

상호정보에 의한 감성상태 뇌파분석 Analyzing the Emotional State EEG by Mutual Information

김 응 수
Eung Soo Kim

대전대학교 공과대학 전자공학과

요 약

인간의 뇌 정보처리를 이해하기 위한 일환으로서, 많은 연구자들이 사람의 두피에서 자발적으로 발생하는 전기 활동인 뇌파(EEG)를 분석하였다. 측정된 뇌파는 잡음처럼 보이는 비선형적인 거동으로 인하여 단순한 관찰만으로는 그 특징을 분석하기가 매우 어렵다. 따라서 이러한 뇌파를 분석하고 이해하기 위한 방법으로 파워스펙트럼, 바이스펙트럼 등과 같은 스펙트럼 분석과 상관차원, 프랙탈 차원과 같은 비선형 카오스 분석 등과 같은 해석법들이 활발히 연구되어왔다. 본 논문에서는 이러한 기존의 방법 외에 두 신호사이의 통계적 의존성을 측정하는 양인 상호정보를 이용하여 뇌파의 특징을 분석하였다. 뇌파간의 상호정보 분석을 통해 두뇌에서의 정보의 흐름에 관한 특징을 알아보았고, 감성 자극에 반응하는 두뇌의 활동영역을 알 수 있었다.

ABSTRACT

For understanding the information processing in human brain, we analyze the EEG, a spontaneous electric activity on the scalp of the human. In this paper, we used the mutual information to analyze EEG. The mutual information is used to show the stochastic correlation between signals which are generated in the communication and information theory. The used EEG is evoked by each auditory stimulus in positive and negative emotional states. As a result, we found that there is some difference at the mutual information in each emotional state.

1. 서 론

그리스 시대까지 거슬러 올라가는 뇌연구의 역사는, 19세기말 리처드 캐튼(Richard Caton)에 의하여 전기필스가 신경을 통해 전달되어 근육을 움직인다는 사실이 밝혀졌으며, 20세기초 뉴런이 발견됨으로써 뇌가 수많은 뉴런으로 복잡하게 연결된 네트워크 구조로 되어있다는 사실이 알려지게 되었다. 20세기 초까지는 신경세포 및 생체전기현상에 대한 많은 연구가 행해졌으며 특히, 셰링턴(Sherrington) 등은 신경세포의 기능에 관한 연구로, 델(Dale) 등은 신경자극의 화학전달에 관한 연구를 각각 수행하였다. 1929년 한스 베르그(Hans Berger)가 뇌를 구성하는 뉴런들로부터 발생하는 생체전기현상으로서 뇌파(EEG)를 발견하였으며, 1950년 호치킨·헉슬리(Hodgkin·Huxley)는 미소전극을 이용한 뉴런동작의 실증적인 실험결과를 이용하여 뉴런 축색의 막투과 전압에 대한 비선형 동역학을 기술하는 방정식을 제안하였다. 1960년 휴벨(Hubel)과 위셀(Wiesel)은 미소전극을 이용하여 시각 피질에서의 시각정보 처리과정을 해명하였으며, 이때까지는 주로 미소전극을 이용하여 개별 뉴런에 전극

을 꽂고 뉴런에서의 전기현상을 관찰하는 방식이 주로 사용되었다. 그러나 미소전극을 이용한 뇌기능 연구는 살아있는 생물을 대상으로 신경세포에 전극을 꽂아야 하는 실험상의 어려움과 뉴런 하나하나의 동작은 알 수 있지만 복잡한 회로망인 뇌의 기능을 이해하기는 어렵다는 사실로부터, 뇌를 모델화하고 그 기능을 수치해석이나 컴퓨터 시뮬레이션으로 분석하는 방법들이 최근 많이 연구되고 있다.

뇌의 신경세포가 정보를 처리하는 과정에서 수상돌기가 만들어내는 막전위의 합인 뇌파(Electroencephalogram, EEG)는 수 십초동안 지속되는 뇌활동을 기록하므로 복합적인 인지과정의 연구에 유용할 수 있으나 해당하는 뇌 부위의 3차원적 규명(source localization)이 불가능하다. 하지만 비침습적인 방법으로 측정되기 때문에 피험자에게 아무런 해를 끼치지 않아 인간의 뇌 정보처리를 시간적, 공간적으로 파악하는 수단으로서 입장에서 널리 활용되어 왔다[10]. 그러나 간질 환자의 경우와 같이 뇌활동의 급격한 변동을 갖는 경우에는 정상적인 뇌파와 확연히 구별이 가능하지만, 이러한 특수한 경우를 제외하고는 정상인의 감성상태나 지각상태를 측정된 뇌파만으로 구별하

기는 거의 불가능하다.

