

레저버 컴퓨터와 합성곱 신경망을 이용한 심부전과 부정맥 심전도 분석

백준호^{1,2}, 우준혁¹, 한경림^{1,3*}

¹한국과학기술연구원 뇌과학연구소 뇌융합기술연구단, ²서울대학교 물리천문학부, ³국가연구소대학교
KIST스쿨 바이오-메디컬융합전공

paikjoonho123@kist.re.kr, wjh601@kist.re.kr, *khan@kist.re.kr

Analyses of heart failure and arrhythmia electrocardiograms using reservoir computers and convolutional neural networks

Joonho Paik^{1,2}, Junhyuk Woo¹, Kyungreem Han^{1,3*}

¹Center for Brain Technology, Brain Science Institute, Korea Institute of Science and
Technology, Seoul 02792, Korea, ²Department of Physics and Astronomy, Seoul National
University, Seoul 08828, Korea, ³Division of Bio-Medical Science & Technology, KIST School,
Korea National University of Science and Technology, Seoul 02792, Korea

요약

인공신경망 기반의 심전도 분석은 정확하고 효율적인 심장 질환 진단, 예후예측, 반응예측에 도움을 줄 수 있다. 본 연구에서는 레저버 컴퓨터 (reservoir computer)를 이용한 심부전 환자의 심전도 시계열 예측법과 합성곱 신경망 (convolutional neural network)을 이용한 부정맥 환자의 이상 심전도 감지법을 제안한다. 에코 상태 네트워크 (echo state network)-레저버 컴퓨터를 심전도 시계열 예측에 적합하도록 학습하여 심부전 환자의 미래 심전도 전계를 예측하였으며, 합성곱 신경망 모델을 기반으로 부정맥 환자의 이상 심전도 비트 (beat)를 정확히 분류하였다. 본 연구는 앞으로 국내 대규모 임상연구와 접목하여 심부전, 부정맥, 허혈성 심질환 등의 진단 (diagnostic), 예후예측 (prognostic), 반응예측 (predictive) 지표 (index) 개발과 치료실 공백을 메우는 가정 및 일터에서의 모니터링 시스템 개발로 발전할 수 있다.

I. 서론

심혈관 질환은 전 세계 주요 사망 원인으로 2030년에는 매년 2천 3백만명이 심혈관 질환으로 인해 사망할 것으로 예상되며,[1] 심혈관 질환의 정확한 진단, 예후예측, 반응예측은 사망률을 낮추는데 크게 기여할 수 있을 것이다. 컴퓨터-보조 (computer-aided) 심전도 분석 기술은 심혈관 질환의 진단, 예후예측, 반응예측 정확도를 높이는 데 도움을 줄 수 있으며, 최근에는 정교한 기계학습 모델로 심전도를 분석하려는 시도가 이루어지고 있다.[2]

본 연구에서는 레저버 컴퓨터와 합성곱 신경망을 이용해 심부전 환자와 부정맥 환자의 심전도 분석을 진행하였다. 심부전 환자의 심전도 시계열을 예측할 수 있는 에코 상태 네트워크 (echo state network)-레저버 컴퓨터와 부정맥 환자의 이상 심전도 비트 (beat)를 분류하는 합성곱 신경망 기반 모델을 제안하였다.

II. 본론

1. 심전도 데이터

심부전 환자의 심전도 시계열 예측을 위해 BIDMC Congestive Heart Failure Database[3,4]의 심전도 데이터를 사용하였으며, 부정맥 환자의 이상 심전도 감지에는 MIT-BIH Arrhythmia Database[4,5]와 St. Petersburg INCART 12-lead Arrhythmia Database[5]의 심전도 데이터를 사용하였다.

2. 레저버 컴퓨터를 이용한 심부전 환자의 심전도 시계열 예측

레저버 컴퓨터는 복잡한 동역학계에서 생성된 시계열 정보를 처리하는데 뛰어난 성능을 보여주는 기계학습 모델이다.[6] 순환 신경망 (recurrent neural network)으로부터 유래한 레저버 컴퓨터는 순환 신경망 모델의 시계열 데이터 처리 효율성을 유지하면서도, 순환 신경망에서 문제가 되는 파라미터 비수렴성과 기울기 소실 (vanishing gradient)을 극복하기에 유리하다.

