

동적 신경회로망을 이용한 비선형 시스템 제어 방식

정 경 권, 이 정 훈, 김 영 렬, *이용구, **손 동 설, 엄 기 환
동국대학교 전자공학과, *한림정보산업대학 정보통신과, **유한대학 전자과
전화 : 02-2260-3332

Control Method of Nonlinear System using Dynamical Neural Network

Kyung Kwon Jung, Jung Hoon Lee, Young Lyul Kim,
Yong Gu Lee, Dong Seol Son, Ki Hwan Eom
Dept. of Electronic Engineering, Dongguk University
E-mail : kihwanum@dongguk.edu

Abstract

In this paper, we propose a control method of an unknown nonlinear system using a dynamical neural network. The method proposed in this paper performs for a nonlinear system with unknown system, identification with using the dynamical neural network, and then a nonlinear adaptive controller is designed with these identified informations. In order to verify the effectiveness of the proposed algorithm, we simulated one-link manipulator. The simulation result showed the effectiveness of using the dynamical neural network in the adaptive control of one-link manipulator.

I. 서론

최근 로봇 등과 같이 복잡하고 불확실하며 비선형성이 강한 기구계를 가진 역학이나 이런 것을 보편한 복합 시스템의 제어가 급증하고 있다. 이것은 현대의 과학기술, 공업기술의 급속한 진보와 깊은 연관성이 있으며, 이것에 따라 제어이론 및 기술도 급속히 고도화되고 복잡화되어가고 있다[1-2].

현대 제어이론의 성숙과 함께 1970년대에는 최적제어

에 대한 연구가 매우 활발하였으며, 80년대에는 강인한 제어방식과 적응제어방식이 실제적 상황에서 유용함이 입증되었다[3].

플랜트의 동특성이 미지 또는 불확실하고 그 환경의 정보도 정확하지 않은 경우에 우리는 적응 제어 방식을 이용하고 있다. 특히 적응 제어 방식의 일종인 자기 동조 적응 제어(self-tuning adaptive control : STAC) 방식은 시스템의 입출력 데이터를 이용하여 시스템을 동정(identification)하고, 이 동정된 모델을 이용하여 제어기를 설계하는 방식으로, 시스템 모델이 불확실한 제어 대상의 제어에 용이한 장점이 있어 산업용 로봇 제어 등에 적용되어 왔다. 80년대 후반에는 사람의 자연적 언어 체계를 표현하는데 효과적인 퍼지 이론과 생물학적 신경계통을 모방한 신경회로망 이론이 제어 공학자들에 의해 많은 연구의 대상이 되었다[4-5].

본 논문에서는 비선형 시스템의 적응 제어를 위하여 동적 신경회로망 제어 방식을 제안한다. 제안한 제어 방식은 비선형 시스템의 상태 공간 모델과 유사한 형태의 신경회로망을 구성하여 비선형 시스템을 식별하고, 상태 제한 입력을 설계하는 방식이다. 동적 신경회로망은 오차 역전파 방식으로 연결강도를 조정하는 학습 법칙을 이용한다. 제안한 방식의 유용성을 확인하기 위하여 비선형 시스템인 단일 관절 로봇 매니퓰레이터를 대상으로 위치 제어 시뮬레이션을 수행하여 제안한 방식과 기존의 신경회로망을 이용하는 방식과 비교 검토한다.

II. 일반적인 비선형 제어기 설계

단일입력 단일출력(single-input single-output : SISO)을 갖는 비선형 시스템은 일반적으로 식(1)로 된다.

$$\begin{aligned} x^{(n)} + f(x^{(n-1)}, x^{(n-2)}, \dots, x^{(1)}, x) \\ = g(x^{(n-1)}, x^{(n-2)}, \dots, x^{(1)}, x)u \\ y = x \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $x, u \in \mathbf{R}$ (실수)이며, 각각 시스템에 대한 변수와 입력을 나타내고, $y \in \mathbf{R}$ 은 시스템의 출력이 된다. 식(1)의 시스템 변수를 식(2)의 상태 변수로 정의하면

