

論文96-33B-2-15

카오스 뉴런회로의 구현 및 상호연결에 관한 연구

(A Study on Implementation and Interconnection of Chaotic Neuron Circuit)

李益洙*, 呂珍璟**, 李暲勳***, 呂之煥****, 鄭鎬宣*

(Ik Soo Lee, Jin Kyung Ryeu, Kyung Hoon Lee, Ji Hwan Ryeo, and Ho Sun Chung)

요 약

본 논문에서는 腦의 복잡한 動的應答를 모델링한 카오스 뉴런모델을 도입하여 카오스 뉴런모델의 週期응답, 分岐응답, 混沌(카오스)응답 등의 다양한 특징들을 수치해석적으로 분석한다. 그리고 카오스 뉴런모델을 하드웨어로 구현하기 위하여 아날로그 전자회로로 설계 및 구현한다. 카오스 뉴런회로의 전달특성은 선형 및 비선형함수의 합성으로 구성되며, 카오스 뉴런의 출력회로는 2개의 CMOS 인버터와 피드백 저항을 사용하여 간단히 구현된다. 이산적 계산을 위하여 샘플 및 홀드회로를 설계하여 카오스 보드상에서 외부 입력전압의 변화에 대하여 다양한 동적응답을 증명한다. 또한 본 연구에서는 제한한 카오스 뉴런회로들을 直列, 並列 및 階層적으로 연결한 카오스 신경회로망을 구성하여 실제 뇌속에 존재하는 복잡하고 다양한 동적응답을 실험에서 입증했다.

Abstract

This paper describes the chaotic neuron model to represent the complicated states of brain and analyzes the dynamical responses of chaotic neuron such as periodic, bifurcation, and chaotic phenomena which are simulated with numerical analysis. Next, the chaotic neuron circuit is implemented with the analog electronic devices. The transfer function of chaotic neuron is given by summed the linear and nonlinear property. The output function of chaotic neuron is designed with the two CMOS inverters and a feedback resistor. By adjusting the external voltage, the various dynamical properties are demonstrated. In addition, we construct the chaotic neural networks which are composed of the interconnection of chaotic neuron circuits such as serial, parallel, and layer connection. On the board experiment, we proved the dynamic and chaotic responses which exist in the human brain.

I. 서론

비선형 동력학(nonlinear dynamics) 분야에서 근

래에 주목을 받기 시작한 카오스(混沌, chaos) 이론은 이제까지 과학자들이 간과해 온 자연계에서 널리 보

* 正會員, 慶北大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Kyungpook National University)

** 正會員, 東洋工科大学校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Dongyang Institute Technology)

*** 正會員, 浦項專門大學 電算情報處理科

(Dept. of computer Science, Pohang college.)

**** 正會員, 大邱大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Taegu University)

接受日字:1994年4月13日, 수정완료일:1996年1月20日

는 무질서한 현상속에 내재하는 질서를 탐구하는 학문으로 수학, 물리학, 생물학, 천문학, 사회학, 공학 등의 과학 전반의 연구대상이라 할 수 있다. 초기의 작은 擾動(perturbation)이 비선형적 되먹임(feedback) 과정에 의해 시간이 지난 후에는 아주 다른 解(solution)를 발생시켜 장기적인 예측이 불가능한 無作為(random)적인 특성을 보여준다. 또한 위상공간에서 카오스 현상의 동적응답은 결코 같은 경로를 반복하지 않는 기이한 끌개(strange attractor) 구조를 나타내며, 세부를 계속 확대하면 비슷한 미세구조가 반복되어 있는 특징을 보인다^{1),2),3)}.

인간 두뇌의 활동을 뇌파(EEG), 뇌자계(MEG), 미소 막전위 등의 측정이 가능해짐에 따라 뇌의 구조적 역할과 정보처리 능력에 관한 연구가 진행되고 있다. 뇌는 복잡한 기능을 수행하는 고기능 소자인 수많은 神經細胞(뉴런, neuron)들로 구성되어 있으며, 뇌의 활동 신호를 분석한 많은 연구에서도 뇌에서 카오스 상태가 존재한다고 밝혀지고 있다. 이러한 뇌속의 카오스가 어떠한 역할을 수행하는가의 본질에 관한 연구는 아직 이른 단계이지만, 지금까지의 연구결과는 카오스적 동적 응답이 뇌의 정보처리에 필수적이며 학습을 수행하고 패턴을 기억해 내는데 많은 기여를 한다는 것을 보여주고 있다⁴⁾.

실제 뇌속에 존재하는 카오스적 동적응답 특성을 정보처리 과정에 도입하여 이용하려는 공학적 응용의 일환으로, 신경회로망과 카오스 이론을 결합시키려는 카오스 신경회로망(chaotic neural network, CNN) 연구가 최근 활발히 진행되고 있다^{8,9,10)}. 종래의 신경회로망 기술은 비교적 단순한 비선형 소자들을 다수 나열하여 정보처리를 수행해 왔으며, 뉴런의 모델링 과정에서 신경세포를 너무 단순화하여 복잡한 많은 동적 특성들이 배제되었다는 비판이 있는 것이 사실이다. 비선형적 동력학의 관점에서 보면, 실제 뉴런의 내부응답에서는 안정적인 평형점(fixed, equilibrium points), 한계순환(limit cycles), 준주기(quasi-periodic)상태, 분기현상(bifurcation), 카오스 응답(chaotic response) 등의 복잡한 동적응답 상태들이 보인다^{4),7)}.

