

뇌신호-행동 기반 멀티모달 기억처리 분석*

이충연[○], 장병탁
 서울대학교 컴퓨터공학부
 {cylee, btzhang}@bi.snu.ac.kr

Brain-Behavior Analysis of Multimodal Episodic Memory Formation

Chung-Yeon Lee[○], Byoung-Tak Zhang
 School of Computer Science and Engineering, Seoul National University

요 약

최근 스마트폰이나 태블릿PC 등 모바일 기기의 사용량이 증가하고, 또 Google Glass나 iWatch와 같은 Wearable Computer들이 등장하는 시점에서, 고차원의 빅데이터 처리나 Life-long 학습의 중요성이 대두되고 있다. 특히 다양한 센서들을 통해 획득한 멀티모달 데이터의 실시간 처리는 매우 중요하며, 이를 위해서 뇌의 기억 처리 과정을 연구할 필요가 있다. 하지만 인간의 뇌가 접하는 대다수의 자연적 감각 자극들이 동적이고 멀티모달한 특성을 가졌음에도 불구하고, 대다수 연구들에서는 조건적이고 정적인 실험 자극이 제시되는 다소 통제적인 실험 프로토콜을 사용하고 있다. 이에 본 연구에서는 사실적인 실험 환경 내에서 일화기억 과정에 대한 실험을 수행하기 위해, 먼저 서술적 요소가 포함된 동영상 실험 자극으로 사용하는 기억 과제를 개발하고, 다음으로 행동 요소가 고려되는 경우에 대해서 기억 인출 과정과 뇌영상 데이터 간 상관관계를 분석하였다. 실험 결과에서는 비디오와 같이 멀티모달한 실험 자극을 사용하는 경우에도 기존 연구들과 유사한 결과가 나타나는 것을 발견하였으며, 반응시간과 같은 행동 요소를 통해 기억 과정과 관련된 뇌전도 데이터를 해석하는 것이 유의미함을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

기억 처리는 인간의 인지 체계에서 가장 두드러진 특징들 중 하나이다. 일상에서 끊임없이 획득되는 멀티모달한 경험적 지식들이 장기기억으로 저장되고 다시 빠르게 인출되는 과정과 구조는 기억 연구들 중에서도 가장 핵심적인 주제이며, 앞으로 컴퓨터를 통한 빅데이터 처리나 Life-long 학습에 도움을 줄 수 있다. 특히 최근 스마트폰이나 태블릿PC 등 모바일 기기의 사용량이 증가하고, 또 Google Glass와 같은 Wearable Computer가 상용화를 앞두고 있는 시점에서, 다양한 센서들을 통해 획득한 멀티모달 데이터의 실시간 처리는 매우 중요하며, 이를 위해서 뇌의 기억 처리 과정을 연구할 필요가 있다.

일화기억 과정과 관련하여 뇌영상 실험을 수행하는 대다수 연구들은 조건적이고 정적인 실험 자극(e.g. 단어 조합, 정지 영상)을 제시되는 통제적인 실험 프로토콜을 사용하고 있다. 하지만 이러한 실험 환경은 일반적으로 실제 인간의 뇌가 일상에서 접하는 환경과는 크게 다르다. 자연적으로 발생하는 감각 자극들은 동적이고 멀티모달하기 때문이다 [1-2]. 따라서 실제 환경과 유사한 실험 환경을 구축하는 것은 일화기억 관련 연구에 있어서 매우 중요한 조건이다.

본 논문에서는 이러한 조건을 만족시키는 환경 내에서

일화기억 과정에 대한 실험을 수행하기 위해, 서술적 요소가 포함된 동영상(narrative movie)을 실험 자극으로 사용하는 기억 과제를 개발하는 것을 목적으로 한다.

