

퍼지 신경 회로망을 이용한 혼돈 비선형 시스템의 간접 적응 제어기 설계

류주훈* 박진배** 최윤호*

* 경기대학교 전자공학과

** 연세대학교 전기공학과

The Design of Indirect Adaptive Controller of Chaotic Nonlinear Systems using Fuzzy Neural Networks

Joo Hoon Ryoo* Jin Bae Park** Yoon Ho Choi*

* Department of Electronic Engineering, Kyonggi University

** Department of Electrical Engineering, Yonsei University

E-mail : juju@kuic.kyonggi.ac.kr

Abstract : In this paper, the design method of fuzzy neural network(FNN) controller using indirect adaptive control technique is presented for controlling chaotic nonlinear systems. Firstly, the fuzzy model identified with a FNN in off-line process. Secondly, the trained fuzzy model tunes adaptively the control rules of the FNN controller in on-line process. In order to evaluate the proposed control method, Indirect adaptive control method is applied to the representative continuous-time chaotic nonlinear systems, that is, the Duffing system and the Lorenz system. Simulations are done to verify the effectiveness of controller.

1. 서론

비선형 동역학 시스템에서 나타나는 혼돈 현상은 내부적으로는 결정론적 동역학으로부터 발생하지만 외부적으로는 불규칙한 동태를 보이는 현상이다. 혼돈 현상의 불규칙성 및 예측의 어려움 때문에 혼돈 현상이 존재하는 시스템은 시스템의 오동작 및 성능 저하가 일어나기 쉽게 되며, 이런 유해한 결과를 야기시키는 혼돈 현상은 대부분 억제 혹은 제어의 대상으로 인식되고 있다. 그러나 혼돈 현상에 대한 기존의 제어 방법들은 시스템의 구조를 선형화 하거나 변경하여 제어기를 설계하였기 때문에 원래 혼돈 시스템의 혼돈 특성을 충분히 제어할 수 없었다. 이러한 기존 혼돈 제어 방법의 한계성을 극복하기 위해서 신경 회로망이나 퍼지 제어 같은 지능

제어 기법이 도입되었으며, 두 지능 제어 기법의 장점들을 갖는 제어기의 설계에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 따라서 신경 회로망과 퍼지 제어기를 하나의 구조로 구현한 퍼지-뉴럴 제어 방법은 제어 대상 모델에 대한 정확한 수학적 동적 모델링이 요구되지 않으므로, 파라미터의 동특성이 복잡한 혼돈 비선형 시스템을 제어하기에 적절한 제어 기법이다.

본 논문에서는 지능 제어 관점에서 혼돈 비선형 시스템의 제어를 위해 신경 회로망의 학습 능력을 이용하여 퍼지 제어 규칙을 조절할 수 있는 퍼지 신경 회로망(fuzzy neural networks : FNN)을 이용한 간접 적응 제어기 설계 방식을 제안하며, 설계된 제어기를 대표적인 혼돈 비선형 시스템인 Duffing 시스템과 Lorenz 시스템에 적용하여 제안된 제어기 설계 기법의 효용성을 검증하고자 한다.

2. 퍼지 신경 회로망

FNN은 퍼지 제어기의 퍼지화, 퍼지 추론, 비퍼지화 과정을 신경 회로망으로 구현한 것으로, 그림 1은 2개의 입력, 각 입력에 대한 3개의 소속 함수, 하나의 출력을 갖는 퍼지 신경 회로망의 예를 보여준다.

그림 1에서 FNN은 (A)층~(E)층으로 구성되는 전건부와 (E)층~(F)층으로 구성되는 후건부로 구분된다. 소속 함수의 소속 정도는 (A)~(D)층에서 계산된다. (C)층은 시그모이드형 함수를 내부 함수로 가지며 연결 강도 w_c , w_g 는 각각 시그모이드형 함수의 중심 위치 및 기울기를 결정한다.

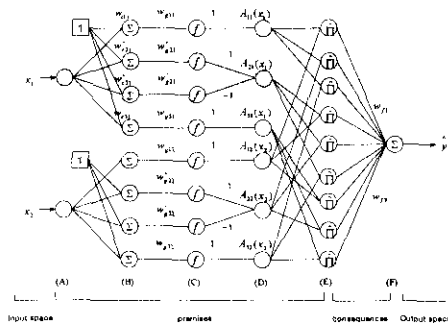


그림 1 퍼지 신경 회로망의 구조

전건부의 의사(pseudo)-사다리꼴 소속 함수는 하나 혹은 부호가 다른 두 개의 시그모이드형 함수를 합성하여 얻어지며, 전건부 (D)층의 출력은 의사-사다리꼴 소속 함수를 갖는 퍼지 변수와 같다.

