

심리적 상태 정보를 이용한 조건부 학습 기반 사용자 인식

송철호*, 반성범**

Conditional Learning-based User Identification using Psychological State Information

Cheol Ho Song*, Sungbum Pan**

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단(No.NRF-2017R1A6A1A03015496, No.RS-2025-25414941)의 지원을 받아 수행된 연구임

요약

웨어러블 디바이스 기술의 확산과 함께 심전도를 이용한 사용자 인식 기술이 주목받고 있다. 그러나 심전도 신호는 심리적 상태 변화에 민감하여 동일 사용자에 대해서도 상태별 인식 성능 차이가 발생하는 한계가 있다. 본 논문에서는 입력 심전도 신호로부터 추정된 상태 확률 정보를 조건으로 반영하는 심리적 상태 조건부 학습 기반 사용자 인식 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 상태 확률을 사용자 인식 과정의 조건으로 반영하여 상태 변화에 따른 특징 불안정성을 완화한다. WESAD 데이터셋을 이용한 5회 반복 실험 결과, 조건부 학습 모델은 Macro 평균 인식을 향상과 함께 상태 간 인식 성능 편차가 평균 0.198% 감소하는 통계적으로 유의미한 결과를 보였다.

Abstract

With the rapid advancement of wearable device technologies, Electrocardiogram (ECG)-based user identification has gained increasing attention. However, ECG signals are highly sensitive to psychological state changes, which leads to performance variations even for the same user under different states. To address this limitation, this paper proposes a psychological state - conditioned learning - based user identification system that incorporates estimated state probability information from input ECG signals as a conditioning factor. The proposed system integrates state probabilities into the user identification process to mitigate feature instability caused by state variations. Experimental results on the WESAD dataset with five repeated trials demonstrate that the conditional learning model achieves an improved macro-average identification accuracy and a statistically significant reduction in inter-state performance variance by an average of 0.198%.

Keywords

electrocardiogram, biometrics, mental stress, conditional learning, CNN

* 조선대학교 IT연구소
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5381-4206>
** 조선대학교 IT연구소 소장(교신저자)
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0960-5706>

· Received: Jan. 08, 2026, Revised: Mar. 04, 2026, Accepted: Mar. 07, 2026
· Co-Corresponding Author: Sung Bum Pan
Research Institute of IT, Chosun University, Dong-Gu, Gwangju 61452
South Korea
Tel.: +82-62-230-6897, Email sbpan@chosun.ac.kr

1. 서 론

최근 센서 기술 및 웨어러블 디바이스의 발전과 함께 생체신호를 이용한 사용자 인식 기술이 차세대 인증 수단으로 주목받고 있다. 생체신호 기반 인식은 생리적 특성을 반영하므로 위·변조가 어려우며, 시간에 따라 변하지 않는 개인 고유 특성을 반영한다는 점에서 높은 보안성을 갖는다. 그중에서도 심전도(ECG, Electrocardiogram)는 심장의 전기적 활동을 반영하는 신호로, 개인별 신호 파형의 형태와 주기적 특성의 차이로 인해 사용자 인식에 적합한 신호로 평가된다. 이에 따라, 심전도를 활용한 바이오인식 기술은 의료 및 보안 분야를 중심으로 활발히 연구되고 있다[1][2].

그러나 심전도는 외부 환경뿐 아니라 스트레스, 감정, 피로도 등 심리적·생리적 상태 변화에 민감하다는 특성을 가진다. 동일한 사용자라도 상태가 달라지면 심전도 파형의 형태, 진폭, 심박 주기 등이 변화하여 인식 성능의 불안정성을 초래한다[3][4]. 기존 연구들에서는 안정적인 상태에서 높은 인식률을 보이지만, 스트레스나 감정 자극 상태에서는 성능이 저하되는 현상을 보고하고 있다[5]. 이러한 문제는 생체신호 기반 사용자 인식의 실생활 적용 가능성을 저해하는 주요 한계로 작용할 수 있다.