레저버 컴퓨터의 하나인 에코 상태 네트워크 (echo state network)를 기반으로 심전도 시계열 예측을 수행한다 (그림 1 참조).

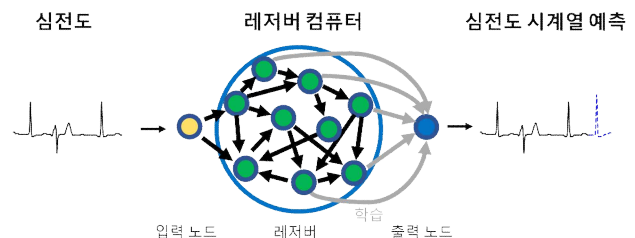


그림 1. 에코 상태 네트워크 (echo state network)를 이용한 심전도 시계열 예측 실험의 모식도

BIDMC 데이터베이스의 심전도에서 10개의 10초 구간을 뽑아 시계열 예측을 진행하였다. 각 구간의 1-8초, 8-10초의 심전도 시계열을 각각

학습, 평가 데이터로 사용하였고, 0-1초의 심전도 시계열은 네트워크의 초기 상태에 의한 효과를 제거하기 위해 사용되었다. 무작위적으로 생성된 5개의 네트워크를 사용하여 5개의 에코 상태 네트워크 모델을 구성하였다. 하나의 10초 구간에 대한 5개 모델의 심전도 시계열 예측 결과를 그림 2에 제시하였다.

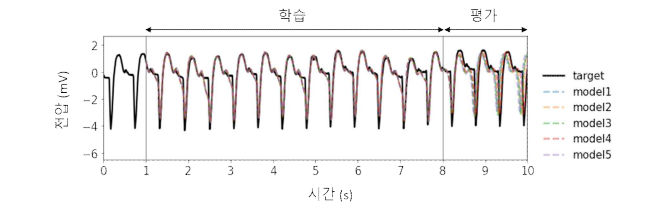


그림 2. 심전도 시계열 예측 예시. 1-8초 구간을 학습하여 8-10초의 심전도 전개를 예측함.

3. 합성곱 신경망을 이용한 이상 심전도 감지

이상 심전도 감지는 R-피크 인식을 통한 심전도 비트 인식과 합성곱 신경망을 이용한 이상 심전도 비트 검출 두 단계로 구성된다 (그림 3).

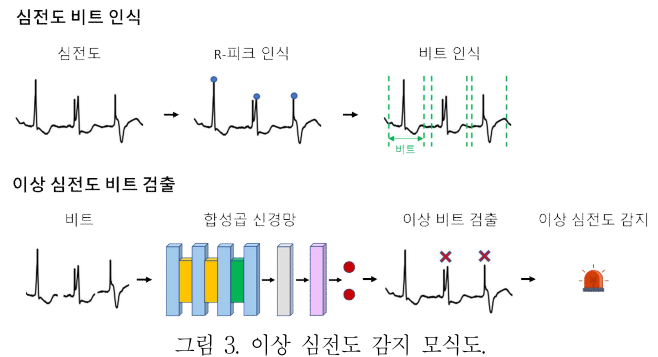


그림 3. 이상 심전도 감지 모식도.

심전도 비트 인식은 신호 잡음 제거, R-피크 인식, 비트 인식의 순서로 진행된다. 신호 잡음 제거에는 0.67-45Hz 유한 임펄스 응답 (finite impulse response) 필터를 사용하였다. 잡음이 제거된 심전도에 10가지 R-피크 인식 알고리즘들을 적용한 결과를 통합해 R-피크를 인식하였다. MIT-BIH와 St. Petersburg 데이터에 대해 R-피크 인식의 민감도 (sensitivity), 양성 예측도 (positive predictive value)를 평가한 결과는 표 1에 제시하였다. R-피크 위치의 0.28초 앞부터 0.44초 뒤까지의 구간을 비트로 인식하였으며, 인식한 비트를 이용해 이상 심전도 비트 검출을 진행하였다.

