

유연 관절 매니플레이터의 자기 구성 퍼지 제어

오박준형* 이시복** 선용호* 이길량*

(Self-Organizing Fuzzy Control of a Flexible Joint Manipulator)

(Jun-Hyoung Park, Shi-Bok Lee, Yong-Ho Sun, Gil-Rang Lee)

1. 서론

최근의 로봇 매니플레이터는 고정밀, 고생산성, 유연성 자동화를 추구한다. 이에 따라 매니플레이터는 운동 정확성, 고속성, 안정성이 더욱 향상되어야 한다. 특히 매니플레이터 관절부의 탄성은 동적 변형 및 진동을 유발함으로써 운동 정확성과 안정성을 현저히 저하시킨다. [1][2][3] 이러한 복잡하고 불확실한 구조를 갖는 로봇 시스템의 고속, 정확한 운동 제어를 위해서는 보다 효과적인 고급 제어 기법 및 제어 장치의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 이러한 문제에 대한 하나의 대응 방법으로 인간의 지식 처리 방법을 모방한 퍼지제어를 적용하여 그 가능성을 본다.

2. 유연 관절 매니플레이터의 동역학

본 연구에서는 오일러-라그랑지 방법을 이용해서 관절 부분에서 탄성적 거동을 하는 매니플레이터의 운동 방정식을 유도한다. [1][2] 일반적으로 오일러-라그랑지 방정식에서는, 시스템의 상태를 일반좌표계 $(q_i, \dot{q}_i, i=1, 2, \dots, n)$ 를 사용하여 나타내는데, 시스템 전체의 운동에너지와 위치에너지를 T 와 V 라고 할 때, 라그랑지안 (Lagrangian) L 은 다음과 같다.

$$L = T - V \tag{2.1}$$

그리고 감쇠에 의한 소실에너지를 d 라고 하면 운동방정식은 다음식에 의해 유도된다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = Q_i - \frac{\partial d}{\partial \dot{q}_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \tag{2.2}$$

여기서 Q_i 는 일반 좌표계에 대한 일반힘 (generalized force)을 나타내며, 가상일 원리에 의해서 구할 수 있다.

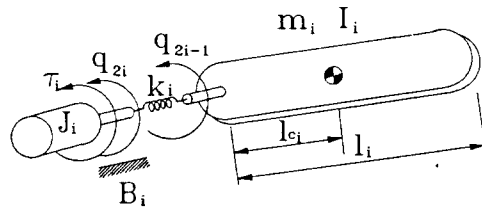


그림 2.1 유연관절을 가진 모델

그림 2.1 은 수평면에서 모터에 의해 직접 구동되는 유연한 관절을 가진 매니플레이터를 나타낸다. 단순화를 위해, i 번째 관절의 유연성을 선형 비틀림 스프링으로 등가 시킨다. 이에 대한 스프링 상수를 $k_i (i=1, 2, \dots, n)$ 으로 나타낸다. 이러한 관절부의 유연성 때문에 강체 관절일 경우보다 자유도가 두 배 늘어나게 된다. 그리고 평면 운동을 하므로 중력은 고려하지 않는다.

이 시스템에 대한 일반 좌표계들의 집합을 아래처럼 둔다.

$$\bar{q}_i = (q_1, \dots, q_{2n}) \tag{2.3}$$

여기서, q_{2i-1} 는 링크 i 의 각 변위이고, q_{2i} 는 로터 i 의 각 변위이다. 이 경우에 $q_{2i} - q_{2i-1}$ 는 관절 i 의 탄성 변위이다.

n 차원 벡터 \bar{q}_1, \bar{q}_2 를

$$\begin{aligned} \bar{q}_1 &= (q_1, q_3, \dots, q_{2n-1})^T \\ \bar{q}_2 &= (q_2, q_4, \dots, q_{2n})^T \end{aligned} \tag{2.4}$$