이와 같은 한계를 극복하기 위해 최근에는 생체신호로부터 사용자의 심리적 상태를 분류하거나, 상태 정보를 인식 모델에 반영하려는 연구가 이루어지고 있다. 합성곱 신경망 또는 장단기 메모리 기반 구조를 이용해 스트레스나 감정 상태를 분류하는 연구가 진행되고 있으며, 다중 태스크 학습(Multi-task learning)을 통해 상태 변동에 강인한 특징 표현을 학습하려는 접근이 제안되고 있다[6]-[8]. 그러나 대부분의 기존 연구는 상태 분류와 사용자 인식을 독립적인 과정으로 수행하거나, 상태 정보를 명시적으로 특징 학습 과정에 반영하지 못하는 구조적 한계를 지닌다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 상태 확률 정보를 조건으로 입력받는 심리적 상태 조건부 학습 기반 심전도 사용자 인식 시스템을 제안한다. 제안된 구조는 합성곱 신경망 기반 상태

분류기를 통해 입력 심전도 신호로부터 상태 확률을 추정하고, 이를 사용자 인식 분류기의 입력 채널에 결합하여 상태 정보를 반영하도록 설계하였다. 이를 통해 모델은 사용자 고유 특성과 함께 상태 변동성을 고려한 특성 표현을 학습하게 된다. WESAD(Wearable Stress and Affect Detection) 데이터셋[9]을 이용한 실험 결과, 제안된 모델은 기존 상태 정보 미반영 모델 구조에 비해 평균 사용자 인식 성능이 향상되었으며, 상태별 성능 불안정성 완화를 확인하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 상태 변화에 따른 사용자 인식에 관한 연구를 분석한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 심리적 상태 조건부 학습 기반 사용자 인식 시스템에 관해 설명한다. 4장에서는 진행한 실험 결과에 대해 분석하고, 5장에서 결론 및 향후 연구로 논문을 마무리한다.

II. 상태 변화에 따른 생체신호를 이용한 사용자 인식에 관한 연구

생체신호는 개인 고유의 생리적 특성을 반영함과 동시에, 사용자의 신체적·심리적 상태 변화에 따라 동적으로 변하는 특성을 가진다. 특히 교감 신경계(Sympathetic nervous system)와 부교감 신경계(Parasympathetic nervous system)는 심박수, 심박 변이도 등 비자발적 생리 반응을 조절하며, 이러한 변화는 심전도 신호의 진폭, 주기성 및 주파수 성분에 반영된다. 이로 인해 동일한 사용자라도 하더라도 상태 변화에 따라 심전도 신호의 통계적 특성과 특징 분포가 달라질 수 있다[10][11]. 이와 관련하여 R. Zhou et al.[12]은 심리적 스트레스 유도를 통해 취득한 심전도 신호를 분석하여, 스트레스 상태에서 심박 변이도 특징과 R-R 간격 분포가 안정 상태 대비 유의미하게 변화함을 보고하였다. 이러한 상태 의존적 신호 변동성은 생체신호 기반 사용자 인식 모델의 특징 공간 분리도를 저하시켜, 실제 환경에서 인식 성능 저하를 초래할 수 있음을 지적하였다.

상태 변화에 따른 생체신호 변동성이 사용자 인식 성능에 미치는 영향을 완화하기 위해, 상태 정보를 고려한 사용자 인식 연구가 진행되고 있다. A.

Al-Jibreen et al.[13]은 부정맥(Arrhythmia)과 같은 비정상 심박동 상태가 사용자 인식 성능에 미치는 영향을 검증하였다. 정상상태에서는 99.28%, 부정맥 상태에서는 93.81%의 인식률을 달성하여 생리적 상태 변화가 사용자 인식 성능에 영향을 미친다는 점을 검증하였다. A. A. Saleh et al.[14]은 운동 직후 및 회복 단계와 같은 신체 활동 상태 변화 환경에서 DE-PADA(Deep Personalized Augmentation and Domain Adaptation) 기법을 적용하여 인식 성능 저하를 완화할 수 있음을 보였다. 다만, 상태 정보를 입력 특징에 명시적으로 결합하지는 않았다.

