

Rhino XR-2 로봇의 퍼지 혼성 제어

변 대열^o, 성 홍석, 이 কে희
서강대학교 전자공학과

Fuzzy Hybrid Control of Rhino XR-2 Robot

Dae Yeal Byun^o, Hong Suk Sung, Kwae Hi Lee
Dept. of E.E. Sogang Univ.

Abstract

There can be two methods in control systems : one is to use a linear controller, the other is to use a nonlinear controller. The PID controller and the fuzzy controller can be said to belong the linear and the nonlinear controller respectively.

In this paper, a new hybrid controller which consist of the linear PID controller of which the gain is tuned and the nonlinear self tuning fuzzy controller is proposed. In the PID controller, an algorithm which parameterizes the proportional, the intergral, and the derivative gain as a single parameter is used to improve the performance of the PID controller. In the self tuning fuzzy controller, an algorithm which changes the shape of the triangle membership function and changes the scaling factor which is multiplied to the error and the error change.

The evaluation of the performance of the suggested algorithm is carried on by the simulation for the Rhino XR-2 robot manipulator with 5 links revolute joints.

1. 서론

퍼지 제어기는 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로는 해석할 수 없거나, 얻어지는 정보가 정성적이고, 부정확하고, 불확실한 경우에 기존 제어기들보다 우수한 제어 결과를 나타냄을 많은 연구 결과로 인하여 검증할 수 있다. 본 연구에서는 로봇 매니퓰레이터의 특성이 다중 입력과 다중 출력을 가진 비선형 시변 시스템이라는 점을 착안하여 로봇 매니퓰레이터의 제어에 보다 개선된 퍼지 제어기를 제안하였다. 로봇 매니퓰레이터는 저속 운행이나 잠음의 영향이 적을 때 그 특성이 기존의 선형 제어기의 성능만으로도 충분히 오차를 보상 받을 수 있었다. 그러나, 로봇 매니퓰레이터에 점차로 고속 운행 등 보다 비선형성이 강화되어 기존의 선형 제어기로서는 많은 오차의 발생 요인들을 충분히 제거할 수 없다. 그러므로, 이러한 비선형 특성을 보상할 수 있는 퍼지 제어기를 구성하게 된다.

이러한 퍼지 제어기를 구성하기 위하여, 본 논문에서는 선형 제어기인 PID 제어기의 계수 튜닝과^{[1][2]} 자기 동조 퍼지

제어기^{[2][4]} 구성하였다. PID 제어기의 계수 튜닝 방법은 PID 제어기의 단점을 보완하기 위하여 PID 제어기의 계수를 하나의 동조 매개변수화하고, 이를 퍼지 추론을 통해 시간적으로 변화 시킨다. 자기 동조 퍼지 제어기는 퍼지 제어기의 입력인 오차와 오차의 변화량에 곱하여지는 확산 계수를 동조시켜가는 과정으로 구성된다. 여기에 멤버십 함수의 변화를 함께하여 그 성능을 향상시킬 수 있다. 위의 두가지 방법을 합성하여 새로운 제어기를 구성할 수 있다. 이를 혼성 퍼지 제어기라 하며, 이는 정상상태에서 PID 제어기가 그 안정성을 보장받게 되며, 그 이외의 시간에서는 퍼지 제어기의 빠른 응답성에 의해 보다 좋은 성능의 제어기를 구성할 수 있다^[6]. 본 논문에서는 PID 제어기의 계수 튜닝 부분을 추가 시켜서 실험하였다.

또한, 위의 각 제어기의 성능에 대하여 5축 회전 관절을 가지는 Rhino XR-2 로봇 매니퓰레이터에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 이 시뮬레이션에서는 자기 동조 퍼지 제어기를 사용하여 상승 시간이 느린 경우에는 상승 시간이 빠르게 진행되는 방향으로, 진동이 심한 경우에는 진동을 줄이는 방향의 실험을 행하였다. 그리고 혼성 자기 동조 퍼지 제어기를 사용하여 상승 시간을 단축하여도 진동이 증가하지 않는 제어기를 구성하였다.

