98.6
9	67	67	100	67	100
10	68	68	100	67	98.5
11	73	73	100	71	97.3
12	70	70	100	68	97.1
13	70	70	100	70	100
14	68	68	100	68	100
15	76	75	98.7	75	98.7
16	73	72	98.6	72	98.6
17	70	70	100	68	97.1
18	70	70	100	70	100
19	68	66	97.1	66	97.06
20	73	72	98.6	72	98.63

5. 결론

본 논문에서는 실시간 모니터링에도 효과적이면서도 높은 정확도를 나타내는 심음 분석 알고리즘 개발을 위해 동시 측정된 PCG와 PPG를 활용한 실시간 심음 분석 이중 결정론적 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘의 성능평가를 수행하고자 건강한 성인 남녀 20명을 대상으로 데이터 수집 실험을 진행하였다. 수집된 데이터의 생리학적 상관관계 분석을 통해 VTT를 계산하였다. 결과적으로 S1 식별 99.43%, S2 식별 98.58%를 나타내며, 우수한 심음 분석 성능을 보였으며, 단일 신호만 사용했을 때의 한계점을 극복해낼 수 있었다.

그러나 현재 제안한 알고리즘을 적용하였을 때, 정상적인 심장 상태 분석만 가능하다는 한계점이 있으므로 향후 연구로 부정맥, 대동맥협착증, 승모판막협착증 등 기저질환이 있는 다양한 대상군의 데이터베이스를 구축하여 알고리즘을 보완할 예정이다.

6. Acknowledgements

본 논문은 대경 혁신 대학 프로젝트(HuStar)의 지원과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 2020R1C1C1014161)

7.참고 문헌

[1] 통계청, 2020년 사망원인통계 결과 중 “사망원인별 사망률”, 2021.
 [2] The story on the World Health Organization(2020), <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (accessed December 9, 2020).
 [3] 서울대학교병원, 「관상동맥 조영술」, <http://www.snuh.org/health/nMedInfo/nView.do?category=TEST&medid=BA000116>, (2022-04-08)
 [4] M. Abdollahpur et al., “Detection of pathological heart sounds”,

Physiological Measurement, Vol. 38, No. 8, p 1616-1630, 2017
 [5] T. Pereira et al., “Photoplethysmography based atrial fibrillation detection: a review”, *Npj Digital Medicine*, Vol. 3, No. 1, 2020
 [6] J. L. Moraes et al., "Advances in photoplethysmography signal analysis for biomedical applications," *Sensors*, Vol. 18, No. 6, pp. 1894, 2018.