

퍼지논리를 이용한 적응제어기의 성능 개선에 관한 연구

• 류근배 이진영 양해원

한양대학교 전기공학과

Performance Improvement Using Fuzzy Logic In Adaptive Control

• Keun-Bae Ryu, Keon-Young Yi, Hai-Won Yang

Dept. of Electrical Eng. Han Yang Univ.

Abstract

This paper presents a new adaptive structure with fuzzy logic applied to adaptive controller. In the conventional adaptive control, good performance cannot be expected due to the adaptation gain of gradient algorithm fixed as a constant. To change adaptation gain properly, fuzzy rules, which are based on the output error and its rate of change, have been established. The proposed fuzzy adaptive law shows fast parameter convergence and improved performance. The fuzzy logic base is added to the conventional adaptive structure and little additional computation time is required.

1. 서론

적응제어(Adaptive Control)는 미지의 플랜트 및 그 주위 환경에 대하여 적절하게 조정될 수 있는 제어기를 도입함으로써 바람직한 특성을 실현하는 것을 목적으로 하고 있다.

기본모델 적응제어(MRAC)는 기준입력에 대하여 플랜트의 출력이 주어진 기본모델의 출력을 추종하여 원하는 출력특성을 얻도록 하는 것이다. 이를 위해서 플랜트의 출력과 기본모델의 출력을 비교하고 이 오차를 이용하여 제어기의 파라미터를 알맞게 조절한다. 제어기 파라미터 설계를 위한 추정알고리즘은 미분방정식으로 표현되며, 많은 양의 계산시간을 요한다. 추정 방법으로는 gradient 알고리즘과 최소자승법(least squares method)이 있다[1]. gradient 알고리즘은 간단하고 계산양도 적은 편이지만 파라미터 수렴속도면에서의 성능은 그다지 만족스럽지 못하다. 최소자승법은 성능은 매우 우수하지만 계산부담이 큰 것이 단점이다.

퍼지집합이론(Fuzzy Set Theory)이 인간의 사고나 그 표현 언어의 모호성 처리에 대한 이론적 바탕을 제공하면서 이 이론을 여러 분야에 응용하고자 하는 시도가 활발히 이루어지고 있다. 자동제어에 인간의 지능 또는 사고방식을 도입하려는 의도로 연구되고 있는 퍼지논리제어(Fuzzy Logic Control)는 기존의 제어알고리즘에서는 필수적인 수학적 모델이 잘 정의되지 않는 공정에 대해서 효과적인 방법이며, 실제 응용사례도 증가하고 있다. 또한 퍼지논리제어가 갖는 장점을 서보 시스템과 같은 정밀제어 분야에 적용하기 위한 연구[5]가 있지만, 아직 실제 구현에는 많은 연구가 필요한 상태이다. 이에 비해 기존의 제어알고리즘에 퍼지논리를 연관시키는 방법[6]은 안정도가 보장되면서 성능의 개선을 얻을 수 있는 장점이 있다.

본 논문은 적응제어기의 성능을 개선할 수 있도록 하기 위해 퍼지 이론의 적용가능성을 고찰한다. 제안된 퍼지적응제어기는 기존의 기본모델적응제어기의 구조는 그대로 유지하고 gradient 알고리즘의 적용이득값 변화에만 퍼지논리가 적용되므로 그 구조가 간단하며, 추가되는 계산부담은 비교적 적다.

2. 기본모델 적응제어 시스템

2.1 파라미터 추정 알고리즘

플랜트의 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$W_p(s) = h_p T(sI - A_p)^{-1} b_p = k_p \frac{Z_p(s)}{R_p(s)} \quad (1)$$

여기서, $R_p(s)$ 는 n 차 monic 다항식이고 $Z_p(s)$ 는 $m(s < n-1)$ 차 monic 다항식이며, 각각의 계수 및 고주파이득 k_p 는 미지이다. 플랜트에 대한 가정은 다음과 같다.

