

# 비선형 시스템의 직접제어방식을 위한 병렬형 신경회로망

김주웅\*, 정성부\*\*, 서원호\*, 엄기환\*

\* 동국대학교 전자공학과, \*\* 서일대학 전자과

Parallel Type Neural Network for Direct Control Method of Nonlinear System

Joo Woong Kim\*, Sung Boo Chung\*\*, Won Ho Seo\*, Ki Whan Eom\*

\* Dept. of Electronic Engineering, Dongguk Univ. \*\* Dept. of Electronics, Seoil College

E-mail : flybear@dgu.ac.kr

## 요 약

본 논문에서는 비선형 시스템의 효과적인 제어를 위해 병렬 연결된 신경회로망 제어방식을 제안한다. 제안한 제어방식은 비선형 시스템을 선형부분과 비선형부분으로 분리하여 각각에 대해 반복최소자승법과 다층회귀신경회로망을 이용하여 플랜트를 직접 제어하는 방식이다.

제안한 제어방식의 유용성을 확인하기 위해 단일 관절 매니플레이터에 적용하여 기존의 다층 신경회로망 제어방식과 비교 검토하여 우수성을 확인하였다.

## ABSTRACT

We propose the modified neural network which are paralleled to control nonlinear systems. The proposed method is a direct control method to use inverse model of the plant. Nonlinear systems are divided into two parts; linear part and nonlinear part, and it is controlled by RLS method and recursive multi-layer neural network with each other.

We simulate to verify the performance of the proposed method and are compared with conventional direct neural network control method. The proposed control method is improved the control performance than the conventional method.

## 1. 서 론

산업사회의 발달로 제어 시스템은 점점 더 복잡해지고 비선형성이 강해지고 있다. 이렇게 복잡하고 비선형성이 강한 플랜트를 제어하기 위해 지능제어방식이 많이 이용되고 있다. 지능제어방식에는 전문가의 경험을 이용한 퍼지제어나 생물학적 신경계통을 모방한 신경회로망 제어방식, 그리고 유전자 알고리즘 등이 있다.

신경회로망은 1957년 Rosenblatt에 의해 처음 소개가 되었다. 그 후 1980년대에 하나 이상의 은닉층을 가진 다층 신경회로망이 발표되면서 패턴인식, 함수의 근사화, 시스템 식별, 인공지능 시스템 및 제어 시스템등 많은 분야에 적용되고 있다.

신경회로망 제어방식으로는 신경회로망 자체를 제어기로 사용하는 직접제어방식과 시스템 모델을 동정하고 동정된 정보를 제어기에 활용하는 간접제어방식이 있다. 신경회로망을 이용하여 직접제어방식을 사용하는 경우에는 역전파 알고리

즘을 적용하기 위해 플랜트의 Jacobian과 같은 변수에 대한 사전지식이 있어야하며, 또한 직접 플랜트를 제어하기 때문에 제어대상인 플랜트가 초기 학습과정에서 불안정 할 수 있는 문제점등이 있다.

본 논문에서는 비선형 시스템의 직접제어방식을 위한 변형된 신경회로망을 제안한다. 제안한 방식은 신경회로망이 플랜트의 역모델을 학습하는 방식으로 플랜트의 사전지식을 시스템의 입출력 정보를 이용하여 추정하고, 플랜트의 역모델을 선형부분과 비선형부분으로 구성하고, 선형부분과 비선형부분의 모델을 병렬연결로 변형된 신경회로망을 이용하는 직접제어방식이다.

제안한 병렬형 신경회로망은 선형부분을 모델화 하는 선형화신경회로망과 비선형부분을 모델화 하는 다층회귀신경회로망의 병렬구조이다.

선형화신경회로망은 반복최소자승법을 이용하여 학습을 수행하고 다층회귀 신경회로망은 역전파 알고리즘을 이용하여 학습한다.

제한한 제어방식의 유용성을 확인하기 위하여 비선형 시스템인 단일 관절 매니플레이터를 이용하여 추종제어에 대한 시뮬레이션을 하여 기존의 다층신경 회로망을 이용한 직접제어방식과 제어 성능을 비교 검토한다.

### II. 다층신경회로망을 이용한 직접제어방식

일반적인 다층신경 회로망을 이용한 직접제어 방식의 전체 제어시스템은 그림 1 과 같다.

