

## 자기 학습 구조를 가진 퍼지 제어기의 응용

正會員 徐 榮 魯\* 正會員 鄭 辰 鉉\*

### Application of a Fuzzy Controller with a Self-Learning Structure

Young Roh Seo\*, Chin Hyun Chung\* *Regular Members*

#### 요 약

본 논문에서는 성능 평가에 의한 자기 학습 구조를 가진 퍼지 제어기를 연구하였다. 퍼지 제어기는 퍼지 논리에 기초를 두고 있고, 퍼지 논리는 실세계의 근사적이고 불확실한 현상을 기술하는데 효과적이다. 이러한 퍼지 논리의 추론으로 제어를 수행하지만 퍼지 제어기의 중요한 부분인 멤버십 함수와 제어 규칙을 설정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 이런 문제점을 보완하기 위해 제어 목표값에 도달할 때까지 스스로 제어 규칙을 개선하는 자기 학습 제어기를 설계하였다. 본 논문에서 퍼지 제어기의 학습은 평가 기준표 (Performance Index)을 이용하여 이루어진다. 퍼지 제어기의 구현은 386PC를 기본으로 하였으며, D/A 변환기, PWM(Pulse Width Modulation) 모터 드라이브 회로 등이 포함된 인터페이스 카드를 제작하여 제어 대상체의 데이터를 처리하였다.

공과 막대기 시스템(Ball and Beam System)을 제어 플랜트로 구현하여 얻은 실험 데이터와 이에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 얻은 데이터를 서로 비교하여서 자기 학습 구조를 갖는 퍼지 제어기의 유용성을 평가하였다.

실험의 결과는 학습 구조가 없는 퍼지 제어기보다 학습 구조를 가진 제어기가 정상상태 도달시간(Settling Time)에서 약 10%정도 빠르게 개선되었다.

#### Abstract

In this paper, we evaluate the performance of a fuzzy controller with a self-learning structure. The fuzzy controller is based on a fuzzy logic that approximates and effectively represents the uncertain phenomena of the real world. The fuzzy controller has control of a plant with a fuzzy inference logic.

\*光云大學校 制御計測工學科  
論文番號 : 94102  
接受日字 : 1994年 4月 2日

However, it is not easy to decide the membership function of a fuzzy controller and its control rule. This problem can be solved by designing a self-learning controller that improves its own control law to its goal with a performance table.

The fuzzy controller is implemented with a 386PC, an interface board, a D/A converter, a PWM (Pulse Width Modulation) motor drive-circuit, and a sensing-circuit for error and differential of error.

Since a *Ball and Beam System* is used in the experiment, the validity of the fuzzy controller with the self-learning structure can be evaluated through the actual experiment and the computer simulation of the real plant. The self-learning fuzzy controller reduces settling time by just under 10%.

## I. 서 론

퍼지집합(Fuzzy Set)과 퍼지 규칙(Fuzzy Rules)을 기초로 구성된 시스템은 1970년경 Zadeh[1]에 의해 제안되었다. 퍼지 제어 시스템(Fuzzy Control System)은 제어 대상체로부터 발생하는 일련의 동작들을 조절하기 위한 퍼지 규칙의 집합체 [3]로 구성된 시스템이다. 퍼지 제어시스템은 약간의 이를 기초로 한 추론(Inference)을 통하여 제어하며, 또 제어량을 언어적으로 표현할 수 있음으로 사용자의 전문적인 기술이 부족하여도 손쉽게 제어 시스템을 구성할 수 있다. 하지만 이러한 장점에도 불구하고 멤버십 함수(Membership Function)를 설정하는 것은 숙련된 기술자의 행동양식이나, 직관으로 행하여짐으로 최적의 설정을 위해 많은 시행착오를 가지고 있다.