본 논문의 두 번째 목적은 반응시간(reaction time, RT)과 같은 행동 요소를 고려하여 기억 인출 과정과 뇌영상 데이터 간 상관관계를 분석하는 것이다. 인간의 뇌는 실험 과제 수행과 관련된 활동 외에 다양한 외부 요인에 노출되기 쉽기 때문에, 획득한 뇌영상 데이터가 실험 과제만을 반영한다고 보기 힘들다. 이러한 문제를 경감시키기 위해서, 정신적 요소와 행동 요소를 모두 고려하여 기억 과정과 관련된 뇌영상 데이터를 해석하는 것을 목표로 한다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1. 실험 방법

멀티모달 기억 회상 과제를 위해 사용된 실험 자극은 27분 길이의 외화 시트콤(Friends, Season 10, Episode 5)으로, 내용 전개와 장소 변화를 고려하여 이 비디오를 다시 20개의 다른 장면으로 나누고, 여기서 각각 5초 길이의 비디오 클립과, 시간차를 두고 이어지는 2개의 정지 영상을 추출한다. 각 비디오 클립은 기억 회상 과제의 인출 단계에서 인출 단서로 사용되며, 정지 영상들은 질의 단계에서 선택지로 사용된다.

보다 정확한 실험을 위해 각 자극을 정해진 시간에 자동으로 출력하고, 각 단계에 대한 타임스탬프 및 질의 단계에서의 피험자 응답 시간을 밀리초 단위로 기록하는 실험용 S/W 프로그램을 제작하여 사용하였다.

* 이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(NRF-2010-0017734-Videome, NRF-2013M3B5A2035921-HyperIntelligence), 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원(KEIT-10035348-mLife, KEIT-10044009)을 일부 받았음.

실험 과제 수행시의 피험자 EEG는 은/염화은(Ag/AgCl) 전극이 부착된 128채널의 Quik-cap과 Neuroscan SynAmps amplifier (Neuroscan, El Paso, TX)를 이용하여 측정한다. 이때 1,000Hz/Ch로 샘플링 된 EEG 신호는 0.01~100Hz의 대역을 갖는 대역통과필터를 거쳐, 32-bit AD 변환에 의해 컴퓨터로 저장된다.

2.2. 실험 절차

전체 실험 절차는 그림 1과 같다. 첫 번째 단계(Video)는 기억 저장 단계로, 피험자가 실험 자극 비디오를 시청하며, 이때 피험자가 따로 수행해야 할 과제는 없다.

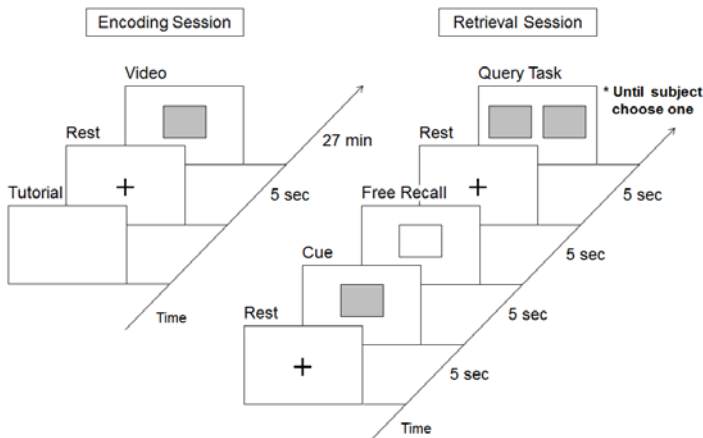


그림 1. 멀티모달 일화기억 실험 절차

다음은 기억 인출 단계로, 먼저 피험자가 인출 단서 비디오(Cue)를 시청한 후 이어지는 내용에 대한 회상(Free Recall)을 5초 간 수행한다. 이때 모니터 상에는 실험 자극과 크기가 동일한 하얀 테두리와 검정 배경의 상자가 출력되어 피험자가 회상에 집중할 수 있도록 한다.

마지막으로 질의 단계(Query Task)에서는 인출 단서로 출력된 내용에서 시간차를 두고 이어지는 2개의 정지영상이 임의의 순서로 좌우로 나누어 출력된다. 피험자는 이 두 정지영상의 순서가 올바른지 틀린지를 결정하여, 올바르다고 생각하면 'O' 버튼을, 틀리다고 생각하면 'X' 버튼을 누른다. 피험자가 버튼을 누르면 다음 구간으로 넘어간다. 이 단계는 피험자가 실험에 집중할 수 있도록 하고, 이전 단계와 달리 강제적으로 기억을 회상하도록 하며, 기억 회상에 걸리는 시간을 측정하는데 그 의미가 있다. 기억 인출 단계는 총 20회 수행된 후 종료되며, 약 10분 내외의 시간이 걸리는 것으로 확인되었다.

