

퍼지 추론부의 성능 향상에 관한 연구

A Study on the Performance of Fuzzy Inference Engine

우 찬 일 · 신 인 철

(단국대학교 전자공학과)

유 종 상

(대유 공업 전문대 전자계산과)

Chan-Il WOO · In-Chul SHIN

(Dept. of Electronic Engineering, Dan-Kook Univ)

Jong-Sang YOO

(Dept. of Computer Science, Dae-Yoo Junior College)

Abstract

The fuzzy logic controller was used effectively for the controlling of unmeasured parameter and inaccurate mathematical modeling was designed.

In this paper, we proposed that the method of reducing the vibration at the target point on calculating the membership degree about input value without a look-up table was proposed. And its effectiveness in the inverted pendulum was acquired.

1. 서 론

인간이 접하는 모든 자연, 사회현상은 갈수록 복잡해지고 있다. 따라서 복잡한 현상의 문제를 인간이 해결한다는 것은 대부분 사람들이 이해할 수 있는 정도로 문제를 간단히 하여 해결하는 것이다. 그러나, 단순화하는 과정에서 문제에 관련된 정보가 손실 (information loss)되기 마련이다. 복잡한 현상을 단순화시켜 문제로 만들 때 가능하면 정보의 손실을 줄이는 방향으로 연구가 진행되고 있고, 이러한 노력이 진행됨에 따라 일상적으로 많이 사용하는 애매한 표현도 그대로 처리할 필요가 생겼다.

퍼지 이론은 애매한 정보를 이용하여 유용한 정보를 만들기 위한 이론으로, 일반적으로 퍼지제어기는 퍼지화기, 규칙베이스, 퍼지 추론기, 그리고 비퍼지화기의 네 가지 중요한 요소로 구성되어 있다.

이제까지 제안된 제어기법은 제어대상의 정확한 수학적 모델을 얻을 수 있다는 전제 하에 전개되었기 때문에 수학적 모델링이 불가능하거나 모델링이 가능하더라도 정확한 수학적 모델의 수립이 곤란한 계통에 대해서는 적용이 불가능하였고, 또한 정확한 수학적 모델이 구해지는 경우에도 심한 비선형성 또는 시변성을 가질 경우에도 기존 제어 이론의 적용이 곤란하다.

퍼지 추론에 널리 쓰이는 퍼지 관계 합성에 의한 추론법은 한 스텝마다 모든 규칙을 거쳐야 하므로 계산량이 많아진다. 이러한 이유로 계산 시간을 줄이는 방법으로 퍼지화 단계에서 변수들을 양자화하고 제어 규칙들은 룩업 테이블화 하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 룩업 테이블로 제어기 규칙을 설정할 경우 수렴 속도는 빨라지나 수렴 구간에서의 진동이 심하게 된다.

본 논문에서는 룩업 테이블을 사용하지 않고 입력 값의 소속정도를 계산하여 목표 지점에서의 진동과 수렴속도를 줄이는 방법을 제안하며 이것을 역추진형(inverted pendulum) 시스템에 적용하여 그 유용성을 확인하고자 한다.

II. 퍼지집합

종래의 과학계산의 범위는 이분법적으로 “예 또는 아니오”, 논리적으로는 “참 또는 거짓”, 집합 이론인 경우에는 요소(element)가 집합에 속하는가 속하지 않는가를 표시하며, 컴퓨터 수치로 표현시 “0 또는 1” 두 수준 하나를 선택하는 명확한 계산 영역을 가진다. 이것을 수학적 개념으로 크리스프(crisp) 하다고 한다. 그러나 인간의 의사결정은 언어적인 표현으로 명확한 것이 아닌 주관적이며 모호하게 표현하기 때문에 사건, 현상 또는 명제들에 대해 의미가 불명확하고 애매하게 나타난다. 이러한 것을 취급하기 위해 제안된 개념이 퍼지 집합 이론이며, 퍼지 집합 이론은 하나의 값이 아닌 정도(degree)의 개념 즉, 정량적인 것이 아닌 정성적인 것을 말한다. 이러한 퍼지 집합은 언어의 애매성 정도를 0과 1사이의 수로 표현하며, 그러한 애매한 정도를 논리적으로 연산할 수 있어 상당히 인간의 사고에 접근해 있다고 볼 수 있다.