로 정의한다. 로터의 운동에너지에서 링크 운동에 의한 효과를 무시하면, 시스템의 운동에너지와 위치에너지는

* (주) 금성사 생활 시스템 연구소
** 부산대학교 기계설계 공학과

$$KE = \frac{1}{2} \dot{\bar{q}}_1^T D(\bar{q}_1) \dot{\bar{q}}_1 + \frac{1}{2} \dot{\bar{q}}_2^T J \dot{\bar{q}}_2 \quad (2.5)$$

$$PE = V(\bar{q}_1 - \bar{q}_2) \quad (2.6)$$

로 표현된다. 여기서 $D(\bar{q}_1)$ 와 $V(\bar{q}_1 - \bar{q}_2)$ 는 강체 매니플레이터의 관성 매트릭스와 탄성 위치에너지이다. J 는 대각 행렬,

$$J = \text{diag}(J_1, J_2, \dots, J_n) \quad (2.7)$$

가 된다. 여기서 J_i 는 i 번째 로터의 관성이다. 그러면 관절의 탄성 위치에너지는

$$V = \frac{1}{2} (\bar{q}_1 - \bar{q}_2)^T K (\bar{q}_1 - \bar{q}_2) \quad (2.8)$$

이 되고, 여기서 K 는 관절 스프링 상수이고 k_1, k_2, \dots, k_n 로 구성되는 대각 행렬이다. 이와 같은 과정을 통하여 운동방정식을 오일러-라그랑지 방정식으로 유도하면,

$$D(\bar{q}_1) \ddot{\bar{q}}_1 + C(\bar{q}_1, \dot{\bar{q}}_1) \dot{\bar{q}}_1 + K(\bar{q}_1 - \bar{q}_2) = 0 \quad (2.9)$$

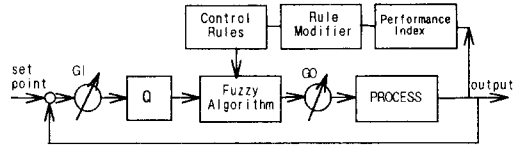
$$J \ddot{\bar{q}}_2 + B \dot{\bar{q}}_2 - K(\bar{q}_1 - \bar{q}_2) = \bar{u}$$

이 된다. 여기서 C 는 링크의 운동에 따른 코리올리와 원심력의 항이고, B 는 모터 로터의 회전에 따른 감쇠에 해당한다.

3. 자기 구성 퍼지 제어 시스템의 설계

단순한 퍼지 논리 제어기 (Fuzzy Logic Controller; FLC)는 많은 실험적인 경우들과 실제 산업적 응용 분야에서 성공적으로 자기 몫을 다해 왔다. [4] [5] [6] [7] 이러한 성공에도 불구하고, 설계적 접근에서 분명하고 고유한 결점이 존재한다. 우선 조작자의 제어 전략에 있어서 언제나 신뢰할 수 있는 언어적 모델이 얻어질 수는 없다는 것이고, 다음으로는 커다란 프로세스 변화는 조작자의 경험 밖에서는 절대 발생하지 않는다고 맹목적으로 가정하는 것이다.

이러한 문제들에 대한 매력적인 해결 방법으로, 성능 평가에 의존하여 제어 규칙을 새로 만들거나 수정할 수 있는 자기 구성 퍼지 논리 제어기 (Self-organizing Fuzzy Logic Controller; SOC)가 제안되었다. [8] [9] [10] [11] 퍼지 제어에서 프로세스의 동작에 대한 경험적인 지식은 항상 불충분하며, 또 그 지식을 충분히 규칙 베이스로 변환하는 데는 어려움이 있다. 그리고 프로세스가 시간에 따라 비선형적으로 변하는 경우에는 이 문제는 더욱 커진다. 이런 문제를 해결하기 위해서 아래 그림 3.1와 같은 구조를 갖는 자기 구성 퍼지 제어기가 필요하게 된다.



