

작업자 안전관리 플랫폼 개발을 위한 신호처리 기반 생체신호 이상징후 감지 알고리즘 설계

장여주*, 이상민*, 진훈*, 송승찬*

*(주)엠플

e-mail: yjang@mpole.co.kr

Design of a Signal Processing-Based Algorithm for Abnormal Biosignal Detection in Worker Safety Management Platform Development

Yeo-ju Jang*, Sang-Min Lee*, Hoon Jin*, Seung-Chan Song*

*MPOLE Co., Ltd.

요약

본 연구에서는 제조업 작업자의 안전관리를 위한 통합관제플랫폼의 개발을 위하여, 생체 상태 악화를 조기에 탐지하기 위한 신호처리 기반 이상징후 감지 알고리즘을 제안하고 그 설계 결과를 제시하였다. 상용품인 갤럭시 워치를 기반으로 심박수, 활동량, 피부온도, 혈중 산소포화도 신호를 수집하였다. 생체신호 이상징후 감지를 위하여 정상-이상 기준값을 사전에 설정하였고, 이를 기반으로 제안된 알고리즘은 네 개의 모듈로 구성되며 순차적인 프로세스를 갖도록 하였다. 1) 신호 전처리: 이동평균, 중앙값 필터를 적용하여 원시데이터 노이즈 제거, 2) 이상치 보정: 클리핑 및 보간 기법 적용, 3) 보정된 결과를 활용한 이상징후 감지: 적응형 기준선과 변화점 탐지를 통하여 위험 상태 판단, 4) 플랫폼 연계 및 표출: 감지 이벤트를 위치·상태 데이터와 함께 디지털트윈 기반 관제 플랫폼에 전달. 본 연구 결과를 통하여 안전관리 플랫폼에서 복잡한 AI 모델 의존성을 줄임과 동시에 저지연·저전력·실시간 탐지가 가능한 경량 알고리즘 구조를 적용하고자 하였다. 향후 데이터 축적을 통해서 알고리즘을 고도화하고, 개인 맞춤형 알고리즘 고도화를 추진할 예정이다.

1. 서론

작업 현장에서는 작업자의 생체 상태 악화나 이상징후를 조기에 탐지하지 못한 경우 산업재해의 발생 위험성이 존재한다[1]. 특히 고온, 과로, 스트레스 환경에서는 심박수(HR), 심박변이도 (HRV), 피부온도와 같은 생체신호를 통하여 이상을 확인할 수 있으며, 이를 실시간으로 검출하는 기술은 작업자 안전을 위한 핵심기술로서 고려되고 있다[2]. 기존 연구의 다수는 복잡한 AI 모델에 의존하지만, 현장 적용 시 저지연·저전력·해석 용이성의 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 제조업 종사 작업자의 안전 관리를 위한 통합관제 플랫폼의 요소기술로써, 신호처리 기반의 이상징후 감지 알고리즘을 설계하여, 노이즈 제거 및 아웃라이어 보정, 적응형 기준선, 변화점 탐지를 조합한 실시간 경량 파이프라인을 제안하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상 장비 및 항목 선정

대상 장비는 삼성 갤럭시 워치 6으로 선정하였다. 본 장비에는

심박 검출을 위한 Photoplethysmography(PPG) 센서, 활동량 측정을 위한 가속도/자이로 센서(걸음 수), 피부온도 센서, 혈중 산소포화도(SpO₂) 센서가 탑재되어 있다. 본 연구에서는 이 네 가지 항목을 선정하여 데이터를 수집하였다. 데이터 수집 환경은 착용형 웨어러블 디바이스를 현장 작업자가 착용하고, 수집된 신호는 현장 모니터링 시스템과 동기화하여 기록하였다.

2.2 데이터 수집 및 처리

데이터 수집은 삼성 갤럭시 워치 6(SM-R940)를 활용하였다. 모든 생체신호는 실시간으로 수집 및 기록되며, 수집된 데이터에는 UTC 기반 타임스탬프를 부여하고자 하였다. 누락값 등이 발생할 시에는 결측치 플래그를 부여함으로써, 전처리 단계에서 추적 가능하도록 하였다.

3. 연구 결과

3.1 알고리즘 설계

본 연구에서 제안한 생체신호 이상징후 감지 알고리즘은 총 네 단계로 구성되도록 설계하였다.

3.1.1 신호 전처리

센서별 특성과 노이즈 특성에 따라 이동평균(Moving Average), 중앙값 필터(Median Filter), 지수 가중 이동평균(EWMA) 등을 선택적으로 적용하여 신호 안정성을 확보하도록 하였다. 이를 통해 고빈도, 순간 스파이크, 드랍아웃 등 다양한 형태의 오차를 효과적으로 보완할 수 있도록 하였다.

