

PPG 신호를 이용한 스마트워치 착용/미착용 탐지 기법

김지민, 문정윤, 김하정, 유재현*
성신여자대학교 AI융합학부 학부생,
*성신여자대학교 AI융합학부 교수

20231342@sungshin.ac.kr, 20221356@sungshin.ac.kr,
20221346@sungshin.ac.kr, *jhyoo@sungshin.ac.kr

Smartwatch Wear/Non-Wear Detection Method Using PPG Signals

Kim Ji Min, Moon Jung Yoon, Kim Ha Jeong, Yoo Jae Hyun*
School of AI Convergence, Sungshin Women's University

요 약

본 논문은 스마트워치 PPG 신호에서 진폭 특성을 활용한 착용/미착용 판정 기법을 제안한다. 알고리즘은 입력 신호를 고정된 길이의 청크로 분할한 뒤, 서브청크 단위로 진폭을 계산하여 착용 여부를 판정한다. 이후 다수결 투표 방식으로 최종 착용 상태를 결정한다. 제안된 방법은 복잡한 머신러닝 모델을 요구하지 않고, 단순한 파형 진폭 분석만으로 구현 가능하므로 연산량이 적고 실시간 적용이 가능하다. 다양한 착용/미착용 시나리오로 실험한 결과, 불완전 착용으로 인한 비정상 신호를 효과적으로 구분하여 후속 건강 분석의 신뢰성을 확보하는 데 기여할 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

웨어러블 기기의 보급 확산으로 인해 개인 맞춤형 건강 및 피트니스 모니터링 수요가 증가하고 있다. 특히 스마트워치에 내장된 PPG 센서는 저비용·비침습적이라는 장점으로 다양한 분야에서 활용되고 있다.

그러나 PPG 신호는 주변 환경 변화에 민감하게 영향을 받는다. 착용이 느슨하거나 센서가 피부와 떨어진 경우에도 주변 물체에서 반사된 빛을 측정하여 신호가 기록된다. 이로 인해 미착용 상태에서도 신호값이 존재하며, HeartPy와 같은 단순 피크 기반 분석 도구는 이러한 신호에서 가짜 피크를 검출하여 BPM을 추정해버리는 문제가 발생한다. 따라서 BPM 중심 접근만으로는 착용 여부를 정확히 판별하기 어렵다.

이에 본 연구는 진폭 특성 기반의 간단하고 해석 가능한 알고리즘을 제안하며, 착용/미착용 여부를 효과적으로 구분하고 웨어러블 데이터의 신뢰성을 높이하고자 한다.

II. 본론

2.1 데이터 수집 및 분석

선행 연구에서는 PPG 신호가 착용 상태와 미착용 상태에서 서로 다른 진폭 특성을 보인다는 사실이 보고된 바 있다 [1]. 본 연구는 해당 가설을 직접 검증하고, 착용 여부 판정 알고리즘 설계에 필요한 임계값을 도출하기 위해 실험을 수행하였다.

착용 상태 데이터는 개인 간 생리적 차이를 반영하기 위해 총 10명의 성인 피험자로부터 수집하였다. 피험자는 (1) 손목에 정상 착용 후 정지 상태로 4분간 유지, (2) 손목에 정상 착용 후 일상적 동작을 4분간 수행하였다.

반면, 미착용 상태는 인체 생리보다는 환경적 요인에 의해 신호가 결정되므로 다수 피험자가 필요하지 않았다. 대신, 사람들이 평소 위치를 착용하지 않았을 때 흔히 보이는 상황을 반영하여 시나리오를 설계하였다. 위치를 (1) 책상 위에 올려둔 경우, (2) 책 밑에 압박한 경우, (3) 가방 속에 넣고 흔든 경우, (4) 주머니에 넣고 걸었을 경우의 네 가지 조건을 각각 2분씩 반복 측정하여 미착용 데이터를 확보하였다.

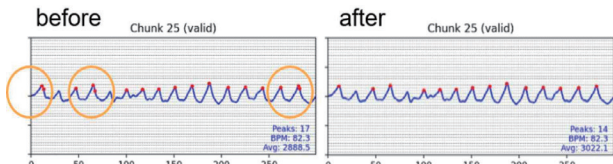
수집된 신호는 25Hz의 샘플링 주파수로 기록되었으며, 12초 단위(300 샘플)의 청크로 분할하여 분석하였다. 각 청크에 대해 (진폭) = $\max(x) - \min(x)$ 을 계산하고, 착용 상태와 미착용 상태의 분포를 비교하였다.

