

t-검증을 이용한 SSVEP 기반 BCI 시스템의 유동적인 시간 윈도우 길이 선택 기법

이주영, 박근호, 이유리, 김형남
부산대학교 전자전기컴퓨터공학과
hnkim@pusan.ac.kr

초록: 뇌 신호만으로 기기들을 직접 제어하는 뇌-컴퓨터 접속 장치 (brain-computer interface) 신호 중 정상 시각 유발 전위 (steady-state visual evoked potential, SSVEP)는 정보 전달 속도가 높고 훈련 (training) 시간이 짧으며 간단한 시스템으로 비교적 높은 정확도를 얻을 수 있는 특징이 있다. 정준상관분석 (canonical correlation analysis, CCA)은 SSVEP 기반 BCI 시스템에서 주파수 인식에 가장 많이 사용되는 방법들 중 하나로, 채널의 위치와 시간 윈도우 길이 (time window length, TW), 조화 (harmonic) 주파수의 수가 주요 매개 변수이다. CCA 를 이용한 기존의 SSVEP 분석 방식은 일정한 TW 를 사용하므로 실시간 분석에는 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 t-검증을 이용해 TW 를 유동적으로 선택하는 CCA 를 제안하고, 기존 기법에 비해 짧은 TW 를 가지며 주파수 인식 정확도를 높인 결과를 제시한다.

주제어: Steady-state visual evoked potential(SSVEP), Canonical correlation analysis(CCA), Time window

I. 서론

뇌-컴퓨터 접속 장치(brain-computer interface, BCI)는 뇌신경계에서 발생하는 전자기적 신호 또는 화학적인 변화를 측정 및 분석하여 인간의 의도를 제어신호로 바꾸어 컴퓨터 또는 외부기기와 직접적으로 정보를 교환한다. BCI를 위한 뇌 신호는 측정 방식에 따라 침습적 (invasive)방법과 비침습적 (noninvasive)방법으로 구분된다.

대표적인 비침습적 방식인 EEG (Electroencephalogram)는 상대적으로 측정 비용이 저렴하고, 전극 삽입에 따른 생체 적응 부작용이나 뇌전증 (epilepsy)이 유발될 가능성이 없는 인체에 무해한 기술로 BCI 시스템에 다양하게 적용 및 응용되고 있다. EEG 기반 BCI 시스템에서 가장 많이 사용되는 신호는 사건 관련 전위 (Event-related potential)와 정상 (定常) 시각 유발 전위 (steady-state visual evoked potential, SSVEP)이다. 그 중 SSVEP기반 BCI는 높은 정보 전달 속도 (information transfer rate)를 가지고 훈련 (training) 시간이 짧다는 장점이 있어 최근 몇 년간 이에 대한 연구가 증가하는 추세이다[1].

SSVEP란 인간이나 동물이 일정한 주파수로 깜박이는 시각 자극에 주의를 집중하고 있을 때 후두부의 시각 피질에서 유도되는 뇌파이다. 이러한 뇌파는 깜박이는 주파수와 동일한 주파수 성분 및 조화 주파수 성분들 (harmonics)을 가진다. SSVEP 기반 BCI 시스템은 각기 다른 주파수로 깜박이는 타겟 (target) 중 원하는

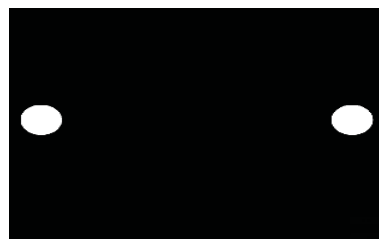


Figure 1. 모니터 내 타겟(target)의 위치

타겟에 주의를 집중하여 측정된 EEG 신호로부터 주파수 성분을 분석하여 피실험자의 의도를 파악한다.

