

EEG 신호를 활용한 그룹 대조 학습 기반 신경적응형 CBT 반응 생성

이진권^{1 2 *}, 김효빈^{1 *}, 황세미^{2 3*}, 김지윤^{2 *}, 송명주^{2 *}, 오하영^{1 †}

¹ 성균관대학교, ² 모두의 연구소, ³ 연세대학교 원주연세의료원
rnjs8316@skku.edu, hyobinkim@gmail.com, semi.hwang11@gmail.com, jjyooon.work@gmail.com,

myungjoo.song12@gmail.com, hyoh79@skku.edu

EEG-Based Group Contrastive Learning Framework for Neuroadaptive CBT Response Generation

Jinkwon Lee^{1 2 *}, Hyobin Kim^{1 *}, Semi Hwang^{2 *}, Jiyeon Kim^{2 *}, Myungjoo Song^{2 *}, Hayoung Oh^{1 †}

¹ Sungkyunkwan University, ² Modulabs, ³ Yonsei University Wonju Health System

요약

본 연구는 저채널(4채널) 소비자용 EEG를 활용해 실시간 뇌파-텍스트 변환으로 치료 전략에 부합하는 CBT 응답을 생성하는 프레임워크를 제안한다. 핵심은 CBT 전략별 대화 맥락 클러스터링과 그룹 대조학습을 통한 EEG-텍스트 정렬, 그리고 경량 추론으로 1초 미만 응답 지연을 달성하는 것이다. 28명으로 구성된 EEG-CBT 데이터셋에서 제안 모델은 BLEU-4, ROUGE-L, BERTScore 및 전문가 치료 적절성 평가에서 기존 방법 대비 개선을 보였고, 지연시간은 1초 미만으로 단축되었다.

I. 서론

우울증과 불안은 21세기 가장 시급한 공중 보건 문제 중 하나로, 전 세계 수억 명의 사람들에게 영향을 미치며 의료 시스템에 큰 부담을 주고 있다[1]. 인지행동치료(CBT)는 부정적인 사고를 인지 재구성 및 공감적 반응을 통해 교정하는 표준 치료법으로 인정받고 있다. 디지털 CBT 도구와 챗봇은 치료 접근성을 높이고 사회적 낙인을 줄이는 데 기여했지만, 실시간 반응이 느리고 개인화 수준이 낮다는 한계를 가진다. 이러한 시스템들은 주로 텍스트 입력과 정해진 템플릿 기반의 답변에 의존하여, 사용자의 순간적인 감정 변화나 개별적인 요구를 포착하지 못한다.

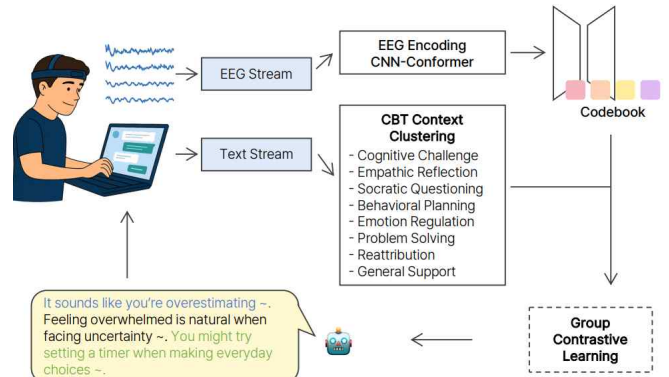
이러한 한계를 극복하기 위해, 본 연구는 언어적 표현 이전에 인지-정서 상태를 실시간으로 객관적으로 측정할 수 있는 뇌파(EEG) 기술을 활용한다. 기존 EEG-텍스트 변환 연구들이 기술적 가능성을 보여주었으나, 대부분 고밀도 채널 EEG 장비를 요구하며 CBT라는 특정 치료 영역에 최적화되지 않았다[2].

본 논문은 CBT에 특화된 EEG-텍스트 변환 프레임워크를 제안하며, 다음과 같은 세 가지 핵심 혁신을 포함한다. (1) EEG 특징과 CBT 전략(인지 재구성, 공감적 반응 등)을 정렬하는 클러스터 기반 그룹 대조 학습, (2) 저채널 소비자용 EEG 장치에 최적화된 표현 증류 기법, (3) 상호작용형 치료를 위한 실시간 추론 능력이다. 이 접근법은 신경생리학적 통찰과 치료 원칙을 결합하여, 확장 가능하고 개인화된 정신 건강 치료를 가능하게 한다.