후건부는 (E)층 및 (F)층으로 구성되며 다음의 퍼지 추론으로 표현된다.

$$R^i = \text{If } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ then } y = w_i \quad (1)$$

($i=1, 2, \dots, n \quad i_1, i_2=1, 2, 3$)

$$I_E = \mu_i = \prod_j A_{ij}(x_j) \quad (2)$$

$$O_E = \hat{\mu}_i = \frac{\mu_i}{\sum_{k=1}^n \mu_k} \quad (3)$$

$$I_F = \hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i w_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} = \sum_{i=1}^n \hat{\mu}_i w_i \quad (4)$$

여기서 x_1, x_2 는 입력, R^i 는 i 번째 퍼지 규칙, A_{i1}, A_{i2} 는 전건부의 퍼지 변수, w_i 는 후건부 연결 강도, n 은 퍼지 규칙의 개수, μ_i 는 후건부 적합도, $\hat{\mu}_i$ 는 정규화된 후건부 적합도, \hat{y} 는 추론된 값이다.

3. FNN을 이용한 혼돈 비선형 시스템의 간접 적응 제어

혼돈 비선형 시스템은 입력항이 따로 존재하지 않고 초기 상태에 의한 상태 변수의 변화에 따르는 출력 값만이 존재하므로 제어를 위해 혼돈 비선형 시스템을 동정하는 경우 동정 입력이 반드시 필요하게 되며 이러한 동정 입력은 시스템의 혼돈 현상을 저해하지 않는 값으로 설정되어야 한다. 한편 혼돈 비선형 시스템의 동정기에는 양호한 성능과 수렴성을 내포하는 직-병렬 동정 구조를 사용하였다.

본 논문에서는 혼돈 비선형 시스템에 대한 동정이 오

프 라인으로 적절하게 수행된 후 FNN 제어기와 동정된 퍼지 모델을 온 라인으로 연결한다. 제어 오차는 퍼지 모델의 미분 이득을 이용해서 직접적으로 FNN 제어기의 후건부 제어 규칙의 생성에 사용된다. 본 논문에서 제안된 간접 적응 제어 방법에 기초한 혼돈 비선형 시스템의 퍼지 신경 회로망 제어기의 구조는 그림 2와 같다.

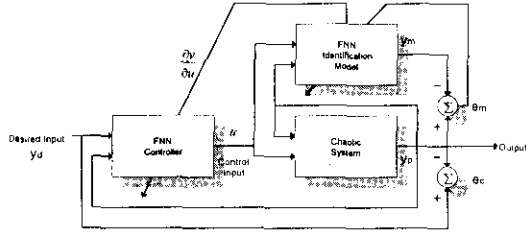


그림 2 퍼지 신경 회로망을 이용한 간접 적응 제어기의 구조

그림 2에서 기준 출력과 혼돈 시스템 출력의 차로 정의되는 제어 오차 e_c 는 퍼지 모델의 미분 이득 및 경사 하강법을 사용하여 FNN 제어기의 제어 규칙을 조정하며, 혼돈 시스템 출력과 퍼지 모델 출력의 차로 정의되는 동정 오차 e_m 은 퍼지 모델의 파라미터를 온 라인으로 조정하는데 이용된다.

식 (5)와 같은 시스템 오차 함수를 정의하자.

$$E = \frac{1}{2}(y - \hat{y})^2 = \frac{1}{2}e^2 \quad (5)$$

여기서 y 는 \hat{y} 의 목표값이다. FNN 제어기의 후건부 연결 강도 변화량 Δw_{ui} 는 경사 하강법 및 연쇄 법칙을 통해 식 (6)과 같이 갱신된다.

$$\begin{aligned} \Delta w_{ui} &= -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ui}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \hat{y}} \frac{\partial \hat{y}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial w_{ui}} \\ &= \eta e \frac{\partial \hat{y}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial w_{ui}} = \eta e \frac{\partial \hat{y}}{\partial u} \hat{u}_{ui} \end{aligned} \quad (6)$$

퍼지 모델의 미분 이득 $\frac{\partial \hat{y}}{\partial u}$ 는 제어 대상으로부터 직접적으로 구할 수 없으므로 식 (7)을 이용한다.