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ x^{(1)} \\ x^{(2)} \\ \vdots \\ x^{(n-2)} \\ x^{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(1)은 식(3)의 상태 공간 모델로 되고,

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n \\ \dot{x}_n &= f(x) + g(x)u \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, x 는 벡터 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 를 나타내고, $g(x)$ 는 $g(x) \neq 0$ 인 조건을 만족하여야 하며 일반적으로 $g(x) > 0$ 이다[7]. 식(3)의 비선형 제어 대상에 추종제어를 위해 원하는 기준 궤적 $y_d(t)$ 를 발생하고, $y_d(t)$ 를 n 번 연속적으로 미분 가능하도록 설계한 n 계 도함수는 $y_d^{(1)}, y_d^{(2)}, \dots, y_d^{(n)}$ 이다. 비선형 제어기의 설계목적은 출력 $y(t)$ 가 원하는 기준 궤적 $y_d(t)$ 를 추종하도록 제어 입력 $u(t)$ 를 설계하는 데 있다. 즉 오차 $e(t) = y_d(t) - y(t)$ 라 정의 하면, 식(4)를 만족하도록 제어 입력 $u(t)$ 를 설계한다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (4)$$

식(3)의 비선형 시스템에 대한 비선형 궤환 제어기를 설계하면 식(5)로 된다.

$$u(t) = \alpha(x) + \beta(x)v \quad (5)$$

여기서 $\alpha(x), \beta(x), v$ 는 각각 식(6), (7), (8)로 된다

[7].

$$\alpha(x) = \frac{\sum_{i=1}^n k_i x_i - f(x)}{g(x)} \quad (6)$$

$$\beta(x) = \frac{1}{g(x)} \quad (7)$$

$$v = \sum_{i=0}^n k_i y_d^{(i)} \quad (8)$$

식(8)의 v 는 전향경로에 가해지는 제어기의 일부분으로 전체 제어기 식(5)에 통합되어 궤환 제어계를 형성하고, $k_i (i=0, 1, \dots, n)$ 는 시스템이 안정하도록 임의로 지정되는 설계 파라미터이다.

III. 동적신경회로망을 이용한 시스템 식별

본 논문에서 제안한 동적 신경회로망은 식(1)과 같은 형태를 그대로 모방한 신경회로망으로 그림 1과 같이 구성된다.

동적 신경회로망은 은닉층이 두 부분으로 구성되어 그 출력이 각각 $f(\cdot)$ 와 $g(\cdot)$ 이다.

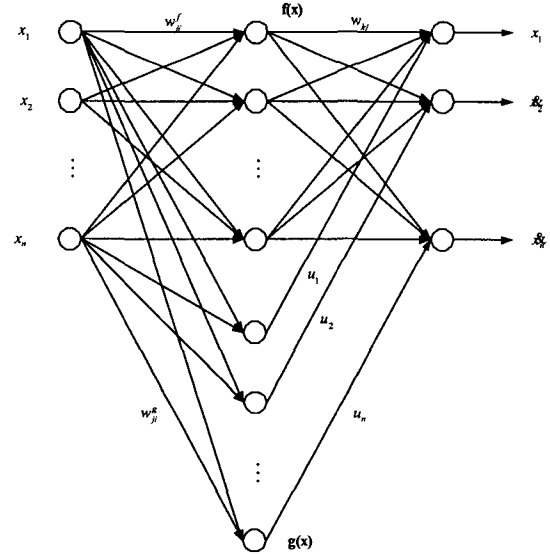


그림 1. 제안한 동적 신경회로망

플랜트의 상태 변수를 입력으로 하여 동적신경회로망의 출력을 계산하면 식(9)와 같다.

$$\hat{x} = w_{1f} f(\sum w_{1i}^f x_i) + g(\sum w_{1i}^g x_i) u \quad (9)$$

식(6), (7), (8)에서 제어 입력은 식(10)과 같이 표현할

수 있다.

$$u = [g(x)]^{-1} [\dot{x} - f(x)] \quad (10)$$

식(9)의 동적 신경회로망의 출력을 이용하여 식(11)의 제어입력을 설계한다.

$$u = [g(\sum w_{ji}^g x)]^{-1} [g - w_{kj} f(\sum w_{ji}^f x)] \quad (11)$$

이렇게 설계된 제어 입력 u 는 동적 신경회로망의 연결강도이므로 오차 역전파 알고리즘으로 신경회로망을 학습하면 제어 입력이 자동으로 조정된다. 그림 2는 동적 신경회로망을 이용한 제어 방식의 블록선도이다.