II. 본론

1. 퍼지 추론을 이용한 PID 제어기 계수의 튜닝

1.1 PID 제어기 계수의 튜닝

PID 제어기의 이득을 결정하기 위하여 본 논문에서는 가장 널리 쓰이는 Ziegler-Nichols 방법을 사용하였으며 그 식은 제어 입력 $u(t)$ 가 식(1)과 같은 PID 제어기일 경우 다음과 같이 주어진다.

제어입력 $u(t)$ 가 다음의 PID 제어기면

$$u(t) = k_c [e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt] \quad (1)$$

여기서, K_c 는 비례 이득, T_d 는 미분 시간 그리고 T_i 는 적분 시간이다.

Ziegler-Nichols 방법용 이용한 계수는 다음과 같이 주어진다.

$$k_c = 0.6k_u, T_i = 0.5t_u, T_d = 0.125t_u$$

여기서, K_u 는 ultimate 이득이며 $t_u = \text{ultimate 주기이다.}$

위의 Ziegler-Nichols 방법에 의한 이득 결정은 주파수 영역에서 대상 시스템에 비례 피드백을 가해 그 값을 변화시킴으로써 안정도 경계까지 이르게하여 구한 ultimate 이득 (K_c)와, 그때의 출력 정현파의 주기값인 ultimate 주기(t_u)를 이용하여 이득을 결정하는 방법이다^[4]. 그러나 일반적으로 Ziegler-Nichols 방법에 의한 제어기는 과도 응답이 크므로 원하는 사양의 시스템의 응답을 얻기 위해서 자기 동조 퍼지 PID 제어기를 이용한다.

즉, Ziegler-Nichols 방법의 계수를 다음과 같이 하나의 매개변수 α 로 매개변수와 한다.

$$k_c = 1.2\alpha k_u, T_i = 0.75 \frac{1}{1+\alpha} t_u, T_d = 0.25T_i \quad (2)$$

여기서 α 를 0.5로 선택한다면 Ziegler-Nichols 방법용 이 용한 계수와 동일하다.

1.2 매개변수 α 의 퍼지 추론

시스템 출력 : $y(t)$
 원하는 출력 : $y_d(t)$
 오차 : $e(t) = y_d(t) - y(t) \in E$
 오차 변화 : $ec(t) = e(t) - e(t-1) \in R$

위의 표와 같이 정의하여 $E \& R \rightarrow H$ 로 맵핑하게 된다. 여기서 H 는 E 와 R 의 제어 규칙에 의해 결정되는 퍼지 변수이다.

본 논문에서 멤버십 함수로써 다음의 삼각형 멤버십 함수를 사용하였다.

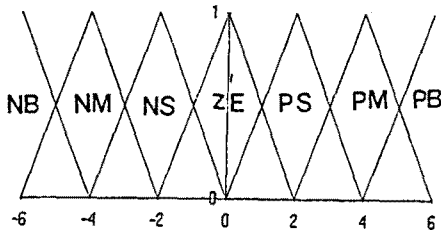


그림 1. 전진부의 삼각형 멤버십 함수

위의 E 와 R 은 삼각형 멤버십 함수를 사용 하였고 후건부 H 는 단일 출력 멤버십 함수를 사용하였다.

제어 규칙은 다음의 표 1과 같다.

표 1. 제어 규칙

		오차 변화						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
오차	NB	PB	PB	PB	PM	ZE	ZE	ZE
	NM	PB	PM	PM	PM	PS	ZE	ZE
	NS	PM	PS	PS	PS	ZE	ZE	ZE
	ZE	PS	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	NS
	PS	ZE	ZE	ZE	NS	NS	NS	NM
	PM	ZE	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZE	ZE	NS	NM	NM	NM	NB

퍼지 추론에 의해 얻어진 H 를 무게중심법을 이용하여 비 퍼지화를 행한다. 이의 결과로 $h(t)$ 를 얻는다.