Q : 양산화 과정
G1 : 입력 스케일링 인자
G2 : 출력 스케일링 인자
그림 3.1 자기 구성 퍼지 제어기의 구성

이러한 SOC는 그림 3.1에서 볼 수 있듯이 두개의 규칙 베이스로 구성된 계층적 구조를 갖추고 있다. 하나는 일반적인 FLC의 규칙 베이스이고, 또 다른 하나는 시스템의 바람직한 전체적 성능에 기준하여 일반적인 규칙 베이스를 창조하고 수정하는 인간과 같은 학습 능력을 나타내는 '메타-규칙 (meta-rules)'으로 구성된다.

FLC의 기본 구성은 그림 3.2와 같이 구성되어 있다. [12]

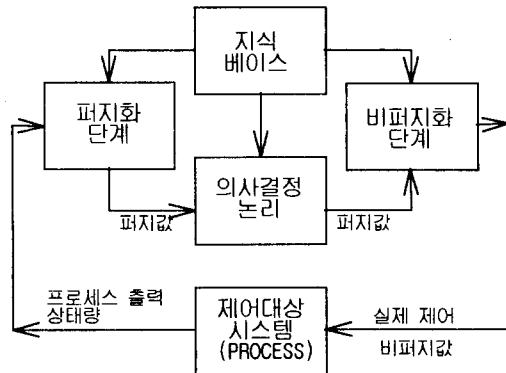


그림 3.2 퍼지 논리 제어기의 기본구성

퍼지 제어를 위해 입력되어지는 상태 변수 값과 같이 크리스프 (crisp)한 값을 퍼지화 연산자를 통하여 어떤 전체 집합 안의 퍼지 싱글톤 (Fuzzy Singleton)으로 변환시킨다. 변환된 퍼지 싱글톤은 명확한 값이다. 이 변환 방법은 추론에 자연스럽게 쉬운 방법을 제공하기 때문에 퍼지 제어 응용에 널리 사용된다. 본 연구에서도 퍼지화 단계에서 식(3.1)과 같은 퍼지 싱글톤을 이용하였다.

$$\begin{cases} \mu_A(x_0) = 1, & x = x_0 \\ \mu_A(x) = 0, & x \neq x_0 \end{cases} \quad (3.1)$$

지식 베이스는 데이터 베이스와 규칙 베이스로 구성되어 있다. 데이터 베이스에서는, 퍼지 집합으로 불 확실한 정보를 나타내고 디지털 프로세싱을 하기 위해 이산화와 양자화를 해야 할 필요가 있다. 이러한 이산화와 오프라인 (off-line) 프로세싱을 통해 얻어진 룩 업 테이블 (Look-Up Table)이 제어의 실행 시간을 단축시

킨다. 이러한 이유에서 본 연구에서도 그림 3.3과 같이 퍼지 구분된 멤버십 함수들을 표 3.1 과 같이 이산화와 양자화를 시행한다.

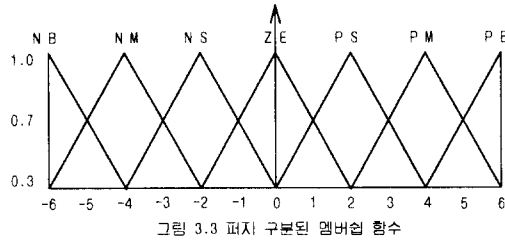


그림 3.3 퍼지 구분된 멤버십 함수

표 3.1 이산화된 기본 퍼지집합

LEVEL NO.	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
-6	1.0	0.3	0	0	0	0	0
-5	0.7	0.7	0	0	0	0	0
-4	0.3	1.0	0.3	0	0	0	0
-3	0	0.7	0.7	0	0	0	0
-2	0	0.3	1.0	0.3	0	0	0
-1	0	0	0.7	0.7	0	0	0
0	0	0	0.3	1.0	0.3	0	0
1	0	0	0	0.7	0.7	0	0
2	0	0	0	0.3	1.0	0.3	0
3	0	0	0	0	0.7	0.7	0
4	0	0	0	0	0.3	1.0	0.3
5	0	0	0	0	0	0.7	0.7
6	0	0	0	0	0	0.3	1.0