분석 결과, 착용 상태에서는 일정 범위 내에서 안정적인 진폭 분포가 관찰된 반면, 미착용 상태에서는 진폭이 매우 작게 나타나거나(책상 위 정지, 책 밑 압박), 반대로 비정상적으로 크게 나타났다(가방 속 흔들림, 주머니 속 흔들림). 이러한 차이를 근거로 본 연구에서는 low_threshold와 high threshold 두 가지 임계값을 설정하여, 안정적 착용 상태와 다양한 미착용 상태를 효과적으로 구분할 수 있도록 하였다.

2.2 데이터 처리 절차

수집된 PPG 신호는 25Hz로 기록되었으며, 약 12초 단위의 청크로 분할하였다. 각 청크는 먼저 0.5~8Hz 구간 bandpass filter를 적용한 후, HeartPy 라이브러리를 이용하여 피크를 검출하고 BPM을 추정하였다. 그러나 HeartPy는 국소 최대치와 주기성만을 이용하기 때문에 착용 상태에서도 인접한 파형을 중복 피크로 검출하여 잘못된 BPM을 산출하는 경우가 있다.

이를 보완하기 위해 피크 정제 과정을 추가하였다. 구체적으로 인접 피크 간 간격(RR interval)을 계산하여 0.3초 이하(200 bpm 이상에 해당)로 나타나는 비생리적 간격은 피크로 인정하지 않고 제거하였다.



[그림 1] HeartPy 피크 검출 결과의 정제 전후 비교

그림 1과 같이 정제된 피크를 기반으로, 청크의 BPM이 30~200 범위에 있으며, 해당 청크에서 검출된 유효 피크 개수가 최소 6개 이상(12초 기준)일 때만 유효한 신호로 인정하였다. 이후, 청크 전체의 진폭이 사전에 정의한 임계값 범위를 벗어나면 미착용으로 판정하였다.

임계값은 전체 신호의 전형적 변동성을 대표하는 표준편차 σ_x 로 정규화하여 산출하였다. 구체적으로 low/high 임계값을 α , β 로 매개변수화하여

$\text{low_threshold} = \alpha \cdot \sigma_x$, $\text{high_threshold} = \beta \cdot \sigma_x$ 로 정의하였다. σ_x 는 본 연구의 실험에서 약 4000으로 추정되었으며, 경험적 분포 분석(2.1절) 결과를 반영하여 $\alpha=0.2$, $\beta=2.5$ 로 설정하였다. 따라서

$\text{low_threshold} \approx 800$, $\text{high_threshold} \approx 100,000$ 이 된다. 낮은 임계값은 미착용 정지에서 관찰되는 극저 진폭을 포착하기 위함이며, 높은 임계값은 미착용 동작에서 나타나는 과대 진폭을 배제하기 위함이다. 이때 유효 피크 조건을 만족하지 않으면서도 진폭이 [low,high] 범위에 머무는 청크는 invalid로 남겨 불확실성을 명시하였다.

마지막으로 처리 과정 중 코드 실행 오류나 예외가 발생할 경우 해당 청크를 error로 기록하였다. 이는 데이터 손상, 길이 부족, HeartPy 처리 실패 등 예외적인 상황에서 발생한다.

이와 같은 전처리 과정을 통해 각 청크는 최종적으로 wear, non-wear, invalid, error 네 가지 범주 중 하나로 분류된다.

2.3 서브청크 기반 최종 판정

앞서 2.2절에서 제시한 진폭 기반 판정은 청크 전체의 진폭을 계산하여 임계값과 비교하는 방식이었다. 그러나 한 청크 전체를 단일 구간으로 분석할 경우, 특정 순간의 노이즈나 신호 불안정으로 인해 전체 구간이 잘못 분류될 가능성이 존재한다.

이를 보완하기 위해 본 연구에서는 각 청크를 5개의 서브청크로 분할하여 분석하였다(60 샘플 단위). 서브청크 단위로 진폭(A)을 계산하고, 앞서 도출한 임계값을 적용하여 판정하였다.

