

전전두엽 뇌파 신호 기반 예측 디코딩 연구

홍을석, 홍기환, 민병경*
고려대학교

hong_es@korea.ac.kr, hongkh@korea.ac.kr, *min_bk@korea.ac.kr

Prefrontal EEG-based decoding of expectancy

Hong Eul-Seok, Hong Ki-Hwan, Min Byoung-Kyong*
Korea Univ.

요 약

뇌파는 인지 기능을 반영한다. 자극이 제시되기 전에 뇌파를 통해서 앞으로 나올 자극을 예측한다면 뇌파를 사용한 인지 도구의 활용을 고급화할 수 있다. 본 연구에서는 물체가 가까워지거나 멀어지는 것을 예측할 때와 예측하지 못할 때의 뇌파를 시간적 일반화(temporal generalization) 방법으로 디코딩하였다. 선행연구에서 보고된 전전두엽의 뇌파 신호가 인지 기능에 중요하다는 결과와 베타파가 하향식 정보 처리에 관여한다는 연구 결과를 토대로 전전두엽의 베타 대역 뇌파가 예측 기능 디코딩에서 중요한 역할을 할 것이라는 가설을 수립하고, 실험을 통해 검증하고자 하였다. 뇌 영역별 디코딩 정확성을 구분하여 분석한 결과, 뇌의 후두엽이나 두정엽보다 전두엽에서 유의하게 디코딩 정확도가 증가하였으며, 전전두엽에서 가장 높은 결과를 보였다. 따라서, 전전두엽의 고주파 베타파 뇌파 신호가 뇌의 예측 기능을 최적으로 반영한다는 점을 보여준다.

I. 서론

뇌파(EEG)는 인간의 다양한 인지 기능을 반영한다. 그 중에 어떤 자극이 등장하는 것을 미리 예측하는 인지 기능이 자극이 등장하기 전부터 뇌파에 반영되어 있다는 점이 선행 연구에서 보고 되었다.[1] 더욱이, 전전두엽(PFC: prefrontal cortex) 지역은 고차원적 인지 기능을 담당한다고 알려져 있어서 [2], 본 연구를 통해서, 예측에 대한 인지적 속성이 전전두엽 지역의 뇌파에서 특별히 뚜렷하게 반영될 것이라는 가설을 검증하고자 하였다.

뇌파는 주파수대역에 따라, 델타파(DC~4Hz), 세타파(4~8Hz), 알파파(8~13Hz), 베타파(13~30Hz), 감마파(30Hz 이상)로 나눌 수 있고, 일반적으로 주파수 대역별로 반영하는 해당 인지 기능이 연결되어 있다. 선행 연구에서 보고된 결과에 따르면, 자극 예측 기간에 베타파 활성이 향상되는 것으로 알려졌다.[3] 그리고, 우리의 선행연구 결과에서는 전전두엽 기반의 뇌파 신호가 고차원적인 인지 기능의 디코딩에 효과적으로 사용될 수 있음을 밝혀냈다.[2] 따라서, 우리는 본 연구를 통해서 전전두엽에서 베타파 대역의 뇌파 신호를 통해 자극의 변화에 대한 예측을 디코딩하고, 전전두엽의 베타파 뇌파가 예측 기능의 디코딩에 가장 중추적인 역할을 한다는 것을 검증해보고자 한다.

II. 본론

본 논문에서는 동심원 자극 크기의 점진적 발산과 점진적 수렴을 통해 다음 자극을 예측할 때에 발생하는 뇌파를 사용해서 해당 자극 크기 변화의 예측을 디코딩하고자 하였다. 건강한 참가자 21 명이 해당 과제를 수행하는 동안의 뇌파를 측정하였다. 우리는 자극의 크기가 점진적으로

변화하는 것을 예측할 때와 그러지 못할 때의 뇌파가 다를 것이라 가정하였다.

본 실험에 사용된 하나의 시각 자극 세트는 4 개의 동심원으로 구성되었고, 각 자극 세트의 시작마다 500ms 동안의 새로운 자극 세트의 시작을 알리는 지침이 표시되었으며, 1000ms~1200ms 의 고정 십자가(fixation cross) 표시 후 동심원 자극이 700ms 동안 제시되었다. 자극 사이 간격(ISI: interstimulus interval)은 900ms~1100ms 범위로 사용되었고, 다음 자극 세트와의 간격은 900ms 로 설정되었다. 시각 자극은 표적 자극과 비표적 자극으로 구성되었고, 표적 자극은 동심원의 크기가 순차적으로 발산하거나 수렴했으며, 비표적 자극은 동심원의 크기가 무작위로 변했다. 자극 세트가 표적 자극인지 비표적 자극인지에 대해서는 동심원의 색깔에 의해 피험자에게 표지가 되었고, 뇌파 결과에 색깔에 대한 효과를 없애기 위해, 사용된 두 가지 색인 적색과 녹색의 뇌파 결과를 최종 분석에서는 평균하여 처리하였다. 표적 자극과 비표적 자극은 각각 100 개의 자극 세트로 구성되었다. 또한, 작업 수행에 사용된 모든 시각 자극은 맹점에 상이 맺히지 않는 시야각 안 쪽으로 제시되었다.