그리고 전문가의 설계 경험과 공학적 지식에 의해서 제어 규칙 베이스를 언어적 표현들의 집합으로 구성한다. 전문가의 지식은 보통 퍼지 논리에서 조건부적 진술을 통하여 쉽게 추론 될 수 있도록 "if ~, then ~." 규칙의 형태로 구성한다. 그리고 이러한 규칙들이 FLC에 이용되기 위해서는, 프로세스 상태 변수들과 제어 변수를 선정하여 언어적 제어 규칙들의 형태를 선정해야 한다. 그리고 또 제어 규칙들의 일관성을 유지해야 한다. 본 연구에서 전문가로부터 얻은 초기의 규칙 베이스를 표 3.2에 나타낸다.

표 3.2 전문가로부터 얻은 초기의 규칙베이스

		오차변화율의 언어값							
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
오차의 언어값	NB								
	NM								
	NS								
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
	PS								
	PM								
	PB								

의사 결정 논리 부분에서는 퍼지 함의와 추론 메커니즘을 선정하여야 한다. 본 연구에서 사용한 퍼지 함의는 식(3.2)와 같이 표현되는

Larsen의 곱 연산 규칙이다.

$$R_p = A \times B = \int_{U, V} \mu_A(u) \mu_B(v) / (u, v) \quad (3.2)$$

추론 메커니즘은 Larsen의 곱 연산 규칙을 이용하였기 때문에,

$$(A', B') \circ (A, \text{ and } B, \rightarrow C_i) \\ = [A' \circ (A, \rightarrow C_i)] \cap [B' \circ (B, \rightarrow C_i)] \quad (3.3) \\ (\text{if } \mu_{A' \cdot B'} = \mu_{A_i} \cdot \mu_{B_i})$$

가 된다. 여기서 " A_i and B_i "는 $U \times V$ 안의 퍼지 집합 $A_i \times B_i$ 이다.

비 퍼지화는 크리스프한 제어 입력 공간 안으로 퍼지 제어 입력 공간을 사상시키는 것이다. 이를 위해 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 가장 널리 사용되어 지고 있는 식(3.4)로 표현되는 면적 중심 방법을 이용한다.

$$z_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_z(w_j) w_j}{\sum_{j=1}^n \mu_z(w_j)} \quad (3.4)$$

여기서 n은 출력의 양자화 수준의 개수이다.

이상과 같이 단순한 퍼지 논리 제어가 구성되었다. 여기서 추가적으로 자기 구성 퍼지 제어기는 제어 성능 향상을 위한, 적응 또는 학습 제어기 역할을 위해 그 자체의 성능을 평가 할 수 있어야 한다. 각 프로세스 출력과 관계된 제어기 성능은 바라는 응답과 실제 응답과의 차이로 측정되어 진다. 이 차이로 부터 제어기 출력에 요구되는 바람직한 수정분의 크기를 표 3.3 과 같은 성능지수표로 부터 해당하는 지시를 내리게 된다.

표 3.3 성능 지수표 (Performance Index Table)

		오차변화율의 양자화 수준													
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
오차의 양자화수준	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0		
	-5	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	
	-4	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
	-3	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
	-2	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
	-1	-8	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
	0	-8	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6
	1	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6
	2	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6
	3	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6
	4	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6
	5	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6
	6	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6	6

이와 같은 성능 지수표를 이용하여 실제 자기 구성 퍼지 제어기의 규칙 베이스 수정 과정은 아래와 같이 이루어진다. m 개의 샘플링 시간 전에 수행된 제어 행동이 현재의 나쁜 성능에 영향을 준다고 가정한다. 그러면 단일 입출력 프로세스에서, $e(nT-mT)$ 와 $ce(nT-mT)$ 는 현재보