본 논문에서는 먼저 실제 신경망의 불응성 응답과 뉴런의 아날로그적 출력을 정성적으로 모델화한 카오스 뉴런모델(chaotic neuron model, CNN)을 도입한다¹⁸⁾. 컴퓨터를 이용하여 카오스 뉴런 내부의 카오스

스 응답을 파라미터 공간에서 수치해석적으로 다양한 분석을 행한다. 다음으로 카오스 뉴런모델을 하드웨어 구현을 위하여 카오스 뉴런을 아날로그 전자회로 소자를 이용하여 설계하고, 보드상에서 구현하여 안정한 상태에서 분기과정을 계속하여 카오스 상태로 변화하는 동적특성을 증명해 보인다. 또한 제작한 하나의 카오스 뉴런회로(chaotic neuron circuit)에서 연결가중치(weight)를 갖는 다수의 뉴런들을 상호연결한 카오스 신경회로망을 제안하여 실제 인간 두뇌의 내부에 존재하는 다양한 동적응답 특성, 즉 주기상태, 한계순환, 카오스 상태, 완전한 랜덤 상태 등을 보드상에서 실제 증명해 보인다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서 카오스 신경회로망에 관해 설명한다. III장에서는 카오스 뉴런모델의 하드웨어 구현에 관하여 자세히 기술하였고, IV장에서는 구현한 카오스 뉴런회로를 상호연결한 카오스 신경회로망의 구현 및 실험을 다루었으며, 마지막으로 V장에서는 결론과 향후 연구방향에 대하여 언급한다.

II. 카오스 신경회로망

1. 카오스 뉴런모델

신경세포의 수학적 모델링 연구에서 중요한 모델링으로는 McCulloch -Pitts(1943) 모델, Caianiello (1961)모델 및 Grossberg(1968) 등이 있으며, 이러한 모델들은 모두가 내부적으로 주기적 해를 보이는 반면, 뉴런 내부의 카오스적 응답특성을 반영하지는 못한다는 단점을 가지고 있다^{15,16)}. 최근 오징어 거대축색과 같이 입력 자극에 대하여 막전위를 측정된 결과를 보면, 외부적으로 자극을 가하지 않을 때는 자발적으로 주기적 응답을 일으키고, 자극을 가함에 따라 준주기 또는 주기분배 과정에 의한 복잡한 카오스 응답을 보인다¹⁷⁾. 또한 Freeman 교수는 토끼의 嗅口(후구)에 여러가지 냄새 자극에 대한 뇌의 활동전위를 측정하여 카오스적 동적응답을 발견했다. 토끼에게 기억시킨 냄새를 자극하면 후구의 활동 전위는 극한 주기해(limit cycles)를 보이며, 기억되지 않은 새로운 자극을 주면 복잡한 카오스 응답을 보인다. 그리고 새로운 냄새가 완전히 기억되면 새로운 한계 순환적인 응답을 얻었다¹⁴⁾.

실제 신경망의 활동전위의 생성과정을 보면, 응답의 크기가 연속적으로 변하면, 복잡한 카오스 응답의 생성

은 또한 연속적인 문턱치의 변화에 기인한다. 그리하여 뉴런의 이전 상태의 출력이 현재의 입력에 영향을 미치고, 뉴런의 출력함수를 연속적으로 변화하도록 하여 뉴런이 카오스 응답특성을 나타내도록 모델링한 카오스 뉴런모델(chaotic neuron model)은 매우 중요한 개념이라 할 수 있다^[8,9]. 다음의 식은 카오스 뉴런 모델을 차분방정식으로 나타낸 것이다.

$$x(t+1) = f[A(t) - \alpha \cdot \sum_{r=0}^n k^r \cdot g(x(t-r)) - \theta] \quad (1)$$

$$f(y) = \frac{1}{1 + \exp(-y/\epsilon)} \quad (2)$$

여기서 각 변수는 다음과 같이 정의된다.

$x(t+1)$: 이산 시간 ' $t+1$ '에서의 뉴런의 출력

$f(t)$: 기울기 ' ϵ '를 갖는 뉴런의 비선형적 출력함수

$A(t)$: 이산 시간 ' t '에서의 외부 입력자극의 크기

g : 뉴런 내부에서의 불응성(refractory) 크기와 관계함수

k : 불응성 감쇄상수, $0 \leq k \leq 1$

α : 불응성 함수의 크기 상수, $\alpha > 0$

θ : 뉴런 내부의 역치값

식 (1)에서 뉴런의 내부상태를 $y(t+1)$ 라 정의하고, ' t '의 상태와 k 배한 후 ' $t-1$ '의 상태를 대입한 후 두 식의 차를 구하여 차분방정식을 정리하면 식 (4)와 같이 된다.