* 튜닝 매개변수 α 의 튜닝.

$$\alpha(t+1) = \alpha(t) + \gamma h(t)(1 - \alpha(t)) \quad \alpha(t) > 0.5$$

$$\alpha(t+1) = \alpha(t) + \gamma h(t)\alpha(t) \quad \alpha(t) \leq 0.5$$

여기서, γ 는 갱신량의 수렴치를 수정하는데 사용하는 양의 상수이고 초기치 $\alpha(0)$ 는 0.5이며 이 값의 범위는 0과 1사이이다.

위의 튜닝 매개변수 α 를 식(1),(2)에 대입하여 변화된 PID 계수들을 구한다.

2. 자기 동조 퍼지 제어기

본 논문에서 사용한 자기 동조 퍼지 제어기는 삼각형 멤버십 함수 형태의 변화와 퍼지 제어기의 입력인 오차와 오차의 변화량에 곱해지는 환산 계수를 변화시켜 시스템의 응답 특성을 향상 시킨다.

2.1 삼각형 멤버십 함수 형태의 변화

오차와 오차변화의 멤버십 함수의 삼각형 모양을 변화 시키면 비퍼지화 작업시 그 값의 변화로 인하여 제어기 출력의 변화를 가져오게 된다. 예를 들어 같은 크기의 오차와 오차변화가 멤버십 함수의 입력으로 들어올 경우에도 오차 멤버십 함수 중앙부의 배열을 조절하게 하고 오차변화 멤버십 함수 중앙부의 배열을 성기게 한다면 비퍼지화 과정을 마친 제어기의 출력은 더 커다란 값을 가지게 된다. 그러므로 느린 상승 시간을 가지는 시스템에는 이런 방법에 의하여 보다 좋은 결과를 구할 수 있다.

* 시스템 상승 시간의 개선

표 2. 시스템 상승 시간 개선을 위한

삼각형 멤버십 함수의 변화

No	사 양	상승 시간의 개선
		상승 시간 단축
1	오차의 멤버십 함수	중앙부의 배열을 조밀하게 함
2	오차 변화의 멤버십 함수	중앙부의 배열을 성기게 함

* 시스템 진동의 개선

표 3. 시스템 진동 개선을 위한

삼각형 멤버십 함수의 변화

No	사 양	진동 개선
		진동 단축
1	오차의 멤버십 함수	중앙부의 배열을 성기게 함
2	오차 변화의 멤버십 함수	중앙부의 배열을 조밀하게 함

2.2 환산 계수의 변화

시스템의 오차와 오차변화에 곱하여지는 환산계수와 상승 시간과 진동을 다음과 같이 정의하면

- 오차에 곱하여지는 환산계수 : $S_1 (= 1/a_1)$
- 오차변화에 곱하여지는 환산계수 : $S_2 (= 1/a_2)$
- 기준 입력을 따라가지 못하는 경우의 오차 : E_{rt}
- 기준 입력에 대해 진동하는 횟수 : E_{osc}

환산 계수의 변화를 삼각형 멤버십 함수로 퍼지화 :

$$\mu_H(E_{rt}), \mu_{osc}(E_{osc})$$

이들 퍼지화된 값들로 퍼지성능이라는 FP를 정의할 수 있다.

$$FP := \min[\mu_H(E_{rt}), \mu_{osc}(E_{osc})]$$

- 300 - 그리고, 환산계수의 조정 규칙은 다음과 같다.

표 4. 환산계수의 조정 규칙

환산계수 조정량	전진부	후진부	
		Δa_1	Δa_1
Ert	Nrt	PBrt1	NBrt2
	Prt	NBrt1	PBrt2
Eosc	Nosc	NBosc1	PBosc2
	Posc	PBosc1	NBosc2

위의 조정 규칙에 따라 퍼지 제어기의 환산계수를 다음과 같이 조정한다.

$$a_i^{new} = a_i^{old} + (1 - FP) \Delta a_i \quad (i = 1, 2)$$

이러한 방법으로 환산계수가 결정이 되면, 최상의 FP가 나올때까지 튜닝을 계속하게 된다.

