

적응 뉴로-퍼지 추론 시스템을 이용한 스윙-업 도립진자 제어

김근기*, 유창완, 홍대승, 신자호, 최창호, 최용길, 송영목, 임화영
 광주대학교 제어계측공학과

Control of a Swing-up Inverted Pendulum
 by an Adaptive Neuro Fuzzv Inference System

Kim Keun-Ki *, Yim Wha-Yeong
 Dep. of Control & Instrumentation Eng. Kwangwoon UNIV.

Abstract - Fuzzy controller design consists of intuition, and any other information about how to control system, into a set of rules. These rules can then be applied to the system. It is very important to decide parameters of IF-THEN rules. Because fuzzy controller can make more adequate force to the plant by means of parameter optimization, which is accomplished by learning procedure. In this paper, we apply fuzzy controller designed to the Swing-Up Inverted pendulum.

을 다음과 같이 만들게 된다.

2.1.1 소속함수

소속함수는 다음과 같은 여러 함수가 사용되고 있다. 삼각함수, 사다리꼴 함수, 가우스 함수, 종형 함수 등이 있으나 제어 대상인 스윙-업 도립진자는 비선형성이 강하므로 이를 보완할 수 있는 비선형 함수중에서 종형함수를 선택하였다. 종형함수는 다음의 식으로 3가지 파라미터(a, b, c)를 포함하며 이 파라미터값에 따라 다른 형태의 모양을 가지는 소속함수이다.

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}}$$

1. 서 론

수학적 모델링이 어려운 비선형 시스템에서는 변수 사이의 관계가 복잡하고 불확실성을 내포하게 된다. 퍼지 추론 시스템(Fuzzy Inference System)은 이러한 불확실성 요소를 언어 변수와 소속 함수로 구성된 IF-THEN 규칙에 따라 여러 가지 추론 방법으로 적절한 출력을 추론하게 된다. IF-THEN 규칙에 대해 조건부 소속함수 파라미터와 결과부 파라미터의 최적화를 통해 보다 성능이 좋은 퍼지 제어를 설계할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 퍼지 추론 시스템과 신경망이 결합된 적응 네트워크를 기반으로한 퍼지 추론 시스템을 이용하여 학습능력을 향상 시키고 실제로 비선형성이 강한 스윙-업 도립진자 시스템에 적용하여 우수한 적응성을 가진다는 것을 입증했다.

2.1.2 추론과정

IF-THEN 규칙의 형태는 크게 2 가지로 나눌 수 있는데 본 논문에서는 Sugeno 형태의 규칙을 이용한다. 예를 들면 아래와 같다. 즉 퍼지 집합은 규칙의 조건부에만 존재하고 결론부는 입력 변수에 대한 선형식으로 이루어져있다.

If x is A and y is B, then z = f(x, y)

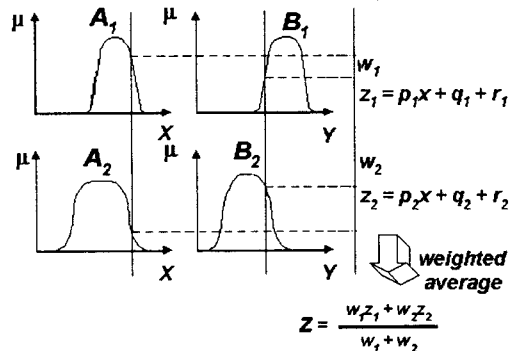
이 추론 시스템은 Mamdani 추론 시스템에서처럼 각 규칙의 추론 결과를 합하여 비퍼지화하는 과정이 없고 가중치 평균으로 대치된다. Sugeno 추론 시스템은 <그림 1>과 같다.

2. 본 론

퍼지 추론 시스템과 신경망이 결합된 적응 네트워크를 기반으로한 적응 뉴로 퍼지 추론 시스템(ANFIS)을 이용하여 제어를 설계하는 과정과 제어기 내부 파라미터가 변화하는 학습 알고리즘, 실제 플랜트에 적용한 실험 결과는 다음과 같다.

2.1 퍼지 추론 시스템

퍼지 추론 시스템은 퍼지 입력에 대해 소속함수와 추론 과정, IF-THEN 규칙의 조합으로 적절한 제어 입력



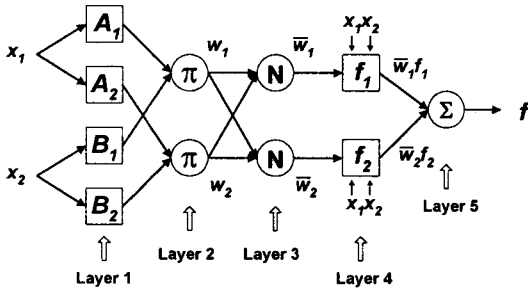
<그림 1> Sugeno 퍼지 추론 시스템

2.2 적응 네트워크

적응 네트워크는 노드안의 파라미터를 이용하여 들어오는 신호에 대해 특별한 기능을 수행하는 다층 전방향 네트워크를 말한다.

