

Biometric identification using artificial intelligence-based photoplethysmography signals

Yonghee Lee*, Jeonghwan Cha**, Jundong Lee***

*Professor, Dept. of Computer Engineering, Halla University, Wonju, Korea

**Student, Dept. of Computer Engineering, Halla University, Wonju, Korea

***Professor, Dept. of Multimedia Engineering, Gangneung-Wonju National University, Wonju, Korea

[Abstract]

In this study, In this study, we propose a method for personal identification using photoplethysmography (PPG) signals utilizing deep learning techniques. PPG signals are closely related to the anatomical structure and hemodynamic characteristics of the heart. Unlike electrocardiograms (ECGs), they do not require electrode attachment and can be easily measured noninvasively using optical sensors. In this study, we performed preprocessing on PPG signals measured at rest, followed by training and classification using a deep learning model. The results confirmed that individual identification is possible based on the characteristics of PPG signals corresponding to periodic cardiac and ventricular activity and changes in physical condition. The proposed method was evaluated by acquiring 610 periodic PPG signals from 12 subjects. The evaluation results verified the usefulness and applicability of the proposed approach.

▶ **Key words:** Biometric, Photoplethysmography, Electrocardiogram, PPG, Deep learning

[요 약]

본 연구에서는 딥러닝 기법을 활용하여 광혈류(Photoplethysmography, PPG) 신호를 이용한 개인 식별 방법을 제안한다. PPG 신호는 심장의 해부학적 구조 및 혈류역학적 특성과 밀접하게 연관되어 있으며, 심전도(ECG)와 달리 전극 부착이 필요하지 않고 비침습적으로 광 센서를 통해 간편하게 측정할 수 있다는 장점을 지닌다. 본 연구에서는 휴식 상태에서 측정된 PPG 신호를 대상으로 전처리 과정을 수행한 후, 딥러닝 모델을 통해 학습 및 분류를 진행하였다. 그 결과, 심장 및 심실의 주기적 활동과 신체 상태 변화에 따른 PPG 신호의 특성을 기반으로 개인 간 구분이 가능함을 확인하였다. 제안한 방법은 총 12명의 대상자로부터 각각 610개의 주기적인 PPG신호를 획득하여 알고리즘을 평가하였으며, 평가결과 제안한 접근법의 유용성과 적용 가능성을 검증하였다.

▶ **주제어:** 생체인식, 광혈류신호, 심전도, PPG, 딥러닝

-
- First Author: Yonghee Lee, Corresponding Author: Jundong Lee
 - *Yonghee Lee (yhlee@halla.ac.kr), Dept. of Computer Engineering, Halla University
 - **Jeonghwan Cha (rightear01@gmail.com), Dept. of Computer Engineering, Halla University
 - ***Jundong Lee (jlee@gwnu.ac.kr), Dept. of Multimedia Engineering, Gangneung-Wonju National University
 - Received: 2025. 10. 01, Revised: 2025. 10. 22, Accepted: 2025. 11. 17.

I. Introduction

생체인식은 개인의 고유한 신체적·행동적 특성을 측정하고 분석하여 개인을 식별하는 기술을 의미한다. 생체 인증의 기본 전제는 모든 사람이 본질적으로 서로 다른 생물학적·생리학적 특징을 가지고 있으며, 이러한 차이를 통해 개인을 구분할 수 있다는 점에 기반한다. 일반적으로 생체 인식은 세 가지 주요 유형으로 구분된다. 생물학적 생체인식은 DNA나 혈액과 같은 유전적·분자적 수준의 특징을 활용하며, 형태학적 생체인식은 지문, 얼굴 형상, 홍채와 같은 인체의 구조적 특성을 이용한다. 마지막으로 행동적 생체인식은 음성, 걸음걸이, 타이핑 패턴과 같은 개인의 고유한 행동 양식을 활용한다.

생체인식 기술은 여러 장점을 지닌다. 첫째, 모든 사람에게서 보편적으로 얻을 수 있으며, 개인 간의 차이가 명확하여 높은 구분력을 제공한다. 둘째, 시간이 지나도 변하지 않아 영구적인 특성을 지니며, 셋째, 별도의 인증서나 소지품을 필요로 하지 않아 편리하다. 또한 위·변조나 도용이 어렵다는 점에서 보안성이 높다. 이러한 이유로 지문 및 얼굴 인식은 스마트폰 인증에 널리 활용되고 있으며, 공항 보안 시스템에서는 홍채 인식과 같은 고도화된 생체인식 기술이 적용되고 있다. 이외에도 정맥 패턴이나 음성 인식 등 다양한 요소가 생체인식 식별자로 활용되고 있다[1-3].