3. 혼성 퍼지 제어기

3.1 PID 제어기와 자기 동조 퍼지 제어기의 결합

PID 제어기는 정상상태에서의 그 안정성을 많은 연구들을 통해 알 수 있다. 이러한 안정성을 바탕으로 빠른 응답성을 가지고 있는 퍼지 제어기와 결합을 통해 보다 성능이 뛰어난 제어기를 구성할 수 있다. 이 혼성 퍼지 제어기는 하중 계수라는 상수를 취하여 두 제어기의 결합을 이룬다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$U = \alpha * U_{pid} + (1 - \alpha) * U_F$$

여기서, 전체 제어출력 : U

PID 제어출력 : U_{pid}

퍼지 제어 출력 : U_F 이고,

α 는 $\mu_x(e)$ 라는 삼각형 멤버십 함수를 취하여 퍼지화하여 이 오차가 0에 가까워질수록 1로 수렴하게 된다.

3.2 PID 계수의 튜닝 제어기와 자기 동조 퍼지 제어기의 결합

본문 "1. 퍼지 추론을 이용한 PID 계수의 튜닝"에서 설명하였듯이 PID 제어기의 계수 튜닝을 하였을때 튜닝 이전의 PID 제어기 보다 우수한 성능을 보이므로 혼성 제어기 구성 시 PID 제어기 계수의 튜닝 부분의 추가로 보다 좋은 성능을 얻고자 하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

1. 실험 조건

본 논문에서의 실험 조건은 4초 동안 45도 기울어진 원을 한바퀴 회전하는 경로를 선택하였다. 그리고, 각 조인트의 입력 위치, 속도, 가속도는 offline으로 계산하였으며 출력 속도 부분에 일정량의 가우시안 잡음을 추가하여 실험하였다.

2. 퍼지 추론을 이용한 PID 계수의 튜닝

2.1 PID 제어기와 PID 계수 튜닝 제어기의 비교

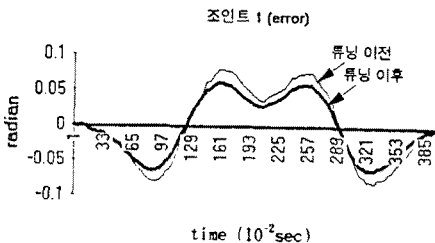


그림 2. 조인트 1의 PID vs PID 계수의 튜닝
표 5. 전체 조인트에 대한 최대 오차, 상승치와 진동치

	최대오차 (radian)	상승치	진동치
PID 제어기	0.157833	17.834006	5
PID 계수 튜닝 제어기	0.149546	14.177687	4

(본 논문에서는 "상승치"를 입력 속도 성분이 양일때의 오차와 음일때의 오차의 차로 정의하며, "진동치"는 오차 부호 변화의 횟수로 정의한다.)

3. 자기 동조 퍼지 제어기

3.1 삼각형 멤버십 함수 형태의 변화

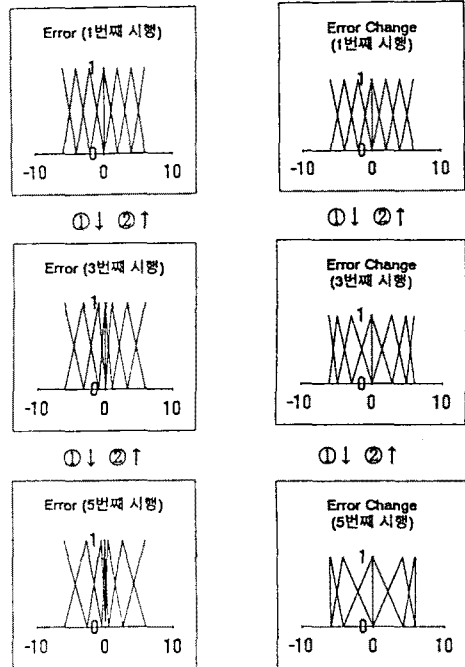


그림 3. 삼각형 멤버십 함수 형태의 변화 추이

그림 3에서 ①의 방향은 상승 시간의 개선이니 ②의 방향은 진동의 개선 방향이다. 본문 표 2와 표 3에서 설명한 방향으로 삼각형 멤버십 함수의 형태가 바뀔 수 있다.

