

심탄도 신호를 이용한 심전도/광용적맥파 복원: 손실 함수 설계와 성능 분석

박웅^{1,2}, 김진원^{1,2}, 이성한², 정인철^{1,2*}

¹한림대학교 인공지능융합학과

²한림대학교 뇌혈관질환 선도연구센터

*incheol.jeong@hallym.ac.kr

Reconstructing ECG and PPG from Single-Channel BCG: Loss Design and Performance Analysis

Ung Park^{1,2}, Jinwon Kim^{1,2}, Sunghan Lee², In cheol Jeong^{1,2*}

¹Department of Artificial Intelligence Convergence, Hallym University

²Cardiovascular Disease Research Center, Hallym University

요 약

본 연구는 무구속 심탄도 (ballistocardiography, BCG)로부터 심전도 (electrocardiography, ECG)와 광용적맥파 (photoplethysmography, PPG)를 동시에 복원하는 공유 인코더-이원 디코더 U-Net 기반 멀티태스크 모델을 제안한다. 세 가지 손실 설계(과형 중심, 정점 보존, 가중 결합)를 비교한 결과, 과형 중심 손실은 과형 오차를 최소화했고, 정점 보존 손실은 박동 간격 재현성을 개선했다. 가중 결합 손실은 두 목표 간 균형을 달성하여 전반적 성능이 가장 우수했다. 본 결과는 BCG 기반 ECG/PPG 동시 복원의 타당성을 입증하며, 손실 결합이 과형 충실도와 타이밍 정확도 간 트레이드오프를 효과적으로 완화함을 보여준다.

I. 서 론

심혈관 질환은 전 세계 주요 사망, 이환 원인으로, 위험인자의 조기 발견과 연속 모니터링이 예후 개선에 핵심적이다 [1]. 심전도 (electrocardiography, ECG)는 심장의 전기 활동을, 광용적맥파 (photoplethysmography, PPG)는 말초 혈류 변화를 측정한다. 그러나 두 신호는 피부 접촉형 센서를 필요로 하며, 장기간 사용 시 불편감, 접촉 압 변화에 따른 왜곡, 움직임·수면 중 이탈로 인한 신뢰도 저하가 발생한다 [2]. 반면 심탄도 (ballistocardiography, BCG)는 침대·의자 등에 부착된 무구속 센서로 심장의 기계적 활동을 압력 변화로 간접 측정하여 연속 관측에 유리하지만, 움직임·외란·설치 조건에 민감해 신호 품질과 특징 추출의 신뢰성 확보가 과제로 남아 있다 [3]. 이를 보완하기 위해 전처리 및 딥러닝 기반 복원·잡음 억제 기법이 제안되어 왔으며 [4, 5], BCG로부터 ECG/PPG를 복원하면 접촉 센서 없이도 맥파전달시간 (pulse transit time, PTT) 기반 혈압 추정이 가능하다 [2]. 다만 단일 BCG로 서로 다른 부위에서 획득되는 ECG·PPG를 동시 복원할 때 위상 차와 정점(peak)을 정밀하게 재현하는 일은 여전히 도전적이다 [4, 6].

본 연구는 이러한 한계를 해결하고 임상적 활용성을 검증하기 위해, 단일 BCG 입력으로 ECG와 PPG를 동시 복원하는 U-Net 기반 멀티 태스크 모델을 제안하고, 위상·정점 보존을 반영한 다양한 손실 설계를 비교·평가하여 복원 품질을 체계적으로 분석한다.

II. 본 론

가. 연구 방법론

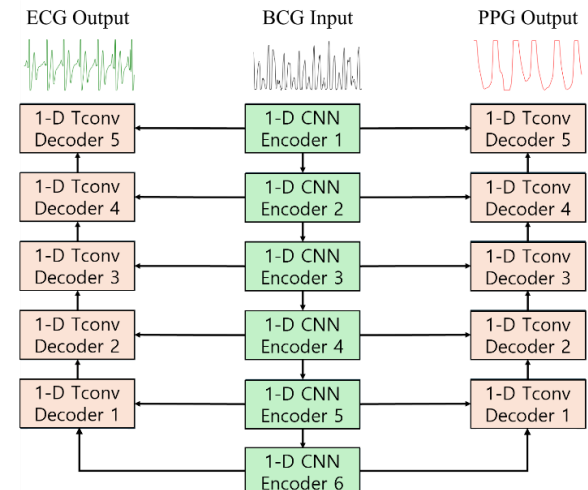
본 연구에는 심폐질환이나 운동 제한이 없는 만 19세 이상 성인 남녀 각 20명 (총 40명)을 모집하였다. 연구는 한림대학교 생명윤리위원회 승인 (HIRB-2024-012)을 받았으며, 모든 참가자에게 서면 동의를 받았다.