상태 분류 정보를 활용하여 사용자 인식 성능 향상을 위한 접근도 연구되었다. Pogliaghi[8]는 다중태스크 학습(Multi-task learning) 구조를 이용하여 스트레스 상태 분류와 사용자 인식을 동시에 학습함으로써, 성능 향상을 보였다. 그러나 상태 분류 결과가 사용자 인식 과정에 직접 결합되지는 않아 상태 변화에 따른 특징 불안정성을 해결하는 데에는 한계가 있다. A. J. Prakash et al.[15]와 C. Fuster-Barceló et al.[16]는 상태 정보를 직접 반영하지는 않았으나, 단일 조건 또는 다양한 건강·활동 상태에서 심전도 기반 사용자 인식 성능을 분석하여 상태 변화에 따른 성능 편차를 확인하였다.

기존 연구들은 생리적·심리적 상태 변화가 심전도 기반 사용자 인식 성능에 영향을 미친다는 점

을 인식하고 다양한 보완 기법을 제안해 왔다. 그러나 상태 분류와 사용자 인식을 병렬적으로 학습하거나, 도메인 적응 또는 보조 태스크 수준에서 간접적으로 상태 변동성을 보완하는 데 그쳤다. 이는 상태 정보를 입력 특징에 명시적으로 결합하여 상태 변화에 강인한 특징 표현을 학습하지 못하는 한계가 있다.

III. 제안하는 심전도 신호를 이용한 상태 조건부 학습 기반 사용자 인식 방법

본 논문에서는 입력 심전도 신호로부터 추정된 상태 확률 정보를 사용자 인식 과정에 조건으로 반영하는 상태 조건부 학습 기반 사용자 인식 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 그림 1과 같이, 합성곱 신경망 기반 상태 분류기를 통해 입력 신호로부터 상태 확률을 추정하고, 이를 사용자 인식 분류기의 입력 채널에 결합하여 상태 정보를 명시적으로 반영하도록 설계하였다. 이때 상태 분류기는 심리적 상태를 정확히 분류하는 독립적 분류기를 목표로 하지 않는다. 입력 신호로부터 연속적인 상태 확률을 추정하여 사용자 인식 모델에 조건 변수로 제공하는 보조 모듈로 동작한다. 이를 통해 모델은 사용자 고유 특성과 함께 심리적 상태 변화에 따른 생리적 변동성을 동시에 고려한 특징 표현을 학습한다.

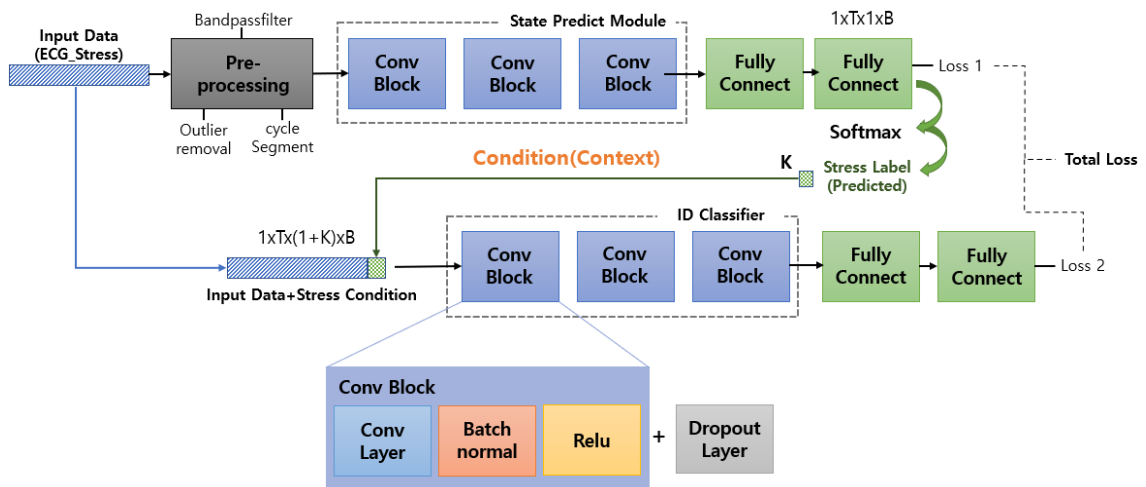


그림 1. 제안하는 심리적 상태 조건부 학습 기반 사용자 인식 시스템
Fig. 1. Proposed psychological state-conditional learning-based user recognition system