3.1.2 이상치 보정

Value Modification 기법 중 클리핑(Clipping) 및 보간(Interpolation) 기법을 적용하여, 순간적 센서 오류나 비현실적인 급격한 변화를 보정하도록 하였다. 이를 통하여 오류값이 명확한 변화를 제거함으로써, 물리적·생리적 타당성을 유지할 수 있도록 하였다.

심박수, 체온, 산소포화도 등 주요 지표의 이상치에 대해서는 [표 1]의 정상·이상 범위를 사전 기준으로 설정하여, 제안 알고리즘의 탐지 성능을 검증할 수 있는 참조 지표(reference index)로 활용하였다.

[Table 1] Normal and Abnormal Ranges by Parameter

Parameter	Normal Range	Abnormal Range (Alert Threshold)
Heart Rate	50-100 bpm	<40 or >120 bpm
Step Count	-	-
Body Temperature	36.0-37.5 °C	<35.0 or >38.0 °C
Oxygen Saturation (SpO ₂)	≥ 95 %	< 90 %

3.1.3 적응형 기준선 산출

추후 개별 작업자의 장기간 데이터 분포를 학습한 이후, 정상 범위를 동적으로 계산(Adaptive Baseline) 하는 방식을 적용하고자 하였다. 이를 통해 개인 간 생체신호 차이와 작업 환경 요인을 반영할 수 있었으며, 정적 임계값 대비 더 정밀한 탐지가 가능하도록 설계하였다.

3.1.4 변화점 탐지

시계열 신호 내 급격한 변화를 감지하기 위해 Page-Hinkley 등의 변화점 탐지 알고리즘을 적용하였다. 이를 통해 심박 급등, 체온 상승, 활동량 급변의 위험 신호를 조기에 포착할 수 있도록 하였다.

3.2 플랫폼 적용 설계

제안 알고리즘은 저지연·저전력·실시간 연동을 핵심 목표로 하였으며, 모듈화 구조(Modular Architecture)로 설계되었다.

3.2.1 센서 모듈(Sensor Module)

센서 모듈을 통하여 웨어러블 디바이스 내 PPG, ECG, SpO₂, 피부온도 등 다양한 센서 기반 원시 데이터를 수집하도록 하였다.

3.2.2 신호처리 모듈(Signal Processing Module)

수집된 데이터에 이동평균(MA), 중앙값 필터(Median Filter), 지수 가중 이동평균(EWMA) 기반 노이즈 제거와 Value Modification 기반 이상치 보정을 수행하도록 하였다.

3.2.3 이상징후 감지 모듈(Anomaly Detection Module)

적응형 기준선(Adaptive Baseline)과 변화점 탐지(Change-point Detection) 알고리즘을 적용하여 심박 이상, 체온 상승, 활동 급변 등 작업자의 이상 상태를 판별하는 기능으로 구성하였다.

3.2.4 플랫폼 연계 모듈(Platform Interface Module)

감지된 이벤트를 작업자의 위치·상태 정보와 함께 디지털 트윈 기반 관제 플랫폼에 전송하며, 관리자 단말에는 실시간 알림을 제공하는 기능을 구성하였다.

4. 논의 및 결론

본 연구에서는 작업자 안전관리 플랫폼을 위한 신호처리 기반 생체신호 이상징후 감지 알고리즘을 제안하였다. 이동평균 및 값 보정 기법을 통한 노이즈 제거, 적응형 기준선 산출, 변화점 탐지를 결합함으로써 저지연·저전력·실시간 탐지가 가능한 경량 알고리즘 구조를 마련하였다.

제안된 알고리즘은 AI 모델 대비 연산량 소모가 적다는 장점이 있다. 다만 복합적인 패턴이나 비정형 데이터 탐지에는 한계가 존재한다. 따라서 향후에는 현장 데이터를 축적하여 머신러닝·딥러닝 기반 고도화를 수행하고, 대규모 분석에는 개인별 특성을 반영한 맞춤형 이상징후 탐지가 가능하도록 Isolation Forest 기반 모델을 적용함으로써 개인화 성능을 강화함과 동시에 성능을 고도화 할 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

이 논문은 중소벤처기업부의 재원으로 중소기업기술정보진흥원-스마트제조혁신 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: RS-2024-00445035).

참고문헌

- [1] 조영창, 김민수, “스트레스 평가를 위한 심박 변이도, 전기피부반응 및 피부온도 특성”, 한국산업정보학회논문지, 20권 3호, 2015년.
- [2] 권태림, “PPG 센서 기반 운전자 생체 신호 이상탐지 및 신호 처리 연구”, 한양대학교, 석사학위 논문, 2023년.