2.3. 전처리 및 분석 방법

측정된 EEG 데이터는 실제 분석에 앞서 눈 깜빡임, 몸 움직임 등의 각종 잡음 성분을 제거하기 위한 전처리 과정을 거친다. 먼저 잡음 성분이라고 여겨지는 신호의 크기가 $\pm 75 \mu V$ 를 벗어나는 채널을 찾고, 그런 채널의 개수가 3개 이상이면 해당되는 시행 데이터는 제거한다. 이후 보다 정밀한 잡음 성분 제거를 위해 독립성분분석(independent component analysis, ICA)을 이용하여 각 채널을 구성하는 성분을 추출한다. 구한 성분들 중 눈 움

직임과 몸 움직임에 해당하는 성분들을 찾아 제거하는데, 이때 눈 움직임에 의한 잡음은 눈 주변의 채널들(hEOG, vEOG)의 최대 성분 값이 나머지 채널들의 최대 성분값보다 더 클 때로 정의되고, 몸 움직임에 의한 잡음은 측두 영역(FT7/8, FC5/6, T7/8, C5/6, TP7/8, CP5/6)의 최대 성분값이 나머지 채널들의 최대 성분 값보다 더 클 때로 정의된다 [3]. 잡음 처리를 거친 EEG 데이터는 실험 프로그램을 통해 기록된 타임스탬프를 이용하여 각 단계별로 추출한다. 즉, 기억 저장 단계와, 인출 단서 제시, 회상, 질의의 총 3개 단계씩 20구간으로 구성되는 기억 인출 단계에 대한 각각의 단위구간(epoch)을 모든 EEG 데이터로부터 추출한다.

다음으로 세타파, 알파파, 베타파, 그리고 감마파 대역의 시간-주파수 영역으로 변환된 데이터로부터 각 주파수 영역에 따른 절대적인 크기를 추출하여 비교 분석하기 위해 파워 스펙트럼 분석을 이용하여 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density, PSD)를 추출한다. 파워 스펙트럼 분석은 각 시간대에서 주파수 별로 파워 값을 계산하는 방법으로, 시간-주파수 분석이라고도 불리며 시간의 흐름에 따른 주파수 변화를 잘 나타내기 때문에 기억 과제에서의 EEG 변화를 살펴보는 데 적합하다 [4-5].