일반적인 심전도 기반 사용자 인식 모델은 피험자의 심리적·생리적 상태 변화에 따라 심전도 파형의 형태, 진폭 및 주기성이 달라질 경우 학습된 특징 분포가 불안정해져 인식 성능이 저하되는 한계를 가진다[17]. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 입력 신호로부터 추정된 상태 확률 정보를 조건(Condition)으로 활용하는 조건부 학습 구조를 설계하였다. 해당 구조는 상태 변화에 따른 신호 분포의 변동성을 보정하고, 보다 안정적인 사용자 특징 표현을 학습하도록 유도한다.

제안된 네트워크는 합성곱 신경망 기반의 상태 분류기와 사용자 인식기로 구성된 직렬구조를 따르며, 해당 시스템은 전체 흐름은 다음과 같다. 먼저, 전처리 및 세그먼트 과정을 거친 단일 심전도 신호 x 는 길이 T 를 갖는 1차원 신호로 정의되며, 이를 표현하면 식 (1)과 같다.

$$x \in \mathbb{R}^{1 \times T \times 1} \quad (1)$$

이때, \mathbb{R} 은 실수 집합을 의미한다. 실제 학습 과정에서는 배치 단위 처리를 위해 여러 개의 심전도 세그먼트를 동시에 입력으로 사용하며, 이 경우 배치 크기 B 를 포함한 식 (2)의 형태로 구성된다. 이 입력 x 는 상태 분류기와 사용자 인식기에 사용되는 원 입력 신호이다.

$$x \in \mathbb{R}^{1 \times T \times 1 \times B} \quad (2)$$

상태 분류기는 입력 심전도 신호로부터 해당 신호가 속한 심리적 상태를 추정하는 역할을 수행한다. 본 연구에서는 세 가지 상태(Baseline, Stress, Amusement)를 고려하며, 상태 분류기는 CNN 기반 구조로 설계하였다. 해당 분류기는 입력 x 를 받아 각 상태에 대한 확률값을 출력하며, 이는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$p = f_s(x), p = [p_1, p_2, p_3] \quad (3)$$

이때, f_s 는 상태 분류기를 의미하며, p 는 각 상태에 대한 확률 벡터로서 $\sum_{k=1}^3 p_k = 1$ 을 만족한다. 이 확률

벡터는 상태 자체를 결정하기 위한 목적이 아니라, 이후 사용자 인식 과정에서 조건 정보로 활용된다.

추정된 상태 확률 p 는 사용자 인식기에 입력되기 전, 시간 축 방향으로 확장되어 원 심전도 신호와 동일한 길이를 갖도록 변환된다. 이를 통해 상태 정보가 전체 심전도 세그먼트에 대해 일관되게 반영될 수 있다. 확장된 상태 확률 \tilde{p} 은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\tilde{p} \in \mathbb{R}^{1 \times T \times K \times B} \quad (4)$$

이때, $K=3$ 은 상태 클래스의 수를 의미한다. 이후 확장된 상태 확률 정보는 원 심전도 입력과 채널 방향으로 결합(Concatenation) 되어 사용자 인식기의 최종 입력을 구성한다. 식 (5)와 같이 구성된 Z 는 상태 정보가 조건으로 포함된 심전도 입력으로서, 사용자 인식기에 전달된다.

$$Z = \text{Concat}(x, \tilde{p}) \in \mathbb{R}^{1 \times T \times (1+K) \times B} \quad (5)$$

사용자 인식기 f_{id} 는 조건부 입력 Z 를 받아 합성곱 블록을 통해 시간적 특징을 추출한 후, 완전 연결 계층을 통해 최종적으로 사용자를 인식한다. 본 연구에서는 상태 분류와 사용자 인식을 동시에 학습하기 위해 식 (6)과 같은 결합 손실 함수를 정의하였다.