다 m 샘플링 시간 전의 오차와 오차 변화량이고, $u(nT-mT)$ 는 제어기 출력이 된다. 결론적으로 $nT-mT$ 시간에 바람직한 제어기 출력은 $u(nT-mT)$ 가 아니라 $u(nT-mT)+r(nT)$ 이어야 할 것이다. 여기서 $r(nT)$ 는 $nT-mT$ 시간에 추가되어야 할 제어기 출력이다. 이 추가되어야 할 제어기 출력을 결정하는 것이 감속 역할을 하고 있는 성능 지수표가 할 일이다. 이러한 관계를 아래처럼 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} E(nT-mT) &= F\{e(nT-mT)\} \\ CE(nT-mT) &= F\{ce(nT-mT)\} \\ U(nT-mT) &= F\{u(nT-mT)\} \\ V(nT-mT) &= F\{u(nT-mT)+r(nT)\} \end{aligned} \quad (3.5)$$

여기서, F 는 퍼지화 연산자를 의미한다. 제어기 수정의 문제는 바로 함의

$$E(nT-mT) \rightarrow CE(nT-mT) \rightarrow U(nT-mT) \quad (3.6)$$

로 부터 새로운 함의

$$E(nT-mT) \rightarrow CE(nT-mT) \rightarrow V(nT-mT) \quad (3.7)$$

로 바뀌어 지는 것을 말한다. 이러한 두가지 함의는 카테이션 곱

$$R_{k-1}(nT) = E(nT-mT) \times CE(nT-mT) \times U(nT-mT) \quad (3.8)$$

$$R'(nT) = E(nT-mT) \times CE(nT-mT) \times V(nT-mT) \quad (3.9)$$

로 주어지는 관계 행렬 $R_{k-1}(nT)$ 와 $R'(nT)$ 로 표현될 수 있다. 이로부터 새로운 퍼지 관계 R_k 는 다음처럼 정의된다.

$$R_k(i, j, k) = \max\{R'(i, j, k), R_{k-1}(i, j, k)\} \quad (3.10)$$

$$(i=1, \dots, n, j=1, \dots, m, k=1, \dots, l)$$

이처럼 새로 만들어진 퍼지 관계로부터 다시 제어를 실시하게 되고, 이와 같은 과정을 반복해 가면서 제어하고자 하는 시스템에 적응해 가게 된다.

4. 수치 실험 및 고찰

본 연구에서는 SOC와의 비교 평가를 위해, PD 제어기를 설계한다.^[13] 수치 실험 대상 플랫폼으로는 유연한 관절을 가진 단일 링크 매니퓰레이터와 두개의 링크를 가진 매니퓰레이터를 선정하였다.

수치 실험에 사용된 시스템들의 파라미터 값들은 표 4.1에 나타낸다.

유연한 관절을 가진 매니퓰레이터는 구동부와 링크각 측정 위치가 일치하지 않는 비병치 시스템이다. 따라서 PD 제어를 하기에는 제어 시스템 자체가 불안정한 특성을 지니고 있기 때문에, 모터의 각변위와 각속도를 피드백 정보로 사용하여 간접적으로 링크의 각변위를 제어한 결과이다. 이때 PD제어에 사용된 게인 값은 시행착오를 통해 좋은 명령 추종성을 보이는 값으로 선정하였다. 자기구성 퍼지 제어기에서는 제어 피드백 정보로는 모터의 각변위와 각속도를 이용하고, 링크의 각변위와 각속도는 규칙 베이스를 수정하고 창조하는 정보로 사용한다.

그림 4.1과 그림 4.2는 단일 유연 링크 매니퓰레이터의 링크 끝단에 부가질량이 없는 상태에서 PD 제어한 결과이다.

