

새로운 신경회로망 구조를 이용한 로봇 매니플레이터의 적응 제어 방식

정경권*, 김인*, 이승현*, 이현관**, 엄기환*

*동국대학교

**호서전산학교

Adaptive Control Method of Robot Manipulators using a New Neural Network

Kyung-kwon Jung*, Ine Gim*, Sung-hyun Lee*, Hyun-Kwan Lee**, Ki-hwan Eom*

*Dongguk University

**Hoseo College

E-mail : kwon@cakra.dongguk.ac.kr

요 약

본 논문에서는 로봇 매니플레이터 제어를 위해 새로운 신경회로망을 제안한다. 제안한 신경회로망 구조는 은닉층과 출력층의 출력이 피드백 층을 거쳐 다시 은닉층과 출력층으로 피드백되는 구조이다. 피드백 층은 한번의 시간 지연을 갖는다. 제안한 신경회로망의 학습은 일반적인 오차 역전파 알고리즘을 사용한다. 로봇 매니플레이터를 대상으로 시뮬레이션과 실험을 통해서 제안한 신경회로망 구조의 유용성을 확인한다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a new neural network for the control of a robot manipulator. The proposed neural network structure is that all of network outputs feed back into hidden units and output units from feedback units. The feedback units are only to memorize the previous activations of the hidden units and output units and can be considered to function as one-step time delays. The proposed neural network works standard back-propagation learning algorithm. The simulation and experiment results showed the effectiveness of using the modified neural network structure in the control of the robot manipulator.

1. 서 론

현대 산업의 발전과 생산 제품의 원가 절감 등의 원인으로 인하여 공장 자동화가 급속히 확산되고 있다. 이로 인하여 여러 가지 면에서 인간이 할 수 있는 작업의 대용으로 산업용 로봇이 이용되고 있다. 특히 반복적인 작업과 작업 환경의 개선에 있어서 산업용 로봇의 역할이 더욱 중요한 비중을 차지하고 있으며, 이러한 여러 가지 측면에서 로봇 매니플레이터(manipulators)의 성능을 개선하기 위해 많은 제어 방법이 제안되어 왔다.

1980년대 중반에 발표된 하나 이상의 은닉층을 갖는 다층 신경회로망 이론은 출력층의 오차를

역전파 형식으로 전파하여 신경회로망의 연결 강도를 조정함으로써 비선형 시스템을 모형화할 수 있는 학습력이 있어 시스템 동정에 성공적으로 적용되고 있다. 신경회로망을 이용한 시스템 동정은 기존의 비선형 제어기 설계에 직접 적용될 수 있으며, 신경회로망 제어기의 초기 학습력을 보상할 수 있어 신경회로망 제어는 복잡하고, 시변 특성이 있거나 비선형 특성이 강한 시스템에 활용될 수 있다. 로봇 매니플레이터와 같이 현대의 복잡한 혼합 시스템의 제어에서 가장 심각한 어려움은 시스템 모델이 정확하지 않을 때, 제어기를 어떻게 구성하느냐에 있다[1][2][3].

본 논문에서는 모델링이 불확실하고, 복잡하며

비선형이 강한 로봇 매니플레이터를 대상으로 고속·고정밀을 위한 지능적인 제어 방식을 제안한다. 제안한 제어 방식은 피드백(feedback) 제어기로 비례 미분 제어기와 제안한 신경회로망을 이용한 피드포워드(feedforward) 제어기를 사용한다. 제안한 신경회로망 구조는 피드백(feedback) 층을 추가하여 은닉층과 출력층의 뉴런의 출력을 다시 은닉층과 출력층의 입력으로 피드백 시키는 구조이다. 피드백 층의 영향으로 은닉층의 적은 뉴런수로도 일반적인 신경회로망 구조의 제어 방식보다 안정적이고 정밀한 제어를 수행할 수 있다. 제안한 제어 방식의 유용성을 확인하기 위하여 다층 신경회로망 방식과의 시뮬레이션과 실험을 통해서 제안한 방식의 성능을 비교·검토한다.

II. 로봇 매니플레이터

로봇 매니플레이터란 관절(joint)과 링크(link)로 연결된 연쇄(chain) 물체의 조합으로서 각 관절은 양쪽으로 각각 하나의 링크와 연결된다. 즉 링크는 매니플레이터의 두 이웃하는 관절축 사이의 관계를 규정하는 강성체로 정의할 수 있다.

그림 1은 XY 평면 내를 이동하는 2 자유도 로봇 매니플레이터이다[1][2][5][6].

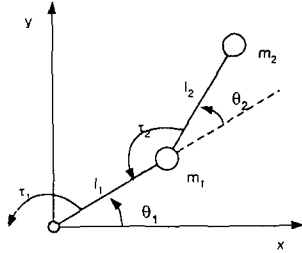


그림 1. 로봇 매니플레이터

로봇 매니플레이터의 동적 방정식은 일련의 복잡한 비선형 미분 방정식으로 표현된다.