$$L_{total} = 0.5L_{state} + 0.5L_{identification} \quad (6)$$

본 연구의 네트워크 모델은 MATLAB 환경에서 RTX 4080 GPU를 이용하여 수행되었으며, 최적화 알고리즘으로 Adam optimizer를 사용하였다. 이때, Adam optimizer의 모멘텀 계수는 $\beta_1 = 0.9$, $\beta_2 = 0.999$ 로 설정하였으며, $\epsilon = 0.001$ 로 적용하였다. 학습률은 0.001로 설정하였으며 mini-Batch size는 256, epoch 수는 10으로 설정하였다. 전체 데이터는 학습 80%, 테스트 20%의 비율로 구성하였다. 이와 같은 상태 조건부 학습 구조를 통해 모델은 단순히 심전도 파형의 형태적 차이를 학습하는 데 그치지 않고, 상태 변화에 따라 달라지는 생리적 변

동성을 내재적으로 보정하였다. 이는, 동일 사용자의 다양한 상태에서도 일관된 인식 성능을 유지할 수 있도록 한다.

IV. 실험 결과 및 분석

본 실험에서는 공개 데이터셋인 WESAD 데이터셋을 이용하였다. 해당 데이터셋은 15명의 피험자에게 웨어러블 디바이스(E4, RespiBAN)를 장착하여, 세 가지 정서적 상태를 유도하여 심전도, 피부 전도도, 호흡 등의 생체신호를 취득하였다. 이 중 심전도 신호는 700Hz로 샘플링되었으며, 각 상태 구간을 균등하게 분할하여 실험에 이용하였다.

제안한 시스템의 효과를 검증하기 위해, 심리적 상태 정보 조건을 반영하지 않은 사용자 인식 모델과 심리적 상태 조건부 학습 기반 사용자 인식 모델의 성능을 비교 분석하였다. 먼저, 심리적 상태 정보를 반영하지 않고 사용자 인식만을 수행한 실험에서는 상태별 인식률을 기준으로 5회 반복 실험하였다. 해당 네트워크는 상태 조건부 학습 모델과 동일한 데이터 분할, 동일한 학습 파라미터 및 초기화 조건에서 학습되었다. 합성곱 계층 수, 커널 크기, 완전 연결 계층 구성 및 출력 클래스 수를 모두 동일하게 유지하고, 상태 확률 정보를 입력 채널에 결합하지 않는다는 점에서만 차이를 두었다. 실험 결과, 전반적으로 99% 이상의 높은 인식률을 보였으나, Baseline 상태에서 99.88%, Stress 상태에서 99.54%, Amusement 상태에서 99.72%로 동일 피험자 이더라도 상태 간 인식 성능 차이가 발생함을 확인하였다. 이는, 생리적 긴장 및 심리적 자극에 따른 심전도 파형 변동이 특징 표현에 영향을 미친 결과로 분석된다.

본 논문에서 제안한 심리적 상태 조건부 학습 기반 사용자 인식 시스템을 적용한 결과를 그림 2에 나타내었다. 이전 실험과 동일한 데이터 구성에서 입력 심전도 신호로부터 추정된 상태 확률 정보를 사용자 인식 모델의 입력 채널에 결합하여 조건부 학습을 수행하였다. 해당 실험 또한 5회 교차검증을 통해 평균 인식 성능을 평가하였다. 실험 결과, 모든 상태에서 99.8% 이상의 안정적인 인식 성능을

보였으며, 특히 상태별 성능 차이가 현저히 감소하는 경향을 보였다. 상태 간 가장 큰 성능 차이를 보였던 Stress 상태에서는 평균 인식률이 99.54%에서 99.84%로 약 0.3%p 향상되었다. 이는, 상태 확률 정보를 조건으로 반영함으로써, 심리적 상태 변화에 따른 특징 불안정성을 효과적으로 보정한 결과로 분석된다.