삼각형 멤버십 함수 형태만을 변화시킴으로써 변화된 조인트 1의 오차는 다음과 같다.

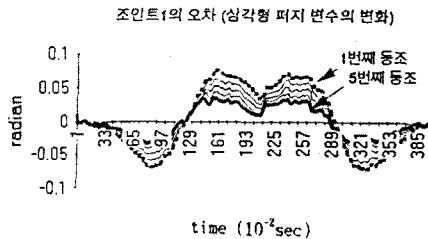


그림 4. 삼각형 멤버십 함수 형태의 변화에 따른 조인트 1의 오차.

표 6. 전체 조인트에 대한 최대 오차, 상승치와 진동치

	최대오차 (radian)		상승치		진동치	
	①번 방향	②번 방향	①번 방향	②번 방향	①번 방향	②번 방향
1번째 시행	0.1676	0.1049	16.685	3.5139	9	81

2번째 시행	0.1369	0.1083	12.244	5.2637	9	57
3번째 시행	0.1187	0.1222	8.5687	8.7220	44	25
4번째 시행	0.1092	0.1329	5.6916	12.524	82	17

3.2 환산 계수의 변화

환산 계수의 변화만으로 변화된 조인트 1의 오차는 다음과 같다.

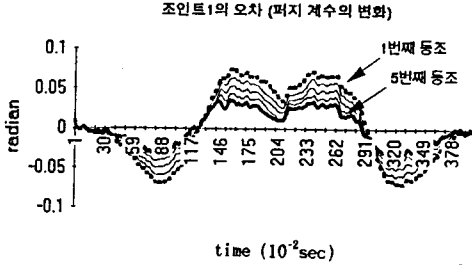


그림 5. 환산 계수 변화에 따른 조인트 1의 오차.

표 7. 전체 조인트에 대한 최대 오차, 상승치와 진동치

	최대오차 (radian)		상승치		진동치	
	①번 방향	②번 방향	①번 방향	②번 방향	①번 방향	②번 방향
1번째 시행	0.1482	0.0810	16.425	7.5663	6	19
2번째 시행	0.1290	0.0944	13.947	9.4371	18	17
3번째 시행	0.1091	0.1071	11.609	11.095	14	18
4번째 시행	0.0941	0.1221	9.5067	12.975	17	16

(①의 방향은 상승 시간의 개선 방향)

(②의 방향은 진동치의 개선 방향)

3.3 삼각형 멤버십 함수와 환산 계수의 동시 변화
삼각형 멤버십 함수와 환산 계수를 동시 변화시켜 얻은 조인트 1의 오차는 다음과 같다.

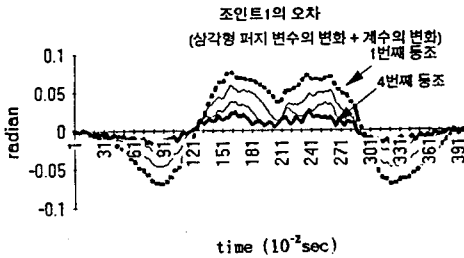


그림 6. 삼각형 멤버십 함수와 환산 계수를 동시에 변화시킨 조인트 1의 오차.

