

청각자극을 받은 두뇌에서의 상호정보이동

조덕연*, 이유정, 김응수
선문대학교 전자정보통신공학부
충남 아산시 당정면 갈산리 100

Mutual Information Flow in Brain by Auditory Stimuli

DukYun Cho*, YouJung Lee, EungSoo Kim
Division of Elec. & Info., Comm. Eng., Sunmoon University
#100 Kalsan-ri, Tangjeong-myeon, Asan-si, Chung-nam 336-840, Korea

요 약

본 논문에서는 고차 뇌 정보처리 연구의 일환으로서, 통신 및 정보이론 분야에서 신호간의 확률적 상관성을 나타내는 지표로 많이 활용되는 상호정보(mutual information)를 이용하여 청각자극을 받은 뇌파의 정보이동(information flow)을 분석하였다. 청각자극에 따른 뇌파의 정보이동을 분석한 결과, 자극에 따른 각 상태에서의 확률적 관계의 흐름에 차이가 있음을 볼 수 있었다

뇌파를 분석하기 위해 신호의 확률적 상관성 해석에 적극적으로 이용되는 상호정보(mutual information)를 통해 뇌의 특정부위에서 발생된 신호원들의 확률적 상관성을 찾음으로써, 이 뇌 안에서의 정보흐름(information flow)이 어떠한 양상으로 나타나는가에 관하여 조사하였다. 실험에 쓰여진 뇌파는 깨/불깨 청각자극에 따른 감성상태에서의 뇌파를 측정된 것이다.

1. 서론

1929년 Hans Berger가 사람의 두피에서 자발적으로 발생하는 전기활동인 뇌파(electro-encephalogram ; EEG)를 발견한 이후, 이것은 뇌활동의 변화를 시간적, 공간적으로 파악하는 수단으로서 활발히 연구되어져 왔다[7]. 특히 80년대 중반에 뇌파에 대한 비선형 동역학적 분석이 도입되면서[3] 뇌파 연구에 많은 진전이 있었다. 뇌파는 비침습적 방법으로 측정되어 피험자에게 아무런 해를 끼치지않는다. 이러한 뇌파는 비선형 카오스 신호의 특징을 가지고 있음이 여러 연구 결과들에 의해 밝혀지고 있다[3][9]. 따라서 비선형 동역학적 접근방법으로 뇌파에 대한 많은 연구들이 진행중이다[8][9][10][11]. 최근에는 간질병이나 정신분열증 진단과 같은 임상에서 뿐만이 아니라 인간의 감성상태를 분석[4][8]하고 시스템과의 인터페이스[5]와 같은 응용분야에까지 적용되고 있다.

본 논문에서는 청각자극에 따른 감성상태의

2. 분석이론

2.1 이산확률(Discrete Probability)

일어날 수 있는 모든 가능한 결과의 집합을 표본집합(sample space)이라 하고, 각 결과들은 표본공간의 구성요소가 된다. 표본공간과 그 확률값을 앙상블(ensemble)이라 하고, 대문자로 표기하며, 그 결과는 소문자로 표기된다. 표본공간 $\{a_1, a_2, \dots, a_K\}$ 를 갖는 앙상블 U 에 대하여, 결과 u 가 표본공간의 특정요소 a_k 가 되는 확률을 $PU(a_k)$ 로 표기한다. 여기서 아래 첨자 U 는 앙상블을 나타내고, 독립변수 u 는 표본공간으로부터 값을 갖는 변수로 사용된다.

앞서 언급하였듯이 뇌파는 복잡계이므로 단독의 결과보다는 다수의 결과를 갖는 것에 주목한다. 예를 들어, x 와 y 로 결과를 표시한다고 가정하고, x 는 요소 a_1, a_2, \dots, a_K 의 집합으로부터 선택된 것이고, y 는 요소 b_1, b_2, \dots, b_J 의 집합으로부터 선택된 것이라고 하자. 이때 집합 $\{a_1, a_2, \dots, a_K\}$ 를 X 의 표본공간이라 하고, 집합 $\{b_1, b_2, \dots, b_J\}$ 를 Y 의 표본공간이라 하며, $\{a_k, b_j\}$ 쌍 집합은 공

동 표본공간(joint sample space)이라 한다. 여기서 확률값은 $1 \times K, 1 \times J$ 인 동안에 정의된 공동 확률 $P_{XY}(a_k, b_j)$ 로 주어진다. 공동 표본공간과 그 결과 x 와 y 의 확률값의 결합을 공동 XY 양상블이라 부른다.