퍼지 집합은 일반적으로 다음과 같이 표현한다.

$$A = \{ x, \mu_A(x) \mid x \in X \}$$

A : 퍼지집합, x : 퍼지집합 A 의 원소, X : 전체집합

$\mu_A(x)$: 집합 A 의 원소인 x 의 소속치로서, $0 \leq \mu_A \leq 1$

퍼지집합 A는 $\mu_A(x)$ 라는 소속함수로 특성이 결정된다.

예를 들면, 집합 A = {전체실수 중에서 100에 근접한 수}는 언어를 통한 의미의 전달은 “근접”이라는 언어의 애매성 때문에 퍼지 집합으로 구성할 경우 이 “근접 (approach)”의 정도를 소속정도(membership degree)로써 표현이 가능하다. 이 예의 경우를 그래프로 보면 그림 2.1과 같이 100을 중심으로 양쪽으로 갈수록 “근접”의 정도를 나타내는 소속치가 작아지는 것을 알 수 있다.

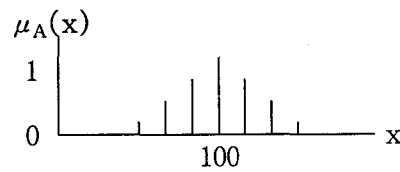


그림 2.1. 100에 근접한 수의 퍼지 집합.

1. 퍼지수(fuzzy number)

퍼지수는 크리스프(crisp)한 수에 가능성을 부여한 수이며 임의의 퍼지집합 A에 다음의 조건으로 제한하며 정규화(normalize)한다.

$$\text{Max } \mu_A(x) = 1 \quad (2.1)$$

또한, 극대 가능성이 산재할 경우 유일한 위치에 최대가능성을 집중시키면 퍼지 집합이 볼록모양(convex)을 이루어야 하고, 퍼지집합이 볼록모양이기 위해서는 임의의 a, b(a < b)에 대해서 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$\mu_A(x) \geq \mu_A(a) \wedge \mu_A(b), \quad \forall x \in [a, b] \quad (2.2)$$

식(2.1)과 식(2.2)의 조건을 만족하면서 소속함수가 연속이면, 이 퍼지 집합을 퍼지수(fuzzy number)라 한다. 이러한 퍼지수에는 삼각형, 종형등 여러 가지 형태를 정의할 수 있다.

2. 퍼지 관계(fuzzy relation)

통상적인 “관계”는 “X는 Y와 같다”라든가 “Y는 X보다 크다”와 같이 분명한 관계를

가리키는데 반하여 “퍼지 관계”는 “X와 Y는 거의 같다”, “Y는 X보다 조금 크다”와 같이 불명확한 관계를 말한다.

퍼지 관계는 퍼지 제어, 진단, 전문가 시스템 등에서 사용하는 IF ~, THEN ~. 조건문을 표현하는 중요한 수단이 되며 퍼지 관계의 합성은 퍼지 추론(fuzzy inference)에서 쓰이는 한 방법이 된다.

퍼지 관계의 정의 : 전체 집합 X, Y가 $X, Y \subseteq R$ 인 집합이고, 각각의 퍼지 집합 A, B를 정의하면 다음과 같다.

$$\text{퍼지집합 } A = \{ (x, \mu(x)) \mid x \in X \}$$

$$\text{퍼지집합 } B = \{ (y, \mu(y)) \mid y \in Y \}$$

여기서 $\mu_R(x, y) = \sum_{i=1}^m \text{Min}[\mu_A(x_i), \mu_B(y_i)]$ 와 같이 표현되며,

이 때 A와 B사이의 퍼지 관계 R은 $X \times Y$ 상의 퍼지 집합을 말하며, 수식화 하면 다음과 같다.

$$R = \{ [(x, y), \mu_R(x, y)], (x, y) \in X \times Y \} \quad (2.3)$$

$$\text{If } \mu_R(x, y) \leq \mu_A(x) \text{ and } \mu_R(x, y) \leq \mu_B(y), \quad \forall (x, y) \in X \times Y$$

서로 다른 퍼지 공간에서의 퍼지 관계는 합성(composition)이라는 연산을 통해서 조합을 이룬다. 이러한 합성의 목적은 임의의 상태에서 일어나는 여러 가지 변수들을 고려함에 있어서 가장 적절하고 타당성 있는 조합을 찾기 위함이다. 퍼지 관계 합성은 Max-Min 합성, Max-Pro 합성, Max-av 합성등이 있고, 일반적으로 퍼지 관계의 합성은 집합 이론에서 적용할 수 있는 연산법칙을 포함해서 반사성(reflexivity), 대칭성(symmetry), 천이성(transitivity)등이 있다.