이러한 퍼지 제어 시스템에 사용되는 퍼지 제어기 [3, 4, 5, 6, 7]의 성능을 향상시키기 위하여 여러 가지 알고리즘이 제시되었다. 이렇게 제시된 방법들중의 하나로 퍼지 제어기의 규칙부분을 변경할 수 있는 자기 학습 퍼지 제어기(Self-Learning Fuzzy Controller) [8, 9]가 제시되었다. 즉, 제어 입력과 결과를 비교하여 제어 목표에 도달하도록 과거의 규칙을 스스로 개선함으로써, 기존의 퍼지 제어기보다 설계시 수고를 줄일 수 있고, 환경의 변화에 따라서 적절한 값을 스스로 설정할 수 있다.

본 논문에서는 퍼지 제어기의 성능을 향상시키기 위해, 자기 학습 제어 알고리즘[8, 9]을 적용한다. 적용한 퍼지 제어기를 제안하고, 잘 알려진 플랜트(Plant) 중의 하나인 공과 막대기 시스템(Ball and Beam System)을 직접 제작한 후 이를 통하여 얻은 실험 데이터와 컴퓨터 시뮬레이션(Computer Simulation)을 통하여 얻은 데이터를 고찰함으로써 자기 학습 제어 알고리즘을 가진 퍼지 제어기의 우수함을 입증하였다.

## II. 본 론

### 1. 퍼지 제어기(Fuzzy Controller)

퍼지 제어기는 실세계의 근사적이고 불확실한 현상을 기술하는데 효과적으로 이용될 수 있다. 퍼지 제어기의 핵심적인 부분은 언어 형태로 표현된 일련의 제어규칙이며, 여기에는 퍼지 연관관계가 포함되어 있고, 퍼지연산 방법에 의해서 제어규칙 합성이 이루어지며 그 결과로 제어 입력이 만들어진다.

### 2. 자기 학습 제어(Self-Learning Control)와 알고리즘(Algorithm)

2.1 자기 학습 제어: 자기 학습 제어 [8]는 제어 알고리즘이 제어 대상체의 공정과 제어가 작동하는 환경의 변화에 따라 스스로 변환하는 방식이다. 자기 학습 제어기는 크게 두 가지의 일을 수행한다. 한 가지는 적절한 제어 입력을 출력하면서 주의 상황에 대한 정보를 받아들이고 다른 한 가지는 과거에 제어 입력으로 인한 시스템의 출력을 이용하여 앞으로의 시스템의 결과를 향상시킨다.

2.2 자기 학습 제어 알고리즘: 대상체의 각 출력에 대해 제어기의 성능은 원하는 목표값(Reference)과 측정값의 차이로서 평가할 수 있다. 그리고 학습은 성능 평가표를 사용하여 수행한다. 성능 평가표에는 오차, 오차의 변화율, 수정값에 대한 정보를 포함하고 있다.

제어되는 시스템이  $m$ 개의 샘플링(Sampling) 시간 만큼 지연이 있다고 가정하면 현재의 오차  $r_e(nT)$ 와 오차의 변화율  $cr_e(nT)$  값은 과거  $m$ 개의 샘플 이전에 발생된 제어 입력  $u(nT-mT)$ 에 의한 결과이다. 그러므로 제어 입력을  $u(nT-mT)$ 로 출력한 과거의 규칙에 수정값  $P(nT)$ 을 적용하여 규칙을 변경한다. 변경 방법은 수정값을 규칙의 가중치로 생각하여 규

칙의 결과에 수정값을 곱하는 형태로 한다.

$$Rule(r_e(nT - mT), cr_e(nT - mT))$$

$$\Rightarrow Rule(r_e(nT - mT), cr_e(nT - mT)) \cdot p(nT)$$

### 3. 공과 막대기 시스템을 위한 퍼지 제어기의 설계 및 구현

#### 3.1 구성

본 논문에서 제안하는 퍼지 제어기의 구성은 그림 1에 나타난다.