양상블 또는 공유 양상블 내에서, 사건(event)은 표본공간에서 요소의 부분집합으로 정의 되어진다. 이산적 양상블의 경우, 사건의 확률은 그 사건을 포함하는 표본공간에서 요소의 확률들의 합이다. 이 XY 양상블에서 특정한 a_k 를 갖는 사건 x 는 쌍의 집합 $\{a_k, b_1; a_k, b_2; \dots, a_k, b_J\}$ 과 일치한다. 따라서 이 사건의 확률은 다음과 같다.

$$P_X(a_k) = \sum_{j=1}^J P_{XY}(a_k, b_j) \quad (1)$$

이를 간략화 하면,

$$P(x) = \sum_y P(x, y) \quad (2)$$

마찬가지로, 주어진 y 결과의 확률은 다음 식으로 나타내어진다.

$$P(y) = \sum_x P(x, y) \quad (3)$$

만약 결과 x 가 a_k 로 주어진 $P_X(a_k) > 0$ 이면, 결과 y 가 b_j 인 조건부 확률은 다음과 같이 정의 된다.

$$P_{Y|X}(b_j | a_k) = \frac{P_{XY}(a_k, b_j)}{P_X(a_k)} \quad (4)$$

다음 식은 식 (4)를 간략화 한 것이다.

$$P(y|x) = \frac{P(x, y)}{P(x)} \quad (5)$$

마찬가지로

$$P(x|y) = \frac{P(x, y)}{P(y)} \quad (6)$$

만약 사건 $x=a_k$ 와 $y=b_j$ 들이 통계적으로 독립이면 다음과 같다.

$$P_{XY}(a_k, b_j) = P_X(a_k)P_Y(b_j) \quad (7)$$

이때 $P_X(a_k) > 0$ 이면, 이 식은 다음과 같이 된다.

$$P_{Y|X}(b_j | a_k) = P_Y(b_j) \quad (8)$$

이상과 같이 조건부는 $y=b_j$ 인 확률을 변경시키지 않는다. 양상블 X 와 Y 가 식 (5)에서처럼 통계적으로 독립이면, 이들은 공동 표본공간에서 모든 쌍 $a_k b_j$ 에 만족한다.

2.2 상호정보와 정보이동 (Mutual Information and Information Flow)

확률적으로 할당된 $P_{XY}(a_k, b_j)$ 를 포함한 XY 공동 양상블에서, $\{a_1, a_2, \dots, a_K\}$ 를 X 표본공간, $\{b_1, b_2, \dots, b_J\}$ 는 Y 표본공간이라고 하자. 확률적 조건에서 사건 $y=b_j$ 는 $x=a_k$ 의 확률을 앞의 확률 $P_X(a_k)$ 로부터 뒤의 확률 $P_{X|Y}(a_k|b_j)$ 로 바꾼다. 이것의 양적인 값은 뒤의 확률과 앞의 확률의 비에 대수를 한 것으로, 기본 정의는 다음과 같이 주어진다. 사건 $y=b_j$ 의 발생에 의해 사건 $x=a_k$ 에 대해 준비된 정보(information)는,

$$I_{X;Y}(a_k, b_j) = \log \frac{P_{X|Y}(a_k | b_j)}{P_X(a_k)} \quad (9)$$

이다. 위의 식 (9)에서 x 와 y 를 바꾸면, 정보가 $x=a_k$ 발생에 의해 사건 $y=b_j$ 에 대해 준비되었음을 알 수 있다. 식은 다음과 같다.

$$I_{Y;X}(b_j, a_k) = \log \frac{P_{Y|X}(b_j | a_k)}{P_Y(b_j)} \quad (10)$$

이때 조건부 확률의 정의를 이용하면 식 (9)과 식 (10)이 동일 함을 알 수 있다. 이러한 대칭성으로 $I_{X;Y}(a_k; b_j)$ 는 사건 $x=a_k$ 와 $y=b_j$ 사이의 상호정보(mutual information)라 한다. 이 상호정보를 간소화 하여 나타내면 다음과 같다.

$$I(x, y) = \log \frac{P(x|y)}{P(x)} \quad (11)$$

하지만 본 논문에서 우리가 이용하는 것은 평균 상호정보(the average mutual information)로 표기는 $I(X;Y)$ 로 하고 식은 다음과 같다.

$$I(X;Y) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J P_{XY}(a_k, b_j) \log \frac{P_{XY}(a_k | b_j)}{P_X(a_k)} \quad (12)$$

