

## TGC 분석을 통한 모바일 기반 상지 재활 프로그램의 유용성 평가

임현미<sup>1,3</sup> · 손지은<sup>2</sup> · 구정훈<sup>3</sup>

<sup>1</sup>서울대학교병원 의생명연구원, <sup>2</sup>계명대학교 자연과학대학 생명과학전공, <sup>3</sup>계명대학교 의과대학 의용공학과

### Usability Evaluation of Mobile based Upper Extremity Rehabilitation Program Through TGC Analysis

Hyunmi Lim<sup>1,3</sup>, Jieun Son<sup>2</sup> and Jeonghun Ku<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Seoul National University Hospital Biomedical Research Institute

<sup>2</sup>Department of Life Science, College of Natural Science, Keimyung University

<sup>3</sup>Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Keimyung University

(Manuscript received 12 September 2018 ; revised 10 January 2019 ; accepted 12 February 2019)

**Abstract:** In this study, Theta Gamma Coupling (TGC) analysis was carried out after performing simple and repeated upper limb exercise and comparative experiment to observe changes in the motor cortex of the brain through TGC and to see if mobile rehabilitation therapy is actually effective. As a result, exercise using mobile devices showed higher TGC values in motor cortex as compared with simple repeat upper limb exercise. In addition, paired t-test using SPSS showed statistically significant difference between exercise using mobile devices and simple repeat exercise at P3( $t=3.390$ ,  $df(\text{degree of freedom})=12$ ,  $p \text{ value}=0.005$ ). Exercise using mobile devices is effective for rehabilitation because it increases the Theta-Gamma Coupling and activates the motor cortex. Also, since the mobile game contents required the subject to detailed athletic ability adjustment with immersion in the task, it may be thought that brain activation is stronger than simple rehabilitation.

**Key words:** Upper extremity rehabilitation, Mobile rehabilitation, Theta-gamma coupling(TGC), Cross-frequency phase-amplitude coupling(CFPAC), Parietal lobe

### 1. 서 론

모바일 기기를 이용한 재활은 시간과 장소에 구애 받지 않고 손쉽게 재활이 가능하다는 점에서 빠르고 반복적인 운동재활을 통한 치료효과를 촉진시키는데 도움을 줄 수 있다. 스마트폰의 센서를 이용해 다양한 게임 콘텐츠를 환자에게 맞춤형으로 제작할 수 있고 전문적 장비가 아닌 일반 모바일 기기이기 때문에 환자가 기기를 다루는데 부담이 적다.

또한 직접 재활치료기관을 방문할 필요가 없어지고 운동을 보조해 줄 보호자 없이도 수행 가능하기 때문에 환자가 훈련 하는데 드는 비용과 부담감을 줄일 수 있다[1, 2].

하지만 모바일 기기를 이용한 재활 운동이 실제로 운동피질에서 뇌 기능에 얼마나 영향을 주는지 평가해 보는 것이 필요하다. 단순히 반복적으로 상지 운동하는 것과 달리 모바일 기기를 이용한 운동이 운동 피질에 어떠한 변화를 주는지 비교해보고 재활 치료에 실질적인 효과를 주는지 알아 보는 것이 중요하다.

TGC는 쥐의 해마에서 처음 발견된 교차 주파수 위상 진폭 커플링(CFPAC, Cross-Frequency Phase-Amplitude Coupling)의 한 유형으로, 고주파의 진폭이 저주파의 위상에 동기화 되는 것을 말한다[3,4]. 이러한 교차 주파수 결합은 해마, 전두엽 피질 및 감각 피질을 포함한 여러 뇌 영역에서 관찰되었다[4-11]. 저주파인 Theta와 고주파인 Gamma

Corresponding Author : Jeonghun Ku  
M221, School of medicine, Keimyung University, 1095 Dalgubeoldaero, Dalseo-Gu 704-701, Korea  
TEL: +82-10-3333-9051  
E-mail: jeonghun.ku@gmail.com  
This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (NO. NRF-2017R1A2B4011920).