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial u} = \frac{f_M(\hat{y}, u(t) + \epsilon) - f_M(\hat{y}, u(t) - \epsilon)}{2\epsilon} \quad (7)$$

여기서 $f_M(\cdot)$ 는 퍼지 모델이며, ϵ 은 0.001이다.

4. 모의 실험 및 결과 고찰

4.1 Duffing 시스템

Duffing 방정식의 동역학은 식 (8)과 같고,

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= -p_1 x - x^3 - py + q \cos(wt) \end{aligned} \quad (8)$$

혼돈 현상을 보이도록 다음과 같은 파라미터 집합을 선택한다.

$$\{p, p_1, q, w_1\} = \{0.4, -1.1, 1.8, 1.8\}$$

시스템의 스트레인지 어트랙터는 그림 3과 같으며, 추적 제어를 위한 기준 경로로는 1 주기해를 선택하였다.

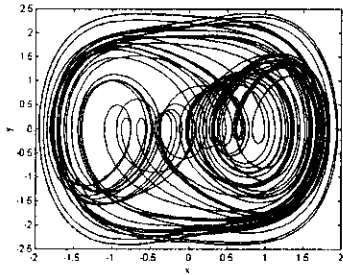
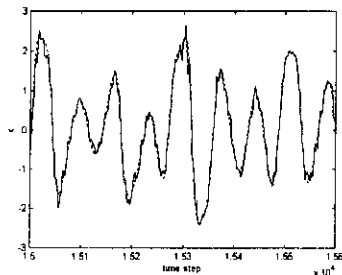


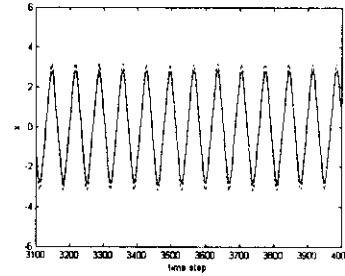
그림 3 Duffing 시스템의 스트레인지 어트랙터

Duffing 시스템에 대한 오프 라인 동정은 16,000번 수행하였으며 오프 라인 동정 결과는 그림 4와 같다. 한편 제어 결과는 그림 5와 같으며 그림 6의 온 라인 동정 과정에서 퍼지 모델이 Duffing 시스템의 동특성을 적절히 반영한 결과 추적 제어 결과는 평균 제곱 오차가 0.0315로 우수한 제어 성능을 보여준다. 한편 그림 7은 Duffing 시스템에 인가된 제어 입력이다.



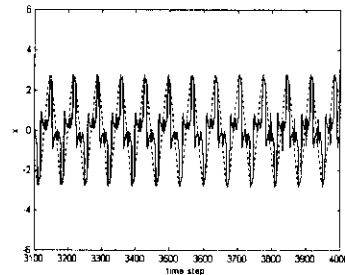
(..... : 시스템 출력, — : 퍼지 모델 출력)

그림 4 Duffing 시스템에 대한 오프 라인 동정 결과



(..... : 기준 출력, — : 시스템 출력)

그림 5 Duffing 시스템에 대한 제어 결과



(..... : 시스템 출력, — : 퍼지 모델 출력)

그림 6 Duffing 시스템에 대한 온 라인 동정 결과

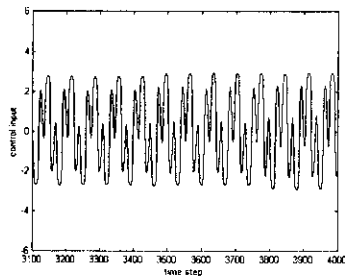


그림 7 Duffing 시스템에 대한 제어 입력

4.2 Lorenz 시스템

Lorenz 시스템의 동역학은 식 (9)와 같고,

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sigma(y - x) \\ \dot{y} &= \rho x - y - xz \\ \dot{z} &= xy - \beta z \end{aligned} \quad (9)$$

혼돈 현상이 나타나도록 다음과 같은 파라미터 집합을 선택한다.

$$\{\sigma, \beta, \rho\} = \{10, 8/3, 28\}$$

Lorenz 시스템의 스트레인지 어트랙터는 그림 8과 같다. 조절 제어를 위한 기준 경로로는 Lorenz 시스템의 평형점 중의 하나인 $(-8.4853, -8.4853, 27)$ 로 선택하였다.