가정: 1) k_p 의 부호

2) $R_p(s)$ 의 차수의 상한 n

3) 상대차수 $n^* (= n-m)$

둘을 알고 있는 것으로 하고,

4) $Z_p(s)$ 는 안정한 다항식이다.

기본모델의 입력 $r(t)$ 는 유계(bounded)이며 출력은 $y_m(t)$ 이다. 기본모델의 전달함수는

$$W_m(s) = k_m \frac{Z_m(s)}{R_m(s)} \quad (2)$$

이며 $Z_m(s)$, $R_m(s)$ 는 각각 $m_1(s < m)$, n 차의 monic 안정한 다항식이며, k_m 은 상수이다.

제어목적은 플랜트에의 적절한 유계입력 $u(t)$ 를 발생시켜 플랜트와 기본모델간의 출력오차가 0이 되도록 하는 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_p(t) - y_m(t)| = 0 \quad (3)$$

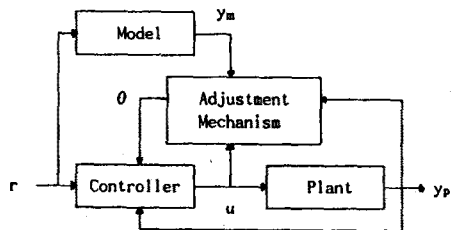


그림 1. 적응제어시스템

적용제어시스템의 구조는 그림1과 같다. 제어기는 2n개의 조정가능한 파라미터와 보조신호 발생기로 구성된다. 제어입력은 기준입력 r(t), 플랜트출력 y_p(t) 및 보조신호벡터 ω₁(t), ω₂(t)와 파라미터벡터 θ(t)에 의해 다음과 같이 구성된다.

$$u(t) = \theta^T(t) \omega(t) \quad (4)$$

여기서

$$\omega^T(t) = [r(t), \omega_1^T(t), y_p(t), \omega_2^T(t)]$$

$$\theta^T(t) = [k_0(t), \theta_1^T(t), \theta_0(t), \theta_2^T(t)]$$

이다.

보조신호 ω₁(t)과 ω₂(t)의 발생은 다음과 같이 (n-1)차 벡터미분방정식

$$\dot{\omega}_1(t) = \Lambda \omega_1(t) + bu(t)$$

$$\dot{\omega}_2(t) = \Lambda \omega_2(t) + by_p(t) \quad (5)$$

으로 기술되며 Λ는 (n-1)×(n-1)의 안정한 행렬이다.

전체시스템은

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda & 0 \\ bhp^T & 0 & \Lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_p \\ b \\ 0 \end{bmatrix} \theta^T \omega$$

$$y_p = hp^T x_p \quad (6)$$

으로 쓸 수 있으며, θ(t) = θ* + φ(t)로부터 식(7)은

$$\dot{x} = Acx + bc [k_0^* r(t) + \phi^T(t) \omega(t)]$$

$$y_p = hc^T x \quad (7)$$

와 같이 쓸 수 있다.

여기서

$$x = [x_p^T, \omega_1^T, \omega_2^T]^T$$

$$Ac = \begin{bmatrix} A_p + b_p \theta_0^* h_p^T & b_p \theta_1^* h_p^T & b_p \theta_2^* h_p^T \\ b \theta_0^* h_p^T & \Lambda + b \theta_1^* h_p^T & b \theta_2^* h_p^T \\ bhp^T & 0 & \Lambda \end{bmatrix}$$

$$hc = [h_p^T, 0, 0]^T$$

이다.