우선, 작업을 수행하는 참가자의 뇌파가 다음 시각 자극을 예측하는지를 분석하기 위해 표적 자극과 비표적 자극에 대한 ISI 구간의 뇌파 데이터를 사용하였다. 해당 뇌파 신호를 SVM(Support Vector Machine)과 시간적 일반화(temporal generalization) 방법을 이용하여 디코딩하였다.[4] SVM 은 많은 분야에서 높은 정확도를 보이며, 널리 사용되고 있는 기계학습 모델이고,[5] 시간적 일반화 방법은 한 시점에서 데이터를 학습한 다음, 다른 모든 시점에서 이를 디코딩 테스트하여 상호 관계를 이용한 뇌의 정보처리 단계를 관찰할 수 있다.[4]

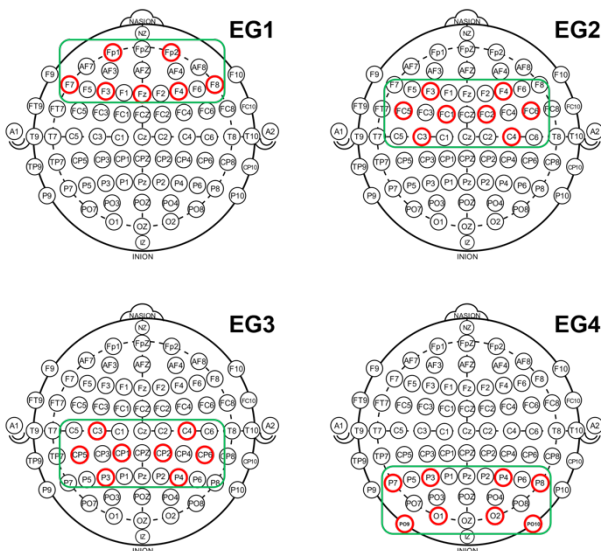


그림 1. 영역 조건별 전극 조합 분포도 (EG1 영역: Fp1, Fp2, Fz, F3, F4, F7, F8; EG2 영역: F3, F4, FC1, FC2, FC5, FC6, C3, C4; EG3 영역: C3, C4, CP1, CP2, CP5, CP6, P3, P4; EG4 영역: P3, P4, P7, P8, O1, O2, PO9, PO10)

예측과 관련된 인지 처리가 전전두엽에서 일어나는지를 검증하기 위해 뇌파 측정 전극을 [그림 1]과 같이 네 영역으로 나누었고, 예측이 베타파와 관련되어 있다는 선행연구의 결과를 바탕으로 베타 대역에 집중하여 예측 시간대에서 디코딩을 진행하였다.

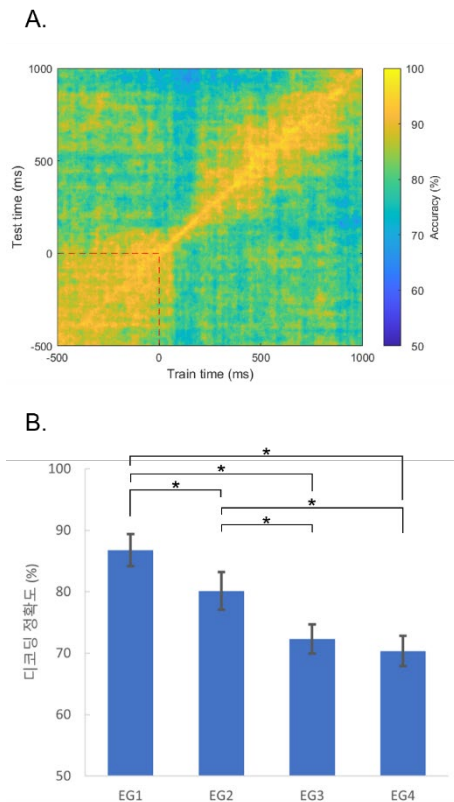


그림 2. SVM의 디코딩 결과. A. 베타파 영역(4~30Hz)의 뇌파를 디코딩한 모든 피험자에 대한 평균 결과로 빨간색 점선은 자극 제시 이전의 예측 기간을 표시함. B. 베타 대역의 전극 조합별 SVM의 디코딩 정확도 (평균 $\pm$ 표준오차 %)로 EG1: $86.8 \pm 2.60\%$, EG2: $80.1 \pm 3.06\%$, EG3: $72.3 \pm 2.38\%$, EG4: $70.3 \pm 2.46\%$.

