

EEG 신호의 비선형 동역학의 비교

Comparison of the nonlinear dynamics of EEG signals

신동선 · 조한범 · 김응수
대전대학교 대학원 전자공학과

DongSun Shin · HanBum Cho · EungSoo Kim
Dept. of Electronics Eng, Graduate School, Daejeon Univesity
E-mail : eskim@dragon.taejon.ac.kr

Abstract

인체 활동에 따라 우리 몸에는 다양한 전기적 생체신호가 발생하며 특히 뇌의 활동에 따라 발생하는 뇌파(EEG)는 비침습적 방법으로 측정될 수 있는 장점 때문에 뇌기능 연구 및 임상 등에서 널리 사용되어지고 있다. 또한 임상에서는 주로 뇌 신경계 질환환자의 병인 규명 및 기전 연구를 위하여 뇌파가 사용되어지고 있다. 최근에는 컴퓨터 발달에 따라 카오스, 비선형 이론 등의 다양한 방법으로 복잡한 시계열 신호인 뇌파를 분석하는 기법들이 개발되어 뇌파의 특징점을 찾아 임상에 활용하거나 뇌기능 연구에 적용하려는 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 잡파(artifact)가 섞여있는 뇌파신호 및 artifact가 제거된 다음 재구성된 뇌파신호(reconstructed EEG signal), 그리고 독립성분으로 분리된 각각의 신호에 대하여 특징점을 찾기 위하여 비선형 및 선형 분석을 실시하여 유의한 차이점을 밝혔다.

Keyword : EEG, Nonlinear, Correlation dimension, Lyapunov exponent, Power spectrum, ICA

1. 서론

인간의 뇌는 신경세포로 이루어진 거대한 시스템으로 가장 복잡한 시스템 중의 하나이다. 그러나 인간의 뇌를 연구하는데는 많은 제약 조건이 따르므로 뇌에 손상을 주지 않고 뇌의 정보처리에 관한 원리를 규명하려는 시도가 다양한 방법으로 이루어지고 있다. 물리학적 관점에서 뇌파는 선형시스템이 아니라 매우 복잡한 궤환 루프를 형성하고 있는 비선형 동역학 시스템이다[6]. 최근 뇌 연구에 있어서 카오스 이론은 비선형적 특성을 보이는 생체 동역학 시스템의 해석과 제어연구에 새로운 관점을 제시하고 있다. 카오스 분석은 그 동안 간과되었던 신호의 복잡한 변화 속에 숨겨져 있는 많은 정보들을 밝혀 낼 수 있는 가능성을 제시하고 있으며, 생체 시스템을 해석하는데 비선형 동역학적 방법으로 접근함으로써 선형적 분석으로는 얻을 수 없었던 정보를 찾을 수 있다. 즉, 보다 다양한 생체 정보를 획득 할 수 있으며 이러한 정보는 임상에 있어서의 진단 및 치료 등에 보다 정확하고 다양한 정보를 제공할 수 있다. 본 논문에서는 다채널로 측정된 뇌파에 대하여 카오스 분석을 적용하였다. 카오스 분석에 앞서 주파수 분석을 위하여 파워 스펙

트럼을 먼저 구하였다. 이어서 각 채널에 대해서 상관차원, 리아프노프 지수값을 구하여 통계 처리하였다. 또한 최근 주목받고 있는 독립성분분석(ICA)을 통해서 측정된 뇌파에 섞여 있는 여러 가지 artifact를 제거하였다. 독립성분분석을 통해서 잡파가 제거된 후 재구성된 뇌파에 대해서도 각각 파워 스펙트럼, 상관차원, 리아프노프 지수를 계산하여 원래의 EEG 신호와 서로 비교하여 유의한 차이점을 밝혀내었다. 또한 독립성분분석에 의해 통계적으로 독립된 신호로 분리된 신호들에 대해서도 각 파라미터 값들을 계산하였으며, topological map을 이용해 분리된 신호들이 뇌의 어느 위치에서 기인하는지를 알아보았다.

