
동적 신경회로망을 이용한 미지의 비선형 시스템 제어 방식

정경권* · 임중규** · 엄기환*

Control Method of an Unknown Nonlinear System Using Dynamical
Neural Network

Kyung Kwon Jung* · Joong kyuLim** · Ki Hwan Eom*

요 약

본 논문에서는 동적신경회로망을 이용한 미지의 비선형 시스템 제어 방식을 제안하였다. 제안한 방식은 비선형 시스템의 상태 공간 모델과 유사한 형태의 신경회로망을 구성하여 비선형 시스템을 식별하고, 식별한 정보를 이용하여 제어기를 설계하는 방식이다. 제안한 방식의 유통성을 확인하기 위하여 단일 관절 매니퓰레이터를 대상으로 시뮬레이션을 수행한 결과 우수한 제어 성능을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we proposed a control method of an unknown nonlinear system using a dynamical neural network. The proposed method is composed of neural network of state space model type, performs for a unknown nonlinear 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 method, we simulated one-link manipulator. The simulation results showed the effectiveness of using the dynamical neural network in the adaptive control of one-link manipulator.

키워드

dynamical neural network, identification, adaptive control

I. 서 론

최근 로봇 등과 같이 복잡하고 불확실하며 비선형성이 강한 기구계를 가진 역학이나 이런 것을 포함한 복합 시스템의 제어가 급증하고 있다. 이것은 현대의 과학기술, 공업기술의 급속한 진보와 깊은 연관성이

있으며, 이것에 따라 제어이론 및 기술도 급속히 고도화되고 복잡화 되어가고 있다[1-2].

현대 제어이론의 성숙과 함께 1970년대에는 최적 제어에 대한 연구가 매우 활발하였으며, 80년대에

*동국대학교

접수일자 : 2002. 5. 24

**호서신산전문학교

는 강연한 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 자기동조 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 페지 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 케환 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 기준의 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

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ x^{(1)} \\ x^{(2)} \\ \vdots \\ x^{(n-2)} \\ x^{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

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 케적 $y_d(t)$ 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 케적 $y_d(t)$ 를 추종하도록 제어 입력 $u(t)$ 를 설계하는 데 있다. 즉 오차 e 를 $e(t) = y_d(t) - y(t)$ 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 케환 제어기 를 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].

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

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

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

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

III. 동적신경회로망을 이용한 시스템 식별

비선형 시스템을 식(1)과 같이 입력신호와 관련되지 않은 비선형 함수 $f(\cdot)$ 와 입력신호와 관련된 비선형 함수 $g(\cdot)$ 로 구성할 수 있다.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (9)$$

그림1의 시스템 동정 블록 선도에서 입력신호 $u(k)$ 는 시스템과 동정모델에 동시에 가해지고 시스템의 출력과 동정모델의 출력간의 오차가 최소화되도록 동정모델의 파라미터를 조정한다[6].

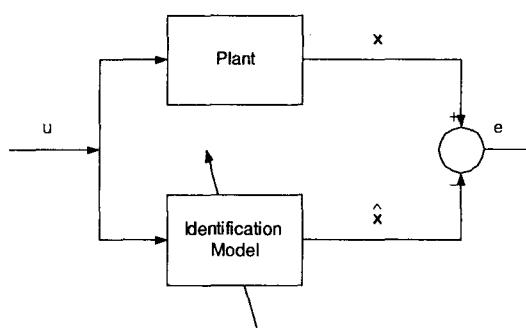


그림 1. 시스템 식별 모델

Figure 1. System identification model

이렇게 조정된 정보를 이용하여 제어기를 설계하면

식(10)과 같다.

$$u = \frac{x - f(x)}{g(x)} \quad (10)$$

식(10)에서 $g(\cdot)$ 을 $diag[g_1 \ g_2 \ \dots \ g_n]$ 이라 하면 식(11)과 같이 표현할 수 있다.

$$u = [g(x)]^{-1}[\dot{x} - f(x)] \quad (11)$$

동적신경회로망을 식(9)와 같은 형태로 하여 그림 2와 같이 구성을 한다.