위의 식을 간략화 하면 아래와 같다.

$$I(X;Y) = \sum_x \sum_y P(x, y) \log \frac{P(x|y)}{P(x)} \quad (13)$$

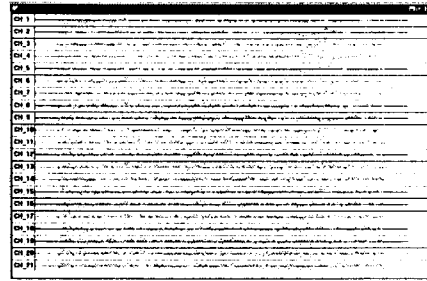
이렇게 구한 상호정보를 시간적 흐름으로 표현한 것을 정보이동(information flow)이라 한다. 이것은 x와 y 두 사건의 확률적인 긴밀성이 시간이 지남에 따라 어떻게 변해가는지를 알 수 있는 지표가 된다. 여기서는 이를 청각자극에 의한 뇌파 분석에 실제 적용한 예를 다음절에서 보인다.

3. 정보이동(Information Flow)에 의한 데이터 분석

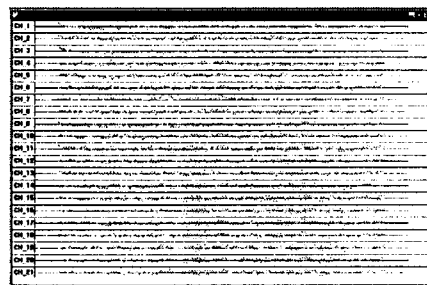
그림 1에서 보이는 것은 청각자극에 의한 감성상태의 뇌파 신호이다. 이 뇌파 데이터는 10/20국제 표준전극 배치에 따라 21개의 전극에서 측정된 것으로서, 샘플링 개수는 2048개이고 샘플링 시간은 0.0048초이다. 본 뇌파 데이터는 건강한 남녀 대학생 18명에 대한 것으로 쾌, 불쾌, 쾌전 그리고 불쾌전의 4가지 상태에 대하여 측정되었다.

그림 2는 그림 1에 대한 임의의 채널간의 단순한 상호정보(mutual information)를 구해 본 것으로, 확률을 구할 때 필요한 셀의 수는 20개이며 샘플개수는 512개이다. 이런 값들을 기초로 하여 시간의 흐름에 따른 뇌에서의 정보이동을 두 가지 방법으로 살펴보았다.

첫번째 방법은 한명씩 뇌파에서 각 시간대 별로 상호정보의 최대값을 구한 후, 이 값을 시간대 별로 연결함으로써 간단하게 정보흐름(information flow)을 알 수 있다. 이런 정보흐름의 양상을 구체적으로 기술하면 다음과 같다. 쾌한 자극시의 감성상태에서는 좌측 후두부(19-21채널)에서 우측 두정엽(12-17채널)으로 확률적 연관성이 옮겨 가는



(a) 쾌한 감성자극시

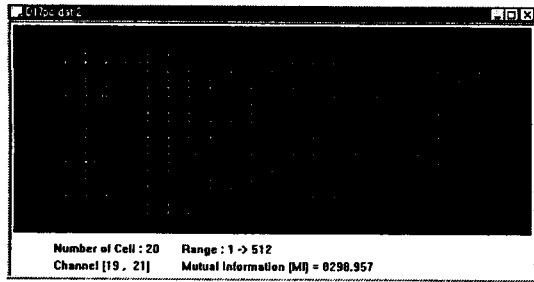


(b) 불쾌한 감성자극시

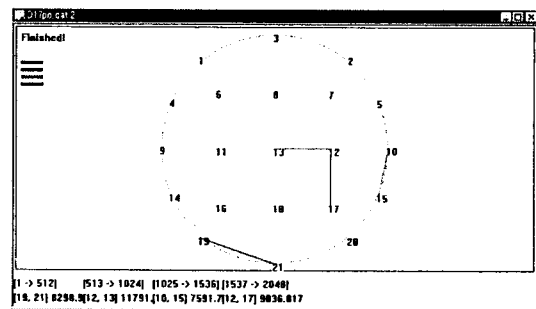
그림 1. 청각자극을 받은 21개 채널의 뇌파 데이터의 예

것을 알 수 있었고, 불쾌한 자극시에는 좌측 전두엽(1-3 채널)에서 우측 후두부(20-21 채널)로 상호정보가 이동하는 것을 관찰할 수 있었다. 이를 나타낸 것이 그림 3이다.

