

## 정준 상관 분석과 켈스트럼 분석을 이용한 SSVEP 기반 BCI 시스템에 관한 연구

이주영, 이유리, 김형남  
부산대학교

[hnkim@pusan.ac.kr](mailto:hnkim@pusan.ac.kr)

### A Study on the SSVEP-based BCI System using a Canonical Correlation Analysis and Cepstrum Analysis

Lee Ju-Yeong, Lee Yu-Ri, and Kim Hyoung-Nam\*  
Pusan National University

#### 요 약

Brain Computer Interface (BCI)란 사람의 뇌에서 나오는 신호로 컴퓨터와 같은 외부기기들을 직접 제어하는 기술을 말한다. EEG (Electroencephalogram) 기반 BCI 에서 사용되는 생체 신호 중 정상 상태 시각 유발 전위 (Steady-state Visual Evoked Potential, SSVEP)는 특정 주파수로 깜박이는 시각 자극을 응시할 때 발생하는 전기적 생체신호이다. 본 논문에서는 SSVEP 신호가 시각 자극에 해당하는 주파수와 이것의 조화주파수 (harmonics) 성분을 가진다는 특성을 활용하여 켈스트럼을 이용해 EEG 신호를 분석하는 알고리즘을 제안한다. 그러나 EEG 원 신호 (raw data)에는 잡음이 많기 때문에 정준 상관 분석 (Canonical Correlation Analysis, CCA)으로 전처리 (pre-processing)를 하고, 이를 통과한 신호를 켈스트럼의 입력 신호로 사용한다. 제안된 SSVEP 기반 BCI 시스템은 측정된 SSVEP 신호가 조화주파수 성분을 충분히 가질 경우 CCA 만으로 찾을 수 없었던 타깃 주파수를 찾을 수 있었다.

#### I. 서론

BCI 를 위한 비침습적 방식의 신호 측정 방식 중 뇌전도 (Electroencephalogram, EEG)는 기능자기공명영상 (fMRI), 뇌자도 (MEG)에 비해 측정 비용이 저렴하고, 측정에 따른 부작용이 발생하지 않아 보다 보편적으로 사용할 수 있는 기술이다. EEG 기반 BCI 를 위한 신호 중 SSVEP 는 일정한 주파수로 깜박이는 시각 자극을 응시할 때 뇌에서 시각영역을 담당하는 후두엽 부근에서 유도되는 뇌전도 신호이다. SSVEP 는 다른 신호들에 비해 BCI 의 정확도를 높이기 위해 필요한 훈련 (training) 시간이 짧고 정보 전달 속도 (Information Transfer Rate, ITR)가 높다는 장점이 있다[1].

현재 SSVEP 신호 분석에 주로 사용되는 기법은 참고문헌 [2]에서 제안된 정준 상관 분석 (Canonical Correlation Analysis, CCA)이다. CCA 는 기존의 power spectral density analysis 보다 좋은 성능을 보이지만 자극 응시 시간이 짧을 경우에는 정보가 부족하여 정준 상관 계수 (canonical correlation coefficient)를 얻는 데 어려움이 있어 잘못된 BCI 명령을 내릴 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하고자 켈스트럼 분석을 사용하였다.

켈스트럼은 주파수 영역에서 주기성을 띠는 신호의 기본 주파수를 찾는 데 적합하다. SSVEP 신호는 주어진 시각 자극의 주파수인 기본 주파수  $f_0$  와 이의 배수인 조화주파수 (harmonics)를 가지기 때문에 주파수 영역에서 주기가  $1/f_0$  인 주기신호이다 [3]. 따라서 켈스트럼을 사용하여  $f_0$  를 찾을 수 있다. 본 논문에서는 SSVEP 신호가 조화주파수 성분을 충분히 가질 경우 CCA 만으로는 찾을 수 없었던 타깃 주파수를 찾기 위해 켈스트럼을 이용한 SSVEP 기반 BCI 시스템을 제안한다.