표 8. 전체 조인트에 대한 최대 오차, 상승치와 진동치

	최대오차 (radian)		상승치		진동치	
	①번 방향	②번 방향	①번 방향	②번 방향	①번 방향	②번 방향
1번째 시행	0.1482	0.0509	16.425	2.2020	6	127
2번째 시행	0.1324	0.0904	10.708	4.2157	17	63
3번째 시행	0.0923	0.1324	6.0991	9.7157	52	17
4번째 시행	0.0799	0.1561	3.4451	14.971	87	18

4. 혼성 퍼지 제어기

4.1 PID 제어기와 자기 동조 퍼지 제어기의 결합

PID 제어기와 자기 동조 퍼지 제어기를 하중계수를 이용해 결합시킨 혼성 퍼지 제어기의 조인트 1의 오차는 다음과 같다.

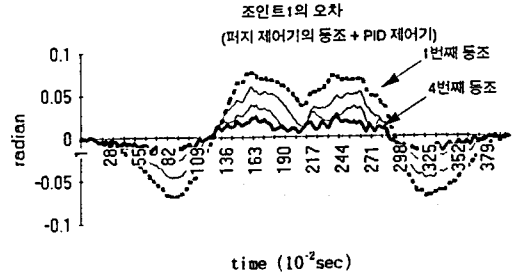


그림 7. 혼성 퍼지 제어기의 조인트 1의 오차

다음의 표 9는 상승 시간의 개선 부분의 결과를 나타낸다. 혼성 퍼지 제어기는 정상상태 근처에서 PID 제어기에 큰 값의 하중계수가 곱해져서 진동을 감소시킬 수 있다.

표 9. 전체 조인트에 대한 최대 오차, 상승치와 진동치

	최대오차 (radian)	상승치	진동치
1번째 시행	0.148240	16.436735	10
2번째 시행	0.132510	10.728897	9
3번째 시행	0.092146	6.424054	11
4번째 시행	0.080217	4.109952	13

표 9에서도 알 수 있듯이 혼성 제어기를 사용함으로써 최대 오차를 줄이면서도 진동이 많아지는 것을 막을 수 있다.

조인트1의 오차 (퍼지 동조 제어기 vs 혼성 제어기)

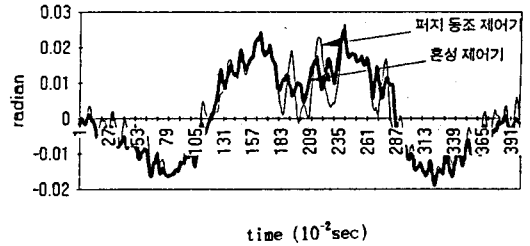


그림 8. 혼성 퍼지 제어기 사용시의 진동 감소

그림 8에서 보듯이 혼성 퍼지 제어기가 자기 동조 퍼지 제어기보다 진동을 감소시킬 수 있다.

4.2 PID 계수의 튜닝 제어기와 자기 동조 퍼지 제어기의 결합

PID 제어기에 비해, 적분, 미분 이득을 매개변수를 이용하여 튜닝한 결과와 자기 동조 퍼지 제어기를 결합하였을 때 조인트 1의 오차는 다음과 같다.

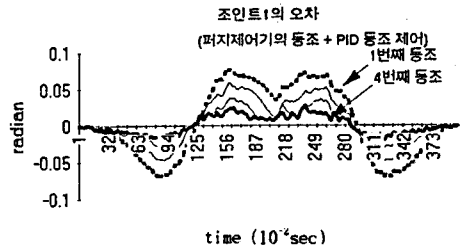


그림 9. PID 계수조정을 이룬 혼성 퍼지 제어기의 조인트 1의 오차

표 10. 전체 조인트에 대한 최대 오차, 상승치와 진동치

	최대오차 (radian)	상승치	진동치
1번째 시행	0.148307	16.404564	9
2번째 시행	0.132403	10.722087	9
3번째 시행	0.092020	6.329821	7
4번째 시행	0.064910	3.773717	9

표 9와 표 10을 비교하면 4번째 시행에서는 최대오차와 상승치, 진동치 모두가 PID 계수조정을 하였을때 보다 좋은 결론을 얻는다는것을 알 수 있다.