의 동기화는 과제를 수행하는 동안 운동피질에서 단기 기억, 학습, 인지 및 정신 활동의 기능을 활성화 시키는데 관련이 있다[12-14]. 또한 저주파의 위상은 대뇌 피질에서 의사 결정, 동기부여뿐만 아니라 외부 감각, 운동에 의한 영향도 받게 된다[14].

과제를 수행하면서 TGC 값이 커지게 되면 그와 관련된 기억, 운동 등의 영역들도 활성화 되기 때문에 Theta-Gamma 동기화 정도에 따라 운동 훈련으로 인한 뇌의 변화가 다르게 나타난다[12-15]. 측정된 뇌파에서 Theta-Gamma 동기화의 정도를 분석하게 되면 뇌의 여러 영역에서 일어나는 활성화를 관찰 할 수 있게 되고 피험자에게 어떠한 영향을 주고 있는지 알 수 있다. 그래서 Theta-Gamma 동기화를 알아보는 것이 모바일 기기를 이용한 운동의 효과를 조사하는데 알맞은 분석법이라고 생각되어 상지 운동하는 동안 뇌파를 측정할 후 TGC 분석을 실시하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 Theta-Gamma 동기화를 통해 뇌의 운동피질에서 일어나는 변화를 관찰하고 모바일 재활 치료가 실제로 효과가 있는지 알아보기 위해 모바일 기기를 사용한 운동과 단순 반복 상지 운동을 실시한 뒤 TGC 분석을 진행 하고 비교하였다.

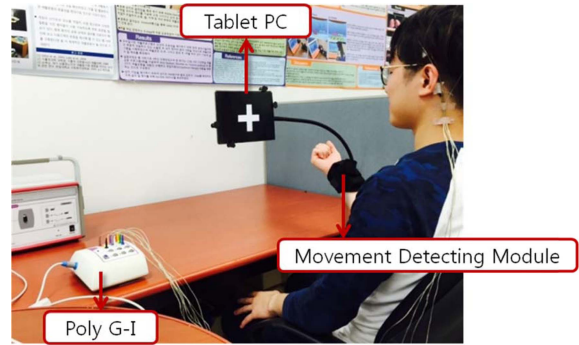


그림 1. 실험에 사용한 기기.  
Fig. 1. Using the device in experiment.

보여주는 태블릿 PC와 상지의 움직임을 자이로 센서를 통해 감지하며 게임에 위치 정보를 전송하는 움직임 감지 모듈이 있다. 태블릿 PC는 피험자가 편하게 마주볼 수 있는 높이로 배치하였고 움직임 감지 모듈은 오른쪽 손목에 부착하였다. 또한 뇌파를 측정할 때 사용한 장비는 Poly G-I(LAXTHA, Daejeon, Korea)이며 Fp1, Fp2, F3, F4, T3, T4, P3, P4 위치에 전극을 부착해 뇌파를 측정하였다.

### 3. 실험에 사용한 게임 콘텐츠

모바일 게임을 이용한 운동에서는 5분 동안 게임 콘텐츠를 이용해 실험을 실시하였다. 손목에 부착한 움직임 감지 모듈을 이용해 게임 화면 속의 물뿌리개 오브젝트를 왼쪽, 오른쪽으로 이동시킬 수 있다. 움직임 감지 모듈을 부착한 팔의 팔꿈치를 접으면 물뿌리개 오브젝트는 왼쪽으로 이동하고 퍼면 오브젝트는 오른쪽으로 이동하였다.