본 연구에서는 퍼지 제어를 위해 룩업 테이블을 이용한다. 하지만 룩업 테이블만으로 제어를 실행하게 되면 느린 응답을 보이는 시스템에는 몰라도, 서보 시스템과 같은 빠른 시스템 일 수록 양자화를 세밀히 하지 않는 한 정밀하고 좋은 결과를 기대하기는 힘들다.^{[5][14]} 그렇다고 해서 많은 양자화를 시도하면 더 복잡한 실제 과정과 또 추론 시간도 기하 급수적으로 많이 걸린다. 본 연구에서는 하나의 룩업 테이블을 이용하면서도 빠른 시스템에 잘 대응할 수 있도록 양자화 수준 사이를 선형적으로 보간하여 사용한다.

그림 4.3과 그림 4.4는 표 3.2와 같은 초기의 전문가 규칙 베이스를 가지고 20번 창조와 수정을 거친 결과를 보여준다. 그림 4.5는 초기의 룩업 테이블이 20번 창조 수정 과정을 거친 후 변화된 모습을 보여준다. 이렇게 설계된 제어기의 강인성을 비교해 보기위해, 파라미터 변화와 외란을 주어 실험해 보았다. 파라미터 변화는 링크의 끝단에 부가 질량을 달았고, 외란은 1.0초 부터 1.05초 동안 크기가 5[N] 인 힘을 끝단에 가하였다. 이때 결과를 그림 4.6, 그림 4.7에 보여준다.

2 링크 매니퓰레이터 퍼지 제어를 실시하기 위해서는 링크간의 연성이 이루어져 있기 때문에, 총 2401(7×7×7×7)개의 규칙들이 필요하다. 하지만 이렇게 많은 규칙들을 실제로 전문가가 하나씩 세우기란 좀처럼 쉽지않다. 따라서 본 연구에서는 각 링크를 독립적으로 제어하면서, 서로 연성이 되어 있는 부분의 규칙은 스스로 수정 창조해 가면서 보완을 해 나가도록 하였다. 이러한 방법을 이용하면 규칙의 수가 총 98(7×7+7×7)개로 줄어드는 잇점이 있어서, 추론 시간도 대폭 줄일 수 있다. 이 방법을 통해 제어한 결과를 그림 4.8과 그림 4.9에 보인다.

표 4.1 유연 관절 매니퓰레이터의 파라미터

매니퓰레이터의 상태 파라미터	2 링크		
	단일링크	link 1	link 2
관절의 강성 [N/rad]	100	100	100
링크의 관성 [kg m^2]	0.052	0.052	0.052
모터의 관성 [kg m^2]	0.05	0.05	0.05
링크의 길이 [m]	0.5	0.5	0.5
링크의 질량 [kg]	2.5	2.5	2.5
모터의 마찰항 [N sec/rad]	0.05	0.05	0.05

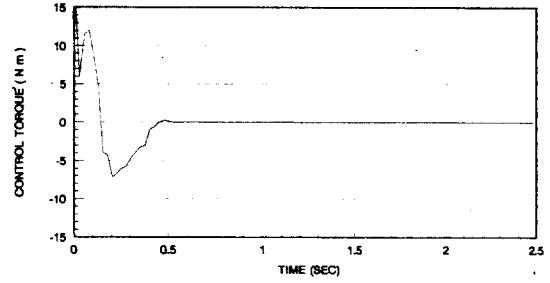


그림 4.4 SOC의 제어 토크 (20번 수정후)