#### II. 제안하는 SSVEP 신호 분석 알고리즘

##### 1. 측정 방법 및 실험 설계



그림 1. 모니터 내 타깃(target)의 위치

본 논문은 오프라인 분석으로 진행되었으며 EEG 신호는 125Hz 의 샘플링 주파수(sampling frequency)로 기록되었다. 한 명의 피실험자로부터 O1, O2, Oz, P3, P4, Pz 총 6 개의 전극에서 측정하였고 Reference 와 GND 전극은 양쪽 귀와 전극 Fz 로 하였다. 그림 1 은 본 논문의 실험에 사용된 디스플레이이다. 그림 1 과 같은 모니터에 각각  $f_1=8Hz$  와  $f_2=10.6Hz$  로 일정하게 깜박이는 두 타깃이 있으며, 이들 중 피실험자가 원하는 타깃을 5 초간 응시했을 때 유도되는 EEG 신호를 분석하여 피실험자의 의도를 파악한다.

##### 2. 정준 상관 분석 (CCA)

CCA 는 두 변수 집단  $X$  와  $Y$  를 각각 선형 결합한 정준 변수 (canonical variable)  $x, y$  사이의 상관 (correlation)을 최대로 하는 선형 결합을 찾는 기법이다.  $x$  와  $y$  는 각각의 변수 집단의 선형 결합으로 이루어지며 식 (1)과 같다.

$$x = X^T W_x, \quad y = Y^T W_y \quad (1)$$

이 때의  $x, y$  간의 상관을 정준 상관 계수 (canonical correlation coefficient)  $\rho$  라 한다. 여기에서  $X$  는 EEG 원 신호를 의미하고,  $Y$  는  $X$  와 길이가 같은 기준 신호로 식 (2)와 같이 자극 주파수  $f$  와 조화 주파수의 수  $N_k$  에 따라 정의된다 [2].

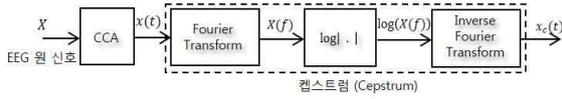


그림 2. 전체 알고리즘 블록도

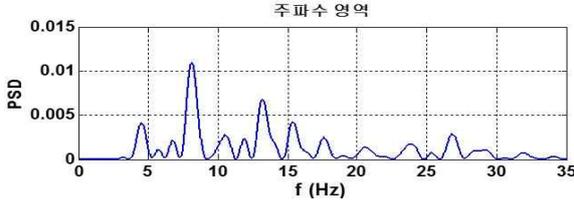


그림 3. CCA를 통과한 신호  $x(t)$ 의 PSD ( $f_0 = 8\text{Hz}$ )

$$Y_f = \begin{pmatrix} \sin(2\pi ft) \\ \cos(2\pi ft) \\ \vdots \\ \sin(2\pi N_h ft) \\ \cos(2\pi N_h ft) \end{pmatrix} \quad (2)$$

### 3. 켈스트럼 분석 (Cepstrum Analysis)

켈스트럼은 곱 신호에 로그를 취하면 합으로 표현되는 성질을 이용하는 것으로 주파수 영역에서 주기성을 띠는 신호 분석에 적합하다.

$$\begin{aligned} X(f) &= S(f)H(f) \\ \log |X(f)| &= \log |S(f)| + \log |H(f)| \end{aligned} \quad (3)$$

켈스트럼이란 신호의 스펙트럼에 로그를 취한 후 Inverse Fourier transform 한 결과로 시간 영역에서 컨볼루션이 cepstral 영역에서 합 신호로 표현된다.  $X(f)$ 가  $f_0$ 를 주기로 가지므로 켈스트럼의 출력  $x_c(t)$ 는 fundamental quefrency  $n_0 = 1/f_0$ 에서 peak를 가진다.