게임의 진행은 그림 2에서 볼 수 있듯이 화면의 왼쪽에서 씨앗이 나타나면 오른쪽으로 서서히 움직이며 화분이 있는 구간까지 이동한다. 움직임 감지 모듈로 움직이는 물뿌리개 오브젝트에서는 물이 나오게 되며 씨앗에게 물을 줄 수 있도록 왼쪽, 오른쪽으로 위치를 조정할 수 있다. 씨앗이 화분에 도착하기 전에 물뿌리개로 물을 줘서 꽃을 피워야만 한다. 만약 물을 주지 못해 씨앗 상태 그대로 도달하면 점수는 0점을 얻게 되고 처음부터 끝까지 물을 계속 줘서 꽃이

## II. 연구 방법

### 1. 피험자 선정과 실험 장소

본 연구는 남자 7명 여자 6명인 총 13명의 피험자(평균 나이: 23±1.87세)를 대상으로 실시하였다. 특별히 정신에 이상이 있거나 커피 등의 약물을 섭취한 자는 제외하였으며 사전에 피험자에게 실험에 관한 설명과 주의사항을 알려주었고 동의를 얻었다. 실험 장소는 주변의 소음이 없는 곳에서 진행하였고 머리의 땀과 이물질은 알코올로 제거한 뒤 장신구를 제거하였다.

### 2. 실험에 사용한 기기

그림 1에서 볼 수 있듯이 상지 운동에 사용된 모바일 기기는 게임 콘텐츠랑 하얀색 십자표시가 있는 검은 화면을

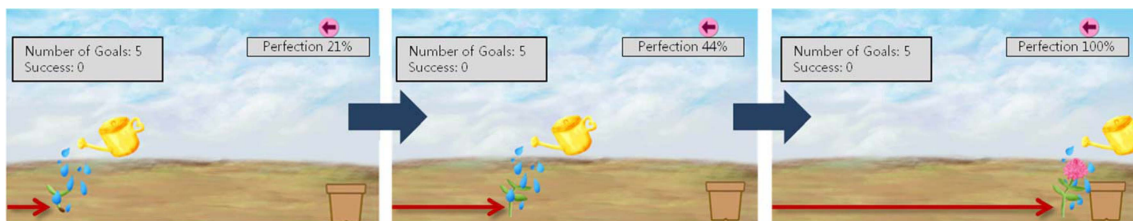


그림 2. 게임 콘텐츠 진행 과정.  
Fig. 2. Progress of Game contents.

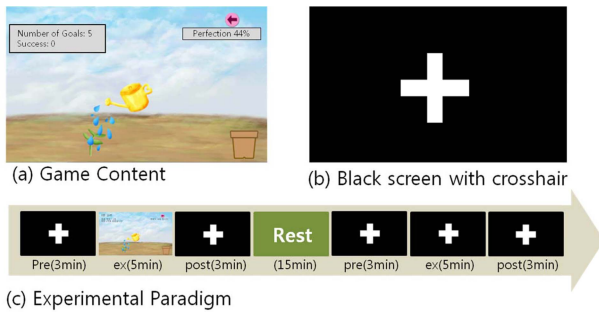


그림 3. 실험 방법. (a)는 모바일 기기를 이용한 운동일 때의 화면. (b)는 단순 반복 상지 운동일 때의 화면. (c)는 실험 패러다임.  
 Fig. 3. Experimental method. (a) Screen of exercise using a mobile device. (b) Screen of Simple repeat upper limb exercise (c) Experimental paradigm.

피게 되면 100점을 얻는다. 씨앗에서 점점 싹이 트고 줄기가 생기고 꽃봉오리에서 꽃이 피는 과정까지 0~100점의 점수가 매겨지게 된다. 이 과정을 5분 동안 반복한다.

4. 실험 방법

피험자에게 Poly G-I를 착용 시킨 뒤 그림 3(a)의 게임 콘텐츠를 보여줄 태블릿 PC를 이용해 실험을 진행하였다. 실험은 모바일 게임 콘텐츠를 이용한 상지 운동과 게임 콘텐츠 없는 단순 반복 상지 운동이 임의의 순서로 진행되며 실험의 총 소요시간은 약 37분이었다.

