

뉴로-퍼지 제어를 이용한 원형 역진자 시스템의 제어

The Control of the Rotary Inverted Pendulum System using Neuro-Fuzzy Controller

*이 주 원 , 채 명 기 , 이 상 배
한국해양대학교 전자통신공학과

*Ju-Won Lee , Myong-Gi Chae , Sang-Bae Lee
Dept. of Electro. & Comm. Eng., Korea Maritime University

Abstract

In this paper, we controlled a Rotary Inverted Pendulum System using Neuro-Fuzzy Controller(NFC). The inverted pendulum system is widely used as a typical example of an unstable nonlinear control system which is difficult to control. Fuzzy theory have been effectively applied in this system. But we are difficult to design this fuzzy controller exactly because membership functions and rules of a fuzzy controller are often given by experts or experience. In this paper, therefore, Neuro-Fuzzy Controller is proposed for the realization of a fuzzy logic control system. This controller is a feedforward multilayered network which integrates the basic elements and functions of a traditional fuzzy logic controller into a connectionist structure which has distributed learning abilities. Such NFC can be constructed from training examples by learning rule, and the structure can be trained to develop fuzzy logic rules and find optimal input/output membership functions. Using this controller, we presented the results that controlled a Rotary Inverted Pendulum System and the associated algorithms.

1. 서론

역진자 시스템은 불안정하여 제어하기가 어려운 비선형적인 제어 시스템의 예이다. 실제로 역진자 시스템은 현대제어 이론을 입증하는

데 이용될 뿐만 아니라 여러 가지 지능제어 시스템의 효율성을 입증시켜 주는데 넓게 사용되어지고 있다. 이와 같은 전통적인 동적 시스템의 제어에는 제어 대상의 정확한 수학적 모

델링이 필요하다. 한편 퍼지 제어 시스템은 제어 대상체로부터 발생하는 일련의 동작들을 제어하기 위한 퍼지 규칙의 집합체로 구성된 시스템이다. 일반적으로 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로는 해석할 수가 없거나, 얻어지는 정보가 정성적, 부정확, 불확실한 경우에는 전문가의 지식과 경험에 의해 제어 규칙을 만들으로써 기존 제어기보다 우수한 결과를 나타내고 있으며, 비선형특성을 지닌 시스템에 대해서는 특히 유용하게 사용되어지고 있다. 그러나 이러한 퍼지 제어 시스템에 필요한 적절한 소속함수와 규칙을 구성하는 것은 전문가의 전적인 도움이 필요하거나 실제로 구성하기 어려운 경우가 많다. 그러므로 퍼지 제어 시스템과 신경회로망을 융합하여 퍼지 소속함수와 규칙을 학습시키는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 전형적인 동적 시스템인 원형 역진자 시스템을 제어하기 위해 뉴로-퍼지 제어 알고리즘을 제안하고, 그 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

II. 원형 역진자 시스템의 수학적 모델링

그림 1은 원형 역진자 시스템의 전체적인 구성을 나타낸다.

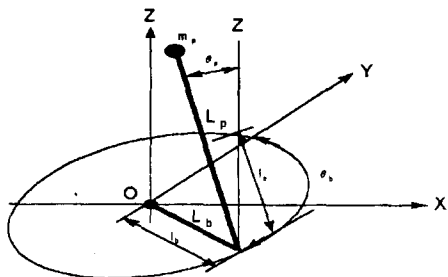


그림 1. 원형 역진자 시스템

베이스 링크 L_b 는 원점 O 에 있는 모터 축에 연결되어 있고 링크 L_p 는 링크 L_b 의 끝에서 회전할 수 있도록 구성되어 있다. 모터의 토크

는 링크 L_b 가 전방향으로 회전할 때 양의 값을 나타낸다. 식(1)은 원형 역진자 시스템의 각 부분에 대한 위치에너지(PE_{pen})와 운동에너지(KE_{pen} , KE_{base})를 나타내고, m_p 는 진자의 무게, l_b 과 l_p 는 각 링크의 길이, g 는 중력가속도, J_b 은 베이스 링크의 관성을 나타낸다.

$$\begin{aligned} PE_{pen} &= m_p g l_p \cos(\theta_p) \\ KE_{pen} &= \frac{1}{2} m_p [(\dot{\theta}_m l_m + \dot{\theta}_p l_p \cos(\theta_p))^2 + (\dot{\theta}_p l_p \sin(\theta_p))^2] \\ KE_{base} &= \frac{1}{2} J_b \dot{\theta}_m^2 \end{aligned} \quad (1)$$