φ(t) = 0 즉 θ(t) = θ* 이면 식(7)이 기준모델을 나타내는 것으로 볼 수 있게 되는 참값 θ*가 존재한다. 따라서, 기준모델과 플랜트사이의 출력오차는 다음과 같은 방정식

$$\dot{e} = Ace + bc [\phi^T(t) \omega(t)]$$

$$e_1 = hc^T e \quad (8)$$

로 표현되며, φ^T(t)ω(t)와 e₁(t)와의 관계는 다음의 전달함수로 주어진다.

$$W_e(s) = hc^T (sI - Ac)^{-1} bc = \frac{k_p}{km} W_m(s) \quad (9)$$

식(3)의 제어목적은 이루기 위해서는 제어기 파라미터를 추정해야 한다. 가장 간단한 경우 즉 k_p의 부호가 양이고 상대차수 n*가 1이면 식(10)의 전달함수가 strictly positive real(SPR)이 되도록 선정될 수 있으므로 제어기의 파라미터를

$$\dot{\theta}(t) = -\gamma e_1(t) \omega(t), \gamma > 0 \quad (10)$$

에 의하여 추정하면 Kalman-Yakubovich lemma[2]로부터 θ(t)와 ω(t)가 유계이며 t→∞에 따라서 e₁이 0으로 수렴하는 것이 증명된다.

n*가 2 이상인 경우에는 식(9)가 SPR 되도록 할 수 없으므로 다른 방법이 필요하다. 특히 n*가 2일 때 W_m(s)L(s)가 SPR 하도록 하는 다항식 L(s)를 선택하면 제어입력은 다음과 같이 결정된다.

$$u(t) = \theta^T(t) \omega(t) - e_1(t) \bar{\omega}^T(t) \bar{\omega}(t) \quad (11)$$

여기서, $\bar{\omega}(t) = L^{-1} \omega(t)$ 이며, 식(10)은

$$\dot{\theta}(t) = -\gamma e_1(t) \bar{\omega}(t), \gamma > 0 \quad (12)$$

로 수정된다.

2.2 파라미터 수렴속도

식(10), 식(12)과 같은 형태의 파라미터 추정방법을 gradient 알고리즘이라 한다. 여기서 적응이득 γ는 적응속도를 결정하는 요소이며, 그 값은 임의의 양수로 선택될 수 있다. 그러나 실제로는 빠른 파라미터 수렴을 위한 적절한 값을 결정하기는 어려우며, 대부분의 경우 매우 느린 수렴특성을 보인다. 최소자승법은 이러한 문제를 해결하기 위하여 적응이득 값을 시간에 따라 연속적으로 변화 시키는 방법이다. 이 방법은 gradient 알고리즘에 비해 일정한 수렴특성을 보인다. 그러나 미분방정식의 계산부담이 매우 커지므로 이의 해결이 적응제어의 실시간 구현을 위한 문제중의 하나이다.

3. 퍼지 알고리즘

3.1 퍼지규칙의 설계

먼저, 플랜트 출력이 기준모델의 출력을 추종하는 경우의 출력오차 상태를 그림 2와 같이 가정한다.

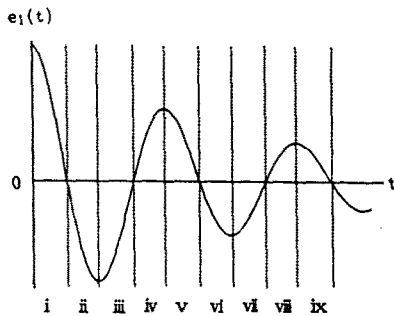


그림 2. 출력오차

설계원칙은 다음과 같이 정할 수 있다.

I) 구간 i, iii, v, vii, ix

플랜트출력이 모델의 출력쪽으로 접근하고 있는 경우로 출력오차의 절대크기가 작아짐에 따라 감소변화를 고려하여 적응이득값은 작은값을 취한다.

II) 구간 ii, iv, vi, viii

플랜트출력이 기준모델의 출력에서 벗어나고 있는 경우로 출력오차의 절대크기와 그 증가율에 비례하여 적응이득값을 크게 조정해준다.

퍼지규칙(Fuzzy Rule)은 IF-THEN 으로 연결된 조건문(condition)과 동작문(action)으로 구성된다. 예를 들어, 위의 설계원칙을 고려하여 2입력 1출력의 규칙을 세워보면 다음과 같이 된다.

