

긍/부정 선택 순간의 뇌파 변화 연구: 두 위치에서 측정된 뇌파의 상호관계 분석

김민준, 신승철, 송윤선, 류창수, 문성실*, 손진훈*
한국전자통신연구원, 충남대학교*

EEG Analysis at the Moment of Yes/No Decision: Study of Spatio-Temporal Relations

Min-Joon Kim, Seung-Chul Shin, Yoonscon Song,
Chang Su Ryu, Sung Sill Moon*, Jin-Hun Sohn*
Electronics and Telecommunications Research Institute,
Chungnam National University*

요 약

긍/부정 선택 실험에서 나타나는 뇌파 변화를 연구하였다. 서로 다른 위치에서 측정된 뇌파의 시공간적 상호관계를 정량화하는 변수로, 시간영역에서 계산하기 용이한 동기율(synchronization rate), 편향성(polarity), 상호상관(cross-correlation) 등의 변수를 도입하여, 긍/부정 선택 순간의 뇌파 변화를 살펴보았다. 좌우 전전두엽(Fp1, Fp2)에서 측정된 뇌파를 사용하여 계산한 동기율, 편향성의 평균과 요동폭, 상호상관 등은, 선택 순간 근처에서, 평상시의 뇌파와 통계적으로 유의미한 차이를 보였다.

Keyword: EEG, BCI(Brain Computer Interface), Spatio-temporal relation, Decision making, Yes/No discrimination

1. 서론

컴퓨터의 등장과 발달은 인간의 의사 전달 방식에 획기적인 전환을 가져왔다. 이러한 변화와 더불어, 컴퓨터와 인간을 이어주는 연결 수단인 HCI(Human Computer Interface)의 연구가 새로운 분야로 등장하게 되었다. HCI는

초기의 키보드에 의한 컴퓨터에의 명령어 전달에서 시작하여, 현재의 마우스 기반 인터페이스로 발달했고, 계속적으로 음성 기반, 생체신호 기반 인터페이스로 발전해나갈 것으로 예상된다.

차세대 컴퓨터 인터페이스로 예상되고 있는 생체신호 기반 인터페이스, 특히 뇌파 기반 인터페이스의 경우에는, 사람의 생각을 읽는다는

의미에서 궁극적인 통신 방법이라고 생각된다. 그러나, 연구의 어려움 등의 문제로, 현재까지는 기초적인 부분의 연구에 한정되어 있다.

뇌파 기반 휴먼 인터페이스의 개발은 크게 두 가지 형태로 이루어지고 있다. 첫째는 특정 뇌파를 유도하는 방식이고, 두 번째는 있는 그대로 뇌파를 인식하는 형태이다. 현재까지 전자의 특정 뇌파 유도형 인터페이스의 연구는 상당수 진행되고 있으나, 후자의 경우에는 그 연구가 비비한 형편이다.

특정 뇌파 유도형은 사용자와 컴퓨터의 훈련을 통해서 간단한 의사를 컴퓨터 등에 전달하는 방식으로 현재까지 가장 많은 결과[1-8]를 보여주고 있는 분야이다. 뇌파를 직접 인식하는 형태를 컴퓨터와 심박시킨 분야로는 사람의 감성상태를 인식하여 적용하는 경우[9]와 ERP(Event Related Potential)을 이용하는 경우[10,11]가 있다. 그러나, 사람의 의사를 직접 인식하는 형태의 연구[12]는 아직까지 많이 이루어지지 않았고, ERP를 이용하는 경우는 실시간 처리가 어렵다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서 특히 관심을 가지고 있는 부분은 머리의 여러 부분에서 측정된 뇌파의 시공간적 상호관계[13]를 분석하여 HCI에 적용하는 분야이다. 또한, 본 연구는 실시간 의사 인식의 초기 단계의 연구의 하나로, 뇌파 분석에서 전통적으로 사용되고 있는 주파수 영역(frequency domain)에서의 분석이 아니라, 시간 영역(time domain)에서의 분석에 관심을 가지고 있다. 뇌파의 시공간적 관계 분석의 측면에서는 시간 영역에서의 분석 방법이 장점을 갖는다고 말할 수 있다.