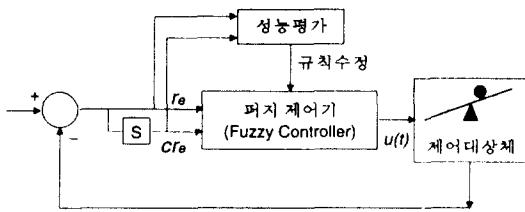


그림 1. 자기 학습 구조를 가진 퍼지 제어기  
Fig 1. Fuzzy Controller with Self-earning Structure

#### 3.2 제어변수의 정의

- $r$  = 거리의 오차  $r_e$
- $\dot{r}$  = 거리의 오차 변화율  $cr_e$
- $u(t)$  = 모터의 입력 전압  $v$

#### 3.3 멤버십 함수의 정의

멤버십 함수의 라벨은 제어 대상체에 따라 다르지만 다음과 같이 7등급으로 정의하였다.

- PB = 오른쪽 크다. (Positive Big)
- PM = 오른쪽 방향으로 보통이다. (Positive Medium)
- PS = 오른쪽 방향으로 적다. (Positive Small)
- ZE = 변화가 없다. (Zero)
- NS = 왼쪽 방향으로 작다. (Negative Small)
- NM = 왼쪽 방향으로 보통이다. (Negative Medium)
- NB = 왼쪽 방향으로 크다. (Negative Big)

멤버십 함수의 설정 [10]은 일반적으로 전문가적 경험과 지식을 기본으로 하지만 일반적으로 제어 과

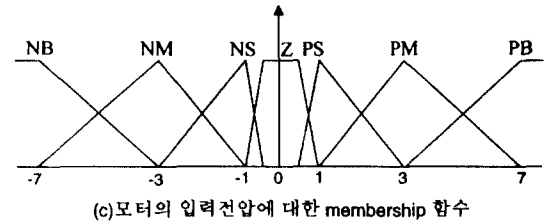
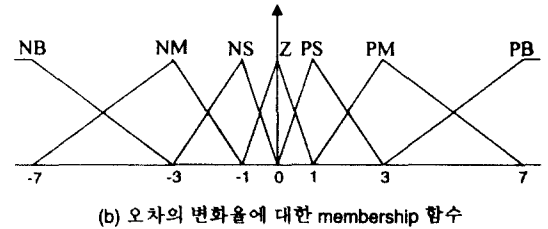
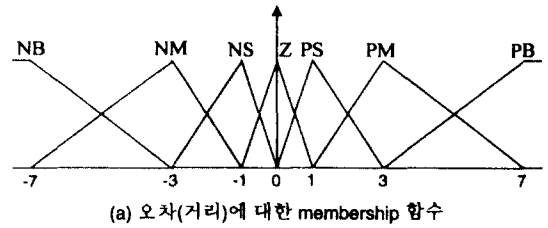


그림 2. 멤버십 함수의 설정  
Fig 2. Setting of Membership Function

라메터의 최대값과 최소값을 설정한 후 이 영역을 균등하게 나누어 설정한다. 그림 2은 오차, 오차의 변화율, 모터의 입력전압에 대한 멤버십 함수의 설정을 나타낸다. 본 논문에서는 일단 균등하게 분할한 후 민감하게 반응하도록 기준값(Reference)쪽으로 약간 집중되게 설정하였다. 멤버십 함수의 라벨의 상대적 크기는 1:2:4의 비율로 ZE의 중심(Peak)이 0, PS의 중심이 1, PM의 중심이 3, PB의 중심이 7, 마찬가지로 NS의 중심이 -1, NM의 중심이 -3, NB의 중심이 -7로 스케일링(Scaling)했으며 모터의 입력 전압의 멤버십 함수에서 ZE라벨의 영역은 사다리꼴로 설정했는데 이는 모터의 특성상 약간의 off-set을 준 것이다.