II. 본론

EEG-CBT 모델 아키텍처

제안하는 EEG-CBT 모델은 EEG 인코딩, 이산 코덱 생성, CBT 맥락 클러스터링, 그룹 대조 학습, 그리고 LLM 디코더의 5



단계 순차 처리 과정으로 구성된다. 각 단계는 CBT 도메인의 특 그림1 본 프레임워크는 EEG 스트림과 텍스트 스트림을 동시에 처리하여 신경적응형 CBT 반응을 생성한다. EEG 신호는 CNN-Conformer 기반 인코더를 통해 시간·공간적 패턴을 추출한 뒤, 벡터 양자화를 거쳐 코드북 표현으로 변환된다. 텍스트 입력은 Sentence-BERT 임베딩을 기반으로 CBT 전략(인지적 도전, 공감적 반응, 소크라테스식 질문, 행동 계획, 정서 조절 등)별 맥락 클러스터링 과정을 거친다. 이후 그룹 대조 학습을 통해 EEG 표현과 CBT 전략 클러스터 간 정렬을 수행하며, 디코더는 이를 바탕으로 치료적으로 적절하고 자연스러운 CBT 반응을 실시간으로 생성한다.

성을 반영하고 저채널 EEG 환경에서의 최적화를 고려하여 설계되었다.

가. EEG 인코딩 및 이산 코덱 생성

입력된 EEG 신호는 CNN-Conformer 아키텍처 기반의 인코딩 모듈을 통해 시간적, 공간적 패턴을 효과적으로 포착한다. 추출된 연속적인 EEG 표현은 VQ-VAE(Vector Quantized Variational Autoencoders)를 사용하여 언어 모델과 호환 가능한 이산적인 코덱으로 변환된다[2].

나. CBT 맥락 클러스터링

본 연구의 핵심 혁신 중 하나인 CBT 맥락 클러스터링은 치료 전략에 따라 대화 내용을 의미적으로 그룹화하는 과정이다.

Sentence-BERT 임베딩을 사용하여 각 CBT 대화 발화를 벡터로 변환한 후, K-평균 클러스터링 알고리즘을 적용하여 '인지적 도전', '공감적 반영', '소크라테스식 질문', '행동 계획' 등 8개의 주요 CBT 기법으로 군집화한다[3,4].

다. 그룹 대조 학습 메커니즘

그룹 대조 학습은 기존의 쌍(pair) 기반 대조 학습을 확장하여, 치료 전략 클러스터 간의 구조적 관계를 학습한다. '강한 긍정 쌍(동일 세션, 동일 클러스터)', '약한 긍정 쌍(다른 세션, 동일 클러스터)', '부정 쌍(치료적으로 대조적인 클러스터)' 등 계층적 쌍 구조를 정의하고, 가중치가 적용된 InfoNCE 손실 함수를 사용하여 클러스터 간의 치료적 유사도에 기반한 학습을 수행한다. 이를 통해 모델은 단순한 의미적 유사성을 넘어 치료적 맥락에 맞는 미묘한 차이를 학습하게 된다.

라. LLM 디코더

사전 훈련된 BART 모델 기반의 디코더는 이산화된 EEG 코덱을 최종적인 CBT 반응 텍스트로 변환한다. 대규모 CBT 대화 코퍼스를 사용한 도메인 적응 훈련을 통해, 디코더는 치료적으로 일관되고 언어적으로 자연스러운 문장을 생성하도록 최적화된다.

III. 실험 및 결과

28명의 참가자로부터 수집된 약 21시간 분량의 EEG 신호 및 CBT 대화 데이터로 구성된 자체 데이터셋을 사용하여 모델 성능을 평가했다. 텍스트 생성 품질(BLEU-4, ROUGE-L), CBT 적절성(전문가 평점), 실시간 성능(응답 지연 시간)을 종합적으로 측정했다.