따라서 이러한 인간의 뇌활동을 분석하기 위해 뇌파가 결정론적인 카오스 신호라는 관점에서 단일 변수 시계열 데이터의 분석을 통해 뇌와 같은 다변수 다차원 복잡계를 연구할 수 있는 효과적인 방법들을 연구하고 있다[1]. 특히 뇌의 상태에 따라 각기 다른 카오스 상태를 갖는다는 것을 상관차원(correlation dimension)이나 리아프노프지수(lyapunov exponent)들을 통하여 정량적으로 알아내는 연구들이 많이 이루어졌고[2-4], 신호의 주파수 특성을 분석하는 파워스펙트럼(powerspectrum)이나 바이스펙트럼(bispectrum)을 통한 뇌파연구도 활발히 진행되고 있다[5,6]. 특히 최근에는 ICA(Independent Component Analysis)와 PCA(Principal Component Analysis)를 이용해 뇌파 신호의 근원적 소스를 찾으려는 시도 또한 많이 이루어지고 있다[7,8].

그러나 본 논문에서는 이러한 기존의 방법에서 벗어나 정보이론 분야에서 쓰이는 상호정보(mutual information)[9]를 뇌파 분석에 적용한 결과에 대하여 기술한다. 상호정보는 신호간의 확률적 상관성을 나타내는 지표로써, 측정된 뇌파에서 각 채널끼리의 정보량을 계산한다. 여기서는 감성상태에 있는 뇌파를 이용하여 상호정보의 양을 계산하였으며, 계산된 상호정보를 시간의 흐름에 따라 분석함으로써 뇌활동의 시간에 따른 특징을 정성적으로 알아보았고, 자극에 따른 두뇌의 활동영역을 알 수 있었다.

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 $P_U(a_k)$ 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 공동 표본공간(joint sample space)이라 한다. 여기서 확률값은 $1 \leq k \leq K, 1 \leq j \leq J$ 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 앙상블이라 부른다.

앙상블 또는 공유 앙상블 내에서, 사건(event)은 표본공간에서 요소의 부분집합으로 정의 되어진다. 이산적 앙상블의 경우, 사건의 확률은 그 사건을 포함하는 표본공간에서 요소의 확률들의 합이다. 이 XY 앙상블에서 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 간략화하면,

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

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. 앙상블 X 와 Y 가 식 (5)에서처럼 통계적으로

독립이면, 이들은 공동 표본공간에서 모든 쌍 $a_i b_j$ 에 만족한다.

2.2 상호정보(Mutual Information)

일반적으로 통신 및 정보이론에서 말하는 전송시스템 (transmission system)에서의 입력과 출력사이의 채널은 conditional probability $P(a_i|b_j)$ 로 나타내어진다. 여기서 a_i 는 시스템의 입력심볼이고 b_j 는 출력심볼이다. 상호정보란 수신측의 출력심볼 b_j 를 수신하기 위한 a priori probability($p(a_i)$), 수신이 이루어지기 전의 입력심볼 a_i 에 대한 확률) 정보량과 출력심볼 b_j 를 수신한 a posteriori probability($P(a_i|b_j)$, 심볼 b_j 가 수신된 상태에서 입력심볼 a_i 가 선택되었을 conditional probability) 정보량 사이의 차이를 나타낸다. 다시 말하면 출력심볼 b_j 를 수신 함으로써 얻어지는 정보의 추가량이고, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$I(a_i; b_j) = \log_r \frac{1}{p(a_i)} - \log_r \frac{1}{P(a_i|b_j)}$$

$$= \log_r \frac{P(a_i|b_j)}{p(a_i)} \quad (9)$$

만약 위의 두 확률 $p(a_i)$, $P(a_i|b_j)$ 가 동일하다면, 심볼 b_j 를 수신함으로써 추가되는 정보가 전혀 없음을 나타내고, 당연히 이 때의 상호정보는 0가 된다. 우리가 심볼 b_j 를 수신함으로써 a_i 에 대한 정보를 조금이라도 추가시키고자 한다면 상호정보는 양수(positive)이어야 한다는 것을 알 수 있다.

$$P(a_i, b_j) = P(a_i|b_j)p(b_j)$$

$$= P(b_j|a_i)p(a_i) \quad (10)$$

위의 식 (10)와 같이 joint probability와 conditional probability의 관계가 성립하기 때문에 상호정보는 다음과 같은 대칭성을 갖는다.

