

# Symbolic Transfer Entropy 를 이용한 왼손/오른손 상상 움직임에서의 특징 추출

강성욱<sup>○</sup> 전성찬

바이오컴퓨팅 연구실, 광주과학기술원

[swkang@gist.ac.kr](mailto:swkang@gist.ac.kr), [scjun@gist.ac.kr](mailto:scjun@gist.ac.kr)

## Feature extraction obtained by two classes motor imagery tasks using symbolic transfer entropy

Sungwook Kang<sup>○</sup> Sung Chan Jun

BioComputing Lab., Gwangju Institute of Science and Technology

### 요약

Brain-Computer Interface (BCI) 는 뇌 신호를 이용하여 생각으로 기계 및 컴퓨터를 제어 할 수 있는 기술이다. 뇌전도(Electroencephalography, EEG) 를 이용한 본 연구는 왼쪽/오른쪽 손 상상 움직임 실험에 대해서 특징 추출 (feature extraction)에 관한 연구로 총 9명의 피험자로부터 얻어진 뇌 전도 데이터를 이용하여 전통적인 방법 (Common Spatial Pattern, CSP 및 Fisher Linear Discriminant, FLDA) 을 이용해 구한 분류 정확도와 본 논문에서 사용 된 Symbolic transfer entropy (STE) 을 통해 얻어진 특징에 대한 결과를 보여 준다. 본 연구를 통하여 STE를 통한 특징 추출 방법이 의미가 있다고 생각한다.

### 1. 도입

Brain-Computer Interface (BCI) 는 생각과 컴퓨터를 연결하는 하나의 방법이다. 생각만으로 컴퓨터 및 기계를 제어하는 것, 그것의 방법을 찾기 위한 것이 BCI의 연구 목적이다[1,2,3]. BCI의 성능을 평가할 때 흔히 분류기를 통한 분류 정확도 (success rate or hit rate) 을 가지고 성능의 좋고 나쁨을 말한다. 성능이 좋은 분류기를 구성하기 위하여, 분류기를 잘 구분 해 줄만한 특징 (feature) 를 찾는 것이 중요한 문제이다. 본 논문은 Symbolic Transfer Entropy (STE)를 이용하여 왼손과 오른손의 상상 움직임 데이터를 통해 두 집단을 분류 해 줄 수 있는 특징을 찾는 데 연구 목적이 있다. 특징 추출 방법에 대한 논문은 위에서 언급한 것 같이 다양한 방법이 제안되었지만, STE를 통해서 특징을 상상 움직임 데이터에 적용을 시도 한 것은 본 논문이 처음이다. 여기서는 STE를 이용하여 Average Information Transfer 를 계산하고, 상상 움직임에 대해서 두 집단(좌,우)사이의 어떤 유의미한 특징이 발견되는지의 여부에 대해 확인 및 해석을 논의하고자 한다.

### 2. 방법

#### 2.1 실험 설계

본 실험은 왼손/오른손의 상상 움직임 (imagery movement of left/right hand task) 에 대한 실험이다. 총 9명의 피험자가 본 실험에 참여하였고, 그 중 4명은 여성 피험자였다 (평균 나이 26.2세, 범위 21-34세). 각 진행 (run) 당 40 개 시행의 데이터가 수집되었고 (좌·우 20개 씩), 총 5회 진행, 200개의 데이터 (좌·우 100개 씩)가 수집되었다. 진행과 진행 사이에 약 3-5분의 휴식시간이 주어졌다. 뇌전도 신호는 32개의 Ag/AgCl 두피 센서에 의해 수집 되었고, 오른쪽 귀 뒷 부분에 (left/right ear mastoid) 기준 (reference) 센서, 왼쪽 귀 뒷 부분이 접지 (ground) 센서가 부착 되었다. 사용 된 32개의 채널은 다음과 같다 (위쪽-아래쪽, 좌-우 순서로, Fp1, Fpz, Fp2, AFz, F7, F3, Fz, F4, F8, Fc3, Fc1, Fcz, Fc2, Fc4, T7, C3, Cz, C4, T8, Cp3, Cp1, Cpz, Cp2, Cp4, P7, P3, Pz, P4, P8, O1, Oz, 그리고 O2). 본 실험에 사용된 뇌전도 수집 기계는 (주)락샤 의 WEEG-32 가 사용 되었고, 512 Hz 샘플링 주파수로 측정 되었다. 또한 몇 명의 피험자에 대해서는 좌·우 팔에 근전도 (EMG) 도 함께 측정 되었다.