본 논문의 구체적인 목적은 사람이 긍정과 부정을 판별하여 선택할 때 나타나는 뇌파의 특성 변화를 연구하는 것이다. 특히 긍정과 부정의 차이심보다는 긍정이나 부정을 선택할 때 공통으로 나타나는, 평상시의 뇌파와는 다른 특성을 찾는 것에 관심을 두고 있다.

2. 실험

본 논문에서 다룬 긍/부정 선택 실험은 피험자가 시각 자극으로 제시되는 문제에 대하여 긍정이나 부정을 선택하는 실험으로, 세 가

지 유형으로 이루어져 있다.

첫 번째 유형은 동일언어 판단과제로, 주어진 두 개의 의미 있는 단어(예를 들면, 웅겔텐덱, 웅겔텐덱)가 같으면 긍정, 다르면 부정으로 판단하는 형태이고, 두 번째 유형은 언어개념 검사 과제로, 왼쪽과 오른쪽에 각각 두 개의 단어가 짝지어져 나타날 때, 좌우의 관계가 동일한지를 판단하는 형태이다(예를 들면, 공책 : 연필 = 칠판 : 분필). 마지막 세 번째 유형은 연이어 나오는 도형들의 맥락이 유지되는가를 판단하는 문제이다.

실험은 다음과 같은 형태로 진행되었다. 실험이 시작되면, 피험자는 준비 단추를 누르고 있다가, 화면에 나타나는 문제의 답을 마음 속으로 결정한 후, 바로 준비 단추에서 손을 떼서 긍정이나 부정의 단추를 누른다. 이 때, 준비 단추에서 손을 떼는 순간을 RT, 그 때부터 긍정이나 부정의 단추를 누를 때까지 걸리는 시간을 MT라고 한다.

실험은 두부 외상이나 정신 질환의 병력이 없는 오른손잡이 대학생을 대상으로 실시되었으며, 본 연구의 분석에 사용된 피험자의 수는 9명이다. 문제는 유형별로 4문제씩 전체 12문제가 주어졌다. 뇌파의 측정은 국제 전국 배치법에서의 Fp1, Fp2와 O1, O2에서 이루어졌으며, 샘플링 주파수는 128Hz였다.

3. 분석

뇌파의 시공간적인 상호관계, 특히 두 곳에서 측정된 뇌파의 위상관계를 상향화하기 위해서 동기율(synchronization rate), 편향성(polarity), 상호상관(cross correlation)의 세 가지 변수를 도입하였다.

동기율 $SR(t)$ 는 두 신호 f_1, f_2 가 얼마나 같은 양상으로 변화하는가, 다시 말해서 두 곳에서 측정된 신호가 동시에 증가하거나 동시에 감소하는 정도를 나타내주는 양으로 다음과 같이 정의된다.

$$SR(t) \equiv \frac{1}{w} \int_{t-w}^t H\left(\frac{df_1}{dt}(f) - \frac{df_2}{dt}(f)\right) df,$$

$$H(x) \equiv \begin{cases} 1 & \text{for } x \geq 0 \\ 0 & \text{for } x < 0 \end{cases}^+$$

여기서, w 는 동기율을 계산할 때 사용한 구간

의 크기이다.

편향성 p 은 두 곳에서 측정된 신호, f_1, f_2 으로 이루어진 위상공간에서의 회전방향을 의미하는 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$p \equiv \frac{\hat{\theta} \cdot \frac{d\vec{x}}{dt}}{\left| \frac{d\vec{x}}{dt} \right|},$$

$$\vec{x} = (x_1, x_2) = (f_1 - f_1^0, f_2 - f_2^0),$$

$$\hat{\theta} \equiv \frac{(-x_2, x_1)}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}}.$$

여기서, f_1^0, f_2^0 는 회전방향을 계산할 때 사용한 원점을 의미한다. 실제 분석에는 편향성의 구간 평균과 구간 내에서 편향성이 요동하는 폭을 대표할 수 있는 표준편차를 도입하여 사용하였다.