IF the output error is positive big
and the change in output error is positive big.
THEN the change in gain is positive big.

IF the output error is negative near zero
and the change in output error is negative big.
THEN the change in gain is positive medium.

규칙의 정성적 표현을 정량화 하기위해 다음과 같이 언어적인 값(linguistic value)을 설정한다.

- PB positive big
- PM positive medium
- PS positive small
- PZ positive near zero
- NZ negative near zero
- NS negative small
- NM negative medium
- NB negative big

이 언어적인 값들은 전체집합(universe of discourse) U 에 대하여 퍼지부분집합(Fuzzy Subset)을 이룬다.

output error(E*), change in output error(CE*), change in adaptation gain(CG*) 등의 언어적 변수(linguistic variable)에 대한 각각의 용어집합(Term Set) T 를 정의하면,

$$T(E^*) = \{ PB, PM, PS, PZ, NZ, NS, NM, NB \}$$

$$T(CE^*) = \{ PB, PM, PS, PZ, NZ, NS, NM, NB \}$$

이 되고, 적응이득값은 항상 양의 값을 갖도록 하므로

$$T(CG^*) = \{ PB, PM, PS, PZ \}$$

로 결정한다.

퍼지규칙은 다음과 같이 언어적 변수간의 관계(relation)로 정의될 수 있다.

$$R^* : E^* \times CE^* \rightarrow CG^* \quad (13)$$

완성된 퍼지규칙을 표 1에 나타내었다.

표 1. 퍼지규칙
Change in Error

		NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
E r r o r	NB	PB	PB	PM	PM	PS	PZ	PZ	PZ
	NM	PB	PM	PS	PS	PZ	PZ	PZ	PZ
	NS	PM	PM	PS	PZ	PZ	PZ	PZ	PZ
	NZ	PM	PS	PZ	PZ	PZ	PZ	PZ	PZ
	PZ	PZ	PZ	PZ	PZ	PZ	PS	PM	PM
	PS	PZ	PZ	PZ	PZ	PS	PM	PM	PM
	PM	PZ	PZ	PS	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	PZ	PZ	PM	PM	PM	PB	PB	PB

3.2 Lookup Table 의 완성

전체집합 U는 이산적인 정량화 레벨(Quantization Level)들을 원소로 갖도록 한다.

$$U = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

모든 출력오차, 출력오차변화, 이득변화는 이 14개의 레벨들도 정량화되도록 한다.

집합 U의 요소들이 각각의 퍼지부분집합에 속하는 정도를 나타내는 소속함수(membership function)는 표 2 와 같이 이산적형태로 정의한다.

표 2. 소속함수

Linguistic Fuzzy Sets	Quantization Levels													
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	0	1	2	3	4	5	6
NB	1	.7	.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NM	.3	.7	1	.7	.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	.3	.7	1	.7	.3	0	0	0	0	0	0	0
NZ	0	0	0	0	.3	.7	1	0	0	0	0	0	0	0
PZ	0	0	0	0	0	0	0	1	.7	.3	0	0	0	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	.3	.7	1	.7	.3	0	0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	.3	.7	1	.7	.3	0
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.3	.7	1	0

정량화된 입력 E 와 CE 에 대하여 퍼지규칙과 소속함수를 이용한 출력 CG 의 결정은 다음과 같은 관계 R 로 정의할 수 있다.

$$R : E \times CE \rightarrow CG \quad (14)$$

출력 CG 의 결정을 위한 방법으로 무게중심법(Center of Gravity : COG)을 사용하였다. 각각의 규칙에 의한 출력의 소속값은 다음과 같이 정의한다.

$$W_{11} = \min(\mu_{NB}(E), \mu_{NB}(CE))$$

$$W_{12} = \min(\mu_{NB}(E), \mu_{NM}(CE))$$

$$W_{88} = \min(\mu_{PB}(E), \mu_{PB}(CE)) \quad (15)$$

CG는 다음 공식으로 계산된다.

$$CG = \frac{\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^8 CG_{ij} W_{ij}}{\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^8 W_{ij}} \quad (16)$$

여기서 CG_{ij}는 ij번째 규칙에 의한 출력의 대표값이다.

