

표준 12 유도 심전도 생성을 위한 활용 리드의 영향 분석

김의중¹, 서동혁², 김상욱^{3*}

¹한양대학교 컴퓨터소프트웨어학과 석사과정

²한양대학교 컴퓨터소프트웨어학과 박사과정

³한양대학교 컴퓨터소프트웨어학과 교수

kimgb6060@hanyang.ac.kr, hyuk125@hanyang.ac.kr, wook@hanyang.ac.kr

Impact of Limb Lead for Generating the Standard 12-Lead ECG: Performance Evaluation

UiJong Kim¹, Dong-Hyuk Seo¹, Sang-Wook Kim¹

¹Dept. of Computer Science, Hanyang University

요 약

의학계에서 심혈관 질환을 정확하게 진단하는 것이 중요해지면서 이를 진단하는 가장 대표적인 방법인 심전도 검사 또한 꾸준한 관심을 받아왔다. 이와 함께, 최근 웨어러블 기기의 발전으로 인해 병원에서 전극을 부착하지 않고 간편하게 심전도를 측정할 수 있게 되었다. 하지만, 이러한 기기들은 단일 사지 유도만을 측정할 수 있다는 한계가 명확하게 존재하여, 심혈관 질환의 정확한 진단이 어렵다. 이러한 배경 속에서, 단일 사지 유도(특히, Lead I 혹은 Lead II)를 활용해 표준 12 유도 심전도를 생성하는 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 그러나 웨어러블 기기에서 측정이 가능한 단일 유도 중 어떠한 리드를 활용하는 것이 유리한가에 관한 연구는 매우 미흡하다. 본 논문은 두 가지의 실제 데이터셋과 세 가지의 심전도 생성 기법에 대한 실험을 통해 각기 다른 사지 유도를 활용하여 표준 12 유도 심전도를 생성하였을 때의 정확도를 비교한다. 실험 결과, Lead II 를 활용하였을 때가 다른 사지 유도를 활용하였을 때 보다 훨씬 정확한 표준 12 유도 심전도를 생성할 수 있음을 보여준다.

1. 서론

심혈관 질환을 정밀하고 정확하게 진단해내는 것은 의학 분야의 꾸준한 관심사이다. 이러한 심혈관 질환을 진단해 내는 여러 가지 방법 중, 심전도 검사는 간단하고 비침습적이며 여러 심혈관 질환 중 몇 가지를 정확하게 진단해낼 수 있다는 장점으로 인해 의학 적 활용도가 매우 높은 방법이다. 일반적으로 심전도는 사지와 흉부에 각각 4 개와 6 개의 전극을 부착하고, 전류를 흘려 12 개의 방향(유도)에서 심장의 전기적 활동을 측정하여 그래프로 기록한다. 이때 12 개의 방향의 종류에 따라 6 개의 사지유도 (Lead I, Lead II, Lead III, aVR, aVL, aVF)와 6 개의 흉부 유도(V1~V6)로 분류하며, 이를 일컬어 표준 12 유도 심전도라 한다.

이러한 12 유도 심전도 그래프를 종합적으로 분석하면 여러 가지 심혈관 질환을 진단할 수 있다.

최근 웨어러블 기기들의 발전으로 병원에서 전극을 부착하지 않고 웨어러블 기기를 통해 간편하게 심전도를 측정할 수 있게 되었다. 특히 주기적인 심혈관 질환의 검진이 강조되면서 심전도를 편리하게 측정할 수 있는 웨어러블 기기들을 활용하는 경우가 많아졌다. 하지만 이러한 기기들은 단일 사지 유도만을 측정할 수 있다는 한계가 존재한다. 단일 사지 유도를 활용한 질병 진단의 정확도는 표준 12 유도를 모두 활용한 진단의 정확도 보다 현저히 낮으므로, 웨어러블 기기를 더욱 잘 활용하기 위해서는 측정된 유도(이하, 리드)를 통해 표준 12 유도 심전도를 정확하게 생성하는 기술이 선행적으로 연구되어야 한다.

* 교신 저자

¹ 환자의 피부나 신체의 구멍을 통과하지 않고 질병 따위를 진단하거나 치료하는 방법

이러한 배경에서 단일 리드를 활용하여 표준 12 유도 심전도를 생성하기 위한 다양한 기술들이 활발하게 연구되고 있다 [1-3]. 그러나 웨어러블 기기에서 측정이 가능한 단일 사지 유도 중 어떠한 리드를 활용하여 표준 12 유도 심전도를 생성하는 것이 유리한가에 관한 연구는 매우 미흡하다. 심전도의 각 리드는 심장이 가지는 한 가지의 전기적 흐름을 각기 다른 방향에서 바라본 것이기 때문에 각 리드가 가진 정보량에는 분명한 차이가 존재한다. 따라서 어떠한 리드를 초기값으로 활용할지에 따라 생성된 표준 12 유도 심전도의 정확성에 차이가 발생한다.