3. 퍼지 추론(fuzzy inference)

퍼지 논리 제어기의 설계는 인간의 경험과 지식에 기초한 추론과정을 모델링(modeling)하는 것으로 간주할 수 있다. 이와 같은 관점에서 최적의 규칙베이스 설계와 적당한 추론방법(reasoning method)의 결정은 대단히 중요하고, 일반적으로 퍼지 논리 제어기의 규칙베이스는

IF (a set of conditioned are satisfied)

THEN (a set of consequences can be inferred)

과 같은 형태를 갖는다. 여기서 'IF' 이하를 전건부(premise part)라 하고, 'THEN' 이하의 부분을 후건부(consequence part)라 부른다.

퍼지추론방법(fuzzy reasoning method)은 L.A.Zadeh의 일반화된 Modus Ponens 이론을 기반으로 하여 정립되었으며 직접법, 간접법, 혼합법의 3가지로 구분된다.

III. 퍼지 제어기 구성 및 제어규칙

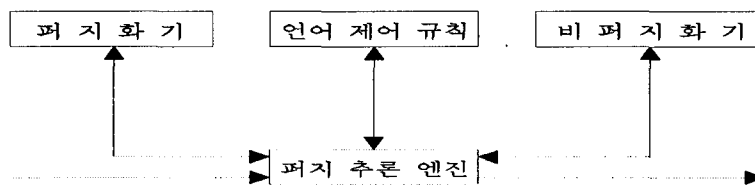
1. 퍼지화(fuzzification)

일반적 형태의 제어기 역할은 오차와 오차의 변화를 받아서 제어 입력을 계산한다. 기존 제어에 있어서는 제어기의 입, 출력이 모두 명확한 값으로 주어지나 퍼지 제어기에서는 입력과 출력이 모두 애매한 퍼지 값으로 주어진다.

FLC(fuzzy logic controller)의 구성요소는 다음 세 가지 요소로 구분된다.

- 언어적 제어규칙의 선정 및 표현.
- 퍼지함축(fuzzy implication)과 퍼지 추론.
- 비퍼지화

FLC의 내부 구조는 다음과 같다.

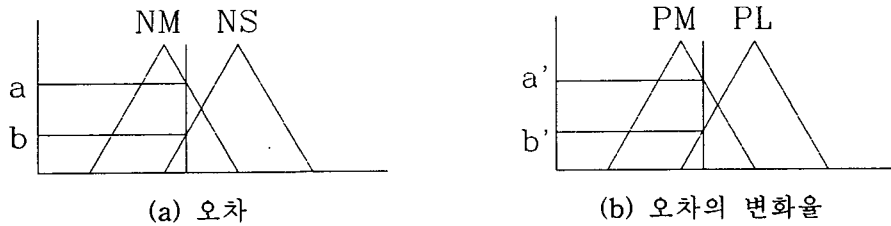


<그림 3.1> 추론부의 구조.

2. 추론(inference)

퍼지화를 통해서 현상태의 오차 값과 오차변화율 값을 위치한 상태와 그 집합 내에서의 소속치를 검출하면 이 두 값을 추론하여 타당한 퍼지값을 얻어야 한다.

1샘플링 주기동안 검출한 오차의 소속함수는 이때 동시에 검출된 모든 오차변화율의 소속함수에 대응 되어야하며 임의의 샘플링 주기때 발생한 오차와 오차변화율이 그림 3.2와 같이 계산된다



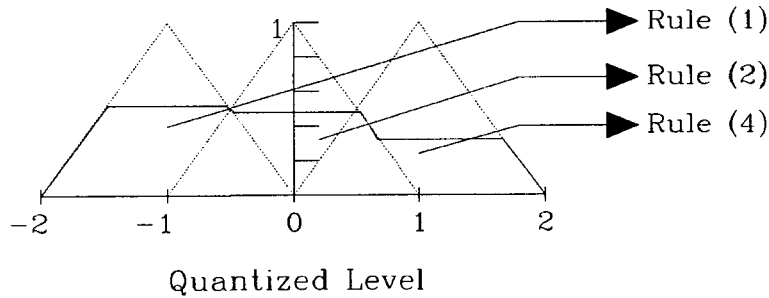
<그림 3.2> 검출된 오차와 오차변화율.