BCG는 압전 센서 기반 SSS-820 (Shenzhen Tianzhi Technology Co., Ltd., 100 Hz)로, ECG/PPG는 MP160

(BIOPAC Systems, Inc.)과 BN-RSPEC-T, PPGED 모듈 (1,000 Hz)로 동시 기록하였다. 수집 절차는 다음과 같다: (i) 참가자에게 ECG (흉부)와 PPG (오른손 검지) 센서를 부착한 뒤 의자에 착석, (ii) 침대로 이동하여 60초 안정 상태 유지, (iii) 의자로 복귀. 위 절차를 3회 반복하였다.

ECG와 PPG는 100 Hz로 다중샘플링하여 BCG와 샘플링 주파수를 일치시켰다. 이어 0.5–60 Hz 5차 Butterworth 대역통과 필터를 적용하여 저주파 기저선과 고주파 잡음을 제거하였다. 모든 신호를 5초 윈도우로 분할하였고, BCG에는 Z-score 정규화를 적용하였다.

모델은 공유 인코더와 신호별 (ECG/PPG) 디코더로 구성된 1-D U-Net 아키텍처이다. 인코더는 일차원 합성곱으로 BCG 특성을 추출하고, 각 디코더는 일차원 전치합성곱으로 해상도를 복원한다. 인코더-디코더 간 skip-connection을 사용하여 세부 특성을 보존하였다.



1-D CNN : one-dimensional convolutional neural network

1-D Tconv : one-dimensional transposed convolution

그림 1 공유 인코더와 신호별 디코더로 구성된 멀티 태스크 모델

손실은 세 가지로 정의하였다. 파형중심 손실 L_{wave} , 기울기 (정점/경계) 보존 손실 L_{grad} , 및 두 손실의 가중 결합 손실 $L_{combine}$ 은 수식 (1-3)과 같다.

$$z \cdot L_{wave} = \frac{1}{|C|} \sum_{c \in C} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (s_{c,t} - \widehat{s}_{c,t})^2 \quad (1)$$

$$L_{grad} = \frac{1}{|C|} \sum_{c \in C} \frac{1}{T-1} \sum_{t=2}^T (\nabla s_{c,t} - \nabla \widehat{s}_{c,t})^2 \quad (2)$$

$$L_{combine} = \alpha L_{wave} + \beta L_{grad} \quad (\alpha, \beta > 0) \quad (3)$$

여기서 $\nabla s_{c,t} = s_{c,t} - s_{c,t-1}$ ($t = 2 \dots T$), $C = \{ECG, PPG\}$ 이다. $s_{c,t}$ 는 복원해야 될 원본 신호, $\widehat{s}_{c,t}$ 는 딥러닝을 통해 복원될 출력 신호이며, c 는 복원해야 할 각 채널, t 는 시계열에서 특정 시점을 의미한다. α 및 β 는 가중합의 계수로, 본 연구에서는 $\alpha=0.5$, $\beta=1.0$ 을 사용하였다.

평가는 (i) 파형 재현성과 (ii) 정점 타이밍 재현성으로 구성하였다. 파형 재현성은 참조 대비 복원 파형의 평균 제곱오차 (mean square error, MSE)와 평균절대오차 (mean average error, MAE)로 산출하였다. 정점 타이밍 재현성은 ECG의 평균 R-R 간격 (mean R-R interval, mean RRI) 및 PPG의 평균 맥과 간격 (mean inter-beat interval, mean IBI)에서 참조 대비 간격 시계열 오차의 MSE로 정량화하였다. 세 손실 함수에 대해 동일 지표 세트를 적용하여 성능을 비교하였다.

나. 연구 결과

세 손실 함수에 대한 파형 오차 (MSE, MAE)와 간격 오차 (RRI·IBI의 MSE)를 비교하였다 (표 1). L_{wave} 는 ECG/PPG 파형 오차를 최소화하여 절대 파형 재현에 유리하였다. L_{grad} 는 정점·경계 보존 특성으로 PPG의 IBI 오차 (MSE)를 가장 낮췄다. 마지막으로 $L_{combine}$ 은 ECG의 RRI 오차 (MSE)를 최소화하여 파형 충실도와 타이밍 정확도 간 균형을 달성하였다.

Metric	L_{wave}	L_{grad}	$L_{combine}$
ECG MSE	0.43	1.28	0.80
PPG MSE	0.15	0.54	0.27
ECG MAE	0.22	0.77	0.41
PPG MAE	0.23	0.54	0.38
Mean RRI	2.37	40.24	0.10
Mean IBI	2.90	0.28	2.92

표 1 손실 함수 구성에 따른 성능 비교

파형 복원 예시에서 L_{wave} 는 전반적 파형 충실도가 높으나 정점이 다소 평탄화되는 경향을 보였다. L_{grad} 는 국소 경계·정점 보존이 우수하나 저주파·평탄 구간의 진폭 재현이 저하되었다. $L_{combine}$ 은 두 특성을 절충하여 파형 충실도와 정점 보존 간 균형적 특성을 나타냈다 (그림 2).