그림 3(c)에서 볼 수 있듯이 모바일 기기를 이용한 운동은 실험 전 3분 동안 하얀색 십자표시가 있는 검은 화면을 가만히 바라볼 때의 뇌파를 측정하였다. 그리고 실험 중에 5분 동안 움직임 감지 모듈을 부착한 팔의 팔꿈치를 접었다 피는 동작을 수행하며 게임 오브젝트를 조정해 게임을 진행하였다. 실험 후에는 실험 전과 같이 3분 동안 움직이지 않고 하얀색 십자표시가 있는 검은 화면을 가만히 바라볼 때의 뇌파를 측정하였다.

단순 반복 상지 운동에서는 실험 중 5분 동안 게임 콘텐츠 없이 그림 3(b)의 하얀색 십자표시가 있는 검은 화면만 바라보며 팔꿈치를 접었다 폈다 하면서 반복적으로 운동을 실시하였다. 그 외에 실험 전과 후는 모바일 기기를 이용한 운동의 실험 전, 후와 같다. 모바일 기기를 이용한 운동과 단순 반복 상지 운동의 실험 순서는 무작위적이며 첫번째 실험이 끝나면 15분 동안 십자가 모양을 보지 않고 움직일 수 있는 휴식시간을 가졌다.

5. 자료처리

Fp1, Fp2, F3, F4, T3, T4, P3, P4 위치에서 얻어낸 8 채널의 뇌파 처리는 MATLAB (MathWorks, Natick, UNITED STATES) 7.9.0 버전과 EEGLAB 도구상자를

사용하였다. Sampling Rate는 256 Hz 이고 전처리 과정으로 Zero Padding, EOG (Electrooculography) 제거, 대역 통과 필터(Band Pass Filter)를 사용하였다. 대역 통과 필터에서 Theta는 4~8Hz, Gamma는 70~75 Hz로 지정하였다.

TGC 값을 얻기 위한 분석 과정에서 위상 값의 왜곡을 피하기 위해 EEGLAB Toolbox에 있는 eegfilt.m 함수를 통해 least-squares FIR filter를 사용했다[16]. 또한 Gamma 진폭의 위상과 Theta 위상은 Hilbert 변환으로부터 얻었다 (amplitude:  $p(t)=\text{real}[z(t)2+\text{imag}[z(t)2]$ , phase:  $\arctan(\text{imag}[z(t)]/\text{real}[z(t)])$ ). 이렇게 얻어낸 Gamma 진폭의 위상과 Theta 위상은 Cohen에 의해 제안된 동기화 지수(SI)에서  $\phi_{ut}$ 과  $\phi_{tr}$ 으로 사용했다[13].

$$SI = \frac{1}{n} \times \sum_{t=1}^n e^{i[\phi_{tr} - \phi_{ut}]} \quad \text{식 (1)}$$

식 (1)에서 n은 시점 t의 개수,  $\phi_{tr}$ 는 시점 t에서 Theta의 위상,  $\phi_{ut}$ 는 시점 t에서 Gamma 진폭의 위상이다. SI는 위상 동기화의 정도를 반영하기 때문에 0이면 완전 비동기화이고 1이면 완전 동기화를 뜻한다. 그래서 1에 가까울수록 Theta 위상에 Gamma 진폭의 동기화가 높다는 뜻이 된다. 식 (1)의 방법으로 교차 주파수 결합이 시간이 지남에 따라 측정되는 지각 및 인지 과정에 어떻게 관련 되는지에 대해 특히 유용하게 사용할 수 있다[13].

6. 통계분석

통계분석은 SPSS(IBM, New York, United States)21에서 모바일 게임 콘텐츠 기반의 상지 운동과 단순 반복 상지 운동의 유의한 차이가 있는지 알아보기 위해 13명의 TGC 값으로 paired t-test를 실시하였다. 그리고 p value는 0.05로 지정하였다.