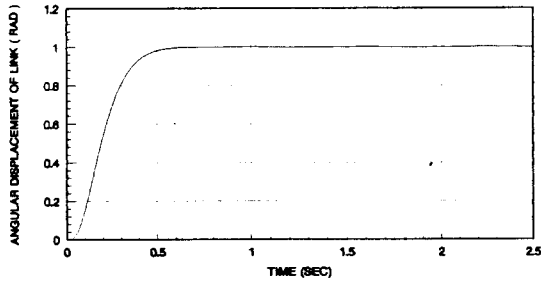


그림 4.1 PD 제어기의 스텝 응답

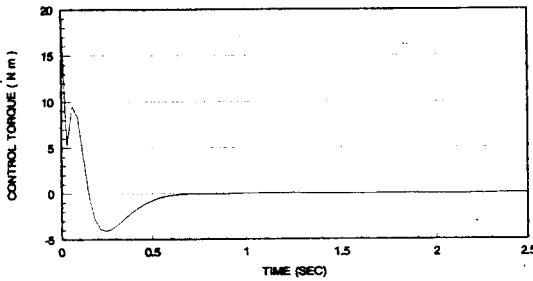
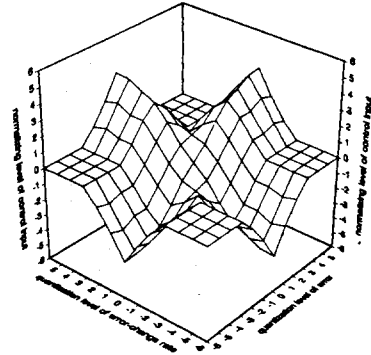
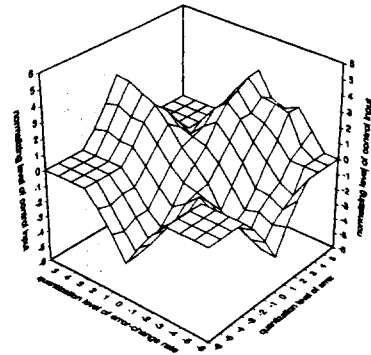


그림 4.2 PD 제어기의 제어입력



(a) initial look-up table



(b) look-up table after 20th modification

그림 4.5 룩업 테이블

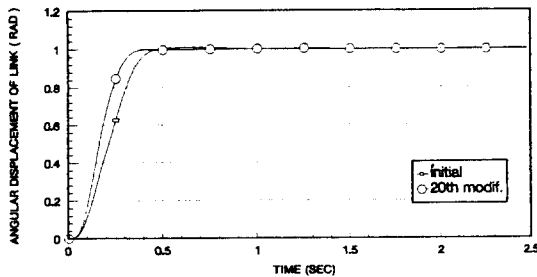


그림 4.3 SOC의 스텝 응답

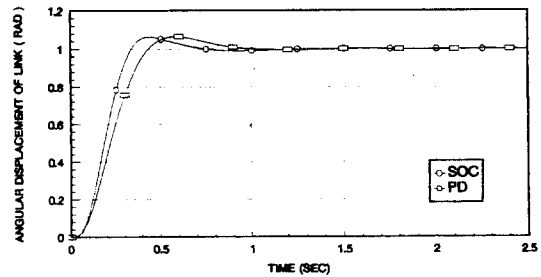


그림 4.6 PD와 SOC의 스텝응답(부가질량 0.5kg)