#### 3.4 규칙 베이스(Rule-Base)

표 1은 퍼지 규칙 베이스를 나타낸다. 규칙 베이스의 가로축은 오차의 변화율을, 세로축은 오차를 나타내며 예로 오차의 변화율이 적을 때는 ZE에 속하고

표 1. 퍼지 규칙 베이스

Table 1. Fuzzy Rule-Base

|    |    | 오차의 변화율 |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|---------|----|----|----|----|----|----|----|
| 오차 | CE | NB      | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |    |
|    | E  | NB      | PB | PB | PB | PB | PM | PS | ZE |
|    | NM | PB      | PB | PB | PM | PS | ZE | NS |    |
|    | NS | PB      | PB | PM | PS | ZE | NS | NM |    |
|    | ZE | PB      | PM | PS | ZE | NS | NM | NB |    |
|    | PS | PM      | PS | ZE | NS | NM | NB | NB |    |
|    | PM | PS      | ZE | NS | NM | NB | NB | NB |    |
|    | PB | ZE      | NS | NM | NB | NB | NB | NB |    |

표 2. 성능 평가표

Table 2. Performance Index Table

|    |    | 오차의 변화율 |     |     |     |     |     |     |   |
|----|----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| 오차 | CE | NB      | NM  | NS  | ZE  | PS  | PM  | PB  |   |
|    | E  | NB      | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1 |
|    | NM | 1.8     | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1   | 1.1 |   |
|    | NS | 1.6     | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1   | 1.1 | 1.2 |   |
|    | ZE | 1.4     | 1.2 | 1.1 | 1   | 1.1 | 1.2 | 1.4 |   |
|    | PS | 1.2     | 1.1 | 1   | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 |   |
|    | PM | 1.1     | 1   | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 |   |
|    | PB | 1       | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2.0 |   |

오차가 양의 방향으로 클 때는 PB에 속하게 되어 규칙의 결과는 음의 방향으로 큰 입력을 주도록 NB가 선택된다.

3.5 성능 평가표(Performance Index Table)

표 2는 성능 평가표를 나타낸다. 성능 평가표에서 왼쪽윗 부분과 오른쪽 아래 부분은 제어의 결과가 나뉘는 방향으로 행해짐으로 큰 가중치를 주어 개선하려는 것이고 오른쪽 윗 부분과 왼쪽 아래 부분은 현재 오차의 변화율 또는 오차가 큰 상황이지만 제어 목표로 빠르게 개선되는 상태임으로 사용된 규칙을 그대로 유지하는 것이다.

Ⅲ. 시뮬레이션 및 실험

1. 공과 막대기 시스템(Ball and Beam System)

그림 3은 본 논문에서 사용된 공과 막대기 시스템을 나타낸다. 막대의 길이는 0.8m이며 무게는 565g이다. 중심점을 기준으로 하여 왼쪽 영역을 -0.4m~0m로 오른쪽을 0m~0.4m로 설정하였다. 볼의 지름은 23.8mm이고 무게는 67g으로 하였다. 사용된 모터는 Tamagawa servo motor 30w[11]를 사용하였다. 모터의 속도를 감속하기 위해 기어를 사용하여 연결하였다.

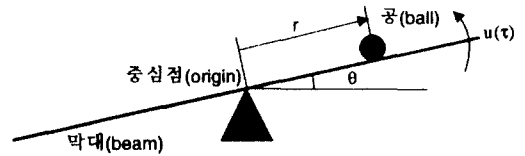


그림 3. 공과 막대기 시스템  
Fig 3. Ball and Beam System

2. 그래픽 시뮬레이션(Graphic Simulation)

그래픽 시뮬레이션을 하여 시스템의 제어상태를 쉽게 파악하도록 하였다. 그림 4에서는 그래픽 시뮬레이션시 화면을 나타낸다. 그림 4의 윗 부분에 제어 변수를 나타나게 하였고 전체적인 시뮬레이션 그림은 간략히 생략하여 그래픽 처리 시간을 짧게 하였다. 이러한 시뮬레이션의 목적은 멤버십 함수의 초기 설정을 좀 더 간편하게 하기 위해서였다. 여기에 사용된 모델링 식은 Runge-Kutta 3차식으로 계산하였다. 시스템의 모델링은 라그랑지안 방정식(Lagrangian equation)을 이용하여 전개하였으며,  $\ddot{x}$ (공과 기준점으로 부터의 거리의 가속도), 와  $\ddot{\theta}$ (막대기의 기울기의 가속도)의 계산은 Mathematica [12]로 처리하였다.