2. 비선형 Parameters 및 ICA

2.1 Power spectrum

파워 스펙트럼은 모멘트(moment), 큐뮬런트(cumulant)를 이용하여 자기상관값을 푸리에 변환(Fourier transform)한 것으로 아래 식(1)로 정의한다.

$$P(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} c_x^2 e^{-j(\omega\tau)} \quad (1)$$

파워 스펙트럼으로는 신호를 구성하는 각 주파수 성분의 분포를 알 수 있다. 뇌파의 경우 각

주파수 대역에 따라 델타파 (0.5~3Hz), 세타 파 (4~7Hz), 알파파 (8~13Hz), 베타파 (14~30Hz)로 분류된다. 파워 스펙트럼은 주파수간의 위상관계가 제거되므로 선형 시스템 분석에 적합하고, 잡음의 영향을 크게 받지 않는다. 그러나 비선형 위상결합(phase coupling)에 대한 정보를 주지 않아 비선형 시스템 분석에서는 선형적으로 근사화 하는 것에 어느 정도 한계가 있다.

2.2 Correlation dimension

상관차원은 끌개의 기하학적 특징을 정량화한 값으로 Gressberger 등이 제안한 방법을 사용하였다. 이것은 끌개 상의 각 점에서 상관적분을 계산하여 상관차원을 결정하는 것이다. 끌개에서 임의의 한 점을 중심으로 반지름 r인 구(sphere)를 만들고 구 내부에 있는 점의 수를 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 끌개 상의 각 점에서 계산을 반복하였을 때 그 값들의 평균값이 상관적분이다. 상관적분은 식(2)로 정의 할 수 있다.

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H(r - |x_i - x_j|) \quad (2)$$

여기서 N : 데이터 수, r : 반지름,
 $H(f)$: heavy-side 함수,
 x_i 와 x_j 는 i 와 j 번째 끌개를 구성하는 점,
 $|x_i - x_j|$: 두 점 사이의 유클리안 거리

상관적분 ($C(r)$)이 반지름의 D 제곱에 비례 ($C(r) \propto r^D$)한다고 가정하고 식(3)과 같이 D 를 계산할 수 있다.

$$D = \frac{\ln C(r)}{\ln r} \quad (3)$$

즉 x 축 $\ln C(r)$, y 축 $\ln r$ 의 그래프를 그렸을 때 선형구간의 기울기 값이 상관차원 (D_2)이다. 상관차원 값이 크면 위상공간의 궤적이 복잡해져서 시스템 구조가 더 복잡해짐을 의미한다.

2.3 Lyapunov exponent

리아프노프 지수는 시계열 신호의 위상공간에서 궤적을 구현하고 가까이 있는 두 점 사이의 거리를 구한 후 시간이 지난 후에 그러한 두 점 사이의 떨어진 거리와의 적당한 관련비를 계산하는 것을 궤적 위의 모든 점에서 반복하여 그 평균값을 구하는 것이다. 리아프노프 지수는 wolf의 방법을 도입하였고 식(4)과 같다.

$$L_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\ln \frac{df_i}{dt_i}}{EVOLV \cdot dt \cdot \ln 2} \text{ (bits/s)} \quad (4)$$

여기서 m : 계산횟수, dt : 샘플링 시간,
 dt_i : 위상공간에서 기준궤도의 초기 두 상태의 간격
 df_i : 일정시간후의 두 상태 사이의 거리
 $EVOLV$: 진행시킨 일정시간

리아프노프 지수값 (L_1)이 크다는 것은 상대적으로 초기조건에 민감하다는 것으로 초기조건에서 약간의 차가 있어도 시간이 지남에 따라 완전히 다른 상태로 된다.