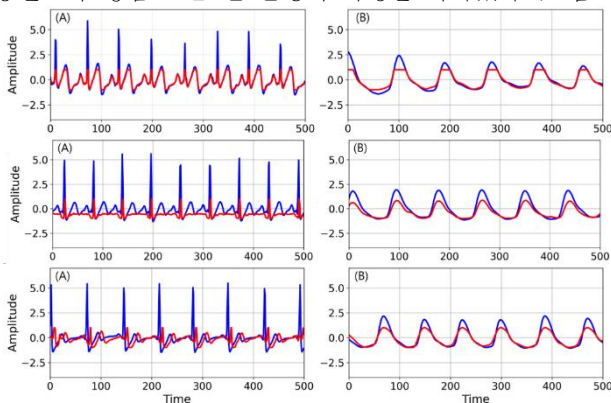


그림 2 복원된 ECG/PPG 복원 예시. 위에서부터 순서대로 L_{wave} , L_{grad} , $L_{combine}$ (A: ECG, B: PPG, 파란색: 원본신호, 붉은색: 복원신호)

모델의 일반화 성능을 검증하기 위해 훈련 집단 규모를 변화시키는 실험을 수행하였다. 전체 40명 중 5명을 고정된 검증 집단으로 두고, 나머지 인원을 10명에서 35명까지 5명 단위로 확장하여 $L_{combine}$ 기반 학습을 진행하였다. 그림 3은 훈련 집단 규모에 따른 ECG RRI와 PPG IBI의 MSE 변화를 보여준다. 훈련 인원이 증가할수록 두 지표의 오차가 전반적으로 감소하여, 충분한 표본 확보가 정점 간격 복원 정확도 향상에 기여함을 확인하였다.

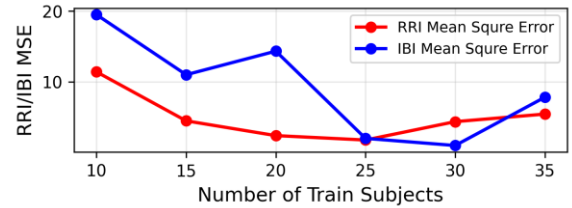


그림 3 훈련 집단 규모에 따른 RRI 및 IBI MSE 비교

III. 결 론

본 연구에서는 단일 BCG로부터 ECG와 PPG를 동시 복원하는 U-Net 기반 멀티태스크 모델을 제안하고, 손실 설계가 성능에 미치는 영향을 체계적으로 비교하였다. 파형 중심 손실 (L_{wave})은 파형 오차를 최소화했고, 기울기 보존 손실 (L_{grad})은 간격 지표 (특히 IBI)를 개선하였다. 가중 결합 손실 ($L_{combine}$)은 두 목표 간 균형을 제공하여 ECG의 RRI 오차를 최소화하였다. 결과적으로, BCG 기반 ECG/PPG 동시 복원에서는 파형 충실도와 타이밍 정확도 사이의 트레이드오프가 존재하며, 손실 결합이 유효한 절충점을 제공함을 확인하였다. 특히 제안 모델은 장기 입원 환자의 침상 모니터링, 가정 기반 원격 환자 감시, 수면 무호흡 및 부정맥 조기 탐지 등 임상·생활 환경에서의 연속적 생체 신호 모니터링에 적용 가능하다. 또한 복원된 ECG와 PPG로부터 심박 변이도, 맥파 전달 시간, 혈압 추정, 호흡 패턴 분석 등 2차 생체 지표를 도출할 수 있어, 기존 접촉형 센서를 대체하거나 보완하는 무구속 모니터링 도구로의 활용성이 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NR070859)

참 고 문 헌

- [1] Kim, C.-S., Ober, S.L. et al. "Ballistocardiogram: Mechanism and Potential for Unobtrusive Cardiovascular Health Monitoring." *Scientific Reports* 2016. DOI: 10.1038/srep31297
- [2] Alizadeh-Meghrizi, M., Ying et al. "Evaluation of dry textile electrodes for long-term electrocardiographic monitoring." *Bio-Medical Engineering OnLine* 2021. DOI: 10.1186/s12938-021-00905-4
- [3] Yang, T., Yuan, H. "Solving variability: Accurately extracting feature components from ballistocardiograms." *DIGITAL HEALTH* 2024. DOI: 10.1177/20552076241277746
- [4] Morokuma, S., Saitoh, T. et al. "Prediction of ECG signals from ballistocardiography using deep learning for the unconstrained measurement of heartbeat intervals." *Scientific Reports* 2025. DOI: 10.1038/s41598-024-84049-0
- [5] Liu, R., Hu, H. et al. "An ECG denoising technique based on AHIN block and gradient difference max loss." *Journal of Electrocardiology* 2024. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2024.153761
- [6] Gomez-Clapers, J., Serra-Rocamora "Towards the standardization of ballistocardiography systems for J-peak timing measurement." *Measurement* 2014. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.09.003