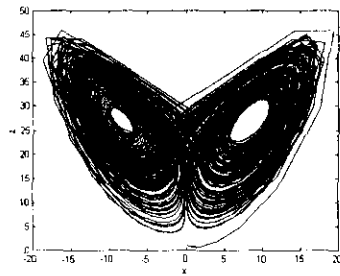
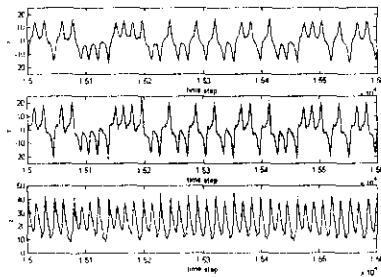


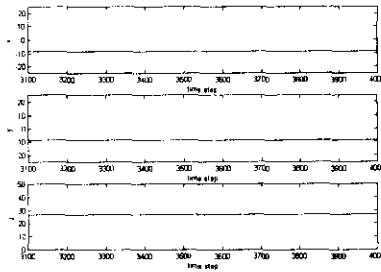
그림 8 Lorenz 시스템의 스트레인지 어트랙터

Lorenz 시스템에 대한 오프 라인 동정은 20,000번 수행하였으며 오프 라인 동정 결과는 그림 9와 같다. 제어 결과는 그림 10과 같고, 온 라인 동정시 퍼지 모델이 시스템의 동특성을 직렬히 반영한 결과, x, y, z의 경우 평균 오차가 각각 $1.9809e-5$, $1.9811e-5$, $1.3121e-9$ 로서, 설계된 제어기에 의해 시스템의 평형점인 $(-8.4853, -8.4853, 27)$ 로 매우 정확한 제어가 수행됨을 알 수 있다. 한편 그림 7과 그림 12의 제어 입력의 형태로부터 복잡한 동역학의 혼돈 비선형 시스템에 대한 제어 입력은 비교적 단순한 형태임을 알 수 있다.



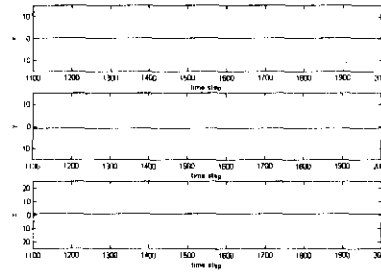
(..... : 시스템 출력, — : 퍼지 모델 출력)

그림 9 Lorenz 시스템에 대한 오프 라인 동정 결과



(..... : 기준 출력, — : 시스템 출력)

그림 10 Lorenz 시스템에 대한 제어 결과



(..... : 시스템 출력, — : 퍼지 모델 출력)

그림 11 Lorenz 시스템에 대한 온 라인 동정 결과

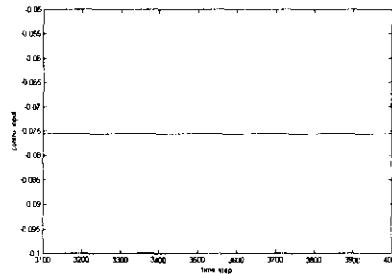


그림 12 Lorenz 시스템에 대한 제어 입력

5. 결론

본 논문에서는 지능 제어 관점에서 우수한 함수 근사화 능력을 갖는 퍼지 신경 회로망을 이용하여 혼돈 비선형 시스템에 대한 간접 적용 제어기 설계 기법을 제안하였다. 제안된 설계 기법은 퍼지 모델의 미분 이득을 이용하여 제어기의 후건부 연결 강도를 갱신한다.

한편 설계된 제어기를 혼돈 특성이 상이한 대표적인 혼돈 비선형 시스템인 Duffing 시스템과 Lorenz 시스템에 적용한 결과로부터, 설계된 제어기의 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

6. 참고 문헌

- [1] S. H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos*, Addison-Wesley Publishing, Company, 1994.
- [2] 오기훈, 주진만, 박광성, 박진배, 최윤호, "신경 회로망을 이용한 혼돈 비선형 시스템의 지능 제어에 관한 연구", Proc. 11th KACC, pp. 453-456, 1996.
- [3] T. Hasegawa, S. Horikawa, T. Furuhashi, Y. Uchikawa, "On design of adaptive fuzzy controller using fuzzy neural networks and description of its dynamical behavior", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 71, pp. 3-23, 1995.