2.4 ICA

독립성분분석(ICA)은 알 수 없는 혼합된 신호로부터 원래의 독립적인 신호로 분리하는 것이다. 즉 입력과 출력사이의 상호 정보량(mutual

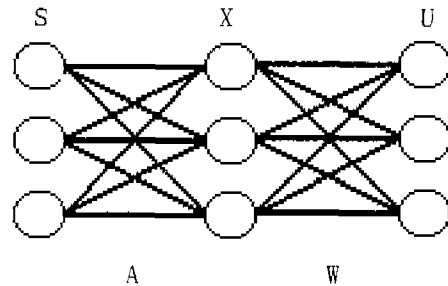


그림 1. ICA 기본모델

information)이 최소가 되도록 함으로써 독립성분을 구하는 것이다. 독립성분분석 기본모델은 그림 1과 같다.

여기서 S : 소스, X : 혼합된 데이터, U : 추측된 독립소스, A : 소스에서 혼합된 데이터 사이의 미지의 변수, W : 혼합된 데이터에서 추측된 독립소스 사이의 미지의 변수이다.

위 그림 1을 벡터행렬로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$x(t) = As(t) \quad (5)$$

$W = A^{-1}$ 에 근사하므로 식(6)과 같이 정의한다.

$$u(t) = Wx \quad (6)$$

독립성분분석은 Bell과 Sejnowski의 정보량 최대화 방법(infomax)에 기초하고 비선형 함수를 거친 입력의 결합 엔트로피를 최소화시키는 w 를 찾고 이를 이용해 $u(t)$ 를 얻는 방법이다.

3. 시뮬레이션

3.1 측정

뇌파는 국제 전극 배치법 10-20system에 따라 19개의 채널을 이용하여 측정하였다. 피실험자는 대뇌질환을 갖지 않은 정상 성인을 대상으로 하였고, 편안히 누운 상태에서 눈을 감박거리게 하고 1분간 측정하였다. 아래 그림 2는



그림 2. Raw EEG Signal

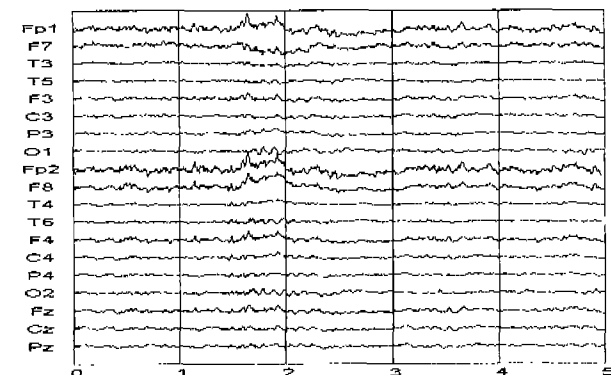


그림 3. Reconstructed EEG Signal

데이터이며 샘플링 주파수는 250KHz 이다.

3.2 Raw EEG 및 Reconstructed EEG 분석

그림 2에서 Fp1, F7, Fp2, F8 채널에서의 파형은 눈의 깜박임에 의해서 생긴 artifact 신호임을 보여준다. 그림 3은 독립성분분석을 통해서 분리된 독립신호들 중 눈의 깜박임에 해당되는 독립신호의 채널을 제거한 후 재 합성된 결과를 보여준다. 즉 뇌파 측정시 눈의 깜박임에 의해서 나타난 artifact 부분이 제거 됐음을 알 수 있다. 그리고 표 1에서는 각 채널에 대한 비선형 분석 파라미터 값을 나타내었다. 상관차원 (D_2) 값은 재구성된 EEG의 경우가 Raw EEG 일 때 보다 값이 커지는 경향이 나타나고 리아프노프 지수 (L_1) 값은 Raw EEG 일 때 보다 값이 약간 작아지나 모두 양의 값을 가진

다. Fp1 채널에 대한 파워 스펙트럼 분포를 그림 4에 나타내었다.