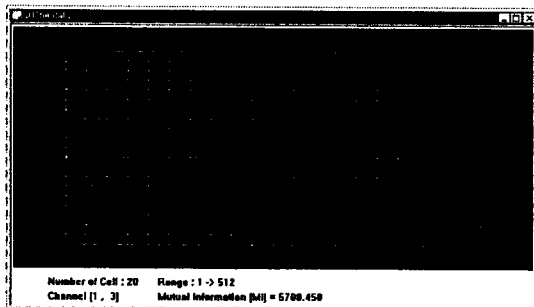
두 번째 방법은 상호정보를 이용한 정보흐름을 파악하기 위해 18명 모두의 상호정보 결과를 각 시간대 별로 분류하여 그림 4에서 보인 것처럼 최대값의 분포를 살펴보는 것이다. 마찬가지로 측정된 샘플 데이터 전체에 대하여 구해진 정보흐름의 양상을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 쾌한 자극시에 확률적 상관성이 상대적으로 많이 분포하는 지역은 처음 좌측 후두부에서부터 시작해서 시간의 흐름에 따라 점차 시계 반대방향으로 이동하는 현상을 관찰 할 수 있었다. 불쾌한 자극시에는 우측 후두부에서부터 시작해서 시계 반대방향으로 이동하는 것을 볼 수 있었다. 그림 4는 상관정보에 대한 정보의 이동이 시간의 흐름에 따라 좌측에서 우측으로 옮겨 가는 현상을 도식화 한 것이다. 여기서 회색으로 표시된 부분은 확률적 분포가 높은 곳을 나타낸다.