본 논문은 두 가지의 실세계 데이터셋과 세 가지의 심전도 생성 기법에 대한 실험을 통해 각기 다른 사지유도 활용하여 표준 12 유도 심전도를 생성하였을 때의 정확도를 비교하여 사지 유도 별 12유도 생성의 유불리를 판단한다. 본 논문의 실험 결과는 다른 사지유도를 활용하였을 때보다 Lead II 를 활용하였을 때 훨씬 정확한 표준 12 유도 심전도를 생성할 수 있음을 보여준다. 우리가 아는 한, 이것은 문헌에서 어떠한 리드를 사용하여야 할지에 대한 첫 번째 비교이다.

2. 관련 연구

본 장에서 우리는 기존 의약품 추천 연구들이 환자 임베딩을 획득하는 방법에 대해 구체적으로 이야기하고 이들의 한계에 대해 이야기하고자 한다.

의학계에 따르면 사지 유도와 흉부 유도는 각각 수직인 평면 상에서 측정된다. 이는 일부 사지 유도(또는 흉부 유도)에서 나머지 사지 유도(또는 흉부 유도)로의 변환은 벡터 연산으로 가능하지만, 사지 유도로 흉부 유도를 생성하는 것이 불가능함을 의미한다. 하지만 딥러닝 기술의 발전으로 인해 이러한 문제를 해결하기 위한 기술들이 등장했다. 특히 헬스케어에 대한 사람들의 관심과 웨어러블 기기의 발전으로 인해 단일 사지 유도로부터 표준 12 유도 심전도를 생성하는 기술이 등장하기 시작했다.

초기 표준 12 유도 심전도를 생성하기 위한 방법들은 다수의 리드를 활용하였다. [4]의 연구를 시작으로 신경망을 활용하는 방법이 제안되었고, 이는 점차 발전되어 CNN [5]기반의 연구로까지 이어졌다. 이러한 연구들은 모두 3개의 사지 유도를 활용하여 나머지 9개의 리드들을 생성하였다. 하지만 이러한 연구들은 다수의 리드를 활용하였고, 심전도를 정확하게 측정된 경우만을 가정하고 있기 때문에 모델의 입력으로 측정 과정에서 생길 수 있는 노이즈들이 제거된 데이터를 사용하였다.

웨어러블 기기로부터 측정된 리드들은 기기의 특성상 하나의 리드만 측정이 가능하고, 개인이 휴대하면서 측정이 되기 때문에 올바르게 측정되어 있지 않을

<표 1> PTB-XL, CUSPH 데이터셋 통계

Dataset	# of ECG samples	Sampling rate (Hz)
PTB-XL	21,799	500
CUSPH	45,122	500

가능성이 크다. 따라서 이러한 점을 고려하여 하나의 리드를 활용하여야 하고, 노이즈를 제거하는 과정을 거치지 않아야 한다. 이를 위하여 초기에는 선형회귀 [6-10], 랜덤포레스트 [11]와 LSTM [1] 기반의 방법이 제안되었다. 이후 이는 점차 발전하여 CNN [12]과 Koopman operator [13]를 활용하는 연구로까지 이어졌다. 최종적으로 적대적 생성 신경망(이하 GAN)을 활용하여 표준 12 유도 심전도를 생성하는 연구들로 이어졌다 [2, 14-17]. 나아가, 리드를 생성하는 데에 리드의 스타일을 학습하여 활용하는 GAN 기반 image-to-image translation 기반의 방법으로 이어졌다 [3].

딥러닝 기술의 발전과 함께 표준 12 유도 심전도를 생성하는 방법 또한 점차 발전하며, 높은 정확도로 실제와 유사한 심전도를 생성해냈다. 하지만 기존 연구들은 심전도 생성 문제에서 측정되는 리드가 생성 정확도에 미치는 효과에 대해 분석한 바가 없다. 따라서 본 논문은 기존 연구를 확장하여 어떠한 리드를 측정하여 심전도 생성에 활용하는 것이 가장 효과적인지에 대한 분석을 진행하였다.

3. 실험

3.1 실험 환경

본 논문에서는 공개 데이터셋인 PTB-XL [18]과 CUSPH [19]를 사용하여 실험을 진행하였다. 두 데이터셋 모두 병원에서 측정된 10 초 길이의 표준 12 유도 심전도 데이터이며, 환자의 성별, 나이와 같은 간략한 개인 정보를 포함하고 있다. PTB-XL 과 CUSPH 는 각각 Physionet 에서 배포하고 있고 Physikalisch-Technische Bundesanstalt 와 Shaoxing People's Hospital 에서 측정된 실세계 데이터셋이며, 두 데이터셋에 대한 요약은 <표 1>에 나타나 있다.