$$x(t+1) = f[y(t+1)] \quad (3)$$

$$y(t+1) = k \cdot y(t) - \alpha \cdot f[y(t)] + a(t) \quad (4)$$

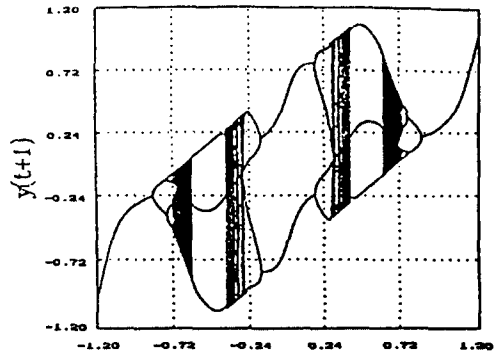
단, $a(t) = A(t) - kA(t-1) - \theta(1-k)$

결과적으로 식(4)를 살펴보면 이산적인 카오스 뉴런모델의 내부특성 $y(t+1)$ 은 선형적인 항 $k \cdot y(t)$ 와 비선형적인 항 $\alpha \cdot f[y(t)]$ 및 외부입력 $a(t)$ 의 합으로 이루어진다. 선형적인 항은 각 뉴런의 이전 카오스 뉴런의 내부상태 $y(t)$ 에 뉴런의 불응성적인 영향을 반영하는 k 의 곱으로 이루어지며, 비선형적인 항은 불응성 함수의 크기를 결정하는 변수 α 와 뉴런의 연속적인 출력함수(sigmoid output function)의 $f[y(t)]$ 항의 곱으로 이루어진다. 또한 외부입력 $a(t)$ 는 다른 뉴런의 출력으로 부터 목표 뉴런으로의 외부 입력의 총합이 된다.

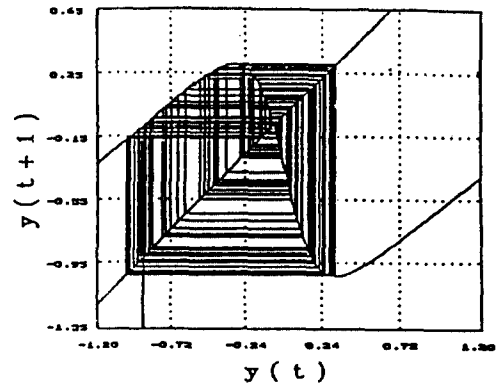
2. 카오스 뉴런모델의 수치해석

카오스 뉴런모델에서 안정한 상태와 카오스 상태를

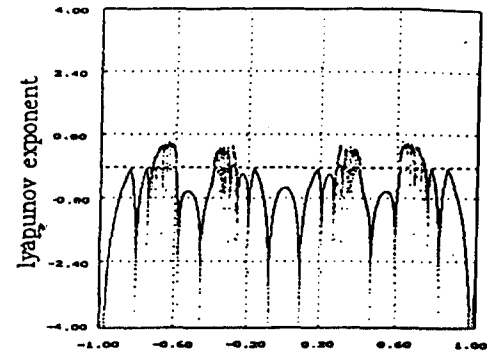
수치해석적으로 분석했으며, 카오스 상태에서의 다양한 동적 응답을 카오스 뉴런모델과 관련하여 해석을 행했다.



(a)



(b)



(c)

그림 1. 카오스 뉴런모델의 응답

(a) 분기도 (b) 1차원 이산적 사상 (c) 리아푸노프 지수

Fig. 1. The response of chaotic neuron model

(a) the bifurcation diagram (b) 1-dim. discrete mapping (c) the Lyapunov exponent.

그림 1(a)는 식(4)의 카오스 뉴런모델에서 $k(0.8)$, $\alpha(1)$, $\varepsilon(0.1)$ 의 상수에서 내부적 상태를 도시한 것이다. 외부입력 $a(t)$ 를 가하지 않을 때는 두상태가 주기적으로 반복된다. 그리고 $a(t)$ 를 증가시키면 안정한 두점에서 각각 분기(bifurcation)과정을 행하여 네개의 주기적 상태, 여덟주기로 되는 분기과정을 계속한다. 그러나 일정한 임계값을 넘으면 무수한 분기에 의한 다음의 상태를 전혀 예측할 수 없는 상태 즉, 규칙적인 거동이 보이지 않는 카오스 응답 특성을 보인다. 입력을 더욱 증가시키면 카오스 상태에서 안정한 상태로 탈출하여 주기적인 동적특성, 즉 간헐성(intermittency)이 보인다. 또한 카오스 상태의 내부를 확대하여 보면 결코 같은 형태로 반복하지는 않지만 자기상사적인 미세구조를 볼 수 있다. 그림 1(b)는 카오스 뉴런모델의 카오스 상태에서 1차원 사상(one-dimensional mapping)을 이산적으로 수행한 결과를 도시한 것이다. 뉴런 내부의 전달함수의 곡선위를 거의 모두 배우게 된다. 시간의 파형으로는 다음의 상태를 예측하기 불가능하게 하는 복잡한 거동이 보이며, 초기치를 달리한 정상상태의 응답은 현저히 다르게 된다. 보통 상태의 안정성을 판별하고 카오스의 상태를 기술하는데 리아푸노프 지수(Lyapunov exponent)가 흔히 사용된다. 정의식은 다음의 식 (5)와 같다.

$$\lambda = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_0^N \ln \left| \frac{dy(t+1)}{dy(t)} \right| \quad (5)$$

리아푸노프 지수는 초기의 값들이 정상상태에서 어떠한 영향을 미치는가 하는 측정의 정도를 나타내며, 리아푸노프 지수의 값이 영 이하일 경우는 주기적인 안정한 거동을 보인다. 리아푸노프 지수의 값이 양일 경우는 불안정한 특성 즉, 카오스 상태를 나타낸다. 그림 1(c)는 수치해석적으로 계산한 리아푸노프 지수 값을 나타낸 것이다.