모든 가능한 입력쌍에 대한 출력값을 계산하여 Lookup Table을 작성한다. 완성된 Lookup Table 을 표 3에 보였다. 식 (16)에 의한 결과는 레벨간격 1로 조정되었다.

표 3. Lookup Table

		CE													
		-6	-5	-4	-3	0	0	-0	0	1	2	3	4	5	6
E	-6	6	6	5	5	4	4	4	3	2	1	1	0	0	0
	-5	6	6	5	5	4	4	3	2	2	1	1	0	0	0
	-4	5	5	4	4	3	3	2	1	1	1	0	0	0	0
	-3	5	5	4	3	3	3	2	2	1	1	0	0	0	0
	-2	4	4	3	3	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0
	-1	4	4	3	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	-0	4	3	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	3	4
	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	4	4	4
	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	3	4	4
	3	0	0	0	0	0	1	1	2	2	3	3	4	5	5
	4	0	0	0	0	1	1	1	2	3	3	4	4	5	5
	5	0	0	0	1	1	2	2	3	4	4	5	5	6	6
	6	0	0	0	1	1	2	3	4	4	5	5	6	6	6

3.3 적응이득값의 결정

연속시간 시스템에서 적응이득은 일정시간 간격에 따라 주기적으로 결정되도록 해야한다. 그러므로, 출력에 대한 샘플링이 필요하며, 주기 T로 샘플링된 출력오차 e*(t)와 e*(t-T)와의 차이로 시간 t에서의 출력오차변화 Δe*(t)를 구한다.

샘플링된 출력오차 e*(t)와 출력오차변화 Δe*(t)를 정량화된 전체집합 U로 mapping 하기 위해서는 이산화(discretization) 과정이 필요하다. 즉 측정값 e* 와 Δe* 는 각각 이산화함수 q1 과 q2 에 의해 전체집합 U 내의 레벨들로 정량화 된다. 이때 e* 와 Δe* 는 scale factor k1, k2 에 의해 각각 scaling 되어 함수에 대입된다. q1, q2 는 그림 3과 같은 성질을 갖으며 표 4 와 같이 정하였다.

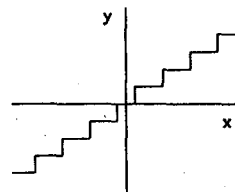


그림 3. 이산화 함수

표 4. Scaling Mapping

$k_1 e^*$ 범위	$k_2 \Delta e^*$ 범위	Level
$k_1 e^* < -0.5$	$k_2 \Delta e^* < -0.05$	-6
$-0.5 \leq k_1 e^* < -0.4$	$-0.05 \leq k_2 \Delta e^* < -0.04$	-5
$-0.4 \leq k_1 e^* < -0.3$	$-0.04 \leq k_2 \Delta e^* < -0.03$	-4
$-0.3 \leq k_1 e^* < -0.2$	$-0.03 \leq k_2 \Delta e^* < -0.02$	-3
$-0.2 \leq k_1 e^* < -0.1$	$-0.02 \leq k_2 \Delta e^* < -0.01$	-2
$-0.1 \leq k_1 e^* < -0.01$	$-0.01 \leq k_2 \Delta e^* < -0.001$	-1
$-0.01 \leq k_1 e^* < 0$	$-0.001 \leq k_2 \Delta e^* < 0$	0
$0 \leq k_1 e^* \leq 0.01$	$0 \leq k_2 \Delta e^* \leq 0.001$	0
$0.01 < k_1 e^* \leq 0.1$	$-0.001 < k_2 \Delta e^* \leq 0.01$	1
$0.1 < k_1 e^* \leq 0.2$	$-0.01 < k_2 \Delta e^* \leq 0.02$	2
$0.2 < k_1 e^* \leq 0.3$	$-0.02 < k_2 \Delta e^* \leq 0.03$	3
$0.3 < k_1 e^* \leq 0.4$	$-0.03 < k_2 \Delta e^* \leq 0.04$	4
$0.4 < k_1 e^* \leq 0.5$	$-0.04 < k_2 \Delta e^* \leq 0.05$	5
$0.5 < k_1 e^*$	$k_2 \Delta e^* < 0.05$	6