III. 연구 결과 및 고찰

그림 4는 8채널에서 얻은 모바일 게임 콘텐츠 기반의 상지 운동과 단순 반복 상지 운동의 TGC 값을 비교한 Topographic map이다. 실험 결과 모바일 기기를 이용한 운동이 단순 반복 상지 운동보다 전반적으로 운동피질에서 Theta-Gamma 동기화가 더욱 높았다. 또한 SPSS를 이용해 paired t-test를 한 결과 P3에서 모바일 기기를 이용한 운동과 단순 반복 운동의 차이가 통계적으로 유의미 하였다 ( $t=3.390$ ,  $df(\text{degree of freedom})=12$ ,  $p \text{ value}=0.0138$ ).

본 연구에서는 모바일 기기를 이용한 운동이 재활 치료에 실질적인 효과를 줄 수 있는지 알아보기 위해 단순 반복 운동을 할 때와 뇌파를 측정해 Theta-Gamma의 동기화 정도를 알아보는 TGC 분석을 실시한 뒤 비교하였다. Theta-

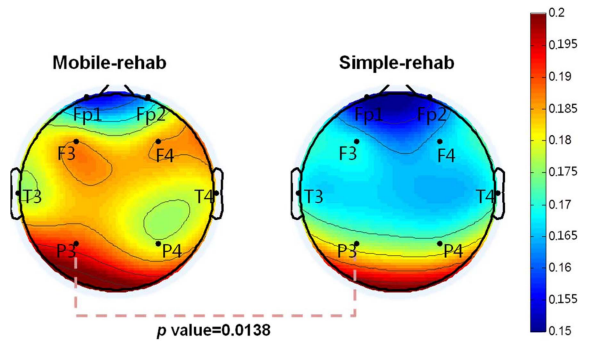


그림 4. 모바일 기기를 이용한 운동과 단순 반복 운동의 TGC 값을 비교한 Topographic map.

Fig. 4. Topographic map comparing TGC values of exercise using a mobile device and simple repeat exercise.

Gamma 동기화는 단기 기억, 학습, 인지 등 대뇌의 특정 영역의 활성화가 나타나는 것과 관련이 있다[12-14]. 그래서 상지 운동을 하는 동안 발생하는 뇌파를 측정했을 때, 그림 4에서 볼 수 있듯이 모바일 게임 콘텐츠를 이용한 상지 운동이 단순 반복 상지 운동보다 운동피질에서 TGC 값이 더 크기 때문에 모바일 기기를 이용한 운동이 실제로 뇌에 변화를 일으키고 재활 치료에 유용한 영향을 줄 수 있다고 볼 수 있다.

이때 무슨 이유로 TGC 분석 결과가 게임에서 더 높게 나온 것 인지 알아볼 필요가 있다. 모바일 기기를 이용한 운동과 단순 반복 운동에서 피험자가 스스로 동일한 반복 상지 운동을 수행하였지만 게임 콘텐츠의 유무가 달랐다. 지루할 수 있는 상지 운동을 하는 동안 피험자가 온전히 집중해 참여하기가 힘든데 게임 콘텐츠의 오락적인 요소가 피험자에게 흥미와 동기부여를 유발시키게 되고 피험자가 실험에 적극적으로 참여할 수 있도록 만들었다. 또한 단순 반복 운동에서는 피험자가 팔꿈치를 접었다 폈다 하는데 초점을 맞췄지만 모바일 기기를 이용한 운동에서는 단순히 팔을 움직이는 것이 아닌 점수를 얻기 위해 피험자가 의식적으로 움직임 감지 모듈의 위치를 세밀하게 조정하여 씨앗에 물을 쥐 꽃을 틔어야 했다. 그래서 모바일 기기를 이용한 운동을 하는 동안 단순 반복 운동보다 의식적인 노력을 하게 되면서 운동학습 메커니즘이 더 활성화 되었다는 의미로 보인다. 결국 모바일 게임 콘텐츠가 재미를 주는 동시에 피험자에게 세밀한 조정도 요구 했기에 운동학습 메커니즘이 증가하게 되며 단순 반복 운동 보다 강한 뇌 활성화가 일어났다고 생각된다.