$$I(a_i; b_j) = \log_r \frac{P(a_i, b_j)}{p(a_i)p(b_j)} = I(b_j; a_i) \quad (11)$$

본 논문에서 분석할 인간의 뇌파는 양을 알 수 없는 잡음이 존재하므로 이러한 채널의 특성을 평균적 의미로 해석할 수 밖에 없다. 그러므로 상호정보를 각각의 심볼에 대하여 식 (12), (13)과 같이 평균을 구한 후,

$$I(A|B) = \sum_{i=1}^q P(a_i|b_j)I(a_i; b_j)$$

$$= \sum P(a_i|b_j) \log_r \frac{P(a_i|b_j)}{p(a_i)} \quad (12)$$

$$I(a_i|B) = \sum_{j=1}^q P(b_j|a_i) \log_r \frac{P(a_i|b_j)}{p(b_j)} \quad (13)$$

입력측과 출력측 각각에 대한 평균을 나타내는 것들을 다시 a_i, b_j 에 대하여 평균을 취하면, 아래와 같은 평균상호정보(average mutual information) 식을 얻게 된다

$$I(A; B) = \sum_{i=1}^q p(a_i)I(a_i; B)$$

$$= \sum_{i,j} P(a_i, b_j) \log_r \frac{P(a_i, b_j)}{p(a_i)p(b_j)}$$

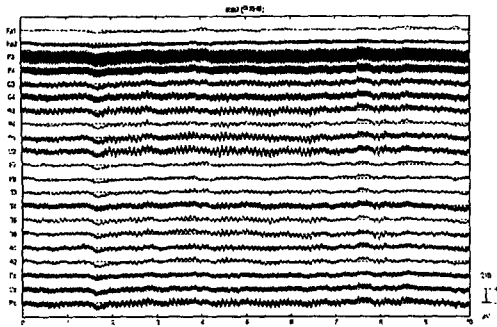
$$= I(B; A) \quad (14)$$

결국, 식 (14)는 각각의 입력 혹은 출력 심볼에는 영향을 받지 않고 오로지 그들의 확률에만 의존하여 전체 시스템에 있어서의 추가 정보를 측정한다. 즉, 이를 뇌파에 적용하여 얻는 값은 두 전극사이의 정보량이 된다.

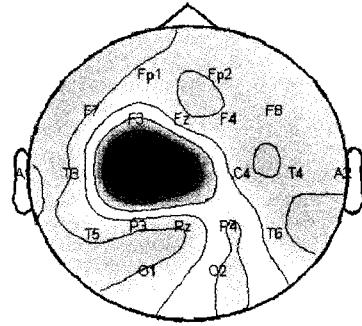
3. 상호정보에 의한 뇌파분석

본 연구에서 사용된 뇌파는 두부 외상이나 정신질환의 병력이 없는 7명의 대학생들(남자 : 4명, 여자 : 3명)을 대상으로 측정되었다. 이들에게는 다음과 같은 동일한 조건을 부여하였다. 피검자는 소리와 전파에 방해를 받지 않게 하기 위해 차단된 방에서 뇌파검사를 시행했고 편안히 침대에 눕게 한 후 입을 가볍게 다물고 몸을 이완시켜 근육에 의한 artifact를 줄이고 먼저 눈을 감게 한 후 가능한 한 눈동자를 움직이지 말도록 하였다. 안락하게 누운 자세에서 눈을 가린 채 두 종류의 청각 자극을 주었는데, 이때 한 자극에 대해 30초의 자극시간을 주고, 그 다음 자극을 위한 대기시간을 2분을 주었다. 청각자극을 위해 오디오 시스템을 이용하였다. 이때 주어진 자극은 평온한 상태에서 눈을 감고 반듯이 누운 상태에서의 무자극과 문을 열고 닫는 등의 시끄러운 청각자극의 두 가지 감성(쾌/불쾌)상태를 유발하는 것이었다. 뇌파는 10/20 국제표준 전극 배치법에 의해 그림 1과 같이 21개 채널에서 측정되었다. 샘플링 주파수는 256 Hz로 하였고 민감도는 7 uV/mm, 고주파 여과 70 Hz, 저주파 여과 1 Hz로 설정하였으며, 한 페이지(10초)의 샘플을 가지고 실험을 하였다.