결과적으로, [그림 2A]의 시각 자극 이전에 나타나는 시각 형태의 높은 디코딩 정확도를 얻었고, 이는 예측의 유무에 따라 서로 다른 정신적 활동이 유지된다는 것을 의미한다.[4] 뇌 영역별 구분 디코딩 정확도 분석을 통해 [그림 2B]의 결과를 얻었고, 전전두엽에 해당하는 EG1에서 두정엽이나 후두엽보다 유의하게 높은 디코딩 정확도가 확인되었다. 각 조건이 정규분포를 이루고 있어 대응표본 t -검정을 수행하였고, 디코딩의 정확도는 뇌의 다른 지역보다 전두엽 영역에서 유의하게 높았으며, 전전두엽에서 가장 두드러졌다. 아래 [표 1]의 결과는 $q < 0.05$ 의 FDR(false discovery rate)로 다중 비교가 보정되었고,[6] 본 논문의 모든 분석과 통계 처리는 MATLAB (ver. R2021a)에서 수행되었다.

표 1. 실험 조건 조합별 대응표본 t -검정

대응 전극 조합	t (20)	p -value
EG1-EG2	2.860	0.010*
EG1-EG3	5.982	0.000*
EG1-EG4	5.153	0.000*
EG2-EG3	3.000	0.007*
EG2-EG4	2.728	0.013*
EG3-EG4	0.766	0.453

*FDR-보정 유의성

III. 결론

본 연구의 실험 결과를 바탕으로 살펴보면, 예측을 디코딩하는 뇌파가 전전두엽 지역에서 우세하게 존재하고 있고, 특별히 뇌파의 베타파 영역이 이를 반영한다는 점을 알아내었다. 본 결과는 베타파가 예측에 관련한다는 선행연구 결과와 맥락을 같이 하고,[3] 전전두엽의 뇌파 신호가 인지 과제의 디코딩에 효과적으로 사용될 수 있다는 우리의 선행연구의 결과와도 방향을 같이 한다.[2] 본 연구 결과를 활용하면, 자극이 제시되기 전에 전전두엽의 뇌파만으로 앞으로 발생할 일을 예측하는 정보를 알아낼 수 있다. 따라서, 전전두엽의 뇌파가 고차원적인 인지 기능을 담당하고, 뇌-기계 인터페이스 분야를 포함해서, 뇌파 기반 인지 도구 제어의 다양한 분야에 중추적으로 사용될 수 있는 가능성과 유효성을 제시한 결과라고 할 수 있다. 본 연구를 발전시켜, 후속 연구로 좀더 구체적이고 다양한 인지 기능을 전전두엽의 뇌파를 사용하여, 정교하게 디코딩하는 방법을 살펴보고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

“This work was supported by the Convergent Technology

R&D Program for Human Augmentation (grant number

2020M3C1B8081319), and the Information Technology

Research Center (ITRC) support program (grant number

IITP-2021-2016-0-00464), which are funded by the Korean

government (MSICT) through the National Research

Foundation of Korea.”

참 고 문 헌

- [1] B.-K. Min et al. "Prestimulus EEG Alpha activity Reflects Temporal Expectancy" *Neuroscience Letters*, 438 (3), June 2008, pp. 270-274
- [2] B.-K. Min et al. "Electrophysiological Decoding of Spatial and Color Processing in Human Prefrontal Cortex" *NeuroImage*, 237, 118163, Aug. 2021.
- [3] HajiHosseini, Azadeh, and Clay B. Holroyd. "Reward feedback stimuli elicit high-beta EEG oscillations in human dorsolateral prefrontal cortex." *Scientific Reports* 5.1 (2015): 1-8.
- [4] J-R. King et al. "Characterizing the dynamics of mental representations: the temporal generalization method" *Trends in Cognitive Sciences*, 18(4), pp. 203-210, Apr. 2014.
- [5] Quitadamo, L. R., et al. "Support vector machines to detect physiological patterns for EEG and EMG-based human-computer interaction: a review." *Journal of neural engineering* 14.1 (2017): 011001.
- [6] Benjamin & Hochberg, "Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing" *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1), pp.289-300, 1995.