2.2.1 ANFIS의 구조

ANFIS(Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) 적응 네트워크의 특별한 형태로서 다섯층으로 구성되어 있다.



<그림 2> ANFIS 구조

사각형 노드는 수정가능한 파라미터를 포함하는 노드이고, 원형 노드는 파라미터가 없는 노드이다. 각 층의 구조는 다음과 같다.

Layer 1: 각 입력에 대한 소속함수값을 결정한다.

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad \text{for } i=1, 2, \text{ or}$$

$$O_i^1 = \mu_{B_{i-2}}(x) \quad \text{for } i=3, 4$$

Layer 2: Layer 1 출력의 곱으로 나타난다.

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad i=1, 2$$

Layer 3: Layer 2의 값을 정규화 시킨다.

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i=1, 2$$

Layer 4: 결론부 파라미터와 곱해진다.

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i)$$

Layer 5: 이전층의 모든 합으로 표현된다.

$$O_i^5 = \text{overall output} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}$$

2.2.2 파라미터 갱신

파라미터의 갱신을 위하여 역전파 알고리즘과 최급강하법을 사용한다. 원하는 입출력쌍을 사상하기 위해서 노드안의 파라미터는 주어진 트레이닝 데이터와 최급강하법 (Steepest Descent)에 따라 갱신된다.

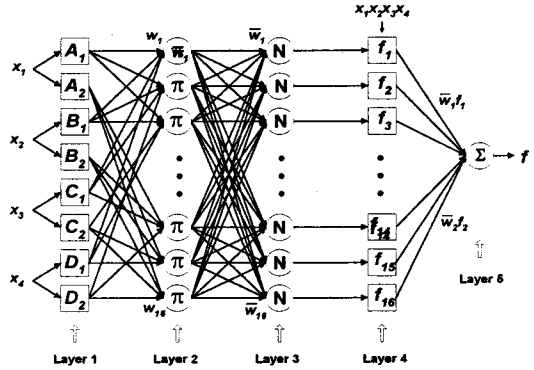
총괄적인 파라미터 \$\alpha\$가 변화하면 최종 출력층의 변화를 가져오고 따라서 error measure가 커지거나 작아지게 된다. 이 error measure가 작아지도록 다음의 식과 같이 최급강하법을 이용하여 오차를 역전파시켜서 \$\alpha\$를 수정하게 된다.

$$\Delta\alpha = -\eta \frac{\partial E}{\partial \alpha}$$

$$\alpha_{next} = \alpha_{now} + \Delta\alpha$$

2.3 제어기 설계

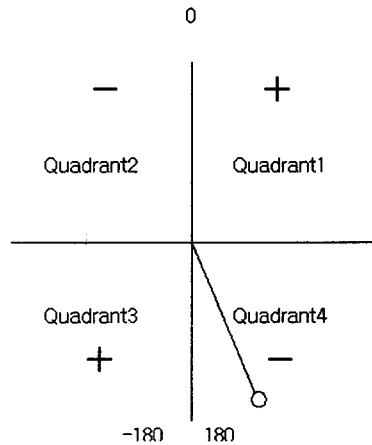
2.3.1 ANFIS 제어기의 구조



<그림 3> ANFIS 제어기 구조

2.3.2 스윙-업 제어

도립진자 시스템은 퍼지 제어기에 의해서 진자가 안정평형점 위치에서 불안정 평형점 위치에 도달하도록 스윙-업을 수행하게 된다. 스윙-업 제어를 위해서 진자가 회전하는 구간을 <그림 4>와 같이 네 구간으로 정의하였다



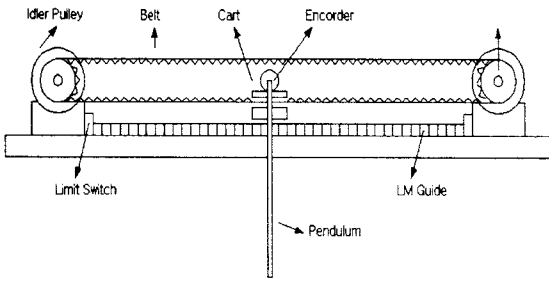
<그림 4> 도립진자의 각도 분할

따라서 스윙-업 도립진자 시스템의 진자를 1,2사분면 위치에 0°의 근처로 보내기 위한 제어 입력은 Q1과 Q3에서는 플러스(Positive)의 힘이 필요하고, Q2와 Q4에서는 마이너스(Negative)의 힘이 필요함을 알 수 있다.