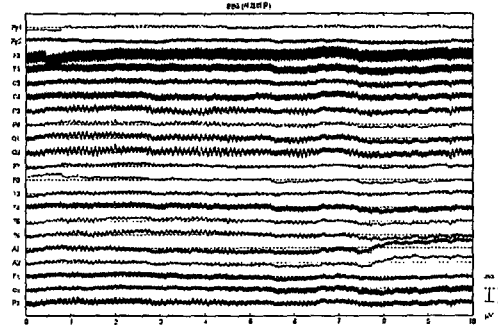
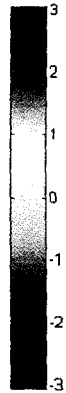
실험은 두 가지 감성상태에서 측정된 각각의 21개 채널들의 정보량을 분석하는 것이다. 그림 2는 전체 샘플의 정보량을 등고선으로 나타낸 것이다. 무자극의 평온한 상태(쾌)에서는 (C3, C2), (F3, C3), (P4, O2)



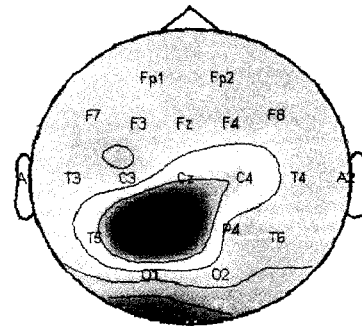
(a) 무자극 상태의 EEG



(a) 무자극 상태의 정보



(b) 시끄러운 청각자극 상태의 EEG



(b) 시끄러운 청각자극 상태의 정보

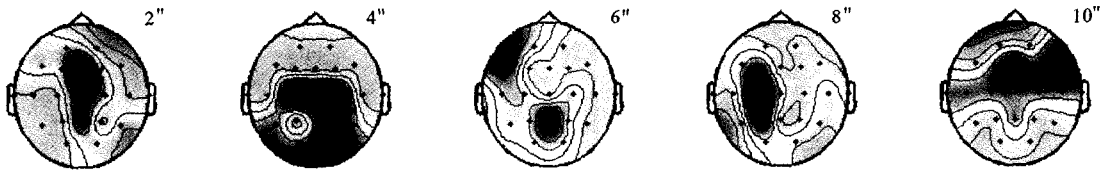


그림 1. 두 가지 감성자극시의 EEG

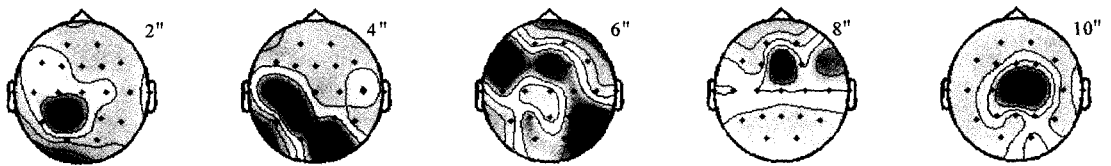
그림 2. 상호정보를 통해 본 뇌파의 정보

들이 정보량이 많고, 시끄러운 상태(블랙)에서는 (T5, P3), (P3, Pz), (Cz, C4)가 정보량이 많음을 알 수 있다. 등고선 그래프에서 붉은 부분(진한색 부분)은 정보량이 많다는 것을 나타내며 이는 확률적으로 상관

성이 많음을 나타낸다. 확률적 상관성이 많다는 것은 그만큼 뇌 활동이 활발하다는 것으로 생각되어진다.



(a) 무자극 상태



(b) 시끄러운 청각자극 상태

그림 3. 시간에 따른 상호정보의 변화

또 다른 시험 하나는, 시간에 따른 뇌활동의 변화를 상호정보를 통해 분석할 수 있는데, 그림 3과 같이 무자극 시에는 붉은 색의 분포가 넓게 전두엽과 후두엽을 흘러다니는 모습을 볼 수 있다. 시끄러운 자극 시에는 붉은 색이 후두부 부근의 한 점에서 점점 넓어져 전체로 퍼져있다가 다시 한 점으로 모이는 것을 볼 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 인간의 뇌 정보처리를 이해하기 위한 일환으로써, 기존의 비선형 동역학 분석이나 스펙트럼 신호분석이 아닌 상호정보를 뇌파 분석에 적용해 보았다.