상호상관은 두 신호의 상관관계를 정량화할 때 자주 사용되는 양으로, 본 연구에서는 상호상관을 각 신호의 자체상관(auto correlation)을 사용하여 규격화(normalization)한 규격화된 상호상관 $R_{ij}(t; \tau)$ 을 사용하였다. 그 정의는 다음과 같다.

$$R_{ij}(t; \tau) \equiv \frac{\phi_{ij}(t; \tau)}{\sqrt{\phi_{ii}(t; \tau)\phi_{jj}(t; \tau)}},$$

$$\phi_{ij}(t; \tau) \equiv \int_{t-w}^t f_1(t) f_2(t + \tau) dt.$$

본 연구에서 사용한 τ 값은 0이다.

측정된 뇌파 데이터 중에서 Fp1, Fp2의 데이터에 대해서 동기율, 편향성 평균, 편향성 표준편차, 규격화된 상호상관을 계산하고, 선택과 비선택(평상시), 긍정과 부정의 경우로 나누어 통계처리를 하였다. 통계처리시에는 모든 데이터를 RT를 기준으로 하여 사용하였으며, 안전도(EOG) 등의 잡파가 혼입된 경우에는 통계에서 제외하였다. 그리고, 평상시의 뇌파는 측정하지 않았기 때문에, RT 전후(RT 전 1초, RT 후 0.5초)를 제외한 데이터를 평상시의 뇌파를 대신하여 사용하였다.

4. 결과 및 논의

그림 1은 RT 근처에서의 동기율의 변화를 나타낸 것이다. 가로축의 시간은 RT로부터의 시간을 의미한다. 그림에서, 긍정의 경우는 가

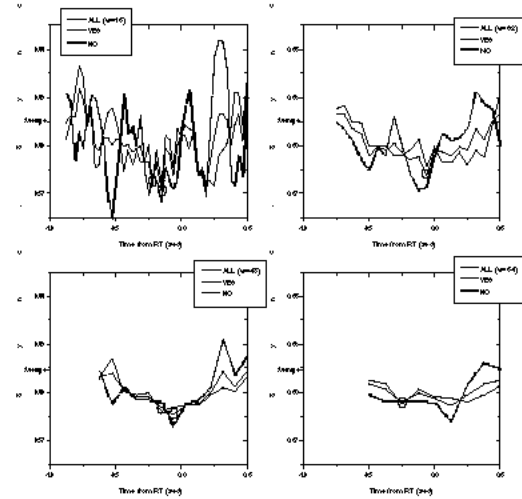


그림 1. RT 근처에서의 동기율의 변화. 가로축의 시간은 RT로부터의 시간을 의미하고, 긍정은 가는 실선, 부정은 점선, 긍정과 부정을 모두 고려한 선택은 굵은 실선으로 나타내고, 통계적으로 유의미한 차이를 보이는 부분은 동그라미로 표시하였다.

는 실선으로, 부정의 경우에는 점선으로 나타내었으며, 긍정과 부정의 경우 모두를 고려한 경우를 굵은 실선으로 나타내었다. 그림에서 w 로 표시한 것은 동기율 계산시 사용한 구간 크기, 엄밀히 말해서는 데이터 개수로, 64, 48, 32, 16은 각각 0.5초, 0.375초, 0.25초, 0.125초에 해당한다. 그리고, 계산 구간에 대한 대표 시간값으로는 구간의 마지막 시간을 사용하였다. 각각의 경우에 대해서 계산 구간의 중첩(overlap) 정도는 75%이다. 그림에서 “Average”로 표시한 것은 평상시 뇌파를 사용하여 얻은 평균값이다.

그림 1에서 긍정과 부정의 차이를 살펴보기 위해서는 긍정의 경우에 대해 얻은 동기율의 변화와 부정의 경우에 대해 얻은 동기율의 변화를 비교하여야 할 것이다. 그런데, 앞에서 잠시 언급했듯이, 이 부분에 대해서는, 본 논문에서는 깊이 설명하지 않기로 한다.

선택과 비선택의 경우를 비교하기 위해서는 긍정, 부정의 경우를 모두 고려한 굵은 실선 부분과 평상시의 평균값을 비교하여야 한다.