	D_2		L_1	
	Raw	Reconstruct	Raw	Reconstruct
Fp1	1.760737	3.253299	1.179091	1.191815
F7	0.780998	2.996118	0.842986	0.434088
T3	0.908335	3.248552	1.075036	0.941457
T5	3.159187	3.713568	0.765148	1.149568
F3	1.750329	4.606822	1.303415	0.750992
C3	2.451229	4.846877	1.171125	0.442279
P3	3.542854	3.472758	1.340499	1.586330
O1	3.464105	2.889637	0.404430	0.597329
Fp2	1.345491	3.461147	1.836941	0.492139
F8	0.981016	2.721046	0.979930	0.625008
T4	1.508101	3.432538	1.487507	0.745450
T6	2.189112	2.621785	0.468914	0.763758
F4	2.312154	3.806903	1.510089	1.533951
C4	3.726195	3.963513	0.705850	0.717702
P4	4.469718	5.560542	1.248764	0.338016
O2	3.225484	3.049995	2.081693	0.346220
FZ	2.387138	4.455411	1.313131	2.590968
CZ	4.264684	5.377034	1.600798	0.358214
PZ	5.043670	5.899336	2.846303	0.340379

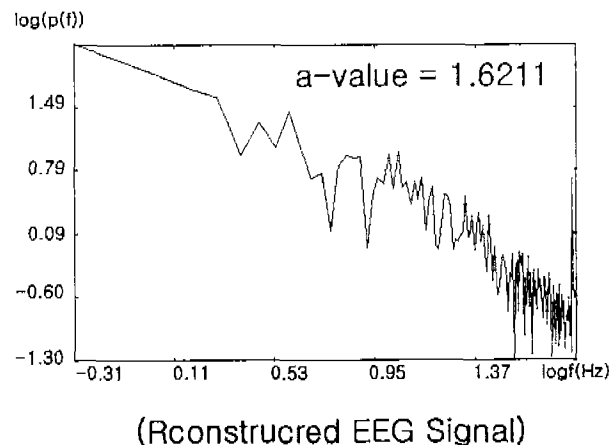
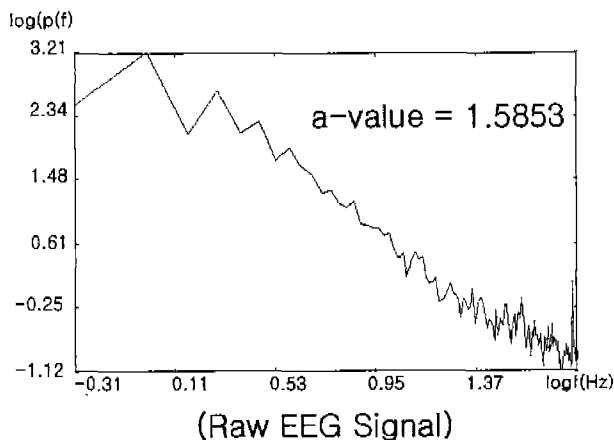


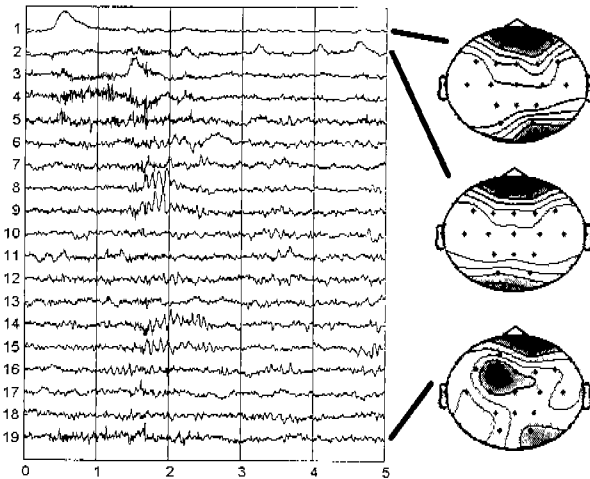
표 1. Raw EEG 와 Reconstructed EEG

비선형 해석 : D_2, L_1

그림 4. Raw EEG와 Reconstructed EEG Signal
파워 스펙트럼(Fp1 channel)

3.3 ICA 분석

측정된 뇌파를 독립성분분석을 통하여 아래 그림 5와 같이 19개의 독립신호로 분리하였다. 이를 통하여 눈 움직임과 같은 artifact가 발생하는 성분을 정확히 추출 할 수 있었다. 각



독립성분들의 발생 위치에 관한 기여도를 추정하기 위하여 topological map을 이용하여 대표적인 곳의 소스 발생 위치를 나타내었다.