위의 식을 이용하여 Lagrangian 방정식으로 풀면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (m_p l_b^2 + J_b) \ddot{\theta}_b + m_p l_b \ddot{\theta}_p l_p \cos(\theta_p) \\ - m_p l_b \dot{\theta}_p^2 l_p \sin(\theta_p) = T \\ m_p l_p \cos(\theta_p) \ddot{\theta}_b l_b - m_p l_p \sin(\theta_p) \dot{\theta}_b \dot{\theta}_m l_b \\ + m_p \dot{\theta}_p^2 l_p^2 - m_p g l_p \sin(\theta_p) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

DC 모터에 의해서 발생하는 토크 T 는 다음 식과 같고 u 는 플랜트의 입력이다.

$$u = V = IR_m + K_m \omega_m \quad (3)$$

$$T = IK_m = \frac{K_m}{R_m} V - \frac{K_m^2}{R_m} \omega_m \quad (4)$$

여기서 ω_m 은 모터의 회전속도[rad/s]이다.

따라서 시스템 파라미터(표1)에 의해 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_b \\ \dot{\theta}_p \\ \ddot{\theta}_b \\ \ddot{\theta}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -67 & -25 & 0 \\ 0 & 64 & 12 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_b \\ \theta_p \\ \dot{\theta}_b \\ \dot{\theta}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 47 \\ -22 \end{bmatrix} u \quad (5)$$

파라미터	기호	수치	단위
베이스 링크의 길이	l_b	0.145	m
베이스 링크의 관성	J_b	0.0044	kgm ²
진자의 길이	l_p	0.305	m
진자의 질량	m_p	0.210	Kg
모터 토크 상수	K_m	0.00767	V/rad.s
모터 전기자 저항	R_m	2.6	Ω
모터 전기자 전압	V	± 5	V

표 1. 시스템 파라미터

III. 뉴로-퍼지 제어기의 설계

원형 역진자 시스템을 제어하기 위해서는 다음의 두 가지 사항을 동시에 만족해야 한다. 첫째는 임의의 위치로부터 목표지점까지의 위치제어이고, 둘째는 진자를 역방향으로 똑바로 세워야 하는 균형제어이다. 이 장에서 우리는 특정한 위치에서 진자를 안정화시키기 위한 인간의 제어 규칙뿐만 아니라 그 동적인 특성까지도 만족시키는 뉴로-퍼지 제어기를 설계하고자 한다.

본 논문에서 사용된 뉴로-퍼지 제어기의 전체적인 구성도는 그림 2와 같다.

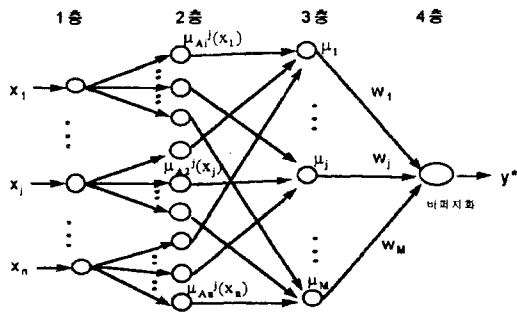


그림 2. 퍼지 싱글턴 규칙을 가진 뉴로-퍼지 제어기의 구조

여기에 제시된 뉴로-퍼지 제어기는 분산학습 능력을 가진 신경회로망의 구조에 퍼지 제어기의 기본 요소와 함수를 통합시킨 다층의 신경회로망의 구조로 구성하였다. 이 시스템은 총 4개의 층으로 구성되어 있다.

입력층(1층)은 입력된 값을 각각의 소속함수에 입력 값을 전달하는 층이고, 2층은 입력 값을 퍼지화 시키는 층으로서 소속함수로 구성되어 있으며 여기에 사용할 수 있는 소속함수의 종류로는 가우시안형, 삼각형 등이 있으나 본 논문에서는 삼각형 함수를 사용하였다. 삼각형 함수의 파라미터는 함수의 중심 m_i^j 와 폭 σ_i^j 이며 학습시 최적의 소속함수를 얻기 위하여 이 파라미터들을 조정한다. 삼각형 소속함수에 대한 식은 다음과 같다.