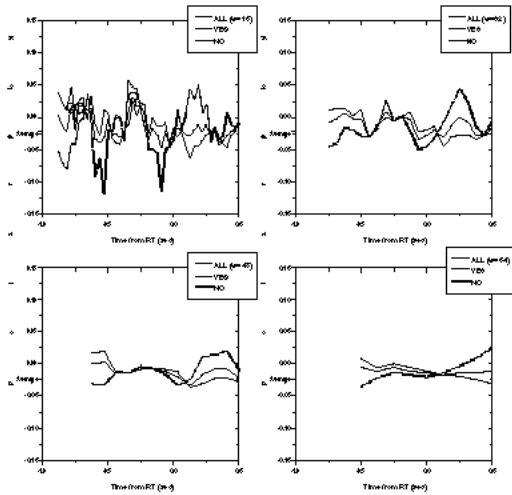


그림 2. RT 근처에서의 편향성 평균의 변화. 가로축의 시간은 RT로부터의 시간을 의미하고, 긍정은 가는 실선, 부정은 점선, 긍부정을 모두 고려한 선택은 굵은 실선으로 나타내고, 통계적으로 유의미한 차이를 보이는 부분은 동그라미로 표시하였다.

좀 더 정밀한 비교를 위해서 두 가지 데이터를 사용하여, 유의수준 5%의 t-검정을 실시하였다. 그 결과 통계적으로 유의미한 차이를 보이는 부분을 그림에서 동그라미로 표시하였다.

그림 1에서, RT 전 약 400ms부터 150ms까지의 구간에서 동기율이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 통계처리 과정에서 나타난 계산 구간 크기와 유의확률의 관계를 살펴보았을 때, 상관관계가 별로 없음을 알 수 있었다.

그림 2에는 편향성의 평균의 변화를 나타내었다. 그림 설명은 그림 1의 경우와 동일하다. 편향성은 RT 전 약 900ms에서 700ms까지의 구간과 400ms에서 300ms의 구간에 대해서 증가하는 양상을 보였다. 그런데, 이러한 양상은 구간 크기가 작은 경우(w=16)에만 나타나서, 편향성의 변화 속도가 동기율에 비해서 빠른 것을 알 수 있었다. 편향성의 값이 양수라는 것은 Fp1 부분이 Fp2에 비해서 먼저 활성화된다는 것을 의미한다.

그림 3에 편향성의 요동폭의 변화를 나타내었다. 편향성의 요동폭은 RT 전 약 700ms부

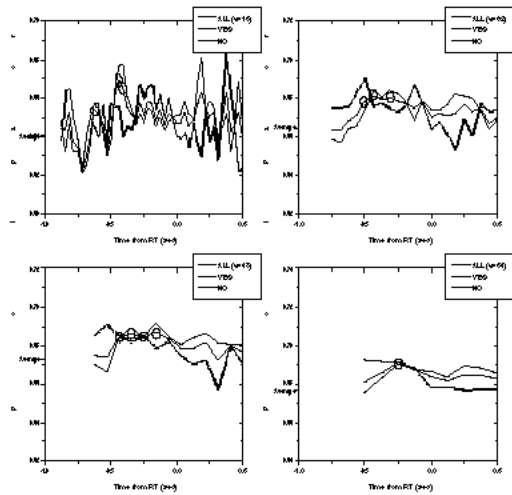


그림 3. RT 근처에서의 편향성 요동폭의 변화. 가로축의 시간은 RT로부터의 시간을 의미하고, 긍정은 가는 실선, 부정은 점선, 긍부정을 모두 고려한 선택은 굵은 실선으로 나타내고, 통계적으로 유의미한 차이를 보이는 부분은 동그라미로 표시하였다.

터 250ms의 상당히 긴 구간에 대해서 증가하는 양상을 보이고 있다. 그리고, 이 변수의 경우에는 계산 구간의 크기가 작을 때보다 클 때에 좀 더 뚜렷한 차이를 보이고 있다.

