

PVDF 센서를 이용한 CNN 모델 기반 수면 자세 분류

조현호¹, 이강현¹, 송채영¹, 최상호¹

광운대학교 컴퓨터정보공학부¹

CNN model-based sleep posture classification using PVDF sensor

Hyunho Cho¹, Kanghyun Lee¹, Chaeyoung Song¹, Sang Ho Choi^{1*}

School of Computer and Information Engineering, Kwangwoon University, Korea

*shchoi@kw.ac.kr

Abstract

Monitoring of sleep posture is essential for identifying potential health risks, enhancing sleep quality, and preventing various conditions, including musculoskeletal pain, respiratory complications, and sleep disorders. In this study, we propose a posture detection system using Polyvinylidene Fluoride (PVDF) sensors combined with Continuous Wavelet Transform (CWT) for real-time monitoring. Data from 57 participants were collected across four body positions (supine, left lateral, right lateral, and prone) using four PVDF sensors placed beneath a mattress. The collected data were transformed into time-frequency representations via CWT, and two deep learning models were developed: a 2D Convolutional Neural Network (CNN) and a 3D CNN. The 2D CNN model processes data by focusing on time and frequency dimensions, while the 3D CNN captures complex interactions across time, frequency, and sensor channels. Both models demonstrated high classification accuracy, with the 3D CNN showing superior performance in capturing posture changes. These findings highlight the potential of PVDF sensors and deep learning in healthcare applications for non-invasive posture monitoring.

1. 연구 배경

육상은 지속적인 압력으로 인해 피부와 그 아래 조직이 손상되는 현상으로, 입원 환자의 약 5-15%가 경험하고 있다. 올바른 자세를 유지하는 것은 육상 뿐만 아니라 척추 건강과 수면의 질에도 중요한 영향을 미친다. 잘못된 자세로 장기간 수면을 취하면 요통이나 목 통증을 유발할 수 있으며, 수면 무호흡증과 같은 호흡 문제를 초래할 수 있다. 또한, 적절한 자세는 깊고 안정적인 수면을 유도하며, 잤은 뒤척임을 줄여 수면의 질을 향상시키는 데 도움을 준다. 따라서 침대에서의 자세 모니터링은 환자의 건강을 유지하고 수면의 질을 개선하는 데 필수적이다.

비구속적 방식으로 환자의 자세를 모니터링하는 필요성은 여러 연구에서 강조되고 있다. 특히, PVDF(Polyvinylidene Fluoride) 센서는 높은 감도와 내구성으로 다양한 생체 신호를 감지할 수 있으며, 이는 수면 자세 모니터링에 적합하다. 기존 연구에서는 PVDF 센서를 활용한 자세 추정이 성공적으로 이루어진 바 있다 [1]. 더불어, LSTM 모델을 사용한 연구에서는 PVDF 센서를 이용한 수면 단계 분류에서 높은 성능을 기록하였으며 [2], 본 연구는 CNN을 통해 타임 시리즈 데이터를 처리하여 자세를 모니터링하는 방법을 제안한다.

개인 맞춤형 수면 솔루션을 제공하는 것도 자세 모니터링의 중요한 이점이다. 의료기관 뿐만 아니라 가정에서도 환자의 자세를 지속적으로 모니터링할 수 있는 정확하고 효율적인 시스템의 필요성이 커지고 있다.

Polyvinylidene Fluoride (PVDF) 센서는 높은 감도, 정확성, 내구성, 유연성, 그리고 저전력 소비라는 특성 덕분에 자세 모니터링에 매우 적합하다. 기존의 Force Sensitive Resistor (FSR)와 비교할 때, PVDF 센서는 더 넓은 범위의 압력 변화를 감지할 수 있으며, 시간이 지나도 내구성이 유지된다. 또한, PVDF 센서는 저전력 소비 덕분에 가정 환경에서 장기간 사용하기에도 적합하다. 본 연구는 PVDF 센서를 활용하여 침대에 누운 사용자의 자세를 탐지하는 모델을

개발하고, 그 성능을 평가한다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 PVDF 필름 센서를 이용하여 생체 신호를 측정하고, 이 데이터를 Continuous Wavelet Transform (CWT)를 통해 분석하는 방법론을 제시한다. 총 60명의 성인 피험자(남성 40명, 여성 20명)가 실험에 참여하였으며, 각 피험자는 안내에 따라 지정된 자세를 취하도록 하여 데이터 수집 과정의 일관성을 보장하였다. 본 연구는 광운대학교 기관윤리위원회의 승인을 받아 실시하였다 (IRB no. 7001546-202300831-HR(SB)-008-03).