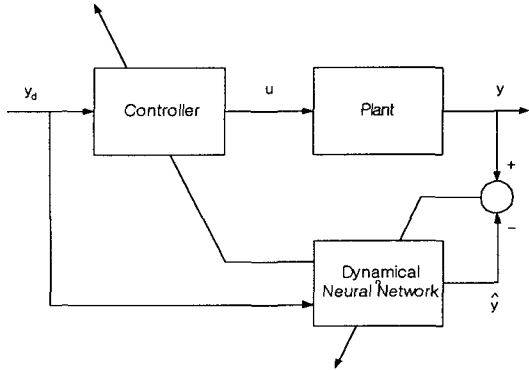


그림 2. 동적 신경회로망을 이용한 제어 방식

IV. 시뮬레이션

제한한 비선형 제어 방식의 유용성을 입증하기 위하여 식(12)로 표현되는 단일 관절 매니플레이터에 대하여 Pentium 상에서 시뮬레이션을 하였다.

$$ml^2 \ddot{\theta} + B \dot{\theta} + mgl \cos(\theta) = \tau \quad (12)$$

여기서 θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ 는 각각 매니플레이터의 각변위, 각속도, 각가속도를 나타내고, τ 는 매니플레이터의 입력력으로 관절에 가해지는 토크이며, m , l , B , g 는 각각 매니플레이터의 질량, 길이, 마찰계수, 중력 가속도를 나타내며, 값은 각각 $m=0.1[\text{kg}]$, $l=1[\text{m}]$, $B=0.4[\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}]$, $g=9.8[\text{m}/\text{s}^2]$ 의 사양을 갖는다. 식(12)의 시스템을 상태 공간 모델로 표현하면 식(13)이 된다.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{g}{l} \cos(x_1) - \frac{B}{ml^2} x_2 + \frac{1}{ml^2} \tau \quad (13)$$

식(13)에 대하여 Runge-Kutta fourth order 알고리즘을 이용하고, 10[ms] 시간 간격으로 하여 식(14)의 기준 궤적에 대하여 비선형 시스템 동정과 제어를 수행하였

다.

$$y_d(t) = \sin(\pi t) \quad (14)$$

동적 신경회로망의 구성은 입력층의 뉴런수 2개, 은닉층의 뉴런수 20개, 출력층의 뉴런수 2개이고, $g(\cdot)$ 의 은닉층 뉴런은 1개이다. 학습률 η 는 0.02로 하였다. 제안한 방식과 비교할 일반적인 신경회로망은 $f(\cdot)$, $g(\cdot)$ 를 각각 독립된 신경회로망으로부터 출력을 계산하여 식(5)와 같이 제어 입력을 계산하는 방식으로 입력층 뉴런수 2개, 은닉층 뉴런수 20개, 출력층의 뉴런수 1개인 신경회로망 두 개를 구성하였다. 학습률은 각각 0.005, 0.0007로 하였다.

매니플레이터의 초기 상태는 위치와 각속도 각각 $[0, 0]^T$ 이다.

그림 3은 일반 신경회로망 방식의 기준궤적과 제어 대상인 단일 관절 매니플레이터의 출력 곡선이고, 그림 4는 제어 입력이다. 그림 5와 그림 6은 제안한 동적 신경회로망 방식의 출력 곡선과 제어 입력이다.