동적신경회로망의 출력은 식(12)와 같다.

$$\dot{x} = w_{kj}f(\sum w_{ji}^f x_i) + g(\sum w_{ji}^g x_i)u \quad (12)$$

$f(\cdot)$ 과 $g(\cdot)$ 로 표현한 은닉층의 활성화 함수는 tangent sigmoid 함수를 사용하였고, 출력층 뉴런의 활성화 함수는 purelin 함수를 사용하였다.

연결강도 조정은 오차 역전파 알고리즘으로 조정을 하였다.

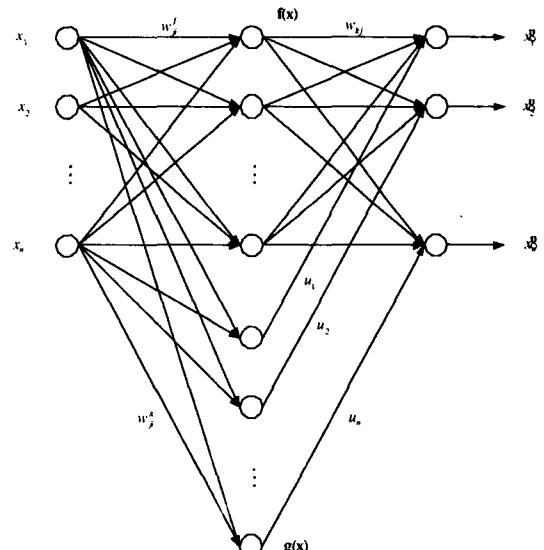


그림 2. 제안한 동적 신경회로망의 구조

Figure 2. Composition of proposed dynamic neural network

식(10)과 (11)의 관계에서 동적신경회로망의 시스템별 정보를 이용하여 식(13)의 제어입력을 설계한다.

$$\mathbf{u} = [g(\sum w_{ji}^s \mathbf{x})]^{-1} [\dot{\mathbf{x}} - w_{kj} f(\sum w_{ji}^t \mathbf{x})] \quad (13)$$

제어 입력 u 는 동적 신경회로망의 구조상 연결강도와 같으므로 오차 역전파 알고리즘으로 신경회로망을 학습하면 제어 입력이 자동으로 조정되는 결과를 얻게된다.

IV. 시뮬레이션

제안한 비선형 제어 방식의 유용성을 입증하기 위하여 식(14)로 표현되는 단일 관절 매니퓰레이터에 대하여 PC 상에서 시뮬레이션을 하였다.

$$ml^2 \ddot{\theta} + B \dot{\theta} + mg l \cos(\theta) = \tau \quad (14)$$

여기서 θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ 는 각각 매니퓰레이터의 각변위, 각속도, 각가속도를 나타내고, τ 는 매니퓰레이터의 입력으로 관절에 가해지는 토크이며, m , l , B , g 는 각각 매니퓰레이터의 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(14)의 시스템을 상태 공간 모델로 표현하면 식(15) 가 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{g}{l} \cos(x_1) - \frac{B}{ml^2} x_2 + \frac{1}{ml^2} \tau \end{aligned} \quad (15)$$

식(15)에 대하여 Runge-Kutta fourth order 알고리를 이용하고, 2[ms] 시간 간격으로 하여 식(16)의 기준 궤적에 대하여 비선형 시스템 동정과 제어를 수행하였다.

$$y_d(t) = \sin(\pi t) \quad (16)$$

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(13)과 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.

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

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

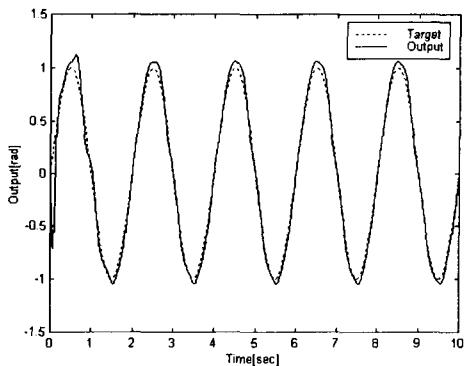


그림 3. 일반적인 신경회로망 방식의 기준 궤적과 출력

Figure 3. Reference signal and output of general neural network method.