3. 실험 결과

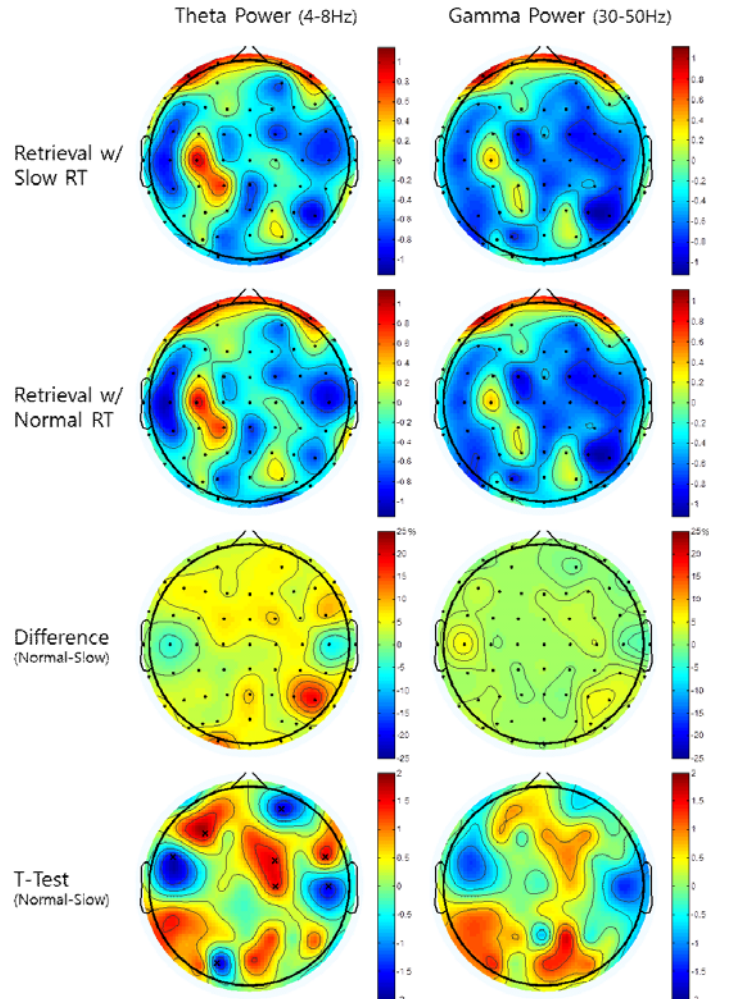


그림 2. 기억 인출 과정에서의 PSD 비교

기억 인출에 의한 EEG 활성화와 질의 단계에서의 피험자 응답 시간 간의 상관관계를 알아보기 위해, 질의 단계에서의 기억 인출 과정에 따른 피험자당 20개 응답에 대한 EEG를 느린 응답(slow RT)과 일반 응답(normal RT)의 두 가지 범주로 분류하였다. 이때 피험자별로 응답 시간의 평균과 표준편차의 합을 기준으로 하여 기준 시간보다 느린 경우에는 느린 응답으로, 빠른 경우에는 일반 응답으로 분류하였다. 그림 2는 세타파와 감마파 주파수 대역에서의 PSD를 위의 두 범주로 나누어 뇌 영역에 2차원 맵핑한 결과이다.

그림을 보면 먼저 전전두 영역과 좌측 두정 영역에서 세타파와 감마파가 공통적으로 활성화되었음을 확인할 수 있으며, 이는 fMRI와 PET을 사용한 기존 연구 결과에서 보인 일화 기억 과정에서의 전전두 영역과 좌측 두정 영역 활성화와 일치한다 [6-7].

한편 해당 영역에서의 세타파 활성화 정도는 흥미롭게도 느린 응답보다 일반 응답에서 더 뚜렷하게 나타났다. 일반 응답에서의 세타파 파워는 좌측 전두 영역(F3)과 우측 전두 및 두정 영역 일부(FC2, FC6, C2)에서 더 크고, 우측 전전두 영역(AF4), 좌우 측두 영역(FC5, C6), 좌측 후두 영역(PO3)에서 더 낮게 나타나면서 기억 저장과 비교하여 인출 과정에서 차이를 나타내는 영역들 [8]이 일반 응답에서 유사한 차이를 나타내었다. 반면, 감마파 결과에서는 유의미한 차이가 없었다.

4. 고찰 및 결론

본 논문은 멀티모달의 비디오 데이터를 실험 자극으로 사용하여 실제 환경에서 인간의 뇌가 접하는 자극들을 가상으로 제시하고, 이후 각각 자율적/강제적인 기억 인출을 유도하는 실험 과제를 통해 일화기억 처리과정과 EEG 데이터 간의 상관관계에 대해 알아보았다.

본 실험 결과에 대해서 두 가지 측면의 해석을 해볼 수 있다. 먼저 응답 시간에 따른 세타파 활성화 차이가 발생한 이유에 대해 생각해 볼 필요가 있다. 응답 시간이 길어지는 이유는 기억 인출에 필요한 단서로부터 필요한 정보, 즉 출처 기억 정보를 충분히 획득하지 못한 것으로 볼 수 있으며, 따라서 출처 기억 인출과 관련된 좌측 전두 영역 및 두정 영역의 활성화가 일반 응답에 비해 저조할 수 있다. 또한 이러한 경우 정확한 인출이 이루어질 수 없기 때문에 기억 인출과 관련된 나머지 뇌 영역의 활성화 또한 일반 응답에 비해 낮게 나타난 것으로 판단된다. 이와 유사한 실험 결과로 Klimesch et al. [9]은 인간의 정보처리 속도를 RT로 측정하고, 이에 따른 EEG 신호 간의 차이를 분석한 결과 알파파에서 유의미한 상관관계를 발견하였다. 하지만 기억의 인출 과정에 따른 RT와 EEG 간 상관관계에 대해서는 언급된 바가 없다.