본 논문은 기존의 최신 (state-of-the-art) 연구들 [1-3]에서 사용한 표준 12 유도 심전도 생성 기법을 활용하여 실험을 진행하였다. 6 개의 사지 유도를 활용하였을 때의 효과를 분석하기 위한 평가지표로는 Root Mean Square Error [20] (이하 RMSE), Dynamic Time Warping [21] (이하 DTW), Pearson Correlation Coefficient [22] (이하 PCC)를 사용하였다. 다양한 방법들에서의 평가를 위해, 기존 심전도 생성 연구들과 동일하게 데이터 집합을 훈련 집합 (7/10), 검증 집합 (1/10), 시험 집합 (2/10)으로 나누었다.

3.2 실험 결과

<표 2>는 활용하는 사지 유도에 따른 기존 방법들의 성능 차이를 나타낸다. 실험을 위한 베이스라인 모델로는 기존의 표준 12 유도 심전도 생성을 위한 방법인 ECG-LSTM [1], ECG-GAN [2], ECGT2T [3]를 활용하였으며, 여섯 개의 사지 유도를 모두 활용하여 각

<표 2> 활용하는 사지 유도에 따른 기존 방법들의 성능 차이

		PTB-XL						CUSPH							
		Lead I	Lead II	Lead III	aVR	aVL	aVF	Gain	Lead I	Lead II	Lead III	aVR	aVL	aVF	Gain
RMSE	ECG-LSTM	<u>0.29</u>	0.23	0.31	0.37	0.32	0.33	21.4%	<u>0.91</u>	0.78	0.99	1.08	1.02	0.93	14.2%
	ECG-GAN	<u>0.22</u>	0.18	0.27	0.31	0.27	0.27	16.7%	<u>1.17</u>	0.93	1.24	1.31	1.24	1.23	20.2%
	ECGT2T	<u>0.19</u>	0.15	0.24	0.28	0.25	0.24	17.7%	<u>0.81</u>	0.73	0.99	1.07	1.01	1.00	8.9%
DTW	ECG-LSTM	<u>11.88</u>	10.60	12.47	13.87	13.34	13.43	10.7%	<u>24.02</u>	22.92	26.35	28.32	28.07	27.40	4.6%
	ECG-GAN	<u>9.90</u>	8.56	10.60	11.77	11.18	11.68	13.5%	<u>22.84</u>	19.57	23.33	24.90	24.16	24.79	14.3%
	ECGT2T	<u>8.57</u>	7.51	9.64	10.92	10.02	10.05	12.4%	<u>16.71</u>	14.20	17.33	18.63	17.76	17.80	15.0%
PCC	ECG-LSTM	<u>0.04</u>	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	-7.3%	<u>0.08</u>	0.10	0.05	0.08	0.06	0.08	-16%
	ECG-GAN	<u>0.32</u>	0.34	0.27	0.24	0.24	0.24	-5.3%	<u>0.28</u>	0.36	0.26	0.21	0.21	0.21	-31%
	ECGT2T	<u>0.52</u>	0.59	0.44	0.47	0.48	0.47	-14%	<u>0.47</u>	0.53	0.35	0.40	0.40	0.39	-12%

방법에서의 성능을 비교하였다. 이때 입력으로 활용되는 심전도를 제외한 11 개의 심전도를 생성한 후, 11 개 심전도의 정답과 비교한 정확도들의 평균을 최종값으로 활용하였다. 가장 높은 성능을 보이는 결과는 회색 음영 처리하였고, 두번째로 높은 성능을 보이는 결과는 밑줄 처리하였다. 또한, 가장 높은 성능이 두번째로 높은 성능 대비 얼마나 개선되었는지를 백분율로 표에 함께 나타내었다.

실험 결과에서 보이는 것처럼 Lead II 를 활용하였을 때 모든 평가지표에서 다른 리드를 활용하였을 때보다 우수함을 확인하였다. 구체적으로, Lead I 을 활용하였을 때보다 RMSE 기준 최대 21%의 성능 향상을 확인할 수 있다. 이는 가장 높은 성능을 보이는 방법 [3] 이 다른 방법들 대비 [1-2] 평균 28%의 성능을 보이는 점을 고려했을 때, 꽤 의미 있는 향상임을 알 수 있다. 이러한 점들을 종합적으로 고려하였을 때 활용하는 사지 유도의 종류에 따라 표준 12 유도 심전도를 더 잘 생성할 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구

본 논문은 처음으로 표준 12 유도 심전도의 생성을 위해 활용하는 사지 유도의 영향력을 확인하였고, 어떠한 리드를 활용해야 효과적으로 생성할 수 있을지 분석하였다. 실험 결과를 통해 Lead II 를 활용하였을 때 가장 성공적으로 표준 12 유도 심전도를 생성할 수 있음을 확인하였으며, 활용하는 리드를 바꾸는 것 만으로도 표준 12 유도 심전도를 더 잘 생성해낼 수 있다는 결론을 도출하였다. 이러한 결과를 바탕으로, Lead II 를 측정하는 웨어러블 기기와 이를 활용하는 표준 12 유도 심전도 생성 방법을 개발하는 것이 향후 연구 과제이다.