3. 비퍼지화(defuzzification)

추론과정을 거쳐 대응된 출력의 소속함수는 다수가 겹쳐진 퍼지값이므로 실제 플랜트에 사용하기 위해선 비퍼지화 과정을 거치게 된다.

많이 쓰이는 비퍼지화로는 무게중심법(center of gravity method)을 구하는 방법과 최대치 평균(mean of maximum)을 구하는 방법이 사용된다.

본 논문에서는 계산시간이 다소 걸리나 성능이 우수한 무게중심법을 사용하였다.



<그림 3.3> 무게중심법에 의한 제어 입력 결정.

무게중심법을 구하는 방법의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \mu_u(i)}{\sum_{i=1}^n \mu_u(i)} \quad (3.1)$$

여기서, Y : centroid.

μ_i : 결과 부의 값.

$\mu_v(i)$: 결과 부의 소속함수.

IV. 역추 균형 퍼지제어

1. 역추 균형 제어 시스템

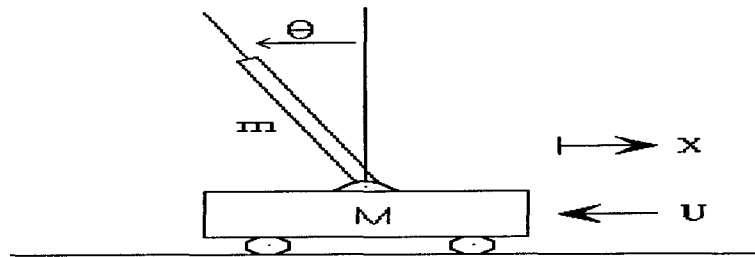
본 논문에서는 퍼지 이론을 사용하여 규칙을 설정하고, 상태의 변화를 규칙에 적용시켜 필요한 제어입력(control input)을 출력하고자 한다. 역추 균형 제어 시스템의 수학적 표현은 다음과 같이 구성된다.

$$(M + m) \ddot{x} + m l \ddot{\theta} \cos \theta - m l \dot{\theta}^2 \sin \theta = -U$$

$$\frac{4}{3} m l^2 \ddot{\theta} + m l \ddot{x} \cos \theta - mg l \sin \theta = 0$$

여기서, M : 마차의 무게, m : 막대의 무게

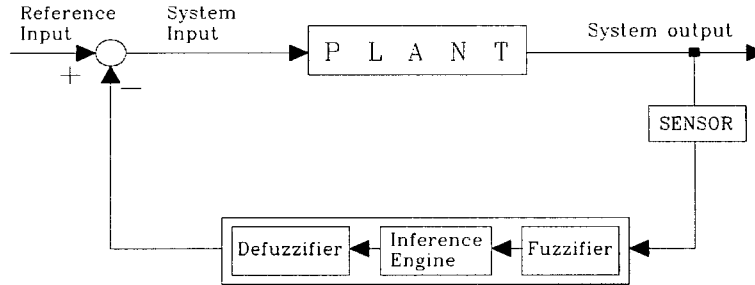
l : 막대의 길이, X : 움직인 거리



<그림 4.1> 역추 균형 제어시스템.

센서를 통해 얻어진 현 상태가 검출된 오차와 오차의 변화율이 해당되는 구간에 따라 추론을 거쳐 최적의 제어 입력을 출력시켜 균형을 잡는다. 역추계의 비선형 2계 미방은 Z-transform을 이용하여 풀었다.

본 논문에서는 시간과 정밀도를 절충하여 두입력 변수의 언어적 집합의 갯수를 7개, 출력 변수의 언어적 집합의 갯수도 7개로 구성하고, 39개의 룰과 15개의 룰을 사용하여 플랜트의 출력에 미치는 영향을 살펴보았다.



<그림 4.2> 퍼지 컨트롤러.

플랜트의 상태 조건은 다음과 같다.

초기 입력 범위 : -10도 ~ +10도

샘플링 주기 : 0.01초

수렴 구간 : -0.3도 ~ +0.3도

동작 시간 : 15초

V. 모의실험 및 결과

본 논문에서는 물의 변화를 중심으로 양자화 범위를 설정하는데 있어서의 변화를 역추 균형 제어시스템에 적용하였다.