생체인식 연구 분야에서는 심장의 활동을 전기적으로 기록한 심전도(ECG) 신호를 이용한 개인 식별 방법도 제안되어 왔다. 심전도는 개인 간의 심장 활동에서 나타나는 미세한 차이를 반영할 수 있어 유효한 생체인식 요소로 활용될 수 있다[4]. 그러나 심전도 측정을 위해서는 인체에 전극을 부착해야 하므로 실제 적용에는 불편함이 따른다. 이를 보완하기 위해 광혈류(Photoplethysmography, PPG) 신호를 활용하는 방법이 제시되었다[5-8]. 연구에서는 PPG가 주로 지문 인식의 보조 수단으로 사용되어, 살아 있는 조직임을 확인하는 용도에 국한되어 왔다.

본 연구에서는 이러한 기존 접근을 확장하여, PPG 신호를 직접적인 생체인식 식별자로 활용하는 방법을 제안한다. PPG는 빛을 이용해 말초 혈관 내 혈류 변화를 비침습적으로 측정할 수 있으며, 전극 부착이 필요 없어 간편하다는 장점을 지닌다. 따라서 PPG 신호는 실제 환경에서 보다 실용적이고 사용자 친화적인 생체인식 기술로 활용될 가능성이 크다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제1장에서는 서론, 제2장에서는 관련 연구를 서술한다. 제3장에서는 제안한 방

법과 딥러닝 모델을 서술한다. 제4장에서는 실험 및 성능을 평가한다.

II. Preliminaries

1. Related works

1.1 Photoplethysmography

심장의 해부학적 구조와 기능은 광혈류신호의 파형 형성에 직접적인 영향을 미친다. 심장은 우·좌심방과 우·좌심실, 그리고 주요 판막으로 구성되어 혈액을 전신으로 펌프질한다. 수축기와 이완기에 따라 혈류의 흐름이 조절되며, 이러한 혈류 역학적 변화가 광혈류신호에 반영된다. 좌심실은 가장 강력한 펌프 역할을 하며, 대동맥으로 혈액을 방출하는 과정이 광혈류신호의 상승 구간에 해당한다. 혈액 방출 후 좌심실이 이완되면서 대동맥판이 닫히고, 이때 신호는 하강 구간을 형성한다. 심장이 한 번의 수축으로 얼마나 많은 혈액을 방출하는지(심박출량)는 광혈류신호의 진폭(파형의 크기)에 영향을 준다. 심박출량이 높을수록 신호의 진폭이 커지고, 심박출량이 낮을수록 진폭이 작아진다. 이처럼 개인별로 해부학적 구조와 생리적 활동의 미세한 차이는 혈류신호의 파형 형성에 중요한 역할을 하며, 이러한 연관성을 기반으로 광혈류신호를 분석하면 해부학적 구조의 차이를 갖는 개인별 특징을 얻어낼 수 있게 된다.

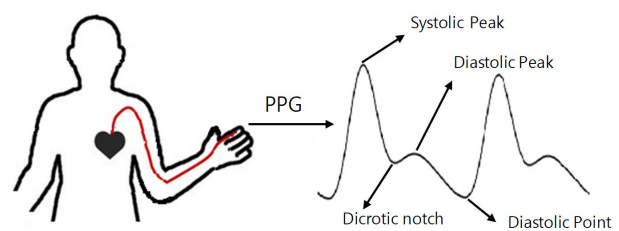


Fig. 1. Relationship between cardiac activity and PPG signal

광혈류신호는 주로 혈액의 흐름 및 혈관의 확장과 수축과 같은 혈류 동작에서 발생하며, 비침습적으로 생체 내부 정보를 얻기 위해 사용된다. 혈액 내 산소화된 헤모글로빈과 탈산소화된 헤모글로빈은 서로 다른 파장의 빛을 다르게 흡수한다. 이 특성을 이용하여 특정 파장의 빛을 조직에 투과시키면, 조직을 통과한 후의 빛의 양과 특성이 혈액의 산소 포화도, 혈류량, 혈관의 직경 등에 의해 변화하게 된다. 혈관 속의 혈액은 심장 박동에 따라 주기적으로 흐름이 증가하거나 감소하는 특성을 보이며, 이로 인해 조직 내 혈액의 농도가 시간에 따라 변하며, 빛의 흡수율도

변하게 된다. 이러한 변화를 포착하여 혈류 신호를 얻을 수 있다. 그림1은 심장의 활동과 광혈류신호와의 관계를 나타낸 그림이다.