2.1. Hardware

PVDF 센서는 압력 변화에 따른 전압 변화를 측정하여 생체 신호를 감지한다. PVDF 센서는 250 Hz의 샘플링 주파수를 가지고 있으며, 이는 1초당 250개의 프레임을 수집할 수 있다. 이 센서는 매우 민감하여 미세한 압력 변화도 감지할 수 있으며, 특히 신체 자세 변화에 따른 압력 분포를 효과적으로 측정할 수 있다.

2.2. Experimental Recording

실험은 일반적인 침실 환경과 유사하게 구성되었으며, 4개의 PVDF 센서를 침대 매트리스 아래에 병렬로 배치하여 실험자의 자세를 모니터링하였다. 각 실험자는 정자세, 왼쪽으로 누운 자세, 오른쪽으로 누운 자세, 그리고 엎드린 자세에서 각각 15분 동안 자세를 유지한 상태로 신호가 기록되었다.

이때 모든 실험은 동일한 프로토콜에 따라 수행되었으며, 각 실험자의 자세에 따른 데이터를 250 Hz의 주파수로 수집하였다. 각 자세의 신호는 자세 변화에 따른 압력 분포 변화를 감지하기 위해 4개의 센서에서 동시에 기록되었다. 각 채널의 주파수 성분은 7500×24 크기의 행렬로 표현되었다.

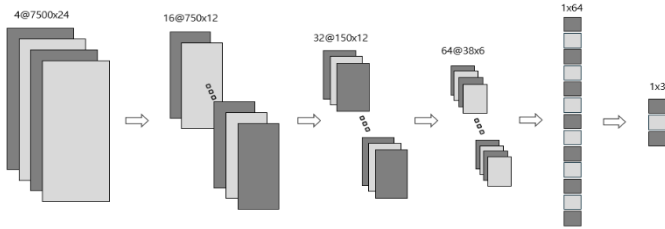


그림3. 2D-CNN 구조도

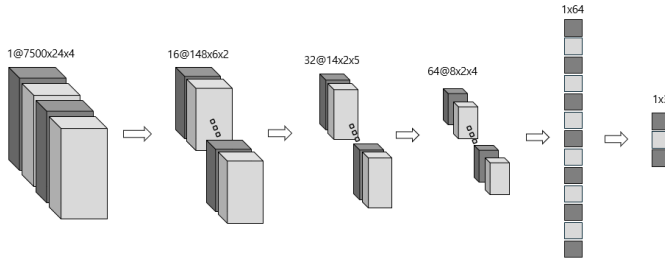


그림4. 3D-CNN 구조도

2.3. Preprocessing

수집된 데이터는 다음의 전처리 단계를 따른다. PVDF 데이터를 처리하는 방식은 [3]에서 제안한 전처리 방법을 참고하였다.

2.3.1. 데이터 병합 및 정규화

4개의 채널 데이터를 하나로 병합한 후, Z-score normalization을 통해 전체 데이터를 정규화 함으로써 각 채널 간의 차이를 최소화하고, 신호의 일관성을 유지하였다. 이후, 각 채널을 다시 분리해서 채널을 분할했다.

2.3.2. Continuous Wavelet Transform (CWT)

신호의 시간-주파수 분석을 위해 CWT를 사용하였다. CWT는 시간과 주파수 도메인 모두에서 신호를 분석할 수 있는 강력한 방법으로, 본 연구에서는 주파수 대역 1 Hz에서 5Hz 사이의 성분을 추출하였다. 변환된 데이터는 약 250,000(시간축)×96 (주파수축)의 형태로 구성되었으며, 주파수축은 각 센서별로 24개의 주파수 성분을 포함하고 있다. 이를 통해 자세에 따른 다양한 주파수 성분을 분석할 수 있었다.

2.4. Dataset

변환된 데이터는 step size 1250 프레임으로 나누어, 각 구간에서 7500 프레임씩 샘플링하였다. 각 샘플은 30초의 데이터를 포함하며, 데이터는 5초 간격으로 샘플링되어 저장되었다. 최종적으로, 총 57명의 실험자의 데이터가 사용되었으며, 38번, 42번, 57번 실험자는 4번째 채널의 데이터 소실로 인해 분석에서 제외했다.