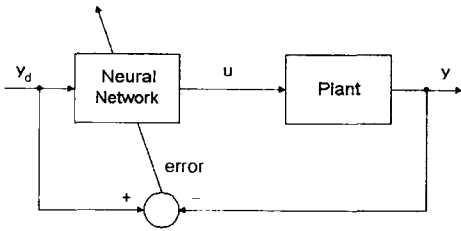


그림 1. 다층 신경회로망을 이용한 적응제어시스템  
Fig. 1 Adaptive control systems using multi-layer neural networks

사용되는 목적함수 J는 식 (1)과 같다.

$$J(k+1) = \frac{1}{2} (y_d(k+1) - y(k+1))^2 \quad (1)$$

신경회로망의 초기 연결강도는 랜덤하게 주어지고, k 번째 샘플링순간에 연결강도 W(k)가 식 (1)의 목적함수를 최급하강하도록 조정된 결과를 ΔW(k)라 하면, k+1 번째의 연결강도 W(k+1)은 식 (2)로 된다.

$$W(k+1) = W(k) + \Delta W(k) \quad (2)$$

따라서 전체 연결강도의 조정은 식 (3)로 된다.

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \eta (y_d(k+1) - y(k+1)) \cdot \frac{\partial u(k)}{\partial w_{ij}(k)} \cdot \frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)} \quad (3)$$

식 (3)의 우측 마지막 항  $\frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)}$  은 감도함수이며, 제어대상의 동역학 방정식으로부터 직접 계산하여야 한다.

신경회로망의 사슬법칙에 의해 출력층으로 들어오는 연결강도  $w_{kj}$ , 출력층에서 1층 앞선층에 대한 연결강도  $w_{ji}$ , 출력층으로부터 2층 앞선층에 대한 연결강도  $w_{ih}$ 의 미세 조정량은 각각 식(4), (5), (6)로 된다.

$$\Delta w_{kj} = \eta \cdot \delta_{pk} \cdot o_{pj} \quad (4)$$

$$\Delta w_{ji} = \eta \cdot \delta_{pj} \cdot o_{pi} \quad (5)$$

$$\Delta w_{ih} = \eta \cdot \delta_{pi} \cdot o_{ph} \quad (6)$$

식 (4), (5), (6)에 대하여  $\delta_{pk}$ ,  $\delta_{pj}$ ,  $\delta_{pi}$ 는 각각 식 (7), (8), (9)로 된다.

$$\delta_{pk} = (y_d(k+1) - y(k+1)) \cdot f'(net_{pk}) \cdot \frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)} \quad (7)$$

$$\delta_{pj} = f'(net_{pj}) \cdot \sum_k \delta_{pk} \cdot w_{kj} \quad (8)$$

$$\delta_{pi} = f'(net_{pi}) \cdot \sum_j \delta_{pj} \cdot w_{ji} \quad (9)$$

식 (4), (5), (6)을 이용하여 출력층으로부터 입력층으로 오차 신호가 역전파되면서 신경회로망의 미세 연결강도를 조정하게 된다. 신경회로망이 직접 제어기로 이용되고 신경회로망의 연결강도는 제어기의 파라미터가 된다.[1][2]

### III. 병렬형 신경회로망을 이용한 직접제어방식

병렬형 신경회로망은 두 개 이상의 신경회로망을 병렬로 연결하여 하나의 망으로 구성된 신경회로망을 일컫는다.

본 논문에서는 두 개의 신경회로망을 이용하여 하나의 망을 구성한 형태의 병렬형 신경회로망을 구성하였다. 두 개의 신경회로망은 비선형 시스템을 선형부분과 비선형부분으로 분리하여, 선형부분은 반복최소자승법을 이용하여 선형화하고, 비선형부분은 다층회귀신경회로망을 이용하여 선형부분에서 근사화되지 않는 부분을 제어한다.

일반적인 형태의 비선형 시스템은 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$y(k+1) = g(y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_y), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_u)) \quad (10)$$

위의 식 (10)은 식 (11), (12)와 같이 선형부분과 비선형부분으로 분리하여 나타낼 수 있다.

$$z(k) = \sum_{i=1}^{n_1} A_i y(k-i) + \sum_{i=1}^{n_2} B_i u(k-i) + b_0 \quad (11)$$

$$y(k+1) = p(z(k)) \quad (12)$$

식 (11)에서  $u(k)$ 와  $y(k)$ 는 각각 k번째 샘플링 시간에서 비선형 시스템의 입력력 벡터이고,  $z(k)$ 는 비선형 시스템의 중간출력으로 선형부분에 대한 출력벡터이다. 그리고  $A_i, B_i$ 는 선형부분의 상수 행렬이고,  $b_0$ 는 바이어스 벡터이다. 그리고 함수  $p(\cdot)$ 는 비선형 함수를 나타낸다.