참고문헌[2]에서 처음으로 정준상관분석 (canonical correlation analysis, CCA)을 기반으로 한 SSVEP분석을 제안하였고, 이것은 기존의 power spectral density analysis 보다 좋은 결과를 보였다. 하지만 기존의 CCA 방식은 고정된 시간 윈도우 길이 (time window length, TW)에서의 주파수 선택 정확도만을 분석하기 때문에 실시간 제어가 필요한 BCI 시스템에는 적합하지 않다. BCI 시스템의 실시간 제어를 위해서는 짧은 TW로 높은 정확도를 획득하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 기존의 CCA 기법에 t-검증 방식을 도입하여 유동적인 TW를 선택하는 기법을 제안하여 SSVEP 기반 BCI 시스템의 속도 및 정확도를 개선한다.

II. 측정 방법 및 실험 설계

그림 1은 본 논문의 실험에 사용된 디스플레이고, 두 개의 타겟이 각각 $f_1=8\text{Hz}$, $f_2=10.6\text{Hz}$ 로 일정한 주파수를 가지며 깜박인다. 피험자는 두 타겟 중 선택된 타겟을 실험 1회 당 5초간 응시했다. 실험 횟수는 8Hz 타겟 11회, 10.6Hz 타겟 20회로 총 31회 실시하였다. Reference 와 GND 전극은 각각 양쪽 귀와 전극 Fz로 하였고, 한 명의 피험자로부터 전극 O1, O2, Oz, P3, P4, Pz에서 125Hz의 샘플링 주파수(sampling frequency)로 EEG 신호를 기록하였다.

III. 정준상관분석 및 t-검증

1. 정준상관분석(CCA)

CCA는 다변량 통계분석 방법으로 두 집단의 변수들의 선형적 연관 관계를 살펴 이 두 선형결합 간의 상관 (correlation)이 최대가 되도록 하는 방법이다. 다수의 변수들로 구성된 두 변수벡터 X , Y 의 선형결합 $x=X^TW_x$, $y=Y^TW_y$ 를 정준변수 (canonical variables)라 한다. CCA는 두 정준변수 x 와 y 사이의 상관을 최대로 만드는 가중 벡터 W_x 와 W_y 를 찾는 것이다.

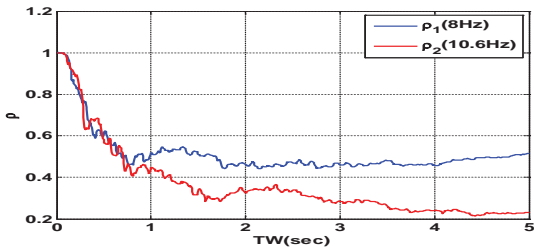


Figure 3. TW 에 따른 정준상관계수

$$\max_{W_x, W_y} \rho(x, y) = \frac{E[x^T y]}{\sqrt{E[x^T x]E[y^T y]}} \quad (1)$$

$$= \frac{W_x^T C_{xy} W_y}{\sqrt{W_x^T C_{xx} W_x W_y^T C_{yy} W_y}}$$

이때 최대 상관계수 값 ρ 자체를 정준상관계수 (canonical correlation)라 하고, 이것을 얻기 위해 식 (1)을 사용한다[3].

본 논문에서 X 는 다중 채널 EEG 신호를 뜻하고, Y 는 자극 주파수를 가지며 X 와 길이가 같은 기준 신호를 의미한다. 기준신호 Y_f 는 식(2)와 같이 자극 주파수 f 에 따라 정의되며 N_h 는 조화 주파수의 수이다.

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

2. t-검증(t-test)

t-검증은 주로 두 집단이 같은 모집단에서 추출되었는지를 판단하는 데 사용된다. t-검증의 원리는 각 집단 내 변수들의 속성이 각 집단의 평균과 유사한 속성을 가질 경우, 두 집단 간에 객관 비교가 가능하다는 것이다.