Ⅲ. 카오스 뉴런회로의 구현

신경회로망에서 병렬 분산적으로 정보처리를 위해서는 신경회로망의 하드웨어 구현은 필수적으로 중요한 문제이며, 집적회로 기술의 발달로 많은 신경회로망 모델들의 IC 칩화가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 카오스 뉴런모델을 바탕으로 카오스 신호를 발생시킬 수 있는 카오스 뉴런회로를 아날로그 전자회로 소자를 이

용하여 구현하고, 보드상의 실험에서 여러가지 동적특징들을 증명해 보인다.

1. 카오스 뉴런회로의 설계

카오스 뉴런모델을 전자회로로 구현하기 위해서는, 식 (1)에서 불응성 응답함수 $g(x(t))$ 를 간단하게 x 로 변환하고, 카오스 뉴런의 출력 응답함수 $f(t)$ 는 연속적으로 변하는 비선형적 시스모이드(sigmoid) 함수로 대체한다. 또한 시간적으로 변하는 $a(t)$ 를 외부적으로 각 시간마다 일정한 DC 입력전압으로 주어진다. 그리하여 식 (4)를 참조하여 설계한 카오스 뉴런회로의 전체회로도 는 그림 2와 같다. 카오스 뉴런회로의 구성은 1차원 사상회로(one-dimensional mapping circuit), 두개의 샘플 및 홀드(sample/hold, S/H) 회로, 그리고 클락(clock) 발생부로 구성된다.

기존의 신경회로망의 구현기술도 수용하면서 또한 카오스 뉴런모델을 전자회로로 확장하여 구현하였다. 본 회로는 뉴런 내부의 여러가지 변수, 즉 k , α , ε 등을 독립적으로 가변 가능하고 IC 칩으로 구현을 쉽게 하기 위하여 아날로그 회로로 설계했으며, 칩의 집적도가 높은 CMOS로 구현하였다. S/H 회로는 전용 IC 칩 LF398을 사용했으며, 외부적으로 커패시터를 연결하여 출력신호를 S/H 회로를 사용하여 이산적으로 입력에 다시 피드백시켜 1차원 사상회로의 입력으로 들어가게 하였다. 간단하게 IC 칩화를 위하여 아날로그 샘플 및 홀드회로는 CMOS transmission 게이트와 홀드 커패시터를 이용하여 간단하게 설계하였다. 그림 2에서 S/H의 B회로에서는 1차원 사상회로의 출력신호 $y(t+1)$ 을 샘플링하여 홀드시간 동안 유지하며 $y(t+1)$ 신호는 다시 피드백되어 S/H의 A회로로 전달되며 S/H A회로의 신호는 다시 $y(t)$ 신호로 대체되어 다음의 1차원 사상회로의 입력신호로 된다. 뉴런의 출력함수 $f(t)$ 는 비선형 시그모이드 함수를 나타낸다. 기존의 구현방법은 OP-AMP로 뉴런의 선형 출력함수를 구현하거나, 2개의 CMOS 인버터를 사용하여 hard limit 특성으로 구현하여 뉴런의 출력함수로 구현했다. 본 연구에서는 두개의 CMOS 인버터와 한개의 피드백 저항으로 뉴런의 출력함수, 즉 시그모이드 함수를 구현했다. 실제 회로 구현의 소자로는 4007(dual complementary CMOS inverter)와 피드백 가변 저항으로 이루어진다. 카오스 뉴런의 내부의 동적특성은 비선형 함수의 기울기(sigmoidal slope, ε)에 의해 민

감한 특성을 보인다. 그리하여 이러한 영향을 고려하기 위하여 회로적으로 피드백 저항을 조정하여 급격한 기울기에서 완만한 기울기까지의 가변이 가능하도록 설계했다. 1차원 사상회로는 식 (4)에서의 $y(t)$ 와 $y(t+1)$ 의 전달특성을 나타내는 회로를 말하며, 선형함수와 비선형 함수의 결합으로 s형 모양의 piecewise 3-segment 비선형 함수를 이룬다. 선형회로와 비선형 시그모이드 회로 부분을 아날로그적으로 adder 회로를 사용하여 1차원 사상회로는 구성된다. 선형회로는 간단히 반전 증폭기를 사용하여 구현할 수 있으며 카오스 뉴런모델에서 불응성 k 의 영향을 반영하는 부분이 된다. 그리고 불응성 함수의 전체 크기를 결정하는 α 의 영향은 뉴런의 출력함수 회로의 뒷부분에서 가변저항을 사용하여 크기를 조절한다. 또한 뉴런의 외부입력 $a(t)$ 를 인가할 때는 adder회로에 반전 외부단자를 만들어 뉴런의 외부적 입력단자의 연결이 가능하도록 만들었다. 그리하여 카오스 뉴런모델의 각부분의 내부변수의 값은 가변저항을 사용했으며, 특히 독립적으로 가변이 가능하도록 설계했다. α 의 값은 R3의 저항으로, k 의 기울기는 R4의 저항으로, ε 은 R₅의 가변저항을 이용하여 가변이 가능하도록 설계했다. 그림 2에서의 1차원 사상회로의 각 파라미터의 값은 다음과 같이 조정할 수 있다.