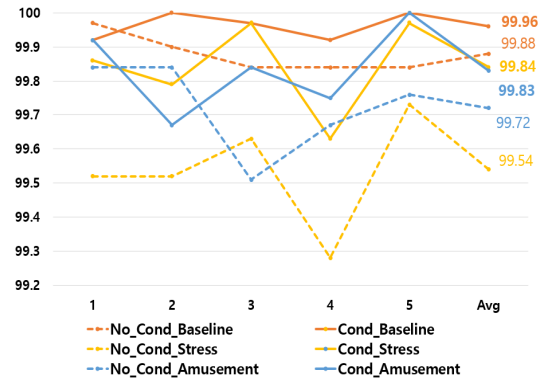


그림 2. 심리적 상태 조건 적용 여부에 따른 사용자 인식 성능 비교

Fig. 2. Comparison of user identification performance with and without psychological state conditioning

조건부 학습 적용 여부에 따른 사용자 인식 성능을 정량적으로 분석하기 위해 상태별 인식 정확도, Macro 평균 인식률, 상태 간 성능 편차를 기준으로 통계적 비교를 수행하였다. 해당 결과는 표 1에 제시하였다. 표 1에서는 5회 반복 실험 결과를 기반으로 평균 및 표준편차를 산출하였으며, Macro 평균 인식률과 상태 간 성능 편차(Max - Min)에 대해 paired t-test와 95% 신뢰구간(Confidence Interval, CI)을 함께 제시하였다. 분석 결과, 조건부 학습 모델은 Macro 평균 인식률에서 평균 0.17%p의 성능 향상을 보였으며, 이는 통계적으로 유의미한 차이로 확인되었다($p = 0.008$). 또한 상태 간 인식 성능 편차는 표 1과 같이 평균 0.198%p 감소하였으며, 해당 감소 역시 통계적으로 유의미하였다($p = 0.034$). 이러한 결과는 제안된 상태 조건부 학습 구조가 평균 인식 성능 향상뿐 아니라, 심리적 상태 변화에 따른 사용자 인식 성능의 안정성을 효과적으로 개선함을 정량적으로 보여준다.

표 1. 조건부 학습 적용 여부에 따른 사용자 인식 성능 및 통계적 분석 결과 (%)

Table 1. User identification performance and statistical analysis with and without conditional learning (%)

Metric	No-Condition (Mean \pm std)	Condition (Mean \pm std)	Difference (Cond-No_Cond)	95% CI of difference	p-value
Baseline ACC	99.878 \pm 0.058	99.962 \pm 0.040	+ 0.084	[-0.012, +0.180]	0.078
Stress ACC	99.536 \pm 0.168	99.844 \pm 0.142	+ 0.308	[+0.140, +0.476]	0.006
Amusement ACC	99.724 \pm 0.139	99.836 \pm 0.131	+ 0.112	[-0.031, +0.255]	0.111
Macro avg ACC	99.713 \pm 0.081	99.881 \pm 0.088	+ 0.168	[+0.072, +0.264]	0.008
Δ (Max-Min)	0.366 \pm 0.167	0.168 \pm 0.135	- 0.198	[-0.371, -0.025]	0.034

심전도 기반 사용자 인식에 관한 기존 연구들과 본 논문에서 제안한 시스템의 성능 비교 내용은 표 2와 같다. Siamese 네트워크 기반 사용자 인증 시스템을 제안한 Prakash[15]의 연구는 단일 조건 환경에서 99.85%의 높은 인식 성능을 확인하였으나, 생리적 또는 심리적 상태 변화에 대한 고려는 포함되지 않았다. 반면, Ai-Jibreen[13]과 Fuster-Barceló[16]의 연구는 부정맥이나 건강·활동 상태와 같은 상태 변화를 고려하여 사용자 인식 성능을 분석하였다. 하지만 정적 상태 대비 상태 변화 구간에서 인식 성능 저하가 발생함을 확인하였다. 이에 비해 본 연구에서는 상태 확률 정보를 사용자 인식 모델의 입력 특징에 조건부 학습을 통해 명시적으로 결합함으로써, 상태 변화에 따른 사용자 인식 성능의 편차를 효과적으로 완화하였다.