$\ddot{x} =$

$$\left( \begin{array}{l} 1.6957164 \ddot{\theta} x - 16.61802072 x \sin \theta + 0.001591819 \tau \\ -0.000213303 \dot{\theta} x \dot{x} - 0.001045188 x \cos \theta + 0.000194043 \sin \theta \\ + 0.000007784 \dot{\theta}^2 x - 0.000076284 x \sin \theta \end{array} \right) / (0.00118825 + 0.00264726x^2)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{(0.0395114\tau - 0.005294527\dot{\theta}x\dot{x} - 0.025943185x\cos\theta + 0.004816044\sin\theta + 0.000193213\dot{\theta}x - 0.001893489x\sin\theta)}{(0.00118825 + 0.00264726x^2)}$$

시뮬레이션에서 샘플링 시간은 그래픽 처리 루틴을 포함하여 36 Hz로 설정하였다.

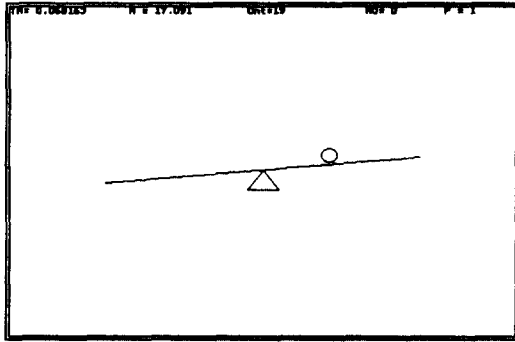


그림 4. 그래픽 시뮬레이션  
Fig 4. Graphic Simulation

### 3. 실험 장치의 구성

그림 5는 퍼지 제어기의 인터페이스를 나타낸다. 퍼지 제어기는 IBM 호환 기종의 386PC로 구현하였다. 여기에 인터페이스 기관(Interface Board)을 직접 제작하여 사용하였다. 그림 6은 인터페이스 기관을 나타낸다. 데이터 버스는 빠른 전송을 위해 16비트 (Bit)로 처리하였으며 인터페이스 기관에는 모터 제어를 위한 PWM 방식의 드라이브 부분 및 8비트 D-A 변환기(Digital to Analog Converter)와 모터의 회전 속도를 검출하기 위한 16비트 카운터(Counter), 막대기에 놓여 있는 공의 위치를 검출하기 위한 부분 등으로 구성된다.