그림 4는 규격화된 상호상관의 변화를 보이고 있다. 규격화된 상호상관의 경우에는 RT 전 450ms에서 300ms의 구간에서 감소를 나타낸다. 그러나, 다른 변수에 비해서 뚜렷한 차이를 나타내지는 않는다. 상호상관과 동기율이 비슷한 의미를 지니는 변수라는 것을 고려할 때, 상호상관과 동기율이 둘 다 감소하는 것은 서로 부합하는 결과로 보여진다.

선택 순간 근처에서의 동기율, 편향성, 상호상관의 변화양상을 살펴본 결과, RT 전 900ms~700ms 구간에서 편향성이 증가하고, 그 후, 700ms~250ms 구간에서 편향성의 요동이 커지며, 450ms~300ms 구간에서 규격화된 상호상관의 감소가, 400ms~300ms 구간에서 편향성의 증가가, 400ms~150ms 구간에서 동기율의 감소가 이어짐을 알 수 있었다. 이 결과를 요약하여 그림 5에 나타내었다.

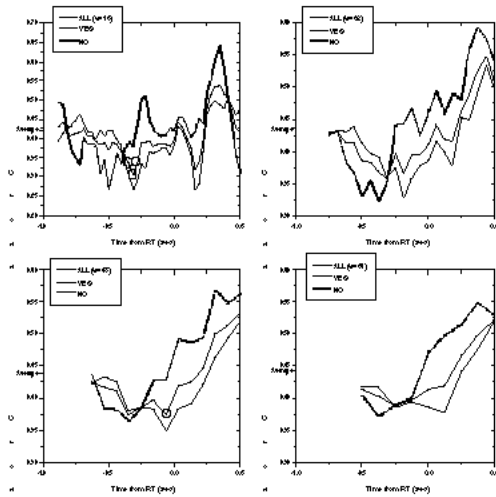


그림 4. RT 근처에서의 규격화된 상호상관의 변화. 가로축의 시간은 RT로부터의 시간을 의미하고, 긍정은 가는 실선, 부정은 점선, 긍부정을 모두 고려한 선택은 굵은 실선으로 나타내고, 통계적으로 유의미한 차이를 보이는 부분은 동그라미로 표시하였다.

분석에 사용한 실험의 경우, RT 때, 누르고 있던 단추를 떼는 동작이 일어나게 된다. 따라서, 뇌파 분석 결과에도(동작과 직접적으로 관련이 적은 전전두엽에서의 데이터를 사용해서 분석하긴 했어도) 그에 해당하는 특징이 나타날 것이다. 그러나, 현재로서는 그 특징이 어떤 형태로 나타날 것인지는 확실히 알 수 없으며, 단지 RT 전 대강 100ms를 전후해서 어떤 특징이 나타날 것이라는 추측 정도만 할 수 있다. 동작관련 특징에 대해서는 보다 세밀한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

지금까지 살펴본 결과 중에서, 편향성 요동의 증가가 가장 뚜렷하고 넓은 구간에서 나타남으로 위의 결과를 BCI에 응용할 때 사용할 수 있는 가장 유력한 특징으로 생각된다. 또한, 동기율의 경우도 적용 가능할 것으로 생각된다. 편향성 평균의 경우에는 짧은 구간에서 나타나기 때문에 응용 가능성이 적을 것으로 생각되고, 상호상관의 경우에는 통계적으로 유의미한 결과를 보이기는 하지만, 그 차이를 보이는 구간에서의 긍정과 부정의 차이가 커서

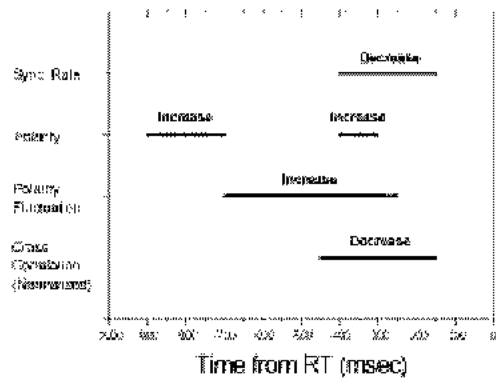


그림 5. 긍부정 선택순간 근처에서의 시공간적 상호관계의 변화 양상.