실험 결과, 제안 모델은 대표적인 EEG-텍스트 변환 모델인 DeWave 및 일반적인 대조 학습을 적용한 SimCLR-EEG 모델과 비교했을 때 모든 평가지표에서 월등한 성능을 보였다. 특히 BLEU-4 점수는 0.63으로 DeWave(0.28) 대비 68% 이상 높았으며, 응답 지연 시간은 890ms로 실시간 상호작용 기준인 1초 이내를 만족시켰다.

또한, 구조화된 EEG-텍스트 쌍의 중요성을 검증하기 위해 EEG-텍스트 쌍을 무작위로 섞거나, 클러스터 레이블을 뒤섞는 등의 조건과 비교 분석한 결과, 본 연구의 구조화된 접근법이 언어적 일관성과 치료적 적절성 모두에서 월등한 성능을 유지함을 확인했다. 이는 의미 있는 EEG-텍스트 정렬이 치료 효과에 결정적임을 시사한다.

IV. 결론

본 연구는 텍스트 기반 디지털 치료의 한계를 극복하는 최초의 실시간 EEG 적응형 CBT 시스템을 제안했다. 주요 기여는 (1) 뇌-행동 분석을 위한 CBT 특화 EEG 데이터셋 구축, (2) 치료 전략의 의미론적 모델링을 위한 클러스터 기반 대조 학습 개발, (3) 실용적인 배포를 위한 저채널 EEG 환경에서의 성능 최적화

이다. 초기 실험 결과는 기존 시스템 대비 향상된 치료 결과와 사용자 참여를 보여주었다.

다만, 28명의 참가자 데이터는 개념 증명 수준이며, 장기적인 효과 검증과 다양한 인구 집단에 대한 일반화는 과제로 남아있다. 향후 연구는 심박변이도(HRV), 안면 및 음성 분석 등 다중 모드 통합, 대규모 무작위 임상 시험을 통한 임상적 검증, 그리고 연합 학습과 동형 암호화를 결합한 고급 개인정보 보호 프레임워크 개발에 초점을 맞춰야 한다. 또한, 급성 정신 건강 위기 상황을 위한 실시간 위기 탐지 및 개입 시스템 개발 역시 중요한 다음 단계가 될 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 과학기술정보통신부가 주관하고 정보통신기획평가원(IITP)이 관리하는 메타버스융합대학원 지원사업(IITP-2025-RS-2023-00254129)과 글로벌 석학 초청사업(RS-2024-00459638), 문화체육관광부가 주관하고 한국콘텐츠진흥원이 지원하는 문화체육관광 연구개발사업(스포츠·관광 R&D 프로그램) — 「청소년 정신건강(심리·행동 조절) 관리를 위한 게임기반 디지털치료제 기술 개발」(RS-2024-00344893), 정보통신기획평가원(IITP)이 지원하는 AI 스타 펠로우십 지원사업(성균관대학교)(RS-2025-25442569) 및 체화형 비전 AI 멀티에이전트 기반 차세대 인간지향 범용 인공지능(AGI) 기술 개발 사업(RS-2025-25443884), 그리고 성균관대학교 캠퍼스 AI 성남연구센터(K-하이테크 플랫폼)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Liu, C.; and Miao, W. 2022. The role of employee psychological stress assessment in reducing human resource turnover in enterprises. *Frontiers in Psychology*, 13.
- [2] Duan, Y.; Zhou, J.; Wang, Z.; Wang, Y.; and Lin, C. 2023. DeWave: Discrete EEG Waves Encoding for Brain Dynamics to Text Translation. *arXiv (Cornell University)*.
- [3] Fenn, K.; and Byrne, M. 2013. The key principles of cognitive behavioural therapy. *InnovAiT Education and inspiration for general practice*, 6: 579-585.
- [4] Cully, J. A.; and Teten, A. L. 2008. A therapist's guide to brief cognitive behavioral therapy.
- [5] Attridge, M., Morfitt, R. C., Roseborough, D., & Jones, E. R. (2020). *Internet-Based Cognitive-Behavioral Therapy for College Students With Anxiety, Depression, Social Anxiety, or Insomnia*. *JMIR Formative Research*, 4.
- [6] Baradari, D., Kosmyna, N., Petrov, O., Kaplun, R., & Maes, P. (2025). *NeuroChat: A Neuroadaptive AI Chatbot for Customizing Learning Experiences*.