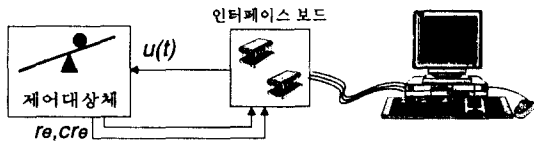


그림 5. 퍼지 제어기의 인터페이스  
Fig 5. Interface of Fuzzy Controller

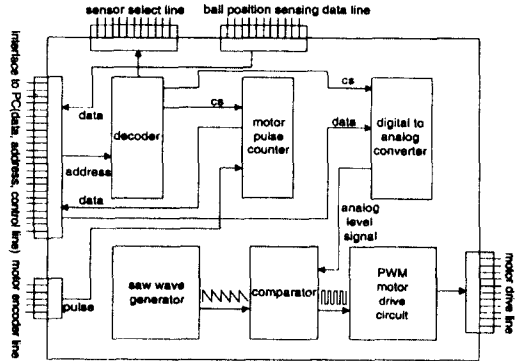


그림 6. 인터페이스 보드  
Fig 6. Interface Board

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 결과

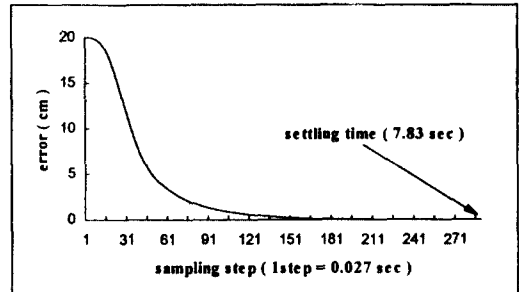


그림 7. 학습 구조가 없는 경우의 시스템 출력(초기 위치 : 0.2m 초기 속도 : 0)

Fig 7. Output of System without Learning(initial position : 0.2m, velocity : 0)

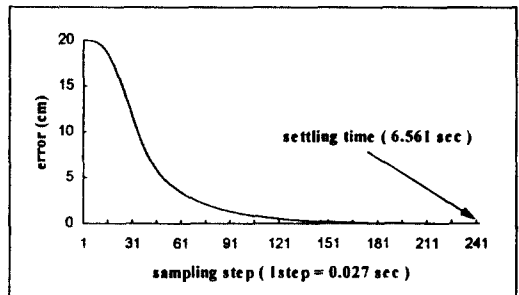


그림 8. 학습 구조가 있는 경우의 시스템 출력(초기 위치 : 0.2m 초기 속도 : 0)

Fig 8. Output of System with Learning(initial position : 0.2m, velocity : 0)

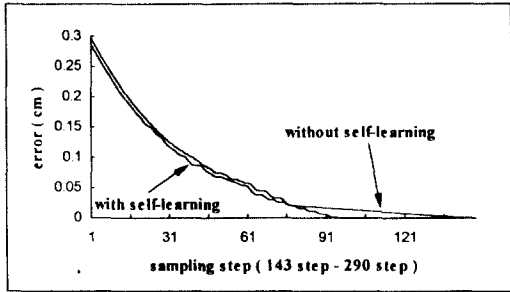


그림 9. 그림 7, 8의 결과 비교(초기 위치:0.2m 초기 속도:0)  
 Fig 9. Comparison of Fig. 7, 8(initial position :0.2m, velocity :0)

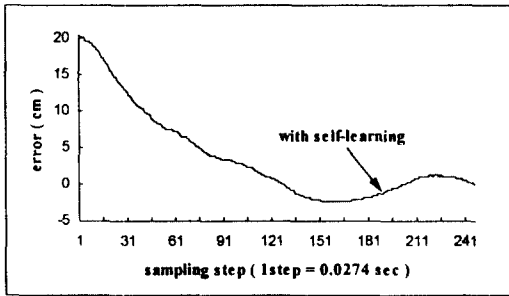
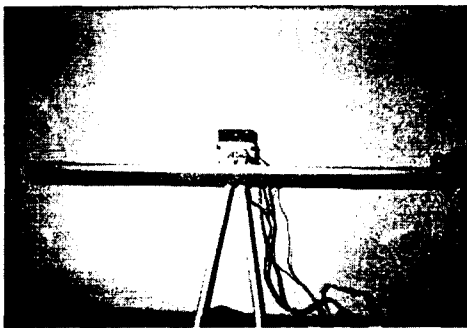
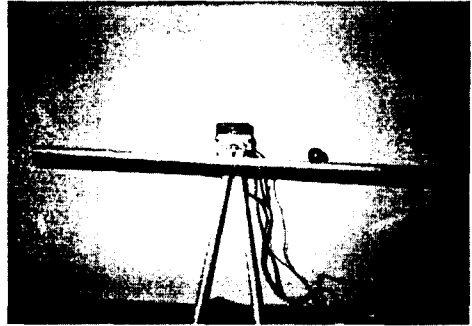