$$k = \frac{R5}{R4} \cdot \frac{R7}{R6} \cdot \alpha = \frac{R7}{R3} \quad (6)$$

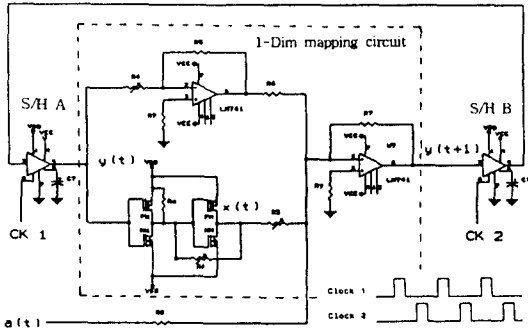


그림 2. 카오스 뉴런회로의 전자회로도
Fig. 2. The electronic circuit of chaotic neuron circuit.

2. 카오스 뉴런회로의 실험 및 고찰

그림 3(a)는 제안한 카오스 뉴런회로에서 뉴런의 출력응답 함수를 보드상에서 구현한 회로에서 피드백 가변저항 R₅를 조절하여 비선형 함수의 기울기를 가변한

것이다. 피드백 저항값이 낮으면 기울기 특성이 완만하며, 피드백 저항값이 높으면 기울기 특성이 급격해짐을 볼 수 있다. 또한 카오스 뉴런회로의 특징으로 카오스 뉴런 내부의 특성을 나타내는 변수 k , α , ε 의 각각의 값은 독립적으로 보드상에서의 가변 저항값을 조절하여 가변할 수 있다. 그림 3(b)는 구현한 일차원 사상회로의 출력력을 오실로스코프를 사용하여 각각의 전달 특성을 측정된 사진이다. s형의 곡선은 선형과 비선형 함수의 합으로 결합한 카오스 뉴런회로에서의 1차원 사상회로의 출력을 나타낸 것이다.

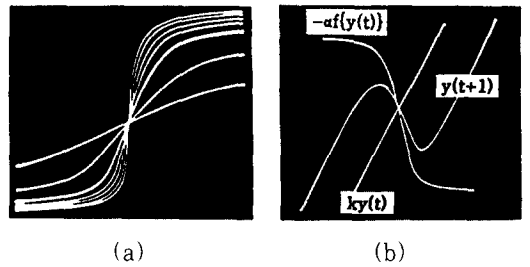


그림 3. 카오스 뉴런회로의 전달특성
(a) 뉴런의 출력함수 (b) 1차원 사상회로
Fig. 3. The characteristic of chaotic neuron circuit.
(a) chaotic neuron output (b) 1-dim. mapping circuit

그림 4는 외부입력 $a(t)$ 의 값을 외부적으로 DC 전압을 인가하여 제작한 보드상에서 추출한 카오스 뉴런 내부의 출력응답을 도시한 것이다. 시간과형을 살펴보면 일정한 주기성도 보이고, 제한된 영역에서 비주기적으로 무작위(random)적인 출력을 발생시키는 것을 알 수 있다. 또한 카오스 영역 내부를 확대한 응답에서도 내부적으로 분기과정을 계속되고 있다는 것을 알 수 있다. 안정한 상태에서 분기과정을 계속하여 불안정한 상태로 되는 동적특성은 구현한 카오스 뉴런회로가 카오스 뉴런모델의 동적응답을 잘 반영하고 있다고 실험에서 증명할 수 있었다.

IV. 카오스 신경회로망의 구현

카오스 뉴런들을 구성 요소로 하여 구성한 신경회로망은 카오스 신경회로망(chaotic neural network, CNN)이라 부르며, 일반적인 기존의 신경회로망과 같이 연결가중치를 가진 카오스 뉴런들로 연결할 수 있다. 신경회로망에서 뉴런들간에는 다양한 상호연결방

식, 즉 대칭(symmetric)과 비대칭(nonsymmetric), 직렬(serial)과 병렬(parallel), 순방향(forward)과 역방향(backward), 단층(single layer)과 다층(multi layer), 고리(ring)과 완전(fully) 연결 등의 다양한 방식이 있을 수 있다. 이러한 연결 방식에 따라 뉴런들의 출력 특성들이 상당한 차이를 보이며, 각자 특유의 적용분야 및 해결 능력을 갖는 것으로 알려져 왔다. 본 연구에서는 제작한 카오스 뉴런회로를 이용하여 뇌신경계에서 존재하는 카오스적 동적응답 특성들을 나타내기 위하여 여러개의 카오스 뉴런회로들을 직렬, 병렬 및 계층적 형태들로 상호 연결하여 다양한 동적 특성을 보드상에서 증명한다.