Lookup Table로부터 구해진 CG 값은 scale factor k_3 에 의해 scaling 되어 실제 이득변화 $\Delta\gamma$ 가 얻어지며, 상수 γ_0 와 합의 식(10) 또는 식(12)에 주기적으로 대입된다.

$$\gamma(t) = \gamma_0 + \Delta\gamma(kT), \quad kT \leq t < (k+1)T, \quad k \text{는 정수 (17)}$$

고정된 scale factor k_3 에 대해 적응이득의 변화범위는

$$\gamma_0 \leq \gamma(t) \leq \gamma_0 + k_3 \times 6 \quad (18)$$

이 된다.

그림 4에 이득결정과정의 블록선도를 나타내었다.

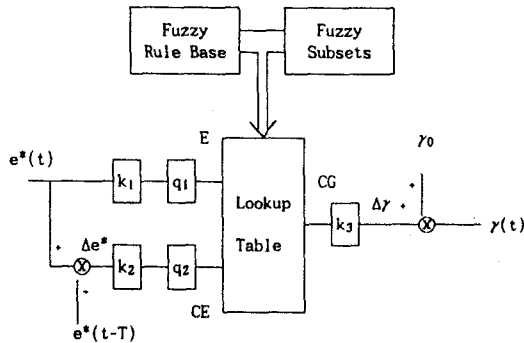


그림 4. 이득결정과정의 블록선도

3.4 scale factor 및 주기의 선택

scale factor k_1 와 k_2 는 실제발생하는 출력오차와 그 변화율이 전체집합 U로 mapping 될 수 있도록 선택해야 한다. k_1, k_2 를 너무 크게 정할 경우 작은 범위의 출력오차 및 그 변화에도 적응이득이 무리하게 변할 수 있으며, 너무 작게 결정될 경우는 퍼지규칙의 적용폭이 작아져 적응이득이 알맞게 변화되지 않을 수 있다. 그러므로 플랜트에 대한 사전정보와 기준입력 및 기준모델의 변화범위등을 고려해야 하며, 고정된 적응이득에 대한 출력특성을 사전에 관측하는 것이 바람직하다. k_3 는 식(18)의 적응이득 변화범위를 고려하여 결정할 수 있다.

이득결정 주기 T는 출력오차와 그 변화율을 고려하여 결정되어야 한다. 크게 선택할수록 오차변화에 대한 대응효과는 감소되며, 너무 크게 되면 큰 적응이득값의 지속으로 바람직하지 못한 결과가 발생할 수 있다. 짧게 선택할수록 오차변화에 대한 대응이 신속해지므로 출력특성 및 수렴특성은 향상될 수 있다. 그러나 극단적으로 짧은 경우에는 제어입력의 시간당 변화가 그만큼 커지는 단점이 있다.

위의 사항을 고려하여 scale factor와 주기 T가 결정되어야 하며, 적절한 범위내에서는 임의의 선택에 대해서도 성능개선을 기대할 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션에 사용할 2차플랜트와 기준모델의 전달함수는 각각 다음과 같이 선정하였다. 파라미터가 참값으로 수렴을 하는 것을 보장하기 위해 sufficiently rich한 기준입력을 설정하였다.

$$W_p(s) = \frac{1}{s(s-1)}, \quad W_m(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1}$$

$$r(t) = 10 \cos(t) + 50 \cos(5t)$$

제어입력은 식(11)에 의해 결정되며, 파라미터는 식(12)로 추정된다. 다항식 $L(s) = s + 1$ 로 하였고, $\lambda = 1, b = 1$ 이다. γ_0 는 0.5이며, 0.01초마다 $\gamma(t)$ 를 결정하도록 하였다. 계산된 파라미터의 참값은 $k_0^* = 1, \theta_0^* = -7, \theta_1^* = -3, \theta_2^* = 6$ 이다.

scale factor k_1, k_2, k_3 는 다음과 같이 선택하였다.