	Sensitivity	Positive predictive value
MIT-BIH	0.982	0.990
St Petersburg	0.947	0.937

표 1. R-피크 인식 알고리즘 평가 결과

이상 심전도 비트 검출을 위한 합성곱 신경망 모델 개발에는 MIT-BIH와 St. Petesburg 데이터의 심전도 비트를 사용하였다. 111,534개의 심전도 비트를 이용해 합성곱 신경망 모델의 학습 (train), 검증 (validation), 평가 (test)를 진행하였다. 합성곱 신경망 모델을 30 에포크 (epoch) 동안 학습하였고, 학습 완료된 모델을 평가한 결과 정밀도 (precision), 재현율 (recall), 정확도는 각각 0.986, 0.994, 0.991이었다. 에포크에 따른 학습, 검증 정확도와 평가 데이터를 모델로 분류한 결과에 대한 혼동행렬 (confusion matrix)을 그림 4에 제시하였다.

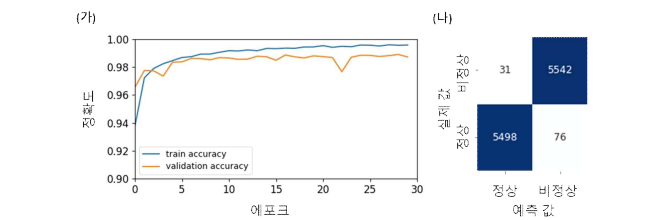


그림 4. (가) 에포크에 따른 이상 비트 검출 모델의 학습 및 검증 정확도 (나) 평가 데이터를 모델로 분류한 결과에 대한 혼동행렬

심전도 비트 인식과 이상 심전도 비트 검출을 순차적으로 적용하여 그림 5와 같이 부정맥 환자의 이상 심전도를 감지하였다.

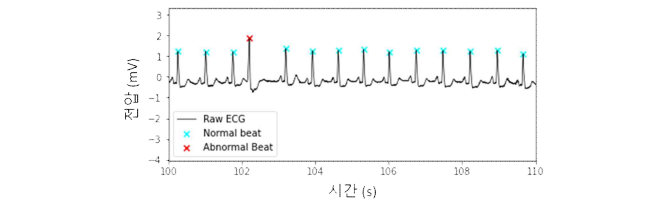


그림 5. 심전도 비트 인식과 이상 심전도 비트 검출을 적용하여 감지한 이상 심전도 예시

IV. 전망

본 연구는 앞으로 국내 대규모 임상연구와 접목하여 심부전, 부정맥, 허혈성 심질환 등의 진단 (diagnostic), 예후예측 (prognostic), 반응예측 (predictive) 지표 (index) 개발과 치료실 공백을 메우는 가정 및 일터에서의 모니터링 시스템 개발로 발전할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 정보통신방송기술개발 및 표준화사업 (No. 2022-0-00159, 시니어 심뇌혈관 질환과 치매 예측을 위한 디지털 마커 및 지능형 엣지 디바이스 개발, 기여율 80%)의 지원과 한국과학기술연구원 미래원천 뇌과학 기술개발사업 (2E32921, 고효율 예측 뇌 기능 모사 알고리즘 개발, 기여율 20%)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

[1] Benjamin E. J., et al. "Heart disease and stroke statistics-2019 update: A report from the American heart association," *Circulation*, 139(10), pp. e56-e528, Mar. 2019.

[2] Liu X., et al. "Deep learning in ECG diagnosis: A review," *Knowledge-Based Systems*, 227, 107187, Sep. 2021.

[3] Baim D. S., et al. "Survival of patients with severe congestive heart failure treated with oral milrinone," *Journal of the American College of Cardiology*, 7(3), pp. 661-670, Mar. 1986.

[4] Goldberger A. L., et al. "PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals," *Circulation*, 101(23), pp. e215-e220, Jun. 2000.

[5] Moody G. B., and Mark R. G. "The impact of the MIT-BIH arrhythmia database," *IEEE engineering in medicine and biology magazine*. 20(3), pp. 45-50, May. 2001.

[6] Woo J., and Kim S. H., et al. "Characterization of the neuronal and network dynamics of liquid state machines," *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 633, 129334, Jan. 2024.