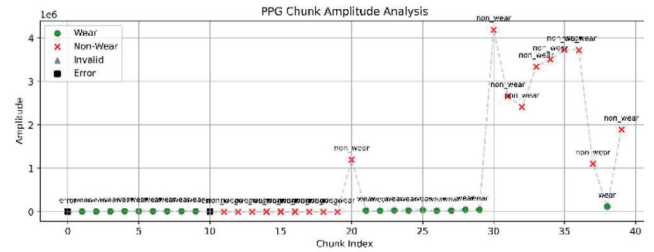
$A < \text{low_threshold} \rightarrow \text{non-wear}$ (극저 진폭)
 $\text{low_threshold} \leq A \leq \text{high_threshold} \rightarrow \text{wear}$
 $A > \text{high_threshold} \rightarrow \text{non-wear}$ (과대 진폭)

각 서브청크의 판정 결과, 최종적으로는 다수결 방식을 통해 청크 단위 착용 여부를 결정하였다. 이러한 절차는 개별 순간의 노이즈에 민감하지 않고, 청크 전체 상태를 보다 직관적이고 해석 가능하게 판정할 수 있도록 한다.

추가적으로, 청크의 초기 판정이 invalid이더라도 진폭이 임계값을 벗어나 극단적으로 크거나 작은 경우에는 최종적으로 non-wear로 재분류하였다. 이는 invalid로 판정되는 모호한 상태를 최소화하고 판정의 일관성을 확보하기 위한 보완 규칙이다.

2.4 결과 및 논의

본 연구의 알고리즘은 착용 상태(정지, 동작)와 미착용 상태(책상 위, 가방 속)에서 검증되었다.



[그림 2] 알고리즘 테스트 결과 (x축 기준 착용 안정 구간(0~9) - 미착용 정지 구간(10~19) - 착용 동작 구간(20~29) - 미착용 흔들림 구간(30~39))

그림2에서 확인할 수 있듯이, 착용 안정 구간에서는 청크가 안정적으로 wear로 판정되었으며, 미착용 정지 구간에서는 진폭이 극도로 낮게 나타나 일관되게 non-wear로 구분되었다. 이후 착용 동작 구간에서도 가벼운 움직임이 있었으나, 진폭 값은 착용 안정 구간과 거의 유사하게 나타났으며 모두 안정적으로 wear로 검출되었다. 마지막으로, 미착용 가방 흔들림 구간에서는 비정상적으로 큰 진폭이 관찰되었으며, 이 역시 대부분 non-wear로 분류되었다. 또한, 0·10·20과 같은 경계 지점에서는 동작 전환에 따른 일시적인 신호 불안정이 발생하여 분석에서 제외하였다.

이러한 결과는 제안된 방법이 단순한 진폭 기반 분석만으로도 극저·과대 진폭을 효과적으로 구분하여 복잡한 모델 없이 착용/미착용 판정을 안정적으로 수행할 수 있음을 보여준다.

다만, 예외적인 노이즈 상황에서는 임계값 설정에 민감할 수 있다는 한계가 존재한다. 향후에는 다양한 미착용 환경을 추가적으로 수집하고, 보조 센서 정보와 결합하여 판정의 견고성을 더욱 강화할 필요가 있다.

III. 결론

본 논문에서는 스마트워치 PPG 신호에서 진폭 특성을 활용한 착용/미착용 탐지 알고리즘을 제안하였다. HeartPy 기반 BPM 검출의 한계를 피크 정제 과정을 통해 보완하고, 진폭 특성을 활용하여 단순하면서도 효과적으로 wear/non-wear 상태를 구분할 수 있음을 보였다.

향후 연구에서는 다양한 사용자 환경과 장기간 데이터셋에서 알고리즘의 성능을 평가하고, 가속도계(ACC), 피부전도도(EDA) 등 보조 센서를 통합하여 다중 모달 기반 착용 여부 판정으로 확장할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 경찰청이 지원한 ‘사회적 약자 보호 강화 기술 개발(www.kipot.or.kr)’의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

[과제명: 저전력 복합측위, 근접탐색 기술 기반 범죄피해 안전조치 대상자 위치추적 통합관계 플랫폼 개발/과제번호: RS-2023-00236101]

참 고 문 헌

- [1] S. Park, D. Zheng, and U. Lee, "A PPG Signal Dataset Collected in Semi-Naturalistic Settings Using Galaxy Watch" *Scientific Data*, vol. 12, Article no. 892, 2025.