### 4. 제안하는 알고리즘

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 전체 블록도는 그림 2와 같다. EEG 신호의 특성상 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)가 낮아 원 신호 (raw data)를 그대로 사용하면 원하는 정보를 얻기 어렵기 때문에 잡음을 제거하기 위한 전처리 과정으로 CCA를 사용하였다. 그림 3은 CCA의 결과인 정준 변수 (canonical variables)  $x(t)$ 를 나타낸다. 잡음이 제거된  $x(t)$ 가 켈스트럼의 입력신호가 되고 켈스트럼의 출력  $x_c(t)$ 의 fundamental quefrency  $n_0 = 1/f_0$ 의 역수로 타깃 주파수  $f_0$ 를 찾을 수 있다. 본 논문의 모의 실험에 사용된 타깃의 주파수  $f_1 = 8\text{Hz}$ 와  $f_2 = 10.6\text{Hz}$ 에 해당하는 fundamental quefrency의 크기를 비교하여 더 큰 값을 갖는 주파수를 피실험자가 원하는 타깃으로 최종 판단하고 BCI 명령을 내리게 된다.

### III. 실험 결과

그림 4는 자극 응시 시간이 짧을 경우, 정보가 부족하여 정준 상관 계수가 불안정한 경향을 보인다는 것을 나타낸다. CCA는 정준 상관 계수를 직접 비교하여 BCI 명령을 내리므로 자극 응시 시간이 짧으면 잘못된

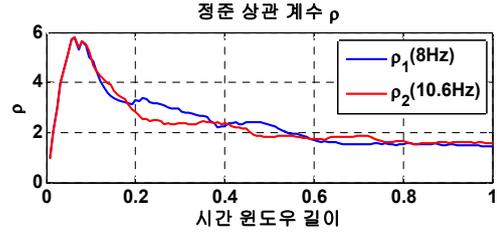


그림 4. 시간 윈도우 길이에 따른 정준 상관 계수 ( $f_0 = 8\text{Hz}$ )

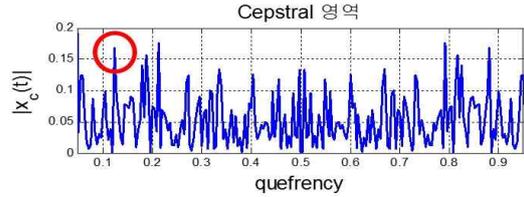


그림 5.  $x_c(t)$ 의 Magnitude ( $f_0 = 8\text{Hz}$ )

BCI 명령을 내릴 수 있다. 그림 5는 본 논문에서 제안된 알고리즘의 최종 결과로 이러한 상황에서도 기본 주파수를 찾을 수 있음을 보여준다.

그림 3과 같이 조화 주파수 성분을 충분히 가지는 경우에 그림 4와 같이 자극 응시 시간이 짧아 정준 상관 계수가 불안정하더라도, 그림 5와 같이 켈스트럼을 이용해 피실험자가 원하는 타깃의 주파수  $f_0$ 를 찾고 그에 따라 올바른 BCI 명령을 내릴 수 있다.

### IV. 결론

실시간으로 BCI 시스템을 제어하기 위해서는 빠른 시간 안에 뇌파 분석과 판단이 이루어져야 한다. 본 논문에서는 SSVEP 신호가 조화 주파수가 잘 나타날 때, 켈스트럼을 이용하여 자극 응시 시간이 짧아도 올바른 BCI 판단을 내린다는 것을 확인했다. 하지만 이는 조화 주파수가 잘 나타나지 않을 경우에는 사용하기 어려운 단점이 있다. 따라서 향후 SSVEP 신호의 조화 주파수를 잘 얻을 수 있는 신호처리 기법에 대한 연구를 진행할 계획이다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1A2008555)

### 참고 문헌

- [1] ZHANG, Yu, et al. Frequency recognition in SSVEP-based BCI using multiset canonical correlation analysis. *International journal of neural systems*, 2014, 24.04.
- [2] LIN, Zhonglin, et al. Frequency recognition based on canonical correlation analysis for SSVEP-based BCIs. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 2006, 53.12: 2610-2614.
- [3] MÜLLER-PUTZ, Gernot R., et al. Steady-state visual evoked potential (SSVEP)-based communication: impact of harmonic frequency components, *Journal of neural engineering on*, 2005.