표 2. 제안하는 시스템과 관련 연구 비교

Table 2. Comparison of the proposed system and related works

Ref.	Signal	State reflection	Performance (%)
[13]	ECG	Arrhythmic	Normal: 99.28 Arrhythmic: 93.81
[15]	ECG	-	99.85
[16]	ECG	Cardiac, activity	Healthy: 99.84 Cardiac: 97.09
Proposed	ECG	Psychological state	Baseline: 99.95 Stress: 99.84 Amusement: 99.83

V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 심리적 상태 정보를 반영한 심전도 신호를 이용하여 조건부 학습 기반 사용자 인식

시스템을 제안하였다. 제안한 시스템은 입력 신호로부터 추정된 상태 확률 정보를 사용자 인식 네트워크의 입력 채널에 결합함으로써, 상태 변화에 따른 특징 표현의 불안정성을 완화하고 안정적인 인식 성능을 달성하였다. 채널 방향 결합 방식은 합성곱 신경망 기반 구조에서 입력 신호에 대한 전역적 상태 정보를 특징 추출 과정 전반에 안정적으로 전달할 수 있는 구조로, 본 연구에서 사용한 상태 확률의 특성에 적합하다. 또한 해당 방식은 추가적인 연산 오버헤드 없이 상태 정보를 반영할 수 있어 계산 복잡도 증가가 제한적이다. 이러한 구조적 특성은 실시간 사용자 인식 시스템에도 적용 가능성을 시사한다. Attention 또는 Gating 기반 조건부 학습 구조는 상태 정보 반영을 위한 유망한 대안이 될 수 있으나, 추가적인 파라미터 증가와 학습 복잡도를 수반한다. 이에 본 연구에서는 구조적 복잡도를 최소화한 채널 결합 방식을 채택하여, 상태 조건부 학습의 효과를 명확히 검증하는 것을 우선 목표로 하였다.

세 가지 심리적 상태에서 취득된 심전도 신호를 포함하는 WESAD 데이터셋을 이용한 실험 결과, 기존 상태 미반영 모델 대비 평균 인식률이 향상되었다. 특히, 생리적 상태별 사용자 인식률의 편차가 감소함을 확인하였다. 이는 상태 변동성을 반영한 조건부 학습 구조가 실제 환경에서도 강건한 사용자 인식 성능을 보장할 수 있음을 나타낸다.

본 연구는 WESAD 데이터셋을 기반으로 수행되었으나, 제안한 조건부 학습 구조는 특정 데이터셋이나 상태 정의에 의존하지 않는 일반적인 프레임워크로서, 다양한 생리적·심리적 상태를 포함하는 다른 심전도 데이터셋에도 확장 적용이 가능하다.

향후 연구에서는 호흡, 피부 전도도 등 추가 생체신호를 결합한 다중 생체신호 기반 상태-인식의 확장 연구를 수행하고자 한다. 또한 파라미터 감소, 최적화 등을 적용하여 모델을 경량화하고 정량적 지표 기반 복잡도 분석을 통해 실제 환경에서의 실시간 구현 가능성 검증 연구를 진행할 계획이다.