식 (10)의 비선형 함수  $g(\cdot)$ 가 입력  $u(k)$ 에 대해 역모델이 존재한다면, 시스템의 입력  $u(k)$ 는 식 (13)와 (14)으로 표현된다.

$$u(k) = A_0 y_d(k) + \sum_{i=1}^{n_1} A_i y(k-i) + \sum_{i=1}^{n_2} B_i u(k-i) + b_0 = W_0(k) \phi(k) + b_0 \quad (13)$$

$$u(k) = q(z(k)) = f(W_2 f(W_1 w(k) + b_1) + b_2) \quad (14)$$

식 (13)에서  $\phi$ 는 입력벡터이고,  $W_0$ 는 선형부분의 상수 행렬로 선형부분에 해당하는 신경회로망의 연결강도를 나타낸다. 또한  $b_0$ 는 바이어스

벡터이다.

식 (14)에서  $W_1, W_2$ 는 비선형부분을 표현하기 위한 신경회로망의 연결강도 행렬이고,  $b_1, b_2$ 는 비선형부분을 표현하기 위한 신경회로망의 바이어스 벡터,  $f(\cdot)$ 는 신경회로망의 뉴런 함수이다. 그림 2는 본 논문에서 사용된 병렬형 신경회로망을 표현한 것이다.[3][4][5]

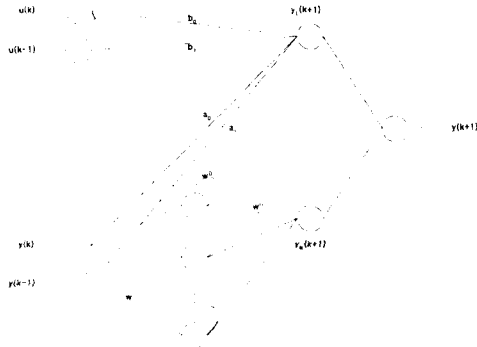


그림 2. 병렬형 신경회로망  
Figure 2. Parallel Type Neural Network

#### IV. 시뮬레이션

제안한 제어방식의 성능을 알아보기 위해 단일 관절 매니플레이터를 이용하여 시뮬레이션을 한다. 단일관절 매니플레이터는 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$m l^2 \ddot{\theta} + B \dot{\theta} + m g l \cos(\theta) = \tau \quad (15)$$

여기서  $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 는 각각 매니플레이터의 각변위, 각속도, 각가속도를 나타내고,  $\tau$ 는 매니플레이터의 입력으로서 관절에 가해지는 토크이며,  $m, l, B, g$ 는 각각 매니플레이터 링크의 질량, 길이, 마찰계수, 중력가속도를 나타낸다. 여기서  $\theta$ 와  $\dot{\theta}$ 를 상태변수로 정의하면 식 (15)는 식 (16)과 같이 상태공간 모델로 된다.[1][6]

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{g}{l} \cos(x_1) - \frac{B}{m l^2} x_2 + \frac{1}{m l^2} \tau \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)을 이용하여 제안한 제어방식과 기존의 다층 신경회로망과의 성능을 비교 검토한다.

그림 3과 4는 제안한 제어방식을 이용한 시뮬레이션 결과이고, 그림 5와 6은 기존의 다층 신경회로망을 이용한 시뮬레이션 결과이다.