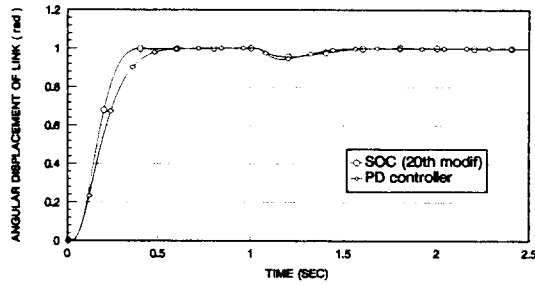


그림 4.7 외란이 있을때 PD와 SOC의 응답

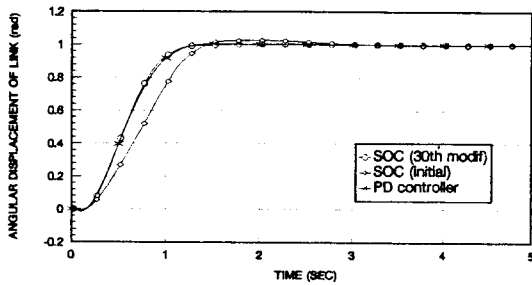


그림 4.8 링크 1의 PD와 SOC의 응답

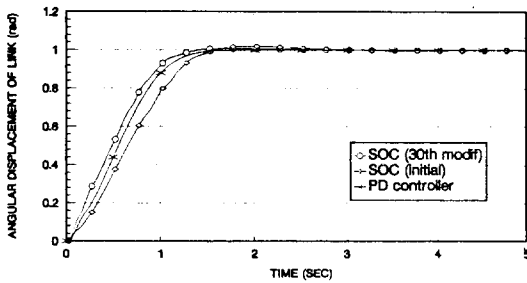


그림 4.9 링크 2의 PD와 SOC의 응답

5. 결론

본 연구에서는 자기구성 퍼지 제어를 설계하여 수치 실험을 통해 유연한 매니플레이터의 위치 제어를 실시하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다. 이전의 규칙 베이스로 부터 만족스럽지 못한 응답을 야기하는 부분을 창조 수정해가면서, 스텝 명령 입력에 대한 명령 추종 성능을 향상시킴을 볼 수 있었다.

유연한 관절을 가진 로봇 매니플레이터와 같은 복잡한 시스템의 퍼지 제어에 있어서 보다 나은 결과를 얻기 위해서는, 많은 양의 규칙 베

이스를 효과적이고도 간단히 전문가의 지식을 표현할 수 있는 연구가 있어야 할 것이다. 그리고 자기구성 퍼지 제어에 있어서 규칙베이스가 변화함에 따라 성능에 큰 영향을 미치는 데이터 베이스와 스케일링 인자의 적절한 변화를 이끌어 낼 수 있는 연구도 있어야 할 것이다.

6. 참고문헌

- [1] Mark W. Spong, M. Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control", JOHN WILEY & SONS
- [2] John J. Craig, "Introduction to Robotics", Addison-Wesley Publishing Company
- [3] S.B.Lee and H.S.CHO, "Dynamic Characteristics of Balanced Robotic Manipulators with Joints Flexibility" Robotica, vol 10, pp25~34, 1992
- [4] E.H.Mamdani and S.Assilian, "An experimental in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", Int.J.Man.Mach.Studies.vol.7,NO1, pp 1~13,1975
- [5] H.R.van Nauta Lemke and W.J.M.Kickert, "Application of a Fuzzy Controller in a Warm Water Plant",Automatica,vol12, pp 301~308,1976
- [6] P.J.King and E.H.Mamdani, "The Application of Fuzzy Control Systems to Industrial Processes", Automatica, vol 13, pp 235~242, 1976
- [7] J.J.Ostergaard, "Fuzzy Logic Control of a Heat Exchanger Process", in Fuzzy Automata and Decision Processes, M.M.Gupta, G.N.Saridis and B.R.Gaines, Eds. Amsterdam : North-Holland, 1977, pp 285~320
- [8] T.J.Procyk and E.M.Mamdani, "A Linguistic Self-Organizing Process Controller", Automatica, vol 15, pp 15~30, 1979
- [9] Tsukasa Yamazaki and Michio Sugeno, "Self-Organizing Fuzzy Controller", 計測自動制御學會論文集, 第20卷, 第8號, 昭和59年8月
- [10] Shihuang SHAO, "Fuzzy Self-Organizing Controller And Its Application For Dynamic Processes", Fuzzy Sets and Systems, 26(1988) 151~164, North-Holland
- [11] S.Daley and K.F.Gill, "A Design Study of Self-Organizing Fuzzy Logic Controller", Proc.Instrn.Mech.Engrs, vol 200, pp 59~69, 1986
- [12] CHUEN CHIEN LEE, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part I,II", IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, VOL 20, NO 2, MARCH/APRIL, 1990, pp 404~435
- [13] 김종식, "선형 제어 시스템 공학", 청문각
- [14] Y.F.Li and C.C.Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems", IEEE Control Systems Magazine, pp 65~72, April, 1989