사사

본 논문은 (1)정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. 2020-0-01373, 인공지능대학원지원(한양대학교))과 (2)정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2018R1A5A7059549)을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] Sohn, Jangjay, et al. "Reconstruction of 12-lead electrocardiogram from a three-lead patch-type device using a LSTM network." *Sensors* 20.11 (2020): 3278.
- [2] Lee, JeeEun, et al. "Synthesis of electrocardiogram V-lead signals from limb-lead measurement using R-peak aligned generative adversarial network." *IEEE journal of biomedical and health informatics* 24.5 (2019): 1265-1275.
- [3] Jo, Yong-Yeon, et al. "ECGT2T: Towards Synthesizing Twelve-Lead Electrocardiograms from Two Asynchronous Leads." *ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, 2023. [4] E. Frank, "An accurate, clinically practical system for spatial vectorcardiography," *circulation*, vol. 13, no. 5, pp. 737-749, 1956.
- [5] Wang, Lu-di, et al. "A novel method based on convolutional neural networks for deriving standard 12-lead ECG from serial 3-lead ECG." *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering* 20.3 (2019): 405-413.
- [6] Scherer, Julie A., Janice M. Jenkins, and John M. Nicklas. "Synthesis of the 12-lead electrocardiogram from a 3-lead subset using patient-specific transformation vectors: an algorithmic approach to computerized signal

- synthesis." *Journal of electrocardiology* 22 (1989).
- [7] Atoui, H., J. Fayn, and P. Rubel. "A neural network approach for patient-specific 12-lead ECG synthesis in patient monitoring environments." *Computers in Cardiology*, 2004. IEEE, 2004.
- [8] Trobec, Roman, and Ivan Tomašić. "Synthesis of the 12-lead electrocardiogram from differential leads." *IEEE transactions on information technology in biomedicine* 15.4 (2011): 615-621.
- [9] Tomašić, Ivan, and Roman Trobec. "Electrocardiographic systems with reduced numbers of leads—synthesis of the 12-lead ECG." *IEEE reviews in biomedical engineering* 7 (2013): 126-142.
- [10] Zhu, Huaiyu, et al. "A lightweight piecewise linear synthesis method for standard 12-lead ECG signals based on adaptive region segmentation." *PloS one* 13.10 (2018): e0206170.
- [11] Afrin, Kakhkashan, et al. "Simultaneous 12-lead electrocardiogram synthesis using a single-lead ecg signal: Application to handheld ecg devices." *arXiv preprint arXiv:1811.08035* (2018).
- [12] Matyschik, Maksymilian, et al. "Feasibility of ECG reconstruction from minimal lead sets using convolutional neural networks." *2020 Computing in Cardiology*. IEEE, 2020.
- [13] Golany, Tomer, et al. "12-lead ecg reconstruction via Koopman operators." *International Conference on Machine Learning*. PMLR, 2021.
- [14] Lee, JeeEun, et al. "Synthesis of electrocardiogram V-lead signals from limb-lead measurement using R-peak aligned generative adversarial network." *IEEE journal of biomedical and health informatics* 24.5 (2019): 1265-1275.
- [15] Zhu, Fei, et al. "Electrocardiogram generation with a bidirectional LSTM-CNN generative adversarial network." *Scientific reports* 9.1 (2019): 6734.
- [16] Beco, Sofia C., João Ribeiro Pinto, and Jaime S. Cardoso. "Electrocardiogram lead conversion from single-lead blindly-segmented signals." *BMC Medical Informatics and Decision Making* 22.1 (2022): 314.
- [17] Seo, Hyo-Chang, et al. "Multiple electrocardiogram generator with single-lead electrocardiogram." *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 221 (2022): 106858.
- [18] Wagner, Patrick, et al. "PTB-XL, a large publicly available electrocardiography dataset." *Scientific data* 7.1 (2020): 1-15.
- [19] Zheng, Jianwei, et al. "A 12-lead electrocardiogram database for arrhythmia research covering more than 10,000 patients." *Scientific data* 7.1 (2020): 48.
- [20] Legendre, Adrien Marie. *Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes: avec un supplément contenant divers perfectionnemens de ces méthodes et leur application aux deux comètes de 1805*. Courcier, 1806.
- [21] Müller, Meinard. "Dynamic time warping." *Information retrieval for music and motion* (2007): 69-84.
- [22] Cohen, Israel, et al. "Pearson correlation coefficient." *Noise reduction in speech processing* (2009): 1-4.