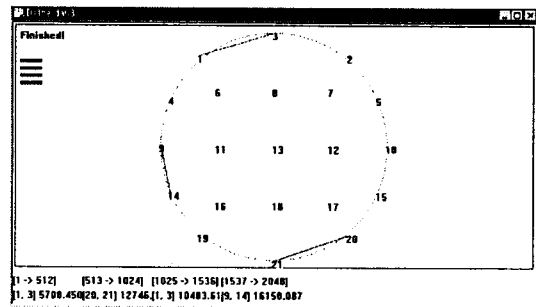
(a) 쾌한 감성자극시



(a) 쾌한 감성자극시



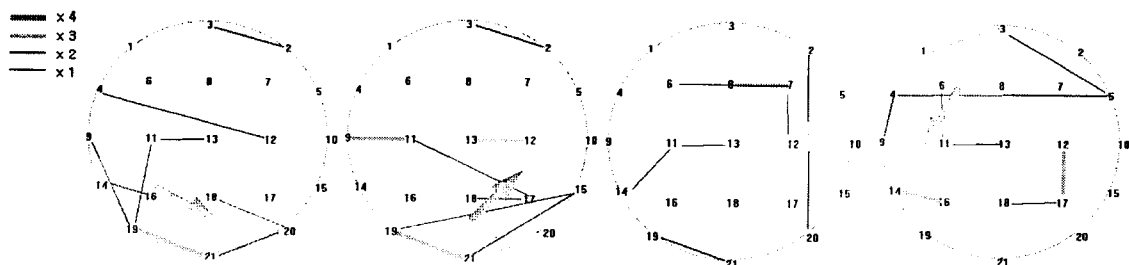
(b) 불쾌한 감성자극시



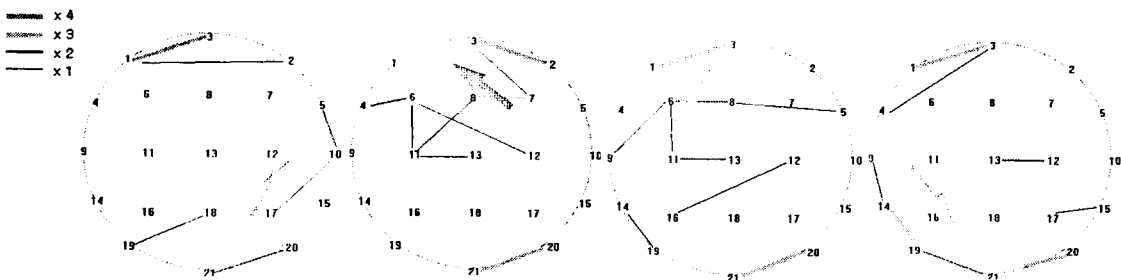
(b) 불쾌한 감성자극시

그림 2. 청각자극을 받은 뇌파의 Mutual Information

그림 3. Mutual Information의 최대값에 의한 정보의 이동



(a) 쾌한 감성자극시



(b) 불쾌한 감성자극시

그림 4. Mutual Information의 분포에 따른 정보의 이동

4. 결론

본 논문에서는 고차 뇌 정보처리를 이해하기 위해 청각 감성자극을 받은 뇌파를 대상으로 상관정보(mutual information)를 이용한 정보흐름(information flow)의 양상을 분석한 결과에 대하여 기술하였다. 상관정보는 두 신호 사이의 확률적인 연관성을 나타내는 지표로, 이를 시간의 흐름에 따라 나열하면 정보흐름이 된다. 쾌한 자극시의 두뇌는 좌측 후두엽에서 우측 측두엽을 지나 우측 전두엽쪽으로 높은 확률적 상관성이 이동하는 것을 알 수 있었고, 불쾌한 자극시에는 우측 측두엽에서 좌측 전두엽을 지나 가는 것을 관찰할 수 있었다.

위의 분석결과에서 우리는 기존에 나온 전두엽이 쾌, 불쾌 감성 정보를 반영하는 곳이고, 긍정적인 감성의 경우 좌반구가 더 활성화 된다는 사실들을 확인할 수 있었다.

이러한 사실로부터, 뇌파에서의 확률적 상관성에 대한 정성적인 특징을 나타내는 상관정보와 정보흐름이 뇌 정보처리 원리를 이해하는데 도움이 되는 파라미터로 사용될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

[1] David Haussler, Manfred Oppen, "General Bounds on the Mutual Information Between a Parameter and n Conditionally Independent Observations", 1995.
 [2] Kentaro Kato, Masao Osaki, Quantum Detection and Mutual Information for QAM and PSK Signals, IEEE Trans. On Comm., vol.47, No.2, pp.248-254, 1999.
 [3] Babloyantz, A., Salazar, J. M., and Nicolis, C., Evidence of chaotic dynamics of brain activity during the sleep cycle, Phys. Lett. A 111, pp.152-156, 1985.
 [4] J.M. Choi and B.H. Bae, S.Y. Kim, The Analysis of EEG signal responding to pure tone auditory stimulus, Journal of KOSOMBE, vol.15, 1994.
 [5] Wolpaw, J. R. and McFarland, D. J., Multichannel EEG-based brain-computer

communication", Electroencephalogr. Clin. Neuro-physiol. 90, pp.444-449, 1994.

[6] E.S. Kim, D.Y. Cho, Y.J. Lee and C.S. Ryu, "An Estimation of the Bispectrum for the EEG in Emotional states", the 5th ICONIP, vol.1, pp.438-441, 1998.

[7] 한선호, 사이토 쇼지, "임상뇌파", 일조각, 서울, 1987.

[8] 김용수, 조덕연, 이유정, 류창수, "청각 자극에 의한 쾌/불쾌 감성상태의 뇌파에 대한 바이스펙트럼 분석", 감성과학회 춘계학술, pp.176-182, 1998.

[9] 류창수, 김승환, 박선희, 황민철, "청각 자극에 의한 감성상태의 뇌파에 대한 상관차원 추정", 정보과학회논문지 (B), 제25권, 제 2호, pp.408-416, 1998.

[10] 박해정, 박광석, 권준수, "바이스펙트럼과 상관차원을 이용한 정신분열증 환자의 공간적 뇌파 분석", 추계학술, 제 16권, 제 2호, pp.138-141, 1994.

[11] 최정미, 황민철, 배병훈, 유은경, 오상훈, 김수용, 김철중, "단일 전극 뇌파에 의한 쾌, 불쾌 감성의 정량화", 감성과학회 학술, pp.199-204, 1997.

[12] 박해정, 박광석, 권준수, "바이스펙트럼과 상관차원을 이용한 정신분열증 환자의 공간적 뇌파 분석", 추계학술, 제16권, 제2호, pp.138-141, 1994.

[13] 최정미, "뇌전위의 물리적 모델링과 비선형분석에 의한 뇌기능연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1997.

[14] T.Konda and K.Aihara, "Chaos in discrete systems and diagnosis of experimental chaos", Trans. Of the institute of Elec., Info. And Comm. Eng., vol.E73, pp.773-783, 1990.

[15] J.M.T. Thompson and H.B. Stewart, "Nonlinear Dynamics and Chaos-Geometrical Methods for Engineers and Scientists", John Wiley & Sons, 1986.