좀 더 세밀히 살펴보아야 할 것으로 생각된다.

5. 요약 및 향후 연구 방향

긍/부정 선택에 관련된 뇌파 실험을 하고, 전전두엽에서 특정된 뇌파 데이터를 사용하여 뇌파의 시공간적 특징의 변화 양상을 살펴보았다.

뇌파의 시공간적 특징을 대표하는 변수로 동기율, 편향성, 상호상관 등의 변수를 도입하였으며, 그 결과 선택 순간 근처에서 평상시 뇌파와는 다른 특징을 보이는 것을 알 수 있었다.

선택 순간 근처에서의 동기율, 편향성, 상호상관 등은 다음과 같은 변화를 보였다. RT 전 900ms~700ms 구간에서 편향성이 증가하고, 그 후, 700ms~250ms 구간에서 편향성의 요동이 커지며, 450ms~300ms 구간에서 규격화된 상호상관의 감소가, 400ms~300ms 구간에서 편향성의 증가가, 400ms~150ms 구간에서 동기율의 감소가 이어짐을 알 수 있었다.

이 결과는 뇌파 기반 컴퓨터 인터페이스 구현에의 기초 연구 자료로 사용될 수 있을 것으로 예상되며, 이 연구결과를 좀 더 확장하기 위해서는 동작관련 특징에 대한 연구와 유형별, 피험자별 통계 처리 등의 좀 더 세밀한 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부의 지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] N. Birbaumer, N. Chanayim, T. Hinterberger, I. Iverson, B. Kotchoubey, A. Kübler, J. Peremouter, E. Taub, and H. Flor, "A spelling device for the paralysed," *Nature* **398**, 297-298 (1999).
- [2] G. R. Müller, C. Guger, and G. Pfurtscheller, "Direct control of a robot by electrical signals from the brain," *Proc. EMBEC 99 Part II*, 1354-1355 (1999).
- [3] B. O. Peters, G. Pfurtscheller, and H. Flyvbjerg, "Mining multi-channel EEG for its information content: an ANN-based method for a brain-computer interface," *Neural Networks* **11**, 1429-1433 (1998).
- [4] M. Polak, and A. Kostov, "Development of brain-computer interface: Preliminary results," *Proc. 19th IEEE/EMBS* 1543-1546 (1997).
- [5] J. R. Wolpaw, D. J. McFarland, G. W. Neat, and C. A. Forneris, "An EEG-based brain-computer interface for cursor control," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* **78**, 252-259 (1991).
- [6] J. R. Wolpaw, and D. J. McFarland, "Multichannel EEG-based brain computer communication," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* **90**, 444-449 (1994).
- [7] A. Kostov, and M. Polak, "Parallel Man-Machine Training in Development of EEG-Based Cursor Control," *IEEE Trans. Rehab. Eng.* **8**, 203-205 (2000).
- [8] Z. A. Keirn, and J. I. Aunon, "A new mode of communication between man and his surroundings" *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **37** (12), 1209-1214 (1990).
- [9] C. S. Ryu, Y. Song, D-S. Yoo, S. Choi, S. S. Moon, and J-H. Sohn, "EEG-based discrimination between yes and no," *Proc. 21th IEEE/EMBS* (1999).
- [10] T. M. Vaughan, J. R. Wolpaw, and E. Donchin, "EEG-based communication: prospects and problems," *IEEE Trans. Rehabilitation Eng.* **4**, 425-430 (1996).
- [11] L. A. Farwell, and E. Donchin, "Talking off the top of your head: Toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* **70**, 510-523 (1988).
- [12] C. W. Anderson, E. A. Stolz, and S. Shamsunder, "Multivariate autoregressive models for classification of spontaneous electroencephalographic signals during mental tasks," *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **45** (3), 277-286 (1998).
- [13] J. P. Pijn and F. L. da Silva, "Propagation of electrical activity: nonlinear associations and time delay between EEG signals," : in "Basic mechanisms of the EEG," St. Zchoske, and E.J. Speckmann Eds. (Birkhäuser, Boston, 1993) pp. 41-61.