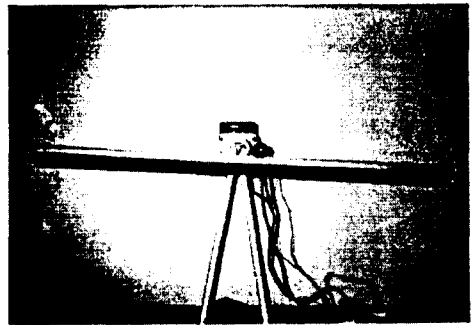
그림 10. 학습 구조를 가진 실제 시스템의 결과(초기 위치 :0.2m 초기 속도:0)  
 Fig 10. Result of Real System with Learning(initial position :0.2m, velocity :0)



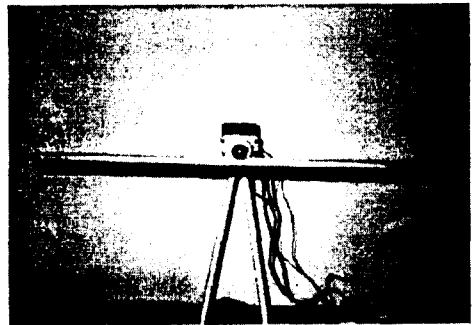
단계: 1



단계: 2



단계: 3



단계: 4

그림 11. 실제 시스템의 동작 모습(초기 위치:0.4m 초기 속도:0)

Fig 11. Actual Experiment(initial position :0.4m, velocity :0)

## 2. 결과 고찰

### i) 시뮬레이션 고찰

그림 7은 자기 학습 구조를 적용하지 않을 때의 시뮬레이션이며, 그림 8은 자기 학습구조를 적용하였을 때의 시뮬레이션 결과이다. 그림 9서 보면 자기 학습 구조를 적용하였을 때 정착 시간(Settling time)이 290 step에서 243 step로 약 10% 정도 개선된 것을 볼 수 있다.

### ii) 실제 실험결과의 고찰

그림 10는 실제 제작한 공과 막대기 시스템의 결과이다. 정상상태에서 약간진동이 있는 것을 알 수 있다.

### iii) 사진에 대한 고찰

그림 11의 사진은 실험의 일부장면을 찍은 사진이다. 막대기의 끝쪽에 공이 놓였을 때 진동이 심하였다. 단계 1~4까지 차례로 4 장면을 보여주고 있으며, 단계 1의 사진에서 보면 막대기의 오른쪽 끝에서 공이 놓여진 후 약 12초후 단계 4의 사진을 보면 가운데(기준점)로 가는 것을 볼 수 있다.

## V. 결 론

일반적인 모델링이 가능한 대상체였지만 이에 대한 정보가 없다고 가정한 다음 불의 위치 예리와 예리의 변화율을 제어 파라미터로 처리하였다. 공의 초기 조건중에 하나인 초기 속도에 비교적 영향을 적게 받았으며, 중심점을 기준으로 0.2m이내의 초기 위치에서도 제어가 잘 실행되었고, 제어가 작동하고 있을 때 외란을 공에 주어도 잘 수렴했다.

퍼지 제어기에 있어서 멤버쉽 함수와 설정은 상당히 중요하다. 이렇게 멤버쉽 함수의 설정을 위해 자기 학습 구조를 적용했으며, 자기 학습 구조를 적용하는 경우와 그렇지 않는 경우는 약 10%의 정착 시간의 차이를 보였다. 다시 말해서 시스템의 표현을 더욱 적절한 멤버쉽 함수로 나타낼 수 있었다.

그림 15에서 보면 정상상태에서 진동이 발생하였는데 가장 큰 원인으로 기어의 오차 때문이었고 그의 오차는 상당히 큰 편이었다.