2.5. Modeling

그림 2.에서 (b), (c)에 해당하는 자세를 함께 묶어서 라벨링을 진행했고 2D CNN, 3D CNN를 이용한 모델로 분류 모델을 구성한다.

2.5.1. 2D convolution

시간축(7500)과 주파수축(24)을 기준으로 데이터를 2D 형태로 처리하며, 각 채널을 모델의 입력 채널로 사용한다. 입력 데이터는 (4x7500x24)로 구성되며, 시간과 주파수 축에서 특징을 추출한다.

2.5.2. 3D convolution

시간, 주파수, 채널 간의 상호작용을 학습할 수 있도록 데이터를 3D로 구성하여 학습한다. 입력 데이터는 (1x7500x24x4)로 PVDF의 4개의 채널 간의 연관성을 추가로 파악한다.

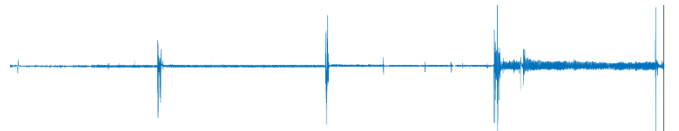


그림 1. PVDF 센서 한 채널에서 측정된 원신호 예시

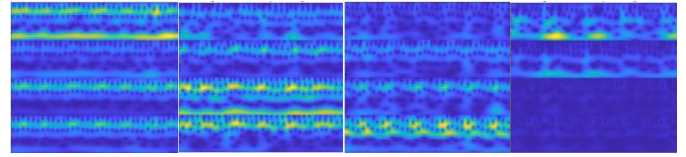


그림 2. 추출된 신호의 전처리 및 구간 분할 예시

(a)정자세, (b)왼쪽, (c)오른쪽, (d)옆드림

3. 연구 결과

57명의 실험 데이터를 사용하여 성능을 평가하였다. 데이터는 45명은 학습, 6명은 검증, 6명은 테스트에 사용되었으며, 각 실험에서 6분의 데이터를 사용하여 실험을 진행했다. 두 모델의 성능은 학습, 검증, 테스트 데이터셋을 통해 평가되었다. 2D CNN은 오버피팅 경향이 나타났으며, 초기 학습 성능이 높았지만 검증 및 테스트 성능에서 상대적으로 낮은 결과를 보였다.

Model	2D CNN	3D CNN
Test Accuracy	79.17%	86.37%
Precision	0.80	0.88
Recall	0.79	0.86
F1-score	0.79	0.87

표 1. 2D-CNN, 3D-CNN 결과

3D CNN 모델은 2D CNN에 비해 검증 및 테스트에서 더 높은 성능을 기록하였다. 이는 수평으로 위치된 PVDF의 각 채널간의 관계성이 상호작용을 파악하는데 충분한 영향을 주는 것을 확인했다. 2D CNN에서도 데이터셋을 보충하고 적절한 세부적인 분류를 추가하면 모델 성능 향상이 가능할 것으로 판단된다.

PVDF 센서를 수평으로 적절히 위치시켜 배치하면서 얻은 데이터로 침대 위에서의 자세를 분류 가능했다. 사용자의 침대에서의 자세를 분류하는 모델의 가능성을 확인했다.

4. Acknowledgements

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2024-RS-2022-001562 25)

5.참고 문헌

- [1] Seo, S., Hwang, S. H., Yoon, H. N., Jung, D. W., Choi, J. W., Lee, Y. J., Jeong, D. U., & Park, K. S. (2014). "Unconstrained Estimation of Body Postures on Bed Using Polyvinylidene Fluoride Film-based Sensor." *Journal of Biomedical Engineering Research*, 35(5), 169-176.
- [2] Choi, S. H., Kwon, H. B., Jin, H. W., Yoon, H., Lee, M. H., & Lee, Y. J. (2020). "Long Short-Term Memory Networks for Unconstrained Sleep Stage Classification Using Polyvinylidene Fluoride Film Sensor." *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 24(12), 3606-3615. DOI: 10.1109/JBHI.2020.2979168.
- [3] Piriyaikitakongkij, M., Warin, P., Lakhan, P., Leelaarporn, P., Kumchaiseemak, N., Suwajanakorn, S., Pianpanit, T., Niparnan, N., Mukhopadhyay, S. C., & Wilaiprasitporn, T. (2021). "SleepPoseNet: Multi-View Learning for Sleep Postural Transition Recognition Using UWB." *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 25(4), 1305-1314.