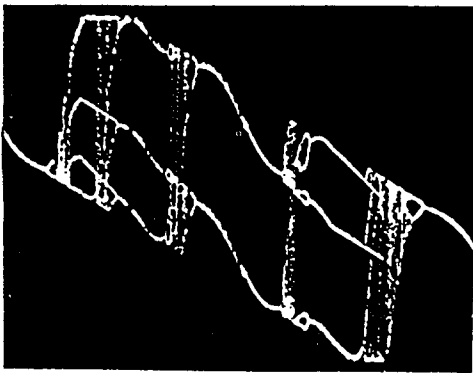


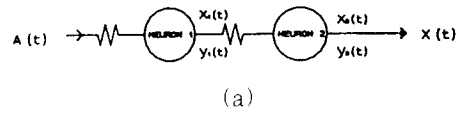
그림 4. 카오스 뉴런회로에서의 분기구조
Fig. 4. The bifurcation diagram of chaotic neuron circuit.

1. 보드의 제작과 실험

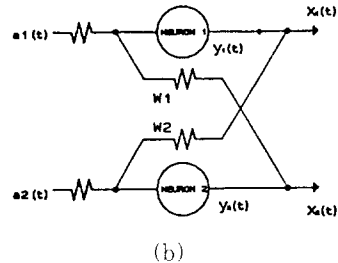
그림 5(a)는 직렬(serial)연결 형태로 한방향의 신호흐름을 나타낸 것이다. 뉴런 1의 출력과 뉴런 2의 연결상태는 회로적으로 가변 저항기를 이용하여 조절했으며, 이것은 뉴런간의 연결강도인 가중치(weight)에 해당한다. 그림 5(b)에서의 연결은 일종의 flip/flop과 같은 타입으로, 뉴런 1의 출력이 피드백되어 뉴런 2의 입력으로 하고, 뉴런 2의 출력은 다시 뉴런 1의 입력으로 하는 병렬(parallel)연결 구조가 된다. 그리고 그림 5(c)는 계층(layer)적인 연결 구조를 보인 것으로 뉴런 상호간의 연결은 직렬 및 병렬로 가중치를 가진 연결로 되며, 뉴런 1과 뉴런 2의 합성으로 하여 전체적으로 뉴런 3에서 출력을 내도록 구성된다.

본 실험에서 제작한 카오스 신경회로망 보드상의 실험에서는 가변 저항과 외부적 입력전압을 수동적으로 적절히 조절하여 오실로스코프 상에서 복잡한 동적특

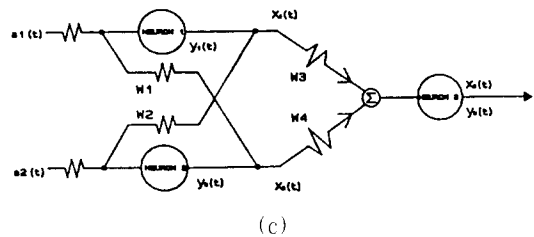
성들을 증명할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 카오스 뉴런간의 상호연결
(a) 직렬 연결 (b) 병렬 연결
(c) 계층적 연결

Fig. 5. The interconnection of chaotic neurons.

(a) serial connection (b) parallel connection (c) layer connection

그림 6(a)는 뉴런을 병렬적으로 연결하여 뉴런 내부의 몇 개의 안정된 상태, 즉 주기적인 평형점을 보여주고 있다. 그림 6(b)는 안정한 주기상태에서 외부 입력의 변화와 연결강도의 변화에 의해 분기하는 과정을 보여주고 있다. 그리고 그림 6(c)는 병렬연결에서 각각 두개의 뉴런들이 서로 영향을 주고 받는 준주기적인 한계순환(limit cycles)을 보인 것이다. 그림 6(d)는 한계순환에서 어떤 임계점 이상의 가중치의 조정 또는 외부 입력영향에 의하여 뉴런 내부의 상태가 안정된 상태에서 두개의 타원의 영역이 교차하면서 불안정한 다양체의 구조를 이루어 급격히 기이한 끌개(strange attractor)의 구조를 보이는 카오스적 동적응답이 된다.

이러한 기이한 끌개의 영역에서는 한정된 영역 속에서 일정한 패턴을 이루나, 다음의 응답은 예측하기 불가능한 상태가 된다.