또한 그림 4를 보면 P3채널에서 유의한 차이가 나타났다. P3채널은 대뇌의 운동 상상, 운동 실행과 관련이 있는 두정엽(Parietal Lobe)에 위치해 있다[17-19]. 두정엽 중 열성 두정엽(IPL, Inferior Parietal Lobe)은 시청각 자극, 공간 인식, 과제 집중하는데 관련이 있으며 특히 좌측 열성 두정엽(LIPL, Left Inferior Parietal Lobe)에서 몸의 움직임

통제, 행동 파악 및 인식에 중심적인 역할을 가진다[20-31]. 이로 인해 만약 좌측 열성 두정엽에 손상이 올 경우 몸의 근육을 제어 할 수 없는 실신 증상이 나타날 수도 있다[32]. 그래서 모바일 기기를 이용한 운동을 하는 동안 게임 콘텐츠가 두정엽의 운동 실행 및 통제와 같은 부분의 메커니즘을 더욱 활성화 시키게 되면서 P3채널에 유의한 차이가 나타나게 되었다고 생각된다.

결과적으로 모바일 게임 콘텐츠가 주는 흥미와 몰입이 피험자의 뇌에서 Theta-Gamma 동기화를 크게 증가시키게 된다. 그리고 TGC 값이 높아질 수록 두정엽에서 운동 제어 관련 영역의 활성화가 높게 나타나게 되기 때문에 단순 반복 운동 보다 재활 치료 효과가 있다고 볼 수 있다.

하지만 건강한 피험자들로 구성해 실험을 진행하였기 때문에 실제 상지 편마비 환자들을 대상으로 실시해 보아야 하며 장기적인 훈련을 통해 개선이 나타나는지 확인해야 한다. 또한 실험 중 상지 운동을 실시한 시간은 5분이었기 때문에 더욱 긴 시간 동안 뇌파를 측정해 보아야 하고 상지 운동뿐만 아니라 다른 신체 부위에서도 효과가 있는지 알아보아야 한다. 더 정확한 결과를 위해 추후 연구로 TGC 분석 이외에 Brain network를 구현하거나 Fourier Transform을 통해 coherence를 표현하는 등의 추가적인 연구도 진행해 보아야 한다.

#### IV. 결 론

모바일 게임 콘텐츠를 이용한 상지 운동 훈련이 운동피질에서 활성화를 일으키고 재활 치료에 실질적인 효과를 주는 지 알아보기 위해 단순 반복 상지 운동을 할 때와 비교실험을 진행한 뒤 TGC 분석을 실시하였다. 그 결과 모바일 기기를 이용한 운동이 단순 반복 상지 운동보다 전반적으로 운동피질에서 TGC값이 더 높았다. 그래서 모바일 기기를 이용한 운동은 Theta-Gamma 동기화를 증가시키고 운동피질의 활성화를 높이기 때문에 실질적으로 재활 치료에 효과적이라고 할 수 있다. 또한 모바일 게임 콘텐츠가 피험자에게 과제에 대한 몰입과 함께 세밀한 운동 능력 조정도 요구 했기에 단순 반복 운동보다 강한 뇌 활성화가 일어났다고 볼 수 있다.

따라서 모바일 기반의 상지 운동이 주는 효과를 이용해 다양한 연구에서 환자의 상황에 맞는 과제를 부여하고 환자 스스로 재활에 참여 하도록 유도하는데 유용하게 활용할 수 있을 것이라 기대할 수 있다.