실험에 사용한 입력은 에러와 에러의 변화율이고, 2개의 물을 테이블화 하면 다음과 같다.

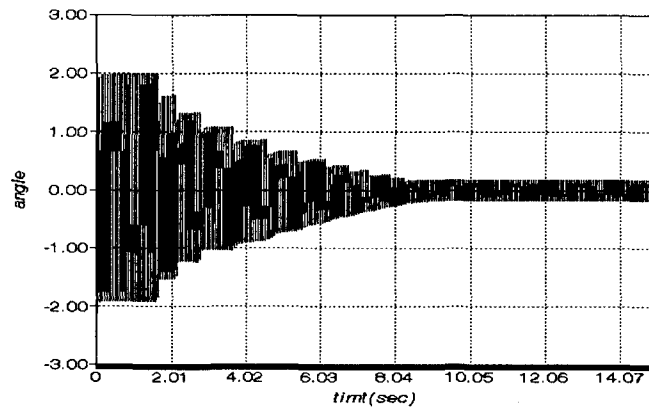
<표 5.1> 실험에 사용한 룰베이스

ERROR								ERROR							
	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PM		NS	NM	ZE	NL	PL	PL	PM		NS	NL	NL
NM	PL	PL		PS		ZE	NM	NM	PL	PL		PS		NL	NL
NS	PL	PM	PM		ZE	NM	NM	NS	PL	PL	PM		ZE	NL	NL
ZE	PM	PM		ZE		NM	NM	ZE	PL	PL		ZE		NL	NL
PS	PM	PM	ZE		NM	NM	NL	PS	PL	PL	ZE		NM	NL	NL
PM	PM	ZE		NS		NL	NL	PM	PL	PL		NS		NL	NL
PL	ZE	PM	PS		NM	NL	NL	PL	PL	PL	PS		NM	NL	NL

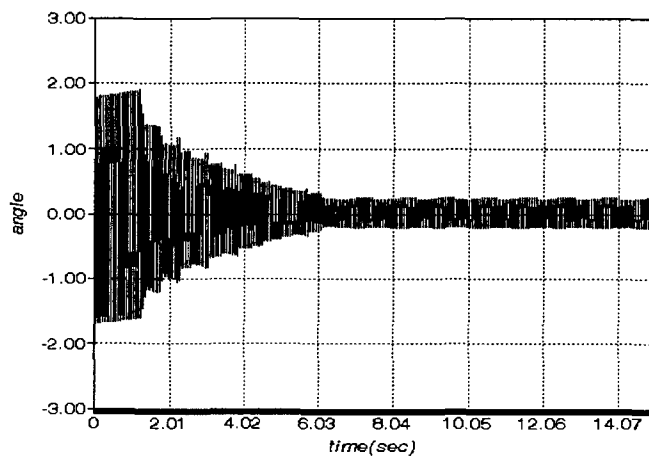
39개의 룰

15개의 룰

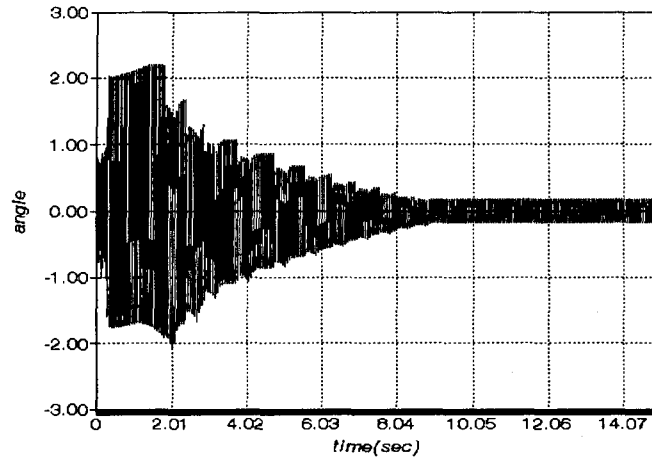
가로 방향은 에러의 언어변수를 나타내고 세로 방향은 에러 변화의 언어변수를 나타낸다. 본 논문에서는 위에서 제시한 룰을 기본으로 양자화 범위를 조절하여 플랜트에 미치는 영향을 살펴 보았다.