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) + H(q) = \tau(t) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2\cos\theta_2 & m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2 \\ m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2 & m_2l_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_2l_1l_2(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2)\sin\theta_2 \\ m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2\sin\theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $q = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ 로 θ_1, θ_2 는 관절 1과 관절 2의 각변위이고, l_1, l_2 는 관절 1과 관절 2의 길이이고, m_1, m_2 는 관절 1과 관절 2의 질량이다. $\tau = [\tau_1 \ \tau_2]^T$ 로 각 관절의 입력 토크이다.

III. 제안한 제어 방식

제안한 신경회로망은 그림 2에서와 같이 별도의 피드백 층(feedback layer)을 두고 은닉층의 출

력 out_j 와 출력층의 출력 out_k 를 피드백 층의 입력으로 한다. 피드백 층에서는 들어온 입력 신호를 지연시킨 후 출력한다. 이 피드백 층의 출력은 은닉층과 출력층의 입력으로 사용된다.

은닉층에서 피드백 층으로의 입력을 x_i^{hf} , 피드백 층에서 은닉층으로의 연결강도를 w_{ji}^{hf} , 출력층에서 피드백 층으로의 입력을 x_i^{of} , 출력층으로의 연결강도를 w_{jk}^{of} 라 하면, 은닉층의 입력 net_j 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있고, 출력 out_j 는 식(4)이다.

$$net_j = \sum_{i=1}^n w_{ji} \cdot x_i + \sum_{i=1}^m w_{ji}^{hf} \cdot x_i^{hf} + \sum_{i=1}^m w_{ji}^{of} \cdot x_i^{of} \quad (3)$$

$$out_j = f(net_j) \quad (4)$$

피드백 층에서 출력층으로의 연결강도를 w_{kj}^{hf} , w_{kj}^{of} 라 하면, 출력층의 입력 net_k 와 출력 out_k 는 식(5), 식(6)과 같다.

$$net_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot out_j + \sum_{j=1}^m w_{kj}^{hf} \cdot x_j^{hf} + \sum_{j=1}^m w_{kj}^{of} \cdot x_j^{of} \quad (5)$$

$$out_k = f(net_k) \quad (6)$$

피드백 층의 입력 $x_i^{hf}, x_j^{hf}, x_i^{of}, x_j^{of}$ 는 다음과 같다.

$$x_i^{hf}(t) = x_j^{hf}(t) = out_j(t-1) \quad (7)$$

$$x_i^{of}(t) = x_j^{of}(t) = out_k(t-1) \quad (8)$$

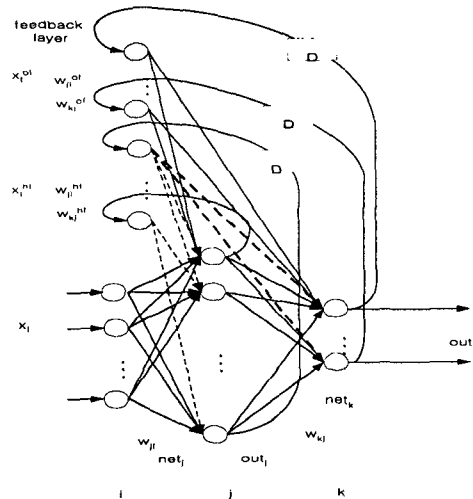


그림 2. 제안한 신경회로망의 구조

목적함수를 식(9)와 같이 정의하여 목적함수가 최소가 되도록 제안한 신경회로망의 연결강도를 역전파 알고리즘으로 조정한다[3][4][5].

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^k [d_k - out_k]^2 \quad (9)$$

$$w_{kj}(t+1) = w_{kj}(t) + \Delta w_{kj} \quad (10)$$

$$= w_{kj}(t) + \eta \cdot [d_k - out_k] \cdot f(out_k) \cdot out_j$$

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \Delta w_{ji}$$

$$= w_{ji}(t) + \eta \sum_{k=1}^n [(d_k - out_k) \cdot f(net_k) \cdot w_{kj}] \quad (11)$$

$$\cdot f(net_j) \cdot x_i$$

$$w_{ki}^{of}(t+1) = w_{ki}^{of}(t) + \Delta w_{ki}^{of} \quad (12)$$

$$= w_{ki}^{of}(t) + \eta \cdot [d_k - out_k] \cdot f(out_k) \cdot x_i^{of}$$

$$w_{ki}^{hf}(t+1) = w_{ki}^{hf}(t) + \Delta w_{ki}^{hf} \quad (13)$$

$$= w_{ki}^{hf}(t) + \eta \cdot [d_k - out_k] \cdot f(out_k) \cdot x_i^{hf}$$

$$w_{jn}^{of}(t+1) = w_{jn}^{of}(t) + \Delta w_{jn}^{of} \quad (14)$$

$$= w_{jn}^{of}(t) + \eta \sum_{k=1}^n [(d_k - out_k) \cdot f(net_k) \cdot w_{kj}^{of}]$$