References

- [1] T. M. C. Pereira, et al., "Biometric Recognition: A Systematic Review on Electrocardiogram Data Acquisition Methods", *Sensors*, Vol. 23, No. 3, Jan. 2023. <https://doi.org/10.3390/s23031507>.
- [2] V. Agrawal, M. Hazratifard, H. Elmiligi, and F. Gebali, "Electrocardiogram (ECG)-Based User Authentication Using Deep Learning Algorithms", *Diagnostics*, Vol. 13, No. 3, Jan. 2023. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13030439>.
- [3] A. Csatho, D. V. Linden, and A. Matuz, "Change in Heart Rate Variability with Increasing Time-on-Task as a Marker for Mental Fatigue: A Systematic Review", *Biological Psychology*, Vol. 185, Jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2023.108727>.
- [4] M. Carvalho and S. Bras, "Addressing Intra-Subject Variability in Electrocardiogram-Based Biometric Systems Through a Hybrid Architecture", *Biomedical Signal Processing and Control*, Vol. 87, Jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.105465>.
- [5] E. Piciucco, et al., "Biometric Recognition Using Wearable Devices in Real-Life Settings", *Pattern Recognition Letters*, Vol. 146, pp. 260-266, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2021.03.020>.
- [6] S. S. Bippro, K. Sumaiya, and A. M. Mohammod, "Monitoring Stress Using Electrocardiogram Signal", *2023 Computing in Cardiology*, Vol. 50, pp. 1-4, Dec. 2023. <https://doi.org/10.22489/CinC.2023.204>.
- [7] C. H. Song, et al., "Stress Classification Using ECGs Based on a Multi-Dimensional Feature Fusion of LSTM and Xception", *IEEE Access*, Vol. 12, pp. 19077-19086, Feb. 2024. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3361684>.
- [8] P. Alessandro, et al., "Multi-Task Learning for Stress Recognition", *Adjunct Proc. of the 2022 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and the 2022 ACM International Symposium on Wearable Computers*, Cambridge, UK, pp. 202-206, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1145/3544793.3563404>.
- [9] P. Schmidt, et al., "Introducing Wesad, a Multimodal Dataset for Wearable Stress and Affect Detection", *Proc. of the 20th ACM International Conference on Multimodal Interaction*, Boulder, CO, USA, pp. 400-408, Oct. 2018. <https://doi.org/10.1145/3242969.3242985>.
- [10] H. G. Kim, et al., "Stress and Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature", *Psychiatry Investig*, Vol. 15, No. 3, pp. 235-245, Feb. 2018. <https://doi.org/10.30773/pi.2017.08.17>.
- [11] S. Immanuel, et al., "Heart Rate Variability for Evaluating Psychological Stress Changes in Healthy Adults: a scoping Review", *Neuropsychobiology*, Vol. 82, No. 4, pp. 187-202, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1159/000530376>.
- [12] R. Zhou, et al., "ECG-Based Biometric Under Different Psychological Stress States", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 202, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.106005>.
- [13] A. Al-Jibreen, et al., "Person Identification with Arrhythmic ECG Signals Using Deep Convolution Neural Network", *Scientific Reports*, Vol. 14, No. 1, Feb. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55066-w>.
- [14] A. A. Saleh, et al., "DE-PADA: Personalized Augmentation and Domain Adaptation for ECG Biometrics Across Physiological States", *arXiv preprint arXiv:2502.04973*, Feb. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.04973>.
- [15] A. J. Prakash, K. K. Patro, S. Samantray, P.

- Plawiak, and M. Hammad, "A Deep Learning Technique for Biometric Authentication Using ECG Beat Template Matching", *Information* 2023, Vol. 14, No. 2, Jan. 2023. <https://doi.org/10.3390/info14020065>.
- [16] C. Fuster-Barceló, C. Cámara, and P. Peris-López, "ECG-Based Patient Identification: A Comprehensive Evaluation Across Health and Activity Conditions", *IEEE Access*, Vol. 13, pp. 171942-171956, Dec. 2025. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3519462>.
- [17] C. H. Song, J. S. Kim, G. Choi, and S. Pan, "Xception-based Stress Classification by Removing ECG Signal's Outliers", *Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 21 No. 5, pp. 75-81, May 2021. <http://doi.org/10.14801/jkiit.2023.21.5.75>.

저자소개

송 철 호 (Cheol Ho Song)



2023년 9월 ~ 현재 :
조선대학교 전자공학과 박사과정,
조선대학교 IT연구소 학생연구원
관심분야 : 바이오인식, 신호처리,
딥러닝, 인공지능

반 성 범 (Sungbum Pan)



1999년 2월 :
서강대학교 전자공학과(공학박사)
2005년 2월 :
한국전자통신 연구원
정보보호연구단 생체인식기술
연구팀 팀장
2005년 3월 ~ 현재 :

조선대학교 전자공학과 교수
관심분야 : 바이오인식, 영상처리