- (1) $k_1 = k_2 = k_3 = 1.$
- (2) $k_1 = k_2 = k_3 = 5.$
- (3) $k_1 = k_2 = k_3 = 10.$

그림 5는 위의 3가지 경우에 대한 각각의 파라미터오차 벡터 norm $\|e\|$ 를, 적응이득을 0.5로 고정시킨 기존의 MRAC와 비교한 것이다. 어느 경우에도 기존의 MRAC보다 향상된 수렴특성을 보인다.

scale factor를 (2)로 정하였을 경우의 출력특성 및 파라미터변화를 그림6-11에 나타내었다.

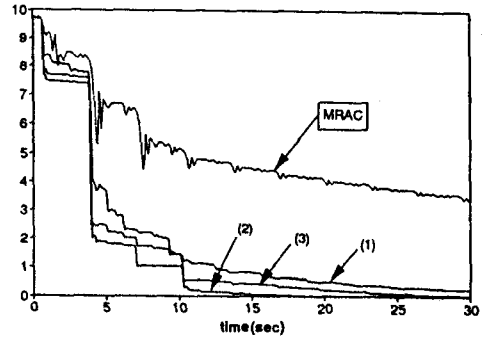


그림 5. 파라미터 오차 $\|e\|$

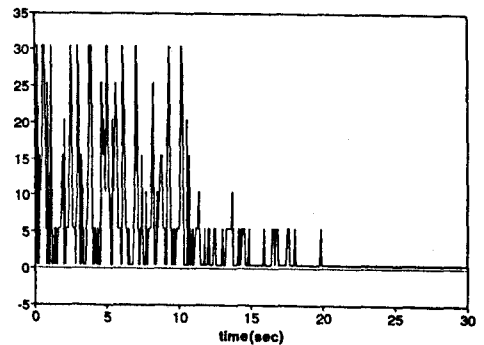


그림 6. 적응이득

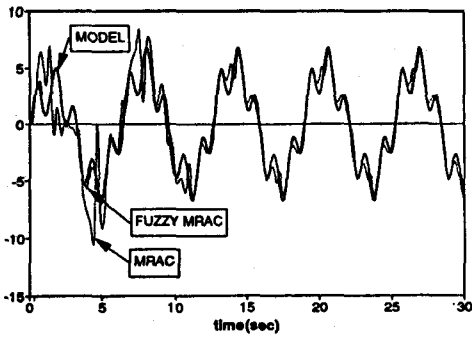


그림 7. 출력

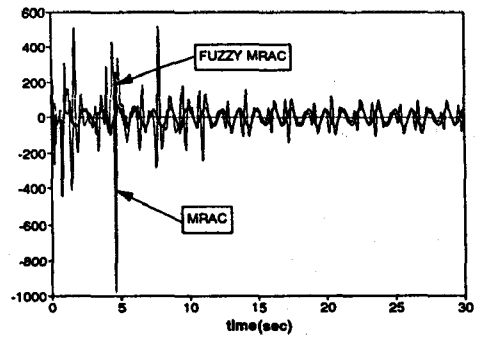


그림 11. 제어입력

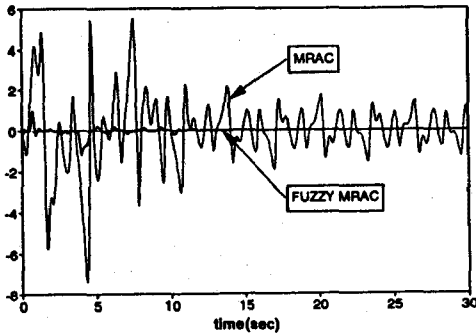


그림 8. 출력오차

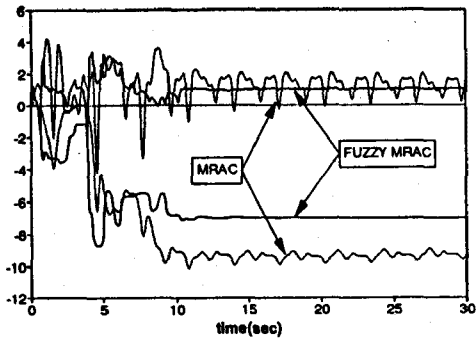


그림 9. 파라미터 k_0, θ_0

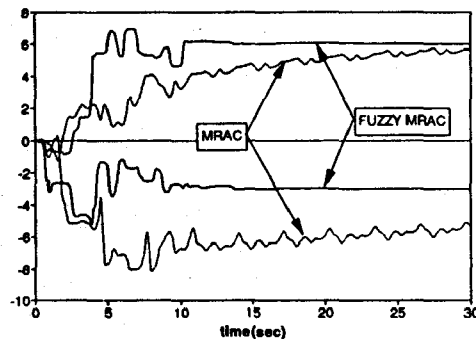


그림 10. 파라미터 θ_1, θ_2

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 본 논문에서 제안된 퍼지 MRAC 는 매우 향상된 출력특성을 보였으며, 제어입력도 기존의 경우보다 작은 범위내로 한정되었다. 파라미터들도 매우 빠른 속도로 각각의 참값으로 수렴함을 볼 수 있다.

5. 결론

적용제어시스템에 대해 퍼지논리를 적용한 퍼지적용제어의 가능성을 살펴보았다. 시뮬레이션결과에서 볼 수 있는 바와 같이 퍼지논리를 이용한 적응이득의 변화로 출력특성 및 파라미터 수렴특성에서 모두 뚜렷한 개선을 보였다. 또한 주기적으로 이루어지는 출력오차 및 그 변화의 정량화과정과 Lookup Table 을 이용해서 적응이득의 변화값을 결정하는 데 필요한 추가적인 계산부담은 비교적 적다. scale factor 의 선택에 따라 다른 특성변화를 보일 수 있지만 적절한 범위내에서 임의의 값으로 결정하여도 기존의 적용제어보다 향상된 성능을 보였다. 