#### 2.2 Symbolic transfer entropy

먼저, 두 개의 time series 신호를 각각  $c_i$  그리고  $c_j$  라고 하자. 심볼화 과정은 [4]에 제시된 순열 엔트로피 (permutation entropy) 에 기반한 방법으로 이루어 지는데,  $emd$ 로 표시 되는 embedding dimension 의 크기에 맞는 심볼이 만들어진다. 어떤 임의의 채널 인덱스  $i$  에 대해서 심볼은  $C_i = \{c(i), c(i + \tau), \dots, c(i + (emd - 1)\tau)\}$ 로 형성 된다. 형성 된 심볼은 오름차순으로 재배열 되고 ( $\{c(i + (k_{i1} - 1)\tau) \leq c(i + (k_{i2} - 1)\tau) \leq \dots \leq c(i + (k_{iemd} - 1)\tau)\}$ , 여기서  $\tau$  는 시간 지연 (time delay) 을 나타낸다.), 만약 값이 같은 경우 ( $c(i + (k_{i1} - 1)\tau) = c(i + (k_{i2} - 1)\tau)$ ), 연관 된 두 인덱스  $k$  의 비교를 통해 순서를 정한다 ( $c(i + (k_{i1} - 1)\tau) \leq c(i + (k_{i2} - 1)\tau)$ ). 따라서 심볼이  $k_{i1} < k_{i2}$  를 만족 할 때, 임의의 채널 데이터  $C_i$  의 모든 심볼은  $emd!$  개수의 심볼 패턴 공간의 어느 한 패턴으로 매핑 (mapping) 된다. 이렇게 형성 된 심볼 ( $\hat{C}_i \equiv (k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{iemd})$ ) 을 가지고 심볼 간의 상대적인 도수 (relative frequency) 를 통해 결합확률분포 (joint probability) 와 조건부확률 (conditional probability) 를 근사 (estimate) 한다. 주어진 두 채널의 심볼  $\hat{C}_i$  와  $\hat{C}_j$  에 대해서 symbolic transfer entropy 는 다음과 같이 정의 할 수 있다[5].

$$\text{Ste}_{c_j, c_i} = \sum p(\hat{c}_{i+\delta}, \hat{c}_i, \hat{c}_j) \log_2 \frac{P(\hat{c}_{i+\delta} | \hat{c}_i, \hat{c}_j)}{P(\hat{c}_{i+\delta} | \hat{c}_i)} \quad (1)$$

여기서 더하기 연산 (summation) 은 모든 심볼에 대해 적용 되고,  $\delta$  는 예측 하고자 하는 심볼의 위치 (time step) 를 나타낸다. 이 symbolic transfer entropy 는 정보의 방향성을 계산 할 수 있는데, 이 방향 지수 (directionality index) 는 두 Ste 값의 차이로 나타낼 수 있다 ( $\text{Ste} = (\text{Ste}_{c_i, c_j} - \text{Ste}_{c_j, c_i})$ ). 이 값이 양수 일 때는 단방향의 연결 (unidirectional coupling)  $C_i$  에 대해 정보가  $C_j$  에서  $C_j$  로 흘러간다고 이야기 할 수 있고, 음수일 때는 반대로 정보가 흘러간다, 즉, ' $C_j$  가  $C_i$  에게 영향을 준다' 라고 이야기 할 수 있다. 정보의 흐름이 균형을 이룰 때에는 그 값은 0 으로 나타난다. 본 논문에서 사용 된 설정 값은  $emd = 5, \tau = 1, \delta = 1$  이다.

### 2.3 평균 정보 흐름

Ste는 어느 특정 시간에 대한 정보의 흐름을 측정 할 수 있고, 창형성 (window) 방법을 이용하여 특정 시간이 아닌 연속된 시간에 대한 정보의 흐름을 파악하고자 Average Information Transfer (AIT) 를 계산한다. AIT는 기준 채널과 나머지 모든 채널간의 Ste 값의 평균 값으로 정의 된다. 식은 다음과 같다.

$$\text{Ste}(c, w) = \frac{\sum_{c_i \neq c_j} [\text{Ste}_{c_i, c_j}(w) - \text{Ste}_{c_j, c_i}(w)]}{n_c - 1} \quad (2)$$

여기서  $n_c$  는 채널의 개수를 나타낸다. 더 명확한 특징을 찾아보기 위해, 자극 제시 전 신호에 대해 base line correction 을 적용하고, 각 채널의 표준 편차 (standard deviation) 값으로 나누어 줌으로써 정규화 값을 구했다. AIT 값이 양수이면 해당 채널, 시간에 정보가 바깥으로 나간다고 생각할 수 있고, 반대로 음수일 경우에는 정보가 들어간다고 이야기 할 수 있다.