$$\cdot f(net_j) \cdot x_n^{of}$$

$$w_{jn}^{hf}(t+1) = w_{jn}^{hf}(t) + \Delta w_{jn}^{hf} \quad (15)$$

$$= w_{jn}^{hf}(t) + \eta \sum_{k=1}^n [(d_k - out_k) \cdot f(net_k) \cdot w_{kj}^{hf}]$$

$$\cdot f(net_j) \cdot x_n^{hf}$$

제안한 신경회로망을 이용한 로봇 매니플레이터 제어 시스템의 전체적인 블록 선도는 그림 3이다.

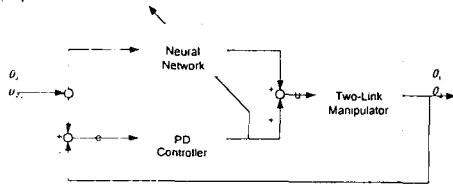


그림 3. 제어 시스템의 블록 선도

그림 3에서 T_f 는 비례 미분 제어기의 피드백 제어기 출력 토크를 나타내고, T_i 는 제안한 신경회로망을 사용한 제어기의 피드포워드 제어기 출력 토크를 나타낸다. T 는 피드백 제어기 토크와 피드포워드 제어기 토크의 합으로 로봇 매니플레이터의 제어는 이것에 의해서 이루어진다. K_p 는 비례 미분 제어기의 비례상수이고, K_v 는 미분상수를 나타낸다.

VI. 시뮬레이션

제안한 신경회로망과 로봇 매니플레이터 제어기의 성능을 평가하기 위하여 Pentium 상에서 C언어를 사용하여 시뮬레이션을 수행한다.

제안한 신경회로망을 이용한 로봇 매니플레이터 제어 시스템의 성능을 평가하기 위하여 그림 1과 같은 2 자유도를 갖는 로봇 매니플레이터에 제어기를 적용하였다. 일반적인 다층 신경회로망을 사용한 경우와 비교·검토한다.

샘플링 시간은 0.01초, 관절 길이

$l_1 = 0.20[m]$, $l_2 = 0.20[m]$, 관절 끝점질량 $m_1 = 0.7[kg]$, $m_2 = 0.3[kg]$ 으로 설정하였으며, 일반적인 다층 신경회로망과 제안한 신경회로망은 동일하게 학습률 η 는 0.05, 입력층의 뉴런수는 6개, 은닉층 뉴런수는 30개, 출력층 뉴런수는 2개이다. 제안한 신경회로망의 피드백층의 뉴런수는 은닉층의 뉴런수와 출력층의 뉴런수의 합인 32개이다. 연결강도의 초기값은 $[-0.1, 0.1]$ 사이에서 임의의 값으로 설정하였다. 비례 미분 제어기에서 비례 상수 K_p 는 10, 미분 상수 K_v 는 1로 하였다. 로봇 매니플레이터의 초기 위치는 각각 $[0 \ 0]^T$ [rad]이고, 초기 속도는 $[0 \ 0]^T$ [rad/sec], 초기 가속도는 $[0 \ 0]^T$ [rad/sec²]이다.

로봇 매니플레이터의 기준 궤적 신호를 식(16), 식(17)과 같이 한다.

$$\theta_{d1} = \sin(t) \quad (16)$$

$$\theta_{d2} = \cos(t) \quad (17)$$

그림 4는 다층 신경회로망을 이용한 제어 방식의 출력 결과이고, 그림 5는 제안한 제어 방식의 출력 결과를 나타낸다.

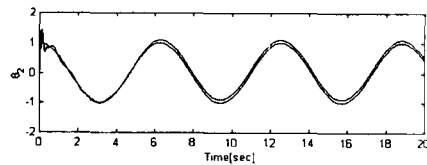
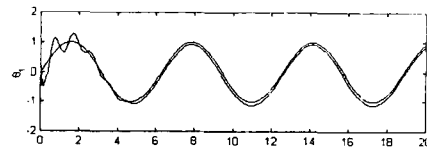


그림 4. 신경회로망을 이용한 출력 결과

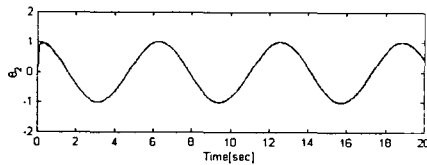
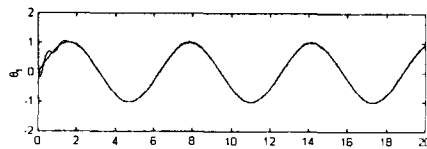


그림 5. 제안한 신경회로망을 이용한 출력 결과

그림 4와 그림 5에서 보면 제안한 제어 방식이

비선형 시스템인 로봇 매니퓰레이터를 대상으로 한 시뮬레이션에서도 θ_1 , θ_2 의 초기의 오차가 작을 뿐만 아니라, 정상상태 오차가 작음을 확인할 수 있다.