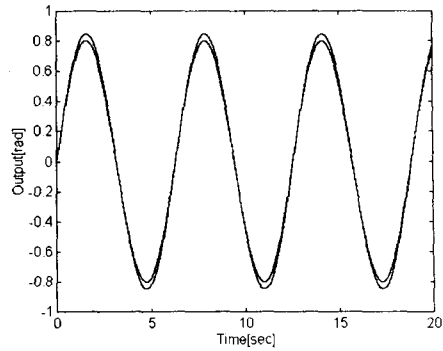


그림 3. 제안한 제어방식의 응답  
Figure 3. Output of The Proposed Method

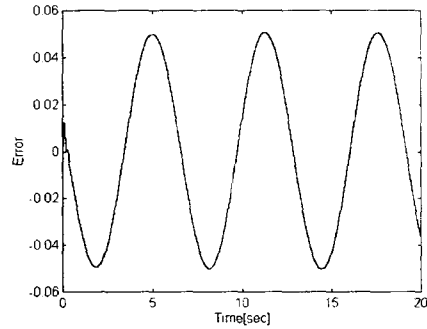


그림 4. 제안한 제어방식의 오차  
Figure 4. Error of The Proposed Method

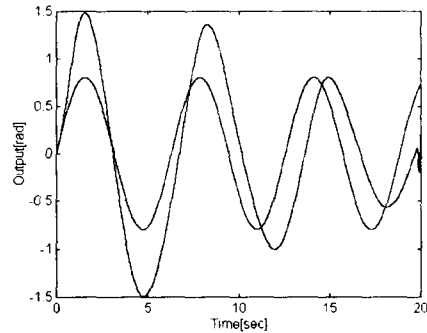


그림 5. 다층신경회로망을 이용한 제어방식의 응답  
Figure 5. Output of The Multi-Layer Neural Network

여기서 그림 3과 5는 기준신호와 응답신호를 나타낸 것이며, 그림 4와 6은 오차신호를 나타낸 것이다.

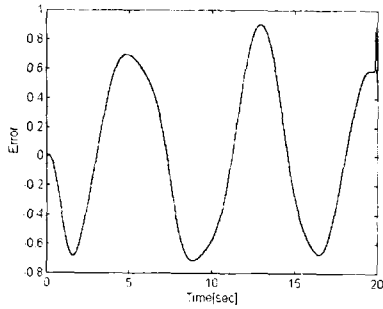


그림 6. 다층신경회로망을 이용한 제어방식의 오차  
Figure 6. Error of The Multi-Layer Neural Network

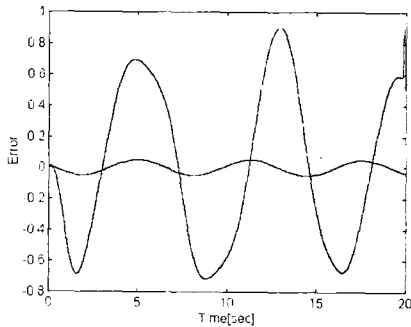


그림 7. 오차곡선  
Figure 7. Error Curve

그림 7은 두 개의 제어방식의 오차곡선을 비교한 것이다. 그림 7을 통해 제안한 방식과 기존의 다층신경회로망을 이용한 제어방식의 오차곡선을 비교하면 제안한 제어방식이 기존의 다층신경회로망보다 오차의 수렴 속도 면에서 월등히 우수함을 보이며, 또한 정상상태 오차도 제안한 제어방식이 기존의 다층 신경회로망보다 더 작음을 알 수가 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 비선형성이 강한 시스템의 제어를 위해 병렬로 연결되어진 변형된 신경회로망을 제안하였다. 제안한 제어방식은 비선형 시스템을 선형부분과 비선형부분으로 분리하여, 선형부분을 반복최소자승법을 이용하여 동정하고, 비선형부분은 다중회귀신경회로망을 적용하였다.

제안한 제어방식과 기존의 다층 신경회로망의

성능 비교를 위해 단일 관절 매니플레이터를 이용한 추종제어를 통한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 결과는 제안한 제어방식이 기존의 다층 신경회로망을 이용한 직접제어방식보다 오차의 수렴 속도 및 정상상태에서의 오차에서 우수한 성능을 보여주었다.

### 참고문헌

- [1] M. Yuan and G. S. Hong and A. N. Poo, Neural adaptive controller : Application to robot manipulator, The third international conference on automation, robotics and computer vision, 1734-1737, 1994
- [2] Madan M. Gupta and Naresh K. Shinha, Intelligent control systems : Theory and applications, IEEE Press, 1996
- [3] Chao-Chee K. and Kwang Y. L., Diagonal recurrent neural networks for dynamic systems control, IEEE Tran. on Neural Networks, 6, 144-156, 1994
- [4] Jin L. Nikiforuk P. U. and Madan M. Gupta, Adaptive control of discrete-time nonlinear systems using recurrent neural network, IEEE Tran. on Neural Networks, 1, 4-27, 1994
- [5] I. D. Landau, System Identification and control design, Prentice Hall, 1990
- [6] A. J. Koivo, Fundamentals for control of robotic manipulators, John Wiley & Sons, 1989