III. The Proposed Scheme

3.1 주기 신호 추출

본 연구에서는 심장의 움직임과 밀접한 관련성을 지니며, 광혈류신호를 이용하여 개인별 특징을 구분하는 알고리즘을 전개한다. 그림 2는 제안한 알고리즘의 단계별 수행내용을 나타낸 것이다.

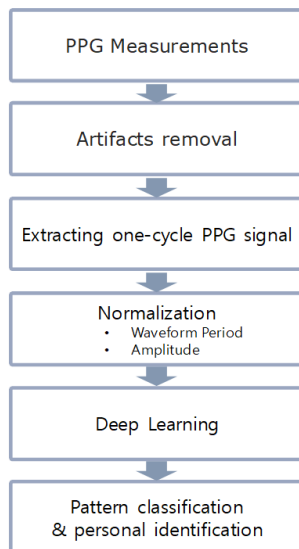


Fig. 2. Flowchart of the proposed algorithm

광혈류신호의 학습과 인식을 위해서는 한 주기의 광혈류신호를 정확히 추출하는 과정이 필요하다. 광혈류신호는 측정 시 대상자의 생리적·심리적 상태에 따라 주기와 진폭이 달라진다. 예를 들어, 안정 시와 운동 시, 또는 긴장·흥분 상태에서는 주기 및 진폭의 변동이 발생한다. 따라서 이러한 변화를 정규화함으로써 개인의 해부학적 구조에 따른 고유한 PPG 파형 특징을 확보할 수 있다. 이를 위해 먼저, 외부 환경 및 측정 조건에서 발생하는 아티팩트를 제거하기 위해 이동평균을 적용한다. 이후 각 데이터프레임에서 중앙 인덱스를 기준으로 좌측과 우측의 최소값을 탐색하여 주기를 정의한다. 최소값(골) 간의 구간은 파형의 주기를 의미하므로, 이를 통해 주기적 구조를 파악할 수 있다. 이러한 과정을 거쳐 1차 전처리가 완료된 데이터 프레임에서 추출한다.

3.2 광혈류신호의 전처리

그림 3는 대상자로부터 측정된 PPG 신호의 한 주기를 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 대상자에 따라 주기, 진폭, 그리고 파형의 형태가 서로 다르게 나타난다. 동일한 대상자라 하더라도 상태에 따라 파형의 특징이 달라진다. 이러한 변동성을 보정하기 위해 먼저 파형의 주기를 일정하게 정규화한다. 이는 후속 딥러닝 학습 과정에서 안정적인 모델 훈련을 가능하게 하기 위함이다. 이를 위해 각 주기가 동일한 개수의 샘플을 갖도록 다항식 보간법을 적용하였다. 이후 진폭을 -1에서 1 사이의 값으로 정규화한다.

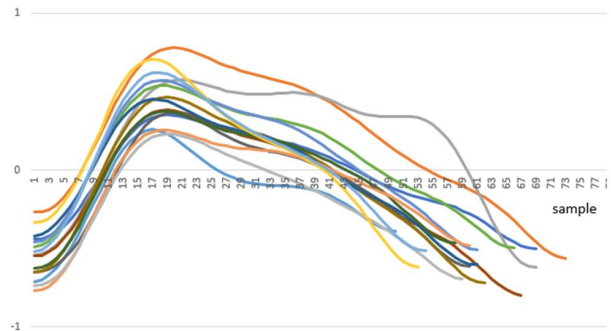


Fig. 3. Normalized 1-cycle photoplethysmographic signals

3.3 딥러닝 모델

본 연구에서는 심장의 수축기와 이완기에 따른 혈압 변화를 반영하는 광혈류신호신호를 활용하여, 개인별 패턴을 구분하는 알고리즘을 제안한다.