#### 참고문헌

[1] H.M Lim, Y.H. Choi, N.J. Paik and J.H Ku, "Development



- and Clinical Evaluation of the Upper Extremity Rehabilitation Game Program for Patients with Upper Extremity Hemiplegia After Stroke Using Smartphone: Preliminary Study,” *J. Biomed. Eng. Res.*, vol. 36, no. 5, pp. 155-161, 2015.
- [2] Y. H. Choi, J. Ku, H. Lim, Y. H. Kim, and N. J. Paik, “Mobile game-based virtual reality rehabilitation program for upper limb dysfunction after ischemic stroke,” *Restor Neurol Neurosci*, vol. 34, no. 3, pp. 455-463, 2016.
- [3] J. W. Kim, B. N. Kim, J. Lee, C. Na, B. S. Kee, K. J. Min, D. H. Han, J. I. Kim, and Y. S. Lee, “Desynchronization of Theta-Phase Gamma-Amplitude Coupling during a Mental Arithmetic Task in Children with Attention Deficit/Hyperactivity Disorder,” *PLoS One*, vol. 11, no. 3, p. e0145288, 2016.
- [4] A. Bruns, R. Eckhorn, H. Jokeit, and A. Ebner, “Amplitude envelope correlation detects coupling among incoherent brain signals,” *Neuroreport*, vol. 11, no. 7, pp. 1509-1514, 2000.
- [5] J. J. Chrobak and G. Buzsaki, “Gamma oscillations in the entorhinal cortex of the freely behaving rat,” *J Neurosci*, vol. 18, no. 1, pp. 388-398, 1998.
- [6] G. Buzsaki and A. Draguhn, “Neuronal oscillations in cortical networks,” *Science*, vol. 304, no. 5679, pp. 1926-1929, 2004.
- [7] M. W. Jones and M. A. Wilson, “Theta rhythms coordinate hippocampal-prefrontal interactions in a spatial memory task,” *PLoS Biol*, vol. 3, no. 12, p. e402, 2005.
- [8] P. Lakatos, A. S. Shah, K. H. Knuth, I. Ulbert, G. Karmos, and C. E. Schroeder, “An oscillatory hierarchy controlling neuronal excitability and stimulus processing in the auditory cortex,” *J Neurophysiol*, vol. 94, no. 3, pp. 1904-1911, 2005.
- [9] F. Mormann, J. Fell, N. Axmacher, B. Weber, K. Lehnertz, C. E. Elger, and G. Fernandez, “Phase/amplitude reset and theta-gamma interaction in the human medial temporal lobe during a continuous word recognition memory task,” *Hippocampus*, vol. 15, no. 7, pp. 890-900, 2005.
- [10] R. T. Canolty, E. Edwards, S. S. Dalal, M. Soltani, S. S. Nagarajan, H. E. Kirsch, M. S. Berger, N. M. Barbaro, and R. T. Knight, “High gamma power is phase-locked to theta oscillations in human neocortex,” *Science*, vol. 313, no. 5793, pp. 1626-1628, 2006.
- [11] O. Jensen, J. Kaiser and J. P. Lachaux, “Human gamma-frequency oscillations associated with attention and memory,” *Trends Neurosci*, vol. 11, no. 7, pp. 267-269, 2007.
- [12] P. Sauseng, W. Klimesch, K. F. Heise, W. R. Gruber, E. Holz, A. A. Karim, M. Glennon, C. Gerloff, N. Birbaumer, and F. C. Hummel, “Brain oscillatory substrates of visual short-term memory capacity,” *Curr Biol*, vol. 19, no. 21, pp. 1846-1852, 2009.
- [13] M. X. Cohen, “Assessing transient cross-frequency coupling in EEG data,” *J Neurosci Methods*, vol. 168, no. 2, pp. 494-499, 2008.
- [14] H. Petsche, S. C. Etlinger, “EEG and Thinking: Power and Coherence Analysis of Cognitive Processes,” *Austrian Academy of Sciences*, 1998.
- [15] C. E. Schroeder and P. Lakatos, “Low-frequency neuronal oscillations as instruments of sensory selection,” *Trends Neurosci*, vol. 32, no. 1, pp. 9-18, 2009.
- [16] A. Delorme and S. Makeig, “EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis,” *J Neurosci Methods*, vol. 134, no. 1, pp. 9-21, 2004.