그림 5. ICA 성분 및 Topological map

4. 결론

우리 몸에는 다양한 생체신호가 발생된다. 이중 복잡한 시계열 신호인 뇌파는 측정 시에 여러 가지 artifact성분들이 혼합되어서 측정된다. 본 논문에서는 독립성분분석을 이용하여 artifact를 제거한 뇌파의 성분만을 추출하였고, 추출 전과 추출 후의 뇌파에 대해서 카오스분석을 적용하여 그 차이점을 나타내 보았다. 분석결과 상관차원 값에 있어서는 원래의 EEG보다 재구성된 EEG의 경우가 일반적으로 높은 상관차원 값을 나타내었다. 또한 리아프노프 지수값은 재구성된 EEG의 경우가 원래의 EEG보다 낮은 양의 정수값을 나타내었고, Fp1의 경우 파워 스펙트럼은 조금 더 높은 주파수 영역으로 이동하였다. 또한 독립성분분석을 통해서 추출된 각각의 독립성분에 대해서 topological map을 이용하여 독립성분들이 뇌의 어느 위치에서 발생하는가를 나타내었다. 우리는 뇌파신호에 대해 카오스와 독립성분분석을 적용한 이러한 연구를 통하여 보다 정확

하고 다양한 정보를 획득함으로써 임상에서의 뇌 질환 진단 및 치료, 또한 뇌 기능연구 등에 보다 정확한 정보를 제공할 수 있음을 제시하고자 하였다.

참고 문헌

- [1] P. Grassberger and I. Procaccia, "Characterization of Attractors", Phys. Rev. Lett. vol.50, no.5, p346-349, 1983.
- [2] Alan Wolf et al, "Determining Lyapunov Exponents From a Time series", Physica 16D, p285-317, 1985.
- [3] A.J. Bell and T.J. Sejnowski, "An Information maximization approach to blind separation & blind deconvolution", Neural Computation, 7:1129-1159, 1995.
- [4] Te-Won lee, Mark Girolami and Terrence J. Sejnowski, "Independent Component Analysis using an Extended Infomax Algorithm for Mixed Sub-Gaussian Sources", Neural Computation, Vol: 11(2) 409-433, 1999.
- [5] 김응수, 이유정, "EEG 독립성분과 위치추정", 한국정보처리학회 2001년 춘계학술대회 논문집, 2001.
- [6] 이호섭, 공성근, "카오스 특징 추출에 의한 시계열 신호의 패턴인식", 숭실대학교 논문집, 1997.
- [7] 박상희, 최윤희, "뇌파신호의 카오스 특징 추출을 위한 통합 시스템의 개발", 연세대학교 논문집, 1995.
- [8] 이병채, "카오스 이론을 이용한 생체 비선형 동역학 시스템의 특성 해석", 연세대학교 박사 논문, 1995.
- [9] 정재승, "비선형 분석법을 통한 알츠하이머 환자 뇌파의 카오스적 성질의 이해", 과기원 석사 논문, 1995.
- [10] 이재훈, 박종현, "뇌파의 카오스계 분석을 이용한 치매증 조기진단에 관한 연구", 대전산업대학 논문집, 1996.
- [11] 아이하라 가즈유키, "쉽게 읽는 카오스", 한뜻출판사, 1994.
- [12] 정호선, 여진경, "뇌와 카오스", ohm사, 1998