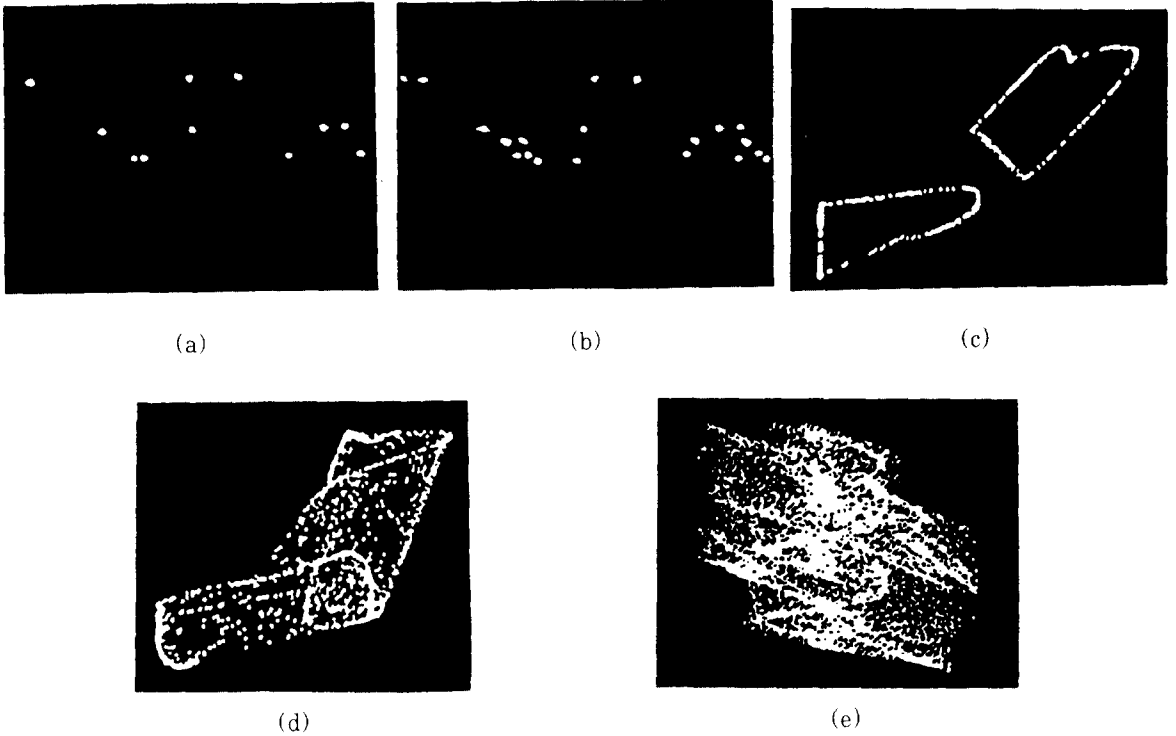


그림 6. 카오스 신경회로망에서의 동적응답

(a) 주기적 상태 (b) 분기 상태 (c) 한계순환적 상태 (d) 기이한 끌개 상태 (e) 랜덤한 상태

Fig. 6. The dynamic response of chaotic neural networks.

(a) periodic state (b) bifurcation state (c) limit cycle state (d) strange attractor state (e) random state

그림 6(e)는 계층구조에서 나타나는 완전히 랜덤한 내부 응답을 도시한 것이다. 카오스적 기이한 끌개의 구조에서 변화하여 예측이 불가능한 무작위적인 패턴으로 되기도 하고, 안정한 상태에서 일정한 임계점 이상에 이르면 뉴론내부의 상태는 일정한 방향성을 갖지 않고 계속해서 랜덤하게 변화하는 상태가 되기도 한다.

2. 고찰 및 응용

뇌의 정보처리 관점에서 카오스 상태는 올바른 기억을 상기하는데 기여를 하며, 압축된 정보의 개념으로 볼 때는 카오스 응답은 학습을 방해하지 않는다는 결과가 발표되고 있다¹⁴⁾. 이제까지 연구 결과를 보면, 카오스 신경회로망은 불응성의 영향이 클 때는 출력응답이 비주기적인 카오스 응답을 보이며, 뉴론 상호간의 영향이 클 경우는 자기조직화하여 기억패턴을 만들어내는 동적인 연상기억형(dynamic associative memory) 신경회로망을 실현해 준다¹³⁾. 그리고 패턴을 인식할 때 초기값에 민감한 카오스의 특성은 아주 비

슷한 아날로그 입력 패턴간의 미소한 차이를 동적으로 확대시켜 식별할 수 있게 해준다. 또한 카오스 응답이 이미 학습한 패턴을 보존하며 새로운 패턴의 학습을 가능케 하며, 학습과정에서 국소적 최소점(local minimum)에 빠지거나 진동하는 문제에서 최적화를 찾는데 카오스의 확률적 요동이 기여를 한다는 연구가 밝혀지고 있다¹⁰⁾.

본 연구에서 제작한 카오스 뉴론회로와 카오스 신경회로망 보드는, 비선형적인 시스템의 구현에 응용이 가능할 것이다. 카오스 시스템을 구성할 경우에는 기본적인 카오스 신호를 발생시키는 장치가 필요할 것이며^{11,12)}, 이러한 카오스 신경회로들을 이용한 응용분야로는 제한된 영역에서의 예측 불가능성을 이용한 random 신호 발생기, 미약한 변화에서 극적으로 변화하는 성질을 이용한 고감도 센서, 단일 입력에 많은 출력을 발생하는 다치논리 및 동적 연상 기억소자^{19,16)}, 카오스의 유연성과 적응성을 이용한 예측과 적응 시스