$$\mu_{A_i^j}(x_i) = 1 - \frac{2|x_i - m_i^j|}{\sigma_i^j} \quad (6)$$

3층은 규칙 층으로서 퍼지 교집합 연산을 하며 j번째 제어 규칙의 적합도는 다음의 수식과 같다.

$$\mu_j = \mu_{A_1^j}(x_1) \mu_{A_2^j}(x_2) \dots \mu_{A_n^j}(x_n) \quad (7)$$

4층은 각각의 추론결과를 비퍼지화하는 층으로서 비퍼지화 방법은 무게 중심법을 사용하였다.

$$y^* = \frac{\sum_{j=1}^M \mu_j \omega_j}{\sum_{j=1}^M \mu_j} \quad (8)$$

퍼지추론의 출력과 바라는 응답에 대한 오차를 최소화하기 위해 경사 하강법으로 오류 역전파 시켜 소속함수의 파라미터와 실수 ω_j 를 조정하는 파라미터 학습 규칙은 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} (y - y^d)^2 = \left[\frac{\sum_{j=1}^M \mu_j(\mathbf{x}) \omega_j}{\sum_{j=1}^M \mu_j} - y^d \right]^2 \quad (9)$$

$$m_i^j(t+1) = m_i^j(t) - \eta_m \frac{\partial E}{\partial m_i^j} \quad (10)$$

$$\sigma_i^j(t+1) = \sigma_i^j(t) - \eta_\sigma \frac{\partial E}{\partial \sigma_i^j}$$

$$w_j(t+1) = w_j(t) - \eta_w \frac{\partial E}{\partial w_j}$$

본 논문에서 사용된 원형 역진자 제어 시스템의 구성은 그림 3과 같다.

여기에서 선형 제어기는 초기에 시스템을 안정화시키기 위해 간단한 모델로 설계되어지고 뉴로-퍼지 제어기는 선형 제어기와 병렬로 접속되어 선형 제어기의 동작점이 바뀔 때마다 적당한 비선형모델을 학습하게 된다. 초기에는 선형 제어기로 플랜트를 제어하고, 이때 선형 제어기의 출력이 0이 아니므로 이것이 뉴로-퍼

지 제어기의 학습 신호로 작용하며, 뉴로-퍼지 제어기는 선형 제어기의 출력이 최소화 되도록 학습이 이루어진다. 선형 제어기의 출력은 학습으로 인해 0으로 접근하게 되고 뉴로-퍼지 제어기의 출력은 점차적으로 크게 된다. 선형 제어기의 출력이 0이 되면 뉴로-퍼지 제어기는 완벽하게 플랜트의 역 모델을 학습하게 된 것이다. 뉴로-퍼지 제어기의 초기 소속함수와 초기 가중치는 아주 작은 난수값을 사용하고 학습률은 0에서 1 사이의 값으로 설정한다.

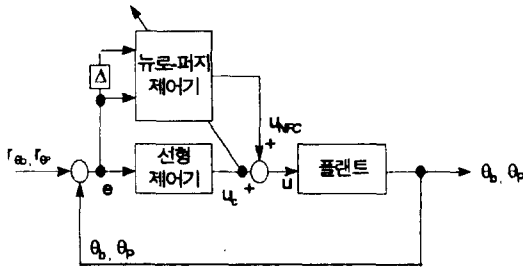


그림 3. 제어 시스템의 블록도

- $r_{\theta b}$: 바라는 베이스 링크의 위치 각
- $r_{\theta p}$: 바라는 진자 각
- θ_b : 베이스 링크의 위치 각(플랜트 출력)
- θ_p : 진자의 각(플랜트 출력)
- u_c : 선형 제어기의 출력
- u_{nfc} : 뉴로-제어기의 출력
- u : 플랜트 제어 입력
- e : 오차

IV. 시뮬레이션

여기서 사용한 선형 제어기는 LQR 제어기를 사용하였으며 뉴로-퍼지 제어기의 입력수는 3개, 각각의 소속함수의 수는 5개이며 학습률은 0.01로 설정하였다. 이 뉴로-퍼지 제어기가 플랜트의 출력(베이스 링크)이 바라는 출력이 되도록 학습하는 과정을 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