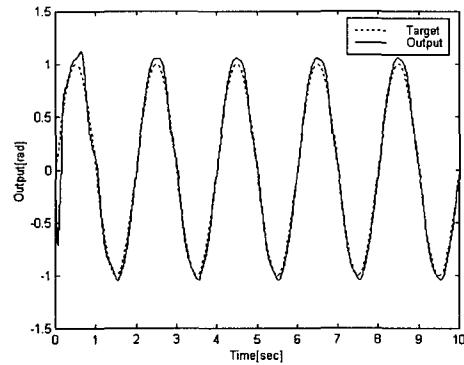


그림 3. 신경회로망 방식의 기준궤적과 출력

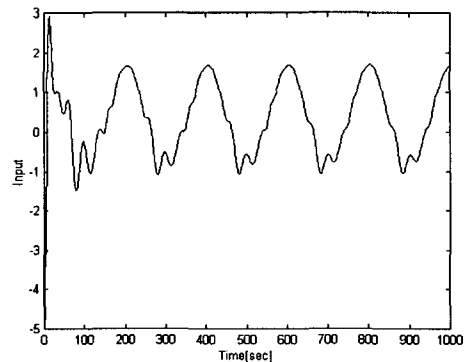


그림 4. 제어 입력

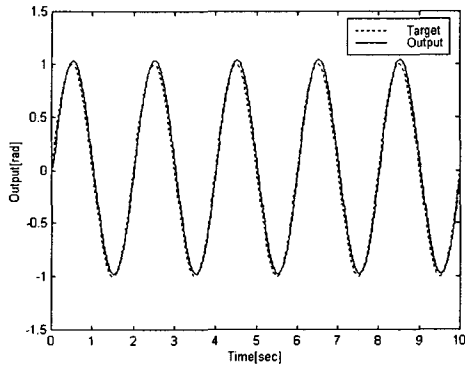


그림 5. 제안한 동적 신경회로망 방식의 기준제적과 출력

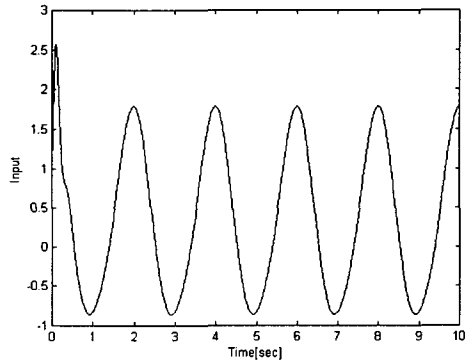


그림 6. 제어 입력

그림 3과 그림 5를에서 제안한 제어 방식이 제어 성능이 우수함을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 비선형 시스템의 적응 제어를 위하여 동적 신경회로망 제어 방식을 제안하였다. 제안한 제어 방식은 비선형 시스템의 상태 공간 모델과 유사한 형태의 신경회로망을 구성하여 비선형 시스템을 식별하고, 상태 제환 입력을 설계하는 방식이다. 동적 신경회로망은 오차 역전파 방식으로 연결강도를 조정하는 학습 법칙을 이용하였다. 비선형 시스템을 입력신호와 관련된 지 않은 비선형 함수 $f(\cdot)$ 와 입력신호와 관련된 비선

형 함수 $g(\cdot)$ 로 구성하여 동적 신경회로망으로 식별을 하고 식별된 정보를 이용하여 제어를 설계하였다. 제안한 방식의 유용성을 확인하기 위하여 비선형 시스템인 단일 관절 로봇 매니플레이터를 대상으로 위치 제어 시뮬레이션을 수행하여 우수한 결과를 확인하였다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] M. Yuan, G. S. Hong and A. N. Poo, "Neural Adaptive Controller : Application to Robot Manipulator," The Third International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision, pp.1734-1737, 1994.
- [3] Zheng Weihing and Ma Peisun, "The Fuzzy-Neural Control of Working Robot Control," The Third International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision, pp.1724-1728, 1994.
- [4] K. J. Astrom and B. Wittenmark, COMPUTER CONTROLLED SYSTEM, Prentice Hall Inc. 1997.
- [5] K. J. Astrom and B. Wittenmark, ADAPTIVE CONTROL, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [6] I. D. Landau, SYSTEM IDENTIFICATION AND CONTROL DESIGN, Prentice Hall Inc., 1990.
- [7] A. Isidori, Nonlinear Control Systems, Springer-Verlag, 1989.