템, 카오스 회로를 이용한 모터의 속도제어, 간단한 수식에서 발생하는 신호를 이용한 조명기와 장식 패턴 발생기, 생체 신호를 분석하여 진단하는 진단시스템, 신뢰성있는 송수신간의 암호화 시스템^{14,15)} 등에 사용이 가능할 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 카오스 뉴런회로를 전자회로로 설계 및 구현하여 보드상에서 실험을 행했다. 카오스 뉴런의 출력함수인 비선형 시그모이드 특성은 CMOS 인버터와 피드백 저항으로 구성하였으며, 일차원 사상회로는 선형과 비선형적 전달특성의 합으로 구성하였다. 샘플/홀드 회로는 CMOS transmission 게이트와 외부 커패시터를 사용하여 간단히 구성하였다. 제작한 카오스 뉴런회로를 보드상에서 실험하여 주기응답, 준주기, 카오스 응답 등의 출력을 볼 수 있었다. 또한 구현한 카오스 뉴런회로들을 직렬, 병렬 및 계층적으로 연결한 카오스 신경회로망 보드상의 실험에서 실제 뇌에서 존재하는 주기, 준주기, 한계순환, 카오스, 랜덤 응답 등의 다양한 동적응답을 관찰할 수 있었다. 앞으로 구현한 카오스 뉴런회로를 IC 칩으로 제작하는 것이 필요하며, 공학적인 응용으로 카오스 뉴런회로를 이용한 실시간 카오스 시스템의 구현에도 연구가 진행되어야 할 것이다. 또한 카오스 신경회로망을 분석하여, 카오스적 응답이 학습과 인식문제에 어떠한 영향을 미치며, 어떠한 분야에 적용할 것인가에 대한 연구가 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] T.S.Parker and L.O.Chua, "Chaos: a tutorial for engineers." Proc. of IEEE, vol. 75, no. 8, pp. 982-1008, 1987.
- [2] Hao Bai-lin, Chaos II, World Scientific, 1990.
- [3] Aihara, *Chaos: 이론의 기초와 응용*, Science, 1990.
- [4] Tsuda, *카오스적 뇌관*, Science, 1990.
- [5] S.Grossberg, "Nonlinear neural networks: principles, mechanisms, and architectures," Neural Networks, vol. 1, pp. 17-61, 1988.
- [6] G.A.Carpenter, "Neural network model for pattern recognition and associative memory," Neural Networks, vol. 2, pp. 243-257, 1989.
- [7] H. Degn, A. V. Holden, and L. F. Olsen, Chaos in biological systems, Plenum, 1986.
- [8] K.Aihara, T.Takabe and M.Toyoda, "Chaotic neural networks," Phys. Lett. A, vol. 144, no. 6-7, pp. 333-339, 1990.
- [9] M.Adachi, K.Aihara, and M.Kotani, "Nonlinear associative dynamics in a chaotic neural networks," Proc. 2'nd International Conference on Fuzzy logic & Neural Networks(Lizuka,Japan), pp. 947-950, 1992.
- [10] T. Yamada and K. Aihara, "Complex computational dynamics in chaotic neural network," the 12-th Korea-Japan joint seminar, pp 59-62, 1995.
- [11] L.Chua, M.Komuro, and T.Matsumoto, "The double scroll family," IEEE Trans. Circuit Syst. vol. cas-33, no. 11, pp. 1073-1097, 1993.
- [12] T.Yamakawa, T.Miki and E.Uchino, "A chaotic chip for analyzing nonlinear discrete dynamical systems," Proc. 2nd International Conference on Fuzzy logic & Neural Networks(Lizuka,Japan), pp. 563-566 1992.
- [13] T.Kameda, K.Aihara, Y.Hori, "Application of a TDOF controller to chaotic dynamical systems," T.IEE Japan, vol. 113-C, no. 1, 1993.
- [14] W.L.Ditto and L.M.Pecora, "Mastering chaos," Scientific American, August, 1993.
- [15] K.M.Cuomo & A.V.Oppenheim, "Circuit implementation of synchronized chaos with application to communication," Physical Review Letters, vol. 71, number 1, 1993.
- [16] J.Tani, "Proposal of chaotic steepest descent method for neural networks and analysis of their dynamics," 전자정보학회논문집 A, vol.. j74-A, no. 8, pp.

1208-1215, 1991.

[17] X.Wang and D.Wang. "Hopf bifurcation of 3-neuron continuous Hopfield neural networks." IJCNN, pp. 647-650, 1993.

[18] 이익수 & 정호선, "카오스 뉴론회로를 이용한 CNN의 하드웨어 구현에 관한 연구," The 3th Proceeding of JCEANF 93, pp. 407-411, 1993

— 저 자 소 개 —



李 益 洙(正會員)

1968년 9월 24일생. 1991년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(학사). 1994년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1994년 ~ 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중.

주관심 분야는 카오스 신경회로망의 VLSI 구현, 카오스 회로 및 시스템 응용 등임



呂 珍 瓏(正會員)

1995년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1995년 2월 ~ 현재 동양대학교 전자·제어·통신공학부 전임강사. 주관심 분야는 신경회로망의 VLSI 구현, 카오스 공학 등임



呂 之 煥(正會員)

1977년 2월 경북대학교 대학원 전자과 졸업(공학박사). 1982년 ~ 현재 대구대학교 전자공학과 교수. 주관심 분야는 반도체소자 및 집적회로설계, 신경회로망, 퍼지, 카오스 회로설계 등임



李 暲 勳(正會員)

1993년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(석사). 1993년 3월 ~ 현재 포항전문대학교 전산정보처리과 조교수. 주관심 분야는 카오스 신경회로망의 패턴인식, 퍼지시스템 및 제어 등임



鄭 鎬 宣(正會員)

1943년 2월 19일생. 1980년 2월 프랑스 툴루즈공대 전자공학과 졸업(공학박사). 1976년 5월 ~ 현재 경북대학교 전자·공학과 교수. 주관심 분야는 신경회로망, 퍼지시스템, 카오스 공학 등임