## 3. 결과

[그림 1]은 왼쪽 오른쪽 집단에 대해서, 선택된 피험자에 대한 AIT 값의 차이를 나타낸다. 데이터 전처리로, 8-15Hz (mu + lower beta rhythm) 에 대해 대역 통과필터링을 시키고, 각 집단에 대해서 Ste 값 및 AIT 값을 계산 하였다. AIT 값을 그려 낼 때, 운동 영역에 위치한 센서들을 중점적으로 보기위해 채널 선택도 같이 하였다. 분류 정확도가 높게 나타나는 피험자는 왼쪽과 오른쪽에 신호에 대해서 정보의 흐름이 강하다고 가정하였다. 그리고 나서 왼쪽과 오른쪽 집단에서의 차이를 보기 위하여 왼쪽에서 나온 AIT 값에서 오른쪽에서 나온 AIT 값을 빼주었다. [그림 1]에서는 피험자 2-2 (sub2-2), 피험자 5-2, 피험자 8-2, 피험자 3-2에서 좌우 반구에 대해 다른 특징이 나타남을 확인할 수 있다.

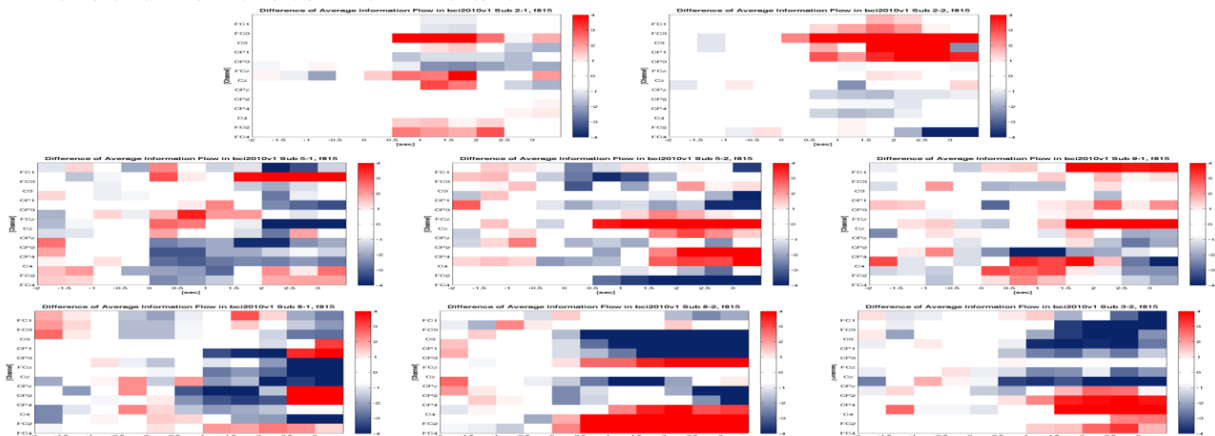


그림 1. 선택된 피험자에 대한 좌,우 상상움직임의 평균 정보 흐름의 차이

## 4. 결론

BCI의 목적은 크게 재활의 목적과, 흥미 (게임, 컨텐츠) 목적으로 나눌 수 있다. 하지만 잡음이 많이 섞인 뇌 신호를 통해 BCI 시스템의 효율성을 높이기 위해서는 강력한 신호처리 방법이 요구 된다. 신호처리 방법에는 전처리, 본처리, 후처리 과정 등 매우 세분화 되어 있지만, 높은 분류 정확도를 나타내는 최종적인 결과물인 제어 신호 (control signal) 을 얻기 위해서는 좋은 특징을 찾는 것이 필수적이다. 이러한 특징 찾기의 한 방법으로 본 논문은 Symbolic Transfer Entropy 를 이용해서 Average Information Transfer 를 계산 하였다. 이 계산을 통해서 특정 피험자에 대해서 좌-우를 구분 할 만한 특징을 찾아 내었다. 하지만, 그 특징들을 해석하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 또한 실시간 BCI 시스템에 적용하기 위해 계산 시간 단축 방법도 개선 되어야 할 것이다.

## Acknowledgement

본 연구는 광주과학기술원 바이오광학영상센터 및 한국연구재단(KRF-2008-331-D00768, NRF-2010-0006135)과 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학IT연구센터 지원사업(NIPA-2010-C1090-1031-0006)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Dean J. Krusienski et al., "A comparison of classification techniques for the P300 Speller", *J. Neural Eng.* **3** pp. 299-305, (2006)
- [2] <http://www.bbci.de/press>, "Highlight CeBIt 2010 - Pinball Experiment"
- [3] 안민규, 강성욱, 전성찬, "뇌전도에 기반한 뇌-컴퓨터 연계기술 연구", *정보통신 합동학술대회* pp. 33-36 (2009)
- [4] C. Bandt and B. Pompe, "Permutation Entropy", *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 174102 (2002)
- [5] Matthäus Staniek and Klaus Lehnertz, "Symbolic Transfer Entropy", *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 158101 (2008)