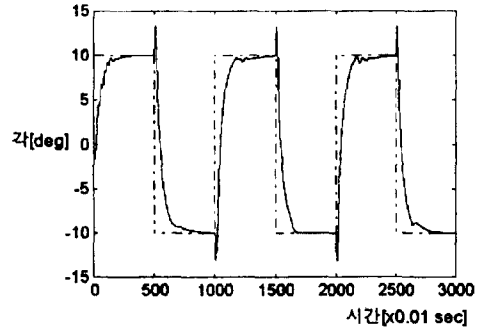


그림 4. 학습 초기상태의 베이스 링크 출력

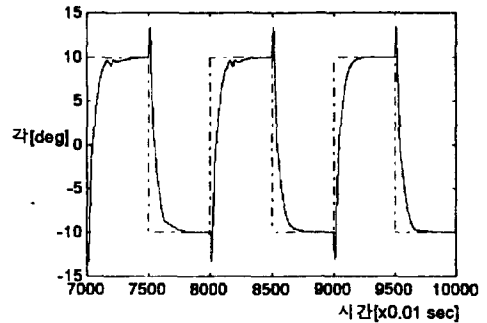


그림 5. 학습 종료시 베이스 링크의 출력

그림 6과 그림 7은 그림 4, 그림 5와 같은 입력 조건을 주었을 때 학습종료시 진자의 각 변화와 바라는 위치에 따른 베이스 링크의 오차를 나타낸 것이다.

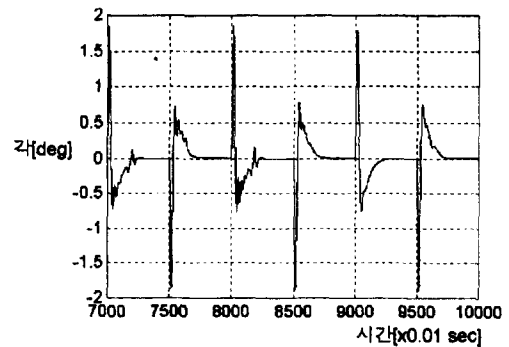


그림 6. 학습 종료시 진자의 출력

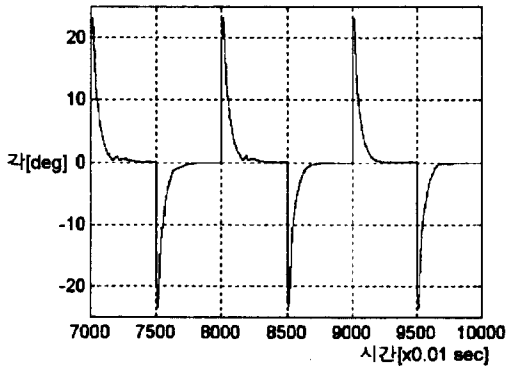


그림 7. 학습 종료시 바라는 위치에 따른 베이스 링크의 출력 오차

V. 결론

본 논문에서는 일반적으로 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로는 해석할 수 없거나 얻어지는 정보가 정성적이고 불확실한 경우에 효과적으로 적용되는 퍼지 제어를 설계함에 있어서 학습 기능을 갖는 신경회로망 구조를 사용하였다. 이러한 뉴로-퍼지 제어를 사용하여 최적의 규칙과 소속함수를 얻을 수 있고, 선형 제어기의 이득계수가 플랜트 제어에 완전히 만족하지 못하여도 뉴로-퍼지 제어기의 학습으로 인하여 최적의 제어가 가능하다. 이를 증명하기 위해서 뉴로-퍼지 알고리즘을 원형 역진자 시스템에 적용하여 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 향후 본 논문에서 제안된 알고리즘으로 실제 원형 역진자 시스템에 적용하여 그 결과를 제시할 것이다.

참고문헌

- [1] Myong-Gi Chae, Sang-Bae Lee, *"The study on the Algorithm for Design of Fuzzy Logic Controller using Neural Network"*, Proceedings of Asian Control Conference, 1997, Vol I, pp. 537-540.
- [2] 김성주, *"신경회로망을 이용한 Linear Track Cart Double Inverted Pendulum*

의 최적제어에 관한 연구" 한국해양대학교 석사학위논문, 1997

- [3] Chin-Teng Lin, C.S.George Lee, *"Neural Fuzzy Systems"*, Prentice Hall, Inc., 1996.
- [4] H. Miyamoto, M. Kawato, T. Setoyama and R.Suzuki, *"Feedback-Error-Learning Neural Networks for Trajectory Control of a Robotic Manipulator,"* Neural Networks, Vol.1, pp251-265, 1988.