다음으로 기존 연구 결과와 달리 기억 인출 결과의 정확도(피험자 응답 정확률)에 따른 차이가 발견되지 않았는데, 그 이유로는 사용된 실험 자극이 다르고, 의미기억과 일화기억의 인출 구조에 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다. 기존 연구에서 단어나 이미지 같은 단순한 자극을 사용하여 의미기억의 저장 및 인출에 대한 실험을

수행한 것과 달리, 본 실험에서는 복합적인 실험 자극인 비디오를 사용하여 일화기억의 저장 및 인출 과정을 다루었기 때문에 차이가 발생한 것으로 생각해볼 수 있다. 즉, 일화기억에서는 의미기억과 달리 기억 저장이나 인출의 실패가 뚜렷이 구분될 수 없기 때문에 인출 결과의 정확도를 측정하는 것이 의미가 없을 수 있다.

위 실험 결과는 비디오와 같이 멀티모달한 실험 자극을 사용하는 경우에도 기존 일화기억 과정 관련 실험들과 유사한 결과가 나타나는 것을 보여주며, 반응시간과 같은 행동 요소를 통해 기억 과정과 관련된 뇌전도 데이터를 해석하는 것이 유의미함을 제시한다. 따라서 앞으로 멀티모달 실험 자극, 뇌영상, 행동요소를 함께 고려한 일화기억 연구를 수행하는데 있어 참고가 될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] E. Tulving, "Episodic memory: from mind to brain," *Annu Rev Psychol*, vol. 53, pp. 1-25, 2002.
- [2] R.A. Jacobs & L. Shams, "Visual learning in multisensory environments," *Top Cogn Sci*, vol. 2, pp. 217-225, 2010.
- [3] T.P. Jung, C. Humphries, T.W. Lee, S. Makeig, M.J. McKeown, V. Iragui, and J. Sejnowski, "Extended ICA removes artifacts from electroencephalographic recordings," *Adv Neural Inf Process Syst*, vol. 10, pp. 894-900, 1998.
- [4] N. Axmacher, S. Haupt, G. Fernández, C.E. Elger, and J. Fell, "The role of sleep in declarative memory consolidation-direct evidence by intracranial EEG," *Cerebral Cortex*, vol. 18, no. 3, pp. 500-507, 2008.
- [5] T. Gruber, D. Tsivilis, C.M. Giabbiconi, and M.M. Müller, "Induced electroencephalogram oscillations during source memory: Familiarity is reflected in the gamma band, recollection in the theta band," *J Cognitive Neurosci*, vol. 20, no. 6, pp. 1043-1053, 2008.
- [6] S.F. Nolde, M.K. Johnson and C.L. Raye, "The role of prefrontal cortex during tests of episodic memory," *Trends Cogn Sci*, vol. 2, pp. 399-406, 1998.
- [7] J. Jacobs, G. Hwang, T. Curran, M.J. Kahana, "EEG oscillations and recognition memory: theta correlates of memory retrieval and decision making," *Neuroimage*, vol. 32, no. 2, pp. 978-987, 2006.
- [8] C.-Y. Lee, B.-J. Lee, J.S. Kim, and B.-T. Zhang, "Neural Correlates of Episodic Memory Formation in Audio-Visual Pairing Tasks," *Proc. of CogSci 2012*, pp. 1864-1869, 2012.
- [9] W. Klimesch, M. Doppelmayr, H. Schimke, T. Pachinger, "Alpha frequency, reaction time, and the speed of processing information. Journal of Clinical," *Neurophysiology*, vol. 13, no. 6, pp. 511-518, 1996.