- [17] T. Hanakawa, I. Immisch, K. Toma, M. A. Dimyan, P. Van Gelderen, and M. Hallett, “Functional properties of brain areas associated with motor execution and imagery,” *J Neurophysiol*, vol. 89, no. 2, pp. 989-1002, 2003.
- [18] P. Dechent, K. D. Merboldt, and J. Frahm, “Is the human primary motor cortex involved in motor imagery?,” *Brain Res Cogn Brain Res*, vol. 19, no. 2, pp. 138-144, 2004.
- [19] F. Chollet, V. DiPiero, R. J. Wise, D. J. Brooks, R. J. Dolan, and R. S. Frackowiak, “The functional anatomy of motor recovery after stroke in humans: a study with positron emission tomography,” *Ann Neurol*, vol. 29, no. 1, pp. 63-71, 1991.
- [20] M. Husain, K. Shapiro, J. Martin, and C. Kennard, “Abnormal temporal dynamics of visual attention in spatial neglect patients,” *Nature*, vol. 385, no. 6612, pp. 154-156, 1997.
- [21] L. Battelli, P. Cavanagh, J. Intriligator, M. J. Tramo, M. A. Henaff, F. Michel, and J. J. Barton, “Unilateral right parietal damage leads to bilateral deficit for high-level motion,” *Neuron*, vol. 32, no. 6, pp. 985-995, 2001.
- [22] L. Battelli, P. Cavanagh, P. Martini, and J. J. Barton, “Bilateral deficits of transient visual attention in right parietal patients,” *Brain*, vol. 126, no. Pt 10, pp. 2164-2174, 2003.
- [23] S. M. Rao, A. R. Mayer, and D. L. Harrington, “The evolution of brain activation during temporal processing,” *Nat Neurosci*, vol. 4, no. 3, pp. 317-323, 2001.
- [24] V. Singh-Curry and M. Husain, “The functional role of the inferior parietal lobe in the dorsal and ventral stream dichotomy,” *Neuropsychologia*, vol. 47, no. 6, pp. 1434-1448, 2009.
- [25] L. J. Buxbaum, K. Kyle, M. Grossman, and H. B. Coslett, “Left inferior parietal representations for skilled hand-object interactions: evidence from stroke and corticobasal degeneration,” *Cortex*, vol. 43, no. 3, pp. 411-423, 2007.
- [26] L. J. Buxbaum, K. M. Kyle, and R. Menon, “On beyond mirror neurons: internal representations subserving imitation and recognition of skilled object-related actions in humans,” *Brain Res Cogn Brain Res*, vol. 25, no. 1, pp. 226-239, 2005.
- [27] E. De Renzi, F. Motti, and P. Nichelli, “Imitating gestures. A quantitative approach to ideomotor apraxia,” *Arch Neurol*, vol. 37, no. 1, pp. 6-10, 1980.
- [28] G. Goldenberg, “Defective imitation of gestures in patients with damage in the left or right hemispheres,” *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, vol. 61, no. 2, pp. 176-180, 1996.
- [29] K. Y. Haaland, D. L. Harrington, and R. T. Knight, “Neural representations of skilled movement,” *Brain*, vol. 123 (Pt 11), pp. 2306-2313, 2000.
- [30] U. Halsband, J. Schmitt, M. Weyers, F. Binkofski, G. Grutzner, and H. J. Freund, “Recognition and imitation of pantomimed motor acts after unilateral parietal and premotor lesions: a perspective on apraxia,” *Neuropsychologia*, vol. 39, no. 2, pp. 200-216, 2001.
- [31] M. Pazzaglia, N. Smania, E. Corato, and S. M. Aglioti, “Neural underpinnings of gesture discrimination in patients with limb apraxia,” *J Neurosci*, vol. 28, no. 12, pp. 3030-3041, 2008.
- [32] H. Liepmann, “Linke Hemisphere und das Handeln,” *Munch Med*, pp. 2322-2326, 1905.