상호정보를 통한 정보량 및 그 변화가 실제 뇌 정보처리에서 어떤 구체적인 정보를 나타내는지는 분명하지 않지만, 간략하게 두 가지 감성자극을 받은 뇌파에 적용시켜 본 결과, 자극에 따른 유의한 차이가 관찰되었다. 즉, 무자극 시에는 좌측 중심부(C3)의 정보량이 많고, 시끄러운 자극 시에는 좌측 두정엽(P3) 부위가 정보량이 많다는 것을 알 수 있었다. 또한 시간의 흐름에 따라 상호정보의 양이 그림 3에 나타낸 바와 같이 뇌의 각 영역별로 퍼져 나가는 현상을 관찰할 수 있었으며, 이를 시각적으로 표현하여 정보의 이동에 대한 특성을 평가할 수 있었다. 이를 통하여 본 연구에서 뇌파분석에 이용한 상호정보량이 인간의 감성상태를 식별하는 파라미터로 쓰일 수 있다는 가능성을 보여주었고, 이를 기초로 하여 뇌 정보처리 분석을 효과적으로 하기 위한 연구가 계속되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 대학기초 및 뇌의약학 연구의 지원을 일부 받아 수행되었습니다.

참고문헌

[1] H. J. Ben and Wei-Kang Cheng, "Structural EEG engineer", IEEE Engineering in medicine and biology magazine, pp. 41-45, 1988.
 [2] J. Roeschke and E. Basar, "The EEG is not a simple noise : strange attractors in intracranial structure, In :

E. Basar (ed.) Dynamics of sensory and cognitive processing by the brain", Springer, pp. 203-216, 1988.
 [3] A. C. K. Soong and C. I. J. M. Stuart, "Evidence of chaotic dynamics underlying the human alpha-rhythm electroencephalogram", *Biol. Cybern.* 62, pp. 55-62, 1989.
 [4] Jeffrey E. Arle and Richard H. Simon, "An application of fractal dimension to the detection of transients in the electroencephalogram", *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 75, pp. 296-305, 1990.
 [5] 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.
 [6] K. G. Choi, E. K. Cho, S. H. Chae, E. S. Kim, J. S. Kim, "Spectral and Bispectral EEG Analysis in Acute Unilateral Ischemic Stroke Patients", *Neurology, Psych. And Brain Research* 7, pp. 9-14, 1999.
 [7] S. Makeig, A. J. Bell, T. P. Jung, T. J. Sejnowski, "Independent Component Analysis of EEG Data", *Advance in Neural Info. Proc. Sys.*, MIT Press, Cambridge MA, pp. 145-151, 1996.
 [8] J. Karhunen and J. Joutsensalo, "Representation and Separation of Signal using Nonlinear PCA Type Learning", *Neural Networks*, 7, pp. 113-127, 1994.
 [9] Robert G. Gallager, "Information Theory and Reliable Communication Systems-second edition", McGrawhill, pp. 56-80, 507-517, 1989.
 [10] K. G. Choi, E. K. Cho, S. H. Chae, E-S. Kim, J. S Kim, Spectral and Bispectral EEG analysis in acute unilateral ischemic stroke patients, *Neurology Psychiatry and Brain Research.* 7, 9-14, 1999.
 [11] Skrandies K: Evoked potentials correlates of semantic meaning-A brain mapping study. *Brain Res Cog Brain Res* 6(3), 173-83, 1998 Jan.
 [12] McKeown MJ, Humphries C, Achermann P *et. al.*: A new method for detecting state changes in the EEG: exploratory application to sleep data. *J Sleep Res*, 7 Suppl 1, 48-56, 1998.
 [13] Spectral structure and brain mapping of human alpha activities in different arousal states. *Neurophysiology*, 39(2), 110-116, 1999.
 [14] Makeig S, Waterfield M, Townsend J, Jung TP *et. al.*: Functionally independent components of early event-related potentials in a visual spatial attention task. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* Jul 29, 354, 1999.
 [15] 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.
 [16] J. M. T. Thompson and H. B. Stewart, "Nonlinear Dynamics and Chaos-Geometrical Methods for Engineers and Scientists", John Wiley & Sons, 1986.
 [17] 한선호, 사이토 쇼지, "臨床腦波", 一潮閣, 1987.



김 응 수 (Eung-Soo Kim)

1977년 : 부산대학교 공과대학 전자공학과 졸업

1979년 : 부산대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)

1993년 : 日本 東北大學校 공학연구과 전자공학과 졸업(박사)

1986년~1987년 : 日本 Waseda University
객원연구원

1984년~1994년 : 한국전자통신연구원 책임연구원

1994년~2000년 : 선문대학교 전자정보통신공학부 교수

2000년~현재 : 대전대학교 공과대학 전자공학과 교수

관심분야 : 신경회로망, 브레인 컴퓨팅, 카오스와 프랙탈 이론
Neural Network and Brain Computing, Statistical
Physics of Neural Network, Chaos and Fractal
theory in Neural Network, Modeling biological
function with Neural Net., Learning and Generali-
zation Algorithm