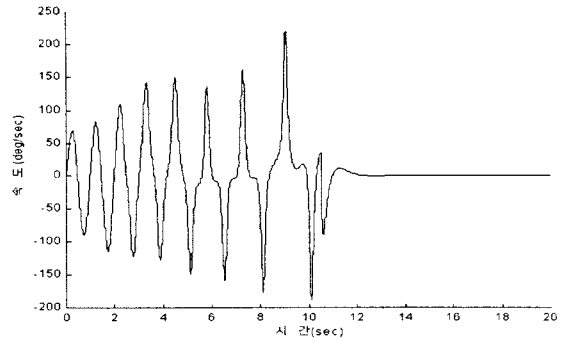
2.3.3 실험 장치 구성도

스윙-업 도립진자 시스템의 전체 구성도는 <그림 5>와 같이 대차와 진자로 구성되어 있다. 타이밍 벨트에 의해 전달된 DC서보모터의 동력이 진자와 대차를 직선왕복

대(LM Guide)위에서 움직이게 된다. 양단에는 리미트 스위치를 부착하여 대차가 이탈되는 것을 방지하였다.

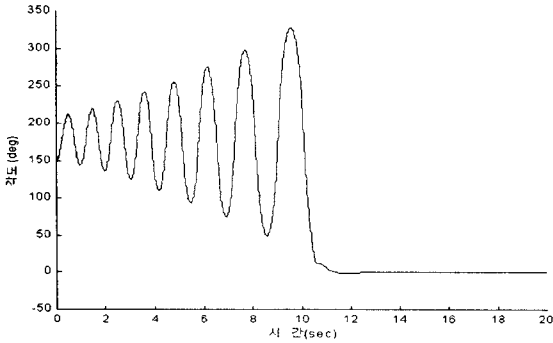


<그림 5> 도립진자 시스템의 전체 구성도

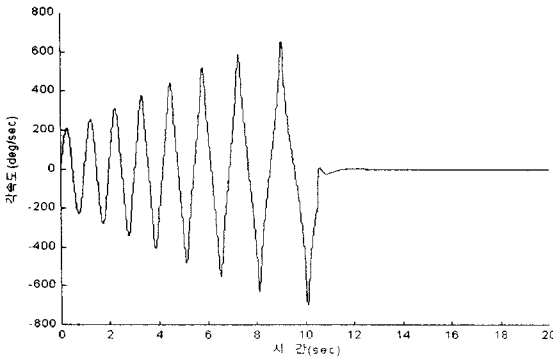


<그림 9> 스윙-업 도립진자의 속도 궤적

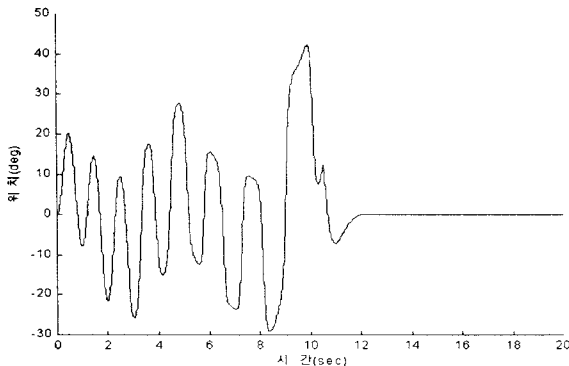
2.3.4 실험 결과



<그림 6> 스윙-업 도립진자의 각도 궤적



<그림 7> 스윙-업 도립진자의 각속도 궤적



<그림 8> 스윙-업 도립진자의 거리 궤적

3. 결 론

본 논문에서는 스윙-업 도립진자를 안정 평형점에서 스윙-업 과정을 거쳐 불안정 평형점으로 이동시킨 후, 도립된 상태로 계속 유지할 수 있도록 적응 뉴로 퍼지 추론 시스템 알고리즘을 제안하였다. 이것은 기존의 퍼지 제어기 비해 제어기 내부 파라미터를 스스로 학습할 수 있는 알고리즘으로써 설계된 제어기의 학습 능력과 우수한 적응성을 세가지의 각각 다른 초기상태에서 시뮬레이션과 실험을 통해서 확인 할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Li-Xin Wang, "A Course in Fuzzy and Control", Prentice-Hall, 1997
- [2] Li-Xin Wang, "Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis", Prentice-Hall, 1994
- [3] J. S. Jang, C. T. Sun, E. Mizutani, "Neuro-Fuzzy and Soft Computing", Prentice Hall, 1997
- [4] Li-Xing Wang, "Stable and Optimal Fuzzy Control of Linear Systems", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 6, No. 1, Feb., 1998.
- [5] D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank, "An Introduction To Fuzzy Control", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.
- [6] G. Feng, S. G. Cao, N. W. Rees, "Analysis and Design of Fuzzy Control Systems using Dynamic Fuzzy Global Models", Fuzzy Sets And Systems, no. 75, pp. 47-62, 1995.
- [7] Han-Xiong Li, "A Comparative Design and Tuning for Conventional Fuzzy Control", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybern., PART B: CYBERN., Vol. 27, No. 5, Oct., 1997.
- [8] Lefteri H. Tsoukalas, Robert E. Uhrig, "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering", John Wiley & Sons INC., 1996
- [9] Hagan, Demuth, Beale, "Neural Network Design", PWS, 1995