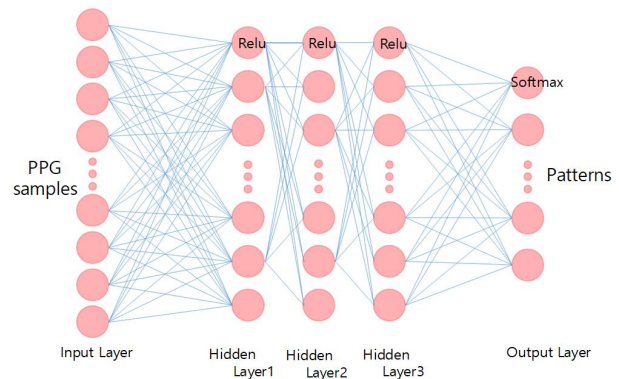


Fig. 4. Artificial intelligence model

제안된 딥러닝 모델은 입력층과 3개의 은닉층, 그리고 출력층으로 구성된 5계층 구조이다. 입력층은 128 샘플의 광혈류신호를 입력으로 받도록 128개의 노드로 구성하였으며, 첫 번째 은닉층은 128개, 두 번째 은닉층은 64개, 세 번째 은닉층은 64개의 노드로 설계하였다. 활성화 함수

는 은닉층에서 ReLU를 적용하였고, 출력층은 12개의 노드로 구성하여 소프트맥스(Softmax) 함수를 통해 각 클래스를 분류하도록 하였다. ReLU 함수는 입력 값이 0 이하일 경우 0을 반환하고, 0보다 큰 경우 해당 값을 그대로 출력하는 특성을 지닌다. ReLU함수는 시그모이드 함수가 0~1 구간에 제한되어 학습 시 결과가 0으로 수렴하는 문제를 완화하는 장점이 있다. 학습 알고리즘으로 과적합을 줄이기 위해 랜덤포레스트 알고리즘을 이용하였다. 학습 데이터의 수가 많지 않은 경우에 효과적으로 사용할 수 있는 알고리즘이다. 제안된 모델은 심장의 해부학적 구조와 혈관 상태에 따라 나타나는 혈류 역학적 변화를 PPG 신호에서 추출하여, 개인 식별에 활용한다. 전처리된 PPG 신호는 한 주기 이상의 데이터를 입력으로 사용하며, 노드의 활성화 함수는 연속적 실수 값 입력에는 시그모이드, 이진적 정보에는 ReLU를 적용하였다. 손실 함수는 MAE(mean absolute error)와 이진 교차 엔트로피(binary cross-entropy)를 함께 적용하여 수렴 속도를 검증하였으며, 최종 출력은 12개 클래스에 대한 개인 구분 결과를 제공한다. 그림 4에 본 연구에서 설계한 딥러닝 구조를 나타냈다.

3.4 학습 데이터 구축

본 연구에서는 총 12명의 대상자로부터 휴식 상태에서 측정한 데이터등으로 12종류의 광혈류신호신호를 획득하였다. 획득된 신호는 전처리 과정과 과적합을 막기 위해 각 패턴별 동일하게 610개씩의 주기신호를 추출하였으며, 이 중 80%는 딥러닝 학습에, 나머지 20%는 성능 검증에 사용하였다.

IV. Conclusions

그림 5는 학습 과정에서의 수렴 상태를 보여주며, 표 1은 성능평가 결과를 나타낸 것이다. 그림 6은 패턴별 인식 결과를 혼동 행렬 형태로 제시한 것이다. 분석 결과, 대부분의 클래스에서 높은 분류 정확도를 확인할 수 있었으며, 이는 PPG 신호가 개인별 해부학적·생리적 차이를 효과적으로 반영한다는 점을 시사한다. 다만, 학습 및 검증 정확도 곡선에서는 일부 불안정한 수렴 양상이 나타났는데, 이는 데이터 다양성 부족 및 모델 최적화와 관련된 한계로 해석된다.

종합적으로, 본 연구는 PPG 신호의 주기적 특성과 심장 활동에 따른 변화를 기반으로 개인 식별이 가능함을 실험적으로 입증하였다. 이는 전극 부착이 필요한 심전도

(ECG)와 달리, 비침습적이고 간편하게 측정 가능한 광혈류신호를 이용한 생체인식 기술의 가능성을 제시하며, 향후 데이터 확충 및 알고리즘 개선을 통해 실용적인 개인 인증 시스템으로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