이상의 결과로, 적교 좌표계에서의 경로 추적 결과를 보이면 다음의 그림과 같다.

제안된 혼성 퍼지 제어기 (XY 경로)

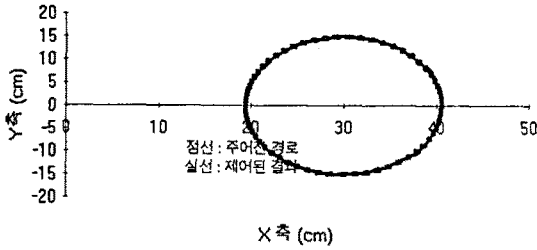


그림 10. 적교 좌표계 XY 평면

제안된 혼성 퍼지 제어기 (YZ 경로)

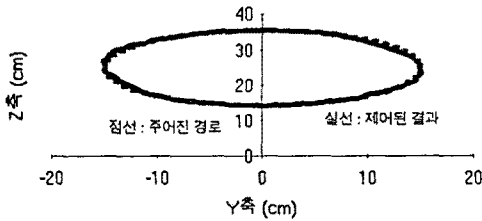


그림 11. 적교 좌표계 YZ 평면

제안된 혼성 퍼지 제어기 (ZX 경로)

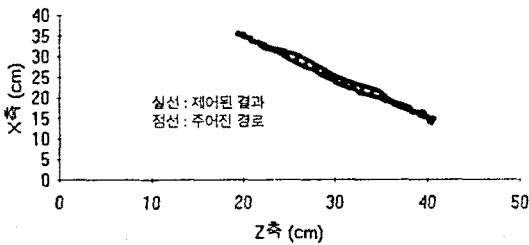


그림 12. 적교 좌표계 ZX 평면

IV. 결론

본 논문에서는 Rhino XR-2 로봇트 매니플레이터의 제어를 퍼지 제어 이론을 중심으로 실험하여 보았다. 실험을 통하여 퍼지 제어가 로봇트 매니플레이터의 비선형성과 시변 특성에 적합한 제어기중 하나라는 것을 알 수 있었다.

PID 제어기의 계수조정예 Ziegler-Nichols 튜닝법에 기초하여 계수를 하나의 동조 매개변수화하고, 이를 퍼지 추론을 통해 PID 제어기의 계수를 시간적으로 변화시킨 결과 최대 오차의 감소와 상승 시간의 감소를 얻을 수 있었다. 또한 자

기 동조 퍼지 제어기를 사용하여 제어할 경우 상승 시간의 감소를 이룰 수 있으나 이에 반하여 진동이 심하여진다는 상치관계를 보임을 알 수 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 퍼지 제어기의 빠른 응답성과 PID 제어기의 안정성을 결합한 혼성 퍼지 제어기를 구성하여 상승 시간이 감소 하더라도 진동의 증가를 방지 할 수 있었다. 여기에 PID 계수조정 방법을 추가결합하여 더 좋은 성능의 제어기를 구성 할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] S. Z. He, S. H. Tan, C. C. Hang and P. Z. Wang, "PID Self-Tuning Control Using A Fuzzy Adaptive Mechanism," *Proc. 1993 IEEE Intern. Conf. Fuzzy Syst.*, San Francisco, California, pp. 708-713.
- [2] Mikio Maeda and Shuta Murakami, "A Self-tuning Fuzzy Controller," *Fuzzy Sets and Systems* 51 (1992), pp. 29-40.
- [3] C. C. Hang, K. J. Åström and W. K. Ho, "Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula," *IEE pro. Part D*, Vol.138, pp. 111-118, 1991.
- [4] Naoyuki ISHIMARU, Tutomu ISHIMOTO and Kanagawa AKIZUKI, "Dialogical Design of Fuzzy Controller Using Rough Grasp of Process Property," '92 *KACC*, pp. 265-271, 1992.
- [5] Y. Saito and T. Ishoda, "Fuzzy PID hybrid control," *Proc. of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks*, pp. 63-64, 1990.