V. 실험 및 검토

2 자유도 로봇 매니퓰레이터에 대하여 제작한 전체 실험 장치의 사진은 그림 6과 같다.

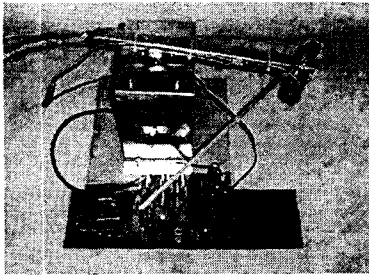


그림 6. 실험 장치 사진

시뮬레이션과 같은 조건으로 실험을 수행하였다.

그림 7은 일반적인 다층 신경회로망 제어 방식의 출력 결과이고, 그림 9는 제안한 제어 방식의 출력 결과이다.

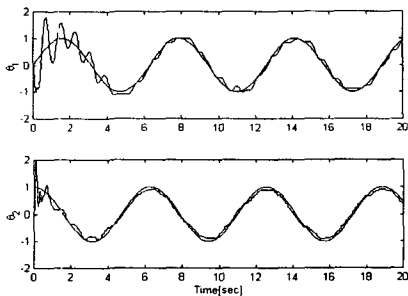


그림 7. 신경회로망을 이용한 출력 결과

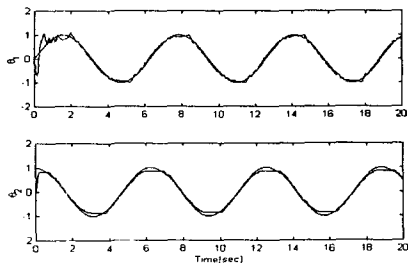


그림 8. 제안한 신경회로망을 이용한 출력 결과

실험 결과 제안한 변형된 신경회로망을 이용한 제어 방식이 전체적으로 오차가 일반적인 신경회로망을 이용한 방식보다 오차가 적고 추종 성능이 좋음을 확인할 수 있었다. 그림 7은 초기의 오차가 크고, 관절 1이나 관절 2 모두 진동하는 부분이 있다. 그림 8의 관절 1의 결과는 초기에 약간의 오차가 있지만 시간이 지남에 따라 오차가 적어지는 것을 알 수 있었고, 관절 2는 목표값의 최대치 부근에서 오차가 발생함을 볼 수 있다.

VI. 결 론

모델링이 불확실하고 비선형이 강한 로봇 매니퓰레이터의 제어를 위하여 변형된 신경회로망을 이용한 제어 방식을 제안하였다. 제안한 제어 방식은 변형된 다층 신경회로망을 이용하여 로봇 매니퓰레이터의 역동역학(inverse dynamics) 모델을 학습하여 이것을 매니퓰레이터의 피드포워드(feedforward) 제어기로 사용하여 관절의 궤적을 제어하는 방식이다. 제안한 변형된 다층 신경회로망은 일반적인 다층 신경회로망과 은닉층의 출력과 출력층의 출력이 피드백(feedback)되는 피드백층을 가진 구조이다. 변형된 다층 신경회로망의 특성과 제어기 설계 및 제어 성능을 평가하기 위하여 두 개의 관절을 갖는 평면 매니퓰레이터를 대상으로 일반적인 다층 신경회로망과 시뮬레이션 및 실험을 통하여 비교 검토한 결과 오차의 감소와 기준 궤적 신호의 추종 성능이 향상되었음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Michael A. Peshkin, ROBOTIC MANIPULATION STRATEGIES, Prentice-Hall Inc., 1990.
- [2] 中野榮二, 로보트 공학, 대영사, 1989.
- [3] Y. M. Chen, K. F. Gill, "Fuzzy-Neuro Control of Robotic Manipulators," The Third International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision, pp.1729-1733, 1994.
- [4] W. Thomas Miller, Richard S. Sutton, and Paul J. Werbos, Neural Networks for Control, MIT Press, 1990.
- [5] D. T. Pham, Sahin Yildirim, "Control of the trajectory of a planar robot using recurrent hybrid networks," International Journal of Machine Tools & Manufacture, no. 39, pp.415-429, 1999.
- [6] Lorenzo Sciavicco, Bruno Siciliano, MODELING AND CONTROL OF ROBOT MANIPULATORS, McGRAW-HILL, 1996.