한편, 퍼지규칙의 설계에 따라 특성변화를 유도할 수 있으므로, 최적의 규칙 설계에 관한 연구가 더 이루어져야 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] G.C.Goodwin and D.Q.Mayne, "A Parameter Estimation Perspective of Continuous Time Model Reference Adaptive Control," *Automatica*, vol.23, no 1, pp.57-70, 1987.
- [2] K.S.Narendra and A.M.Annaswamy, "Stable Adaptive Systems," Prentice-Hall, 1989.
- [3] C.C.Lee, "Fuzzy Logic in Control System: Fuzzy Logic Controller, Part I," *IEEE Trans. Sys.Man Cybern.* vol.SMC-20, no 2, pp.404-418. 1990.
- [4] C.C.Lee, "Fuzzy Logic in Control System: Fuzzy Logic Controller, Part II," *IEEE Trans. Sys.Man Cybern.* vol.SMC-20, no 2, pp.419-435. 1990.
- [5] Y.F.Li and C.C.Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo system," *IEEE Control Systems Magazine* vol.9, no 3, pp.65-72; 1989.
- [6] S.G.Tzafestas and N.P.Papanikolopoulos, "Incremental Fuzzy Expert PID Control," *IEEE Trans.Indus.Electron.* vol.IE-37, no 5, pp.365-371, 1990.
- [7] M.Braae and D.A.Rutherford, "Theoretical and Liguistic Aspects of the Fuzzy Logic Controller," *Automatica*, vol.15, no 5, pp.553-577, 1979.