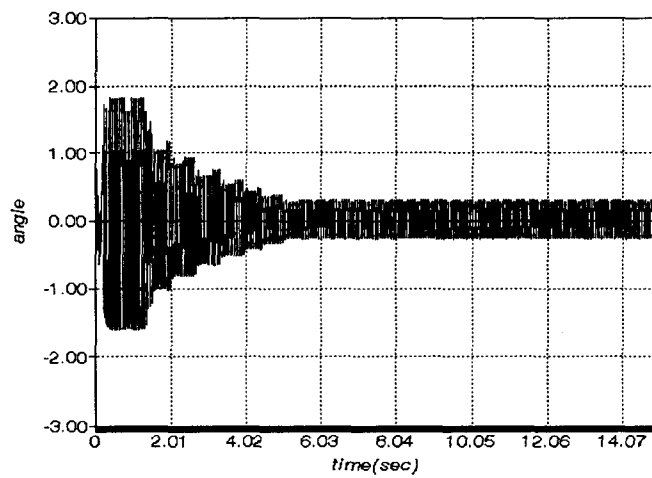
<그림 5.1> 15개의 룰과 [-4, 4]의 양자화 범위를 4도로 나타낸 결과.



<그림 5.2> 15개의 룰과 [-8, 8]의 양자화 범위를 4도로 나타낸 결과.



<그림 5.3> 39개의 룰과 $[-4, 4]$ 의 양자화 범위를 4도로 나타낸 결과.



<그림 5.4> 39개의 룰과 $[-8, 8]$ 의 양자화 범위를 4도로 나타낸 결과.

<표 5.2> 실험 결과를 표로 나타낸 경우.

물의 갯수	양자화 범위	입력각	수렴 속도	수렴 구간	진 동	비고
15	[-4, 4]	4	8.12	최고 : 0.19 최저 : -0.01	일 정	C
15	[-8, 8]	4	6.07	최고 : 0.24 최저 : 0.00	불규칙	B
39	[-4, 4]	4	8.31	최고 : 0.18 최저 : -0.02	일 정	C
39	[-8, 8]	4	5.77	최고 : 0.27 최저 : 0.00	거 의 일 정	A

주관적 등급

A : 수렴 속도가 빠르고, 진동이 일정한 경우.

B : 수렴 속도는 빠르나, 진동이 불규칙한 경우.

C : 수렴 속도는 느리나, 진동이 일정한 경우.

주관적 등급은 수렴 속도와 진동을 고려하여 A ~ C의 3가지 등급으로 나누어 나타내었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 수학적 모델링이 정확하지 않은 계통 및 파라미터의 측정이 불가능한 계통의 제어에 효과적으로 사용될 수 있는 퍼지논리 제어를 설계하였다. 퍼지 추론 알고리즘은 추론시 많은 계산 시간이 소모되므로 룩업테이블(look-up table)화 하는 방법을 사용하고 있으나 수렴 구간에서의 진동이 심하게 나타나게 되므로 본 논문에서는 양자화 레벨의 조절과 물에 의한 빠른 수렴 속도와 수렴 구간에서의 진동을 줄이는 방법을 제안하였다. 이와 같은 방법으로 역추 균형 제어 시스템에 적용시켜 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Ghassan M.Abdelnour, "Design of a Fuzzy Controller Using Input and Output Mapping Factors," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol.21, no.5.
- [2] Y.F.Li and C.C.Lau "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," IEEE Robotics and Automation, April 1989.
- [3] CHUEN CHIEN LEE, "Fuzzy Logic in Control System : Fuzzy Logic Controller Part I • II," IEEE Trans. Syst. Man. Cybern., vol.20, no.2.
- [4] M. Jamshidi, N. Vadiiee, and T.J.Ross, "Fuzzy Logic and Control," Prentice-Hall, Inc, 1993.
- [5] 이광형, 오길록, "퍼지이론 및 응용 I • II," 홍릉과학 출판사, 1991.
- [6] Chun-Shin Lim and Hyongsuk Kim, "CMAC-BASED Adaptive Critic Self-Learning Control," IEEE Trans. Neural Net., vol.2, no.5.
- [7] Gene F.Franklin, "Feedback Control of Dynamic Systems,"2nd Edition. Press Addison Wesley. pp 24-27.
- [8] Bart Kosko. "Neural Networks and Fuzzy Systems,"Press Prentice-Hall, INC.