결론적으로 제어 대상체에 대한 정보가 부족한 상황에서도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었으며, 대상체의 변동에도 적절한 제어가 가능했다. 퍼지 제어기의 성능을 향상시키기 위해, 자기 학습 알고리즘을 적용한 퍼지 제어기를 제안하고, 잘 알려진 플랜트중

의 하나인 공과 막대기(Ball and Beam System)을 직접 제작한 후 이를 통하여 얻은 실험 데이터와 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 얻은 데이터를 고찰한 결과 자기 학습 제어 알고리즘을 가진 퍼지 제어기의 우수함을 입증하였다.

## VI. 추후과제

퍼지 제어기의 설계시 가장 중요한 사항은 멤버쉽 함수의 적절한 설정이다. 이 설정에 대해서는 적절한 이론이 없으며, 제어 대상체에 따라 다르므로 매우 어려운 일이다. 만약 신경회로망에서 사용되는 입력력 데이터를 기초로 하는 학습 이론을 이용한다면, 멤버쉽 함수에 있어 시스템을 표현하는 개개의 라벨을 최적화된 조정으로 할 수 있을 것이며, 성능 평가표를 이용한 경우보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 끝으로 더욱 정밀한 실험을 위해 실험 장치중에서 불의 위치 센서의 정밀도 향상과 기어 부분의 개선이 요구된다.

## 참 고 문 헌

1. H. J. Zimmermann, "Fuzzy Set Theory and Its Applications," 2nd Ed., Kluwer Academic Publishers, 1991.
2. 菅野道夫, "Fuzzy Control System," 大英社, pp. 70-72, 1990.
3. Hamid R. Berenji, "Fuzzy Logic Controllers," in R. R. Yager, L.A. Zadeh editor, An Introduction of Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems, pp.69-96, North Holland, KAP, 1992.
4. C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller Part I," IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, vol. 20, no. 2, pp. 404-418, 1990
5. C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part II," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, vol. 20, no. 2, pp. 419-435, 1990.
6. M. Jamshid, N. Vadiiee, T. T. Ross, "Fuzzy Logic and Control-Software and Hardware Applications," vol. 2, Prentice-Hall, pp.1-8, 1993.
7. 이광형, 오길복, "퍼지 이론 및 응용 II 권: 응용,"

홍릉 과학 출판사, 5-1~5-91, 1991.

8. 이광형, 오길복, "퍼지 이론 및 응용 II 권: 응용," 홍릉 과학 출판사, 6-1~6-68, 1991.

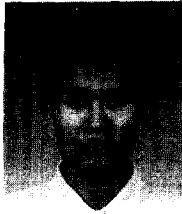
9. Nader Vjeh, "Self Organizing Fuzzy Logic Control of a Control Rig," IEEE International Conf. on Fuzzy Systems, pp. 303-308, San Diego, 1993.

10. Nader Vadiee, "Fuzzy Rule-Based Expert Systems II," in M. Jamshid, N. Vadiee, T. T.

Ross editor, Fuzzy Logic and Control-Software and Hardware Applications, vol. 2, Prentice-Hall, pp.86-111, 1993.

11. Catalogue No. 12-1384N11, "TRE series DC SERVO MOTORS," Tamagawa Seiki CO. LTD., pp.3, 4, 17, 1992.

12. Stephen wolfram, "Mathematica a System for Doing Mathematics by Computer," 2nd Ed., Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1991.



徐榮壽(Young Roh Seo) 정회원  
1969년 7월 25일생  
1992년 2월: 광운대학교 제어계측  
공학과(공학사)  
1994년 2월: 광운대학교 대학원 제  
어계측공학과(공학석  
사)  
1994년 3월~현재: 광운대학교 대  
학원 제어계측공학과  
(박사학위과정)



鄭辰鉉(Chin Hyun Chung) 正會員  
1958년 7월 17日生  
1981년 2월: 延世大學校 電氣工學  
科(工學士)  
1983년 2월: 延世大學校 大學院 電  
氣工學科(工學碩士)  
1990년 5월: Rensselaer Polytech-  
nic Institute (Ph.D)  
1991년 3월~現在: 光云大學校 制御計測工學科 助教授