본 논문에서는 두 데이터 간 평균 차이를 검증하는 방법인 대응표본 t-검증 (paired sample t-test)을 사용했다. 먼저 두 표본평균이 하나의 모집단에서의 모평균과 같을 것이라고 가정하는 영가설 (Null hypothesis)를 세우고, 검정통계량 (Test statistic)을 계산한다. 그 후, 자유도 (Degree of freedom)에 따른 student's t-분포에서의 유의확률 (p-값)을 구한다[4]. p-값은 영가설을 지지하는 정도를 확률로 표현한 것으로 일반적으로 $p < 0.01$ 혹은 $p < 0.05$ 일 때, 영가설을 기각 (Reject)하는데, 본 논문에서는 유의 수준을 0.05로 설정했다.

3. 제안된 유동적인 TW 선택 기법

CCA를 이용해 얻어진 ρ 는 TW에 따라 그림 2와 같다. 일반적으로 0초에서 약 0.7초 동안은 EEG 신호가 부족하기 때문에 ρ 가 불안정하고 2초 이후로 ρ 의 분포가 안정된다. 따라서 TW는 최소 0.7초, 최대 2초의 길이를 갖도록 지정한다 ($0.7\text{초} < TW \leq 2\text{초}$). 제안된 기법의 전체 알고리즘 블록도는 그림 3과 같다. 제안된 기법은 t-검정의 결과인 p-값이 0.05 미만이 되면 정준상관계수 ρ_1, ρ_2 가 다른 집단에서 추출되었다고 판

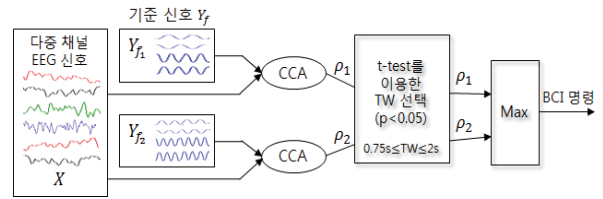


Figure 2. 제안된 기법의 전체 알고리즘 블록도

표 1. 일정한 TW와 제안된 유동적인 TW의 성능 비교

	기존의 일정한 TW				제안된 기법
TW(sec)	0.5	1	1.5	2	1.12
정확도(%)	77.4	83.9	80.7	93.6	90.3

단한다. 이 때, TW 확장을 멈추고 ρ_1 와 ρ_2 의 크기를 비교해 더 큰 ρ 값을 선택하는데, 선택된 ρ 가 ρ_1 이면 f_1, ρ_2 이면 f_2 라는 BCI 제어 명령을 발생시킨다.

IV. 실험 결과

모의실험 결과는 표 1과 같다. 제안된 유동적인 TW의 최대, 최소 TW는 각각 2초, 0.752초였으며, 평균 TW는 1.12초였다. 기존의 CCA 기법인 TW가 1.5초로 일정할 때보다 0.38초 빠르고 정확도는 약 9.6% 향상되었음을 알 수 있다.

V. 결론

실시간으로 BCI 시스템을 제어하기 위해서는 뇌파 분석과 통계 판단이 빠른 시간 안에 이루어져야 한다. 본 논문에서는 SSVEP 기반 BCI 시스템에서 t-검증을 이용해 TW를 유동적으로 선택함으로써 속도와 정확도를 동시에 향상시켰고, 시스템 상에서 별도의 훈련 과정이 필요하지 않은 장점이 있다. 본 논문은 오프라인 분석에서 진행되었는데 이를 실시간 분석에 대한 연구로 확장하여 진행할 예정이다.

참고문헌

[1] Yu-Zhang et al., " Frequency recognition in SS VEP-based BCI using multiset canonical correlation analysis," *International Journal of Neural Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 1450013. Januar y, 2014.

[2] Zhonglin Lin et al., "Frequency Recognition Based on Canonical Correlation Analysis for SSVEP-Based BCIs," *IEEE trans. Biomedical Engineering*, vol. 54, no. 6, pp. 1172-1176, June , 2007.

[3] Magnus Borga, "Canonical correlation, a tutorial," Available from: <http://people.imt.liu.se/~magnus/cca/> , 2001.

[4] Welch, B. L., "The generalization of ' Student' s' problem when several different population variances are involved," *Biometrika*, vol. 34, no.1-2, pp. 28-35, 1947.