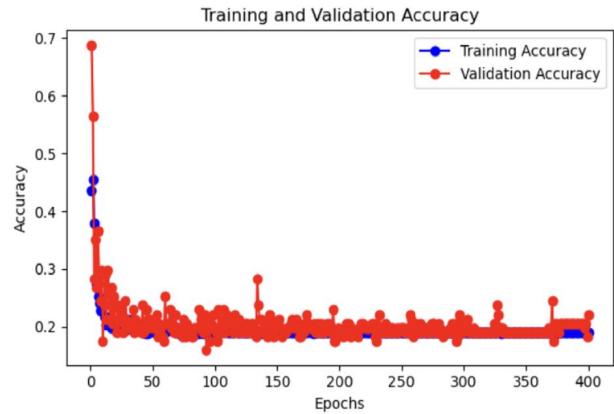


Fig. 5. Training and Validation Accuracy

Table 1. Evaluation Metrics

Metrics	Accuracy	Recall	Precision	F1-score
Value	0.9180	0.9102	0.9082	0.9080

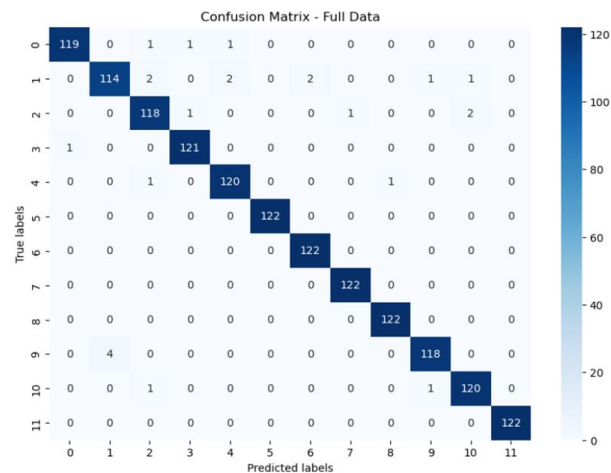


Fig. 6. Confusion Matrix

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation(IITP)-Innovative Human Resource Development for Local Intellectualization program grant funded by the Korea government(MSIT) (IITP-2025-RS-2023- 00260267)

REFERENCES

- [1] Revett K., "Cognitive biometrics: a novel approach to person authentication", *International Journal of Cognitive Biometrics*, vol.1, no.1, pp. 1-9, January 2012. DOI:10.1504/IJCB.2012.046516
- [2] Fairhurst M., Cheng L., Da Costa-Abreu M., "Predictive biometrics: a review and analysis of predicting personal characteristics from biometric data", *IET Biometrics*, vol.6 No. 6, pp. 369-378, May 2017. DOI:10.1049/iet-bmt.2016.0169
- [3] Proença, a H., Briceño, o J C., "Periocular biometrics: constraining the elastic graph matching algorithm to biologically plausible distortions", *IET Biometrics*, vol.3 no.4, pp. 167-175, January 2013. DOI:10.1049/iet-bmt.2013.0039
- [4] Israel S A, Irvine J M., "Heartbeat biometrics: a sensing system perspective", *International Journal of Cognitive Biometrics*, vol.1, no.1, pp. 39-65, January 2012. DOI:10.1504/IJCB.2012.046514
- [5] Park E. K., Baek H. Cho, Sang H. Park, Jong Y. Lee, Hwan S. Hwang, Hun K. Park., Jong S. Lee, Kim I. Y., Kim Sun I., "A Study on the Estimation of Continuous Blood Pressure using PIT and Biometric Parameters", *J.Biomed. Eng.*, vol.27, Issue 1, pp. 1-5, February 2006. DOI: 10.9718/JBER.2006.27.1.001
- [6] Yu C, Liu Z, McKenna T, Reisner A T, Reifman J ., "A Method for Automatic Identification of Reliable Heart Rates Calculated from ECG and PPG Waveforms", *Journal of American Medical Informatics Association*, vol.13, no.3, pp. 309-320, February 2006. DOI: 10.1197/jamia.M1925
- [7] Walia Akhil, Kaul Amit, "PPG and fingerprint: robust bimodal biometric system", *International Journal of Biometrics*, vol.15, no.6, pp. 665-684, January 2023. DOI:10.1504/IJBM.2023.133958
- [8] Chang Hua-Chien, Wang Ting, Liao Chi-An, Liu Tsung-Te, "A Low-Power PPG Processor for Real-Time Biometric Identification and Heart Rate Estimation", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol.70, no.10, pp. 3932-3936, July 2023. DOI: 10.1109/TCSII.2023.3291891

Authors



Yonghee Lee is a professor with the department of computer engineering at Halla University. He received as B.S., M.S., and Ph.D. degree in Electronics Engineering Hanyang University, Seoul, Korea in 1991, 1993, and 1998, respectively. His research interests biosignal processing and digital signal processing.



Jeonghwan Cha is a student at Halla University. He received his bachelor's degree in February 2025 and is currently conducting research in artificial intelligence.



Jundong Lee is a professor with the Department of Multimedia Engineering at GangNeung-Wonju National University. He received as B.S., M.S., and Ph.D. degree in Computer Science from HongIk University, Seoul, Korea in 1990, 1993, and 2001, respectively. His research interests include programming language, IoT, and platform.