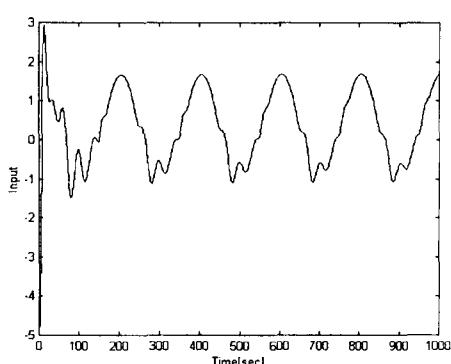


그림 4. 일반적인 신경회로망 방식의 제어 입력 신호
Figure 4. Control input signal of general neural network method.

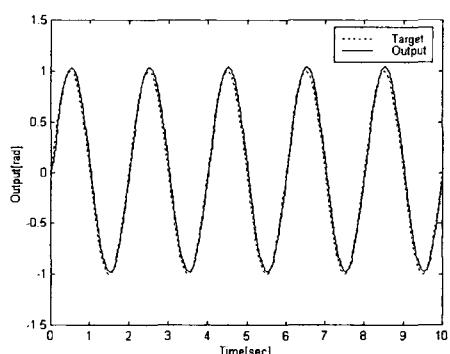


그림 5. 제안한 동적 신경회로망 방식의 기준궤적과 출력
Figure 5. Reference signal and output of proposed method.

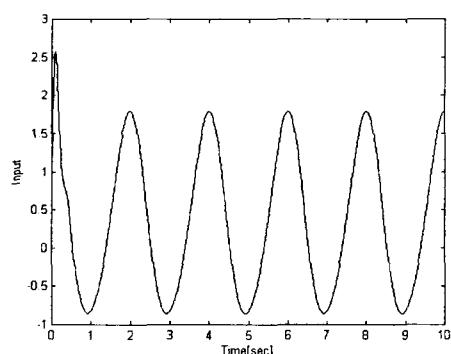


그림 6. 제안한 방식의 제어 입력
Figure 6. Control input signal of proposed method.

그림 3과 그림 5의 응답 곡선에서 제안한 방식의 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 궤환 입력을 설계하는 방식이다. 동적 신경회로망은 오차 역전파 방식으로 연결강도를 조정하는 학습 법칙을 이용하였다. 비선형 시스템을 입력신호와 관련되지 않은 비선형 함수 $f(\cdot)$ 와 입력신호와 관련된 비선형 함수 $g(\cdot)$ 로 구성하여 동적 신경회로망으로 식별을 하고 식별된 정보를 이용하여 제어기를 설계하였다. 제안한 방식의 유용성을 확인하기 위하여 비선형 시스템인 단일 관절 로봇 매니퓰레이터를 대상으로 위치 제어 시뮬레이션을 수행하여 우수한 결과를 확인하였다.

참 고 문 헌

- [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.

저자 소개



정경권(Kyung Kwon Jung)

1998년 동국대학교 전자공학과 공학사
2000년 동국대학교 공학석사, 박사
과정 재학

※ 관심분야 : 신경회로망, 퍼지, 계측제어, 신호처리



임중규(Joong Kyu Lim)

삼성전자 종합연구소 연구원 역임
한보정보통신 개발부 Project Manager 역임
현재 호서전산전문학교 정보처리
과 교수 근무중

동국대학교 전자공학과 공학사, 공학석사(1999),
박사과정 수료

※ 관심분야 : 신경회로망, 퍼지, 패턴 인식



엄기환(Ki-hwan Eom)

1972년 2월 동국대학교 전자공학
(공학사)
1975년 8월 인하대학교 제어계측
(공학석사)
1986년 2월 동국대학교 제어계측
(공학박사)

1978.3~1994.2 유한 대학 전기과 교수
1989.6~1990.6 일본동방대학 정보공학과 연구교수
1994.3~현재 동국대학교 전자공학과 정교수
1999.3~현재 중소기업청 전문위원
1998.3~현재 대한주택공사 심의위원