

유연 관절 매니플레이터의 자기 구성 퍼지 제어

박 준 형,* 이 시 복**

Self-Organizing Fuzzy Control of a Flexible Joint Manipulator

Joon-Hyoung Park,* Shi-Bok Lee**

ABSTRACT

The position control of flexible joint manipulator is investigated by applying the self-organizing fuzzy logic controller (SOC) proposed by Procyk and Mamdani. The SOC is a heuristic rule-based controller and a further extension of an ordinary fuzzy controller, which has a hierarchy structure which consists of an algorithm being identical to a fuzzy controller at the lower loop and a learning algorithm accomodating the performance evaluation and rule modification function at the upper loop. This form of control can be used in those complex systems which have been too difficult to control or which in the past have had to rely on the experience of a human operator. Even though the significant dynamic coupling of the motors and links on the flexible joint manipulator, the performance of command-following is good by applying the proposed SOC.

Key words : self-organizing fuzzy controller(SOC ; 자기구성 퍼지 제어기), flexible joint manipulator(유연관절 매니플레이터), rule modification(규칙 수정), fuzzy controller(퍼지 제어기)

1. 서 론

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 효

과적인 고급 제어 기법 및 제어 장치의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 이러한 문제에 대한 하나의 대응 방법으로 인간의 지식 처리 방법을 모방한 퍼지제어를 적용한다.

2. 유연 관절 매니플레이터의 동역학

본 연구에서는 오일러-라그랑지 방법을 이용하여, 관절 부분에서 탄성적 거동을 하는 매니플레이터의 운동

* (주)LG 전자 생활 시스템 연구소

** 부산대학교 기계설계 공학과, 기계기술 연구소

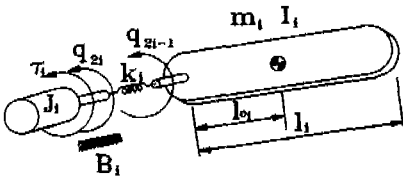


Fig. 2.1 Model for joint flexibility

방정식을 유도한다. ⁽¹⁾⁽²⁾

Fig. 2.1은 수평면에서 모터에 의해 직접 구동되는 유연한 관절을 가진 매니퓰레이터를 나타낸다. 단순화를 위해, i번째 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.

$$\bar{q}_i = (q_1, \dots, q_{2n}) \quad (2.1)$$

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

n차원벡터 \bar{q}_1, \bar{q}_2 를

$$\bar{q}_1 = (q_1, q_3, \dots, q_{2n-1})^T \quad (2.2)$$

$$\bar{q}_2 = (q_2, q_4, \dots, q_{2n})^T$$

로 정의한다. 일반적으로 로터의 각속도에 비해 링크의 각속도가 작기 때문에, 로터의 운동에너지에서 링크 운동에 의한 효과는 무시되고, 이 시스템의 운동에너지와 위치에너지는

$$KE = \frac{1}{2} \dot{\bar{q}}_1^T D(\bar{q}_1) \dot{\bar{q}}_1 + \frac{1}{2} \dot{\bar{q}}_2^T J \dot{\bar{q}}_2 \quad (2.3)$$

$$PE = V(\bar{q}_1 - \bar{q}_2) \quad (2.4)$$

로 표현된다. ⁽¹⁾ 여기서 $D(\bar{q}_1)$ 와 $V(\bar{q}_1 - \bar{q}_2)$ 는 강체 매니퓰레이터의 관성 매트릭스와 탄성 위치에너지이다. J 는 대각 행렬,

$$J = \text{diag}(J_1, J_2, \dots, J_n) \quad (2.5)$$

가 된다. 여기서 J_i 는 i번째 로터의 관성이다. 그러면

관절의 탄성 위치에너지는

$$V = \frac{1}{2} (\bar{q}_1 - \bar{q}_2)^T K (\bar{q}_1 - \bar{q}_2) \quad (2.6)$$

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,

$$D(\bar{q}_1) \ddot{\bar{q}}_1 + C(\bar{q}_1, \dot{\bar{q}}_1) \dot{\bar{q}}_1 + K(\bar{q}_1 - \bar{q}_2) = 0 \quad (2.7)$$

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

이 된다. 여기서 C 는 링크의 운동에 따른 코리올리 와 원심력의 항이고, B 는 모터 로터의 회전에 따른 감쇠에 해당한다. 그리고 \bar{u} 는 토크입력이다.

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, 실제적 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 변환하는데 어려움이 있다. 그리고 프로세스가

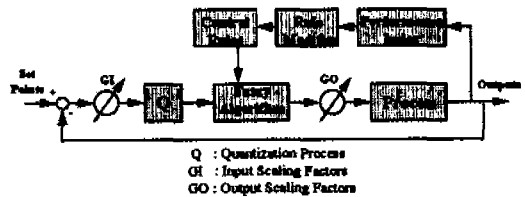


Fig. 3.1 Configuration of self-organizing fuzzy controller

시간에 따라 비선형적으로 변하는 경우에는 이 문제는 더욱 커진다. 이런 문제를 해결하기 위해서 아래 Fig. 3.1과 같은 구조를 갖는 자기구성 퍼지 제어가 필요하게 된다.

이러한 SOC는 Fig. 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 Fig. 3.2와 같이 구성되어 진다.⁽¹²⁾

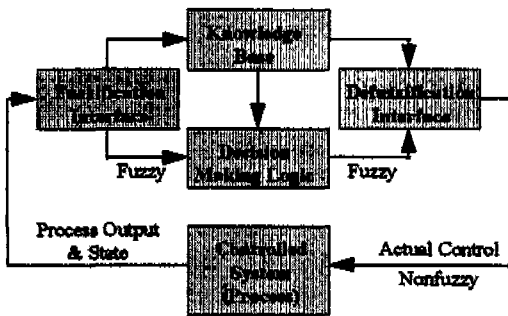


Fig. 3.2 Basic Configuration of Fuzzy Logic Controller

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

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

지식 베이스는 데이터 베이스와 규칙 베이스로 구성된다. 데이터 베이스에서는, 퍼지 집합으로 불확실한 정보를 나타내고 디지털 프로세싱을 하기 위해 이산화와 양자화되어야 한다. 이러한 이산화와 오프라인(off-line) 프로세싱을 통해 얻어진 룩 업 테이블(Look-Up Table)이 제어의 실행 시간을 단축시킨다. 이러한 이

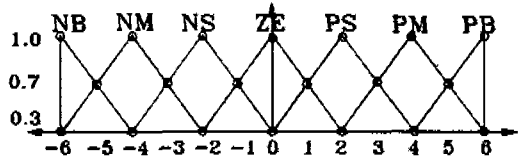


Fig. 3.3 Diagrammatic representation of fuzzy partition

Table 3.1 Discretized fuzzy set

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

유에서 본 연구에서도 Fig. 3.3과 같이 퍼지 구분된 멤버십 함수들을 Table 3.1과 같이 이산화와 양자화를 시행한다.

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~.” 형태로 구성한다. 그리고 이러한 규칙들이 FLC에 이용되기 위해서는, 프로세스 상태 변수와 제어 변수를 선정하여 언어적 제어 규칙들의 형태를 선정해야 한다. 그리고 또 제어 규칙들의 일관성을 유지해야 한다. 본 연구에서 전문가로부터 얻은 초기의 규칙 베이스를 Table 3.2에 나타낸다.

의사 결정 논리는 퍼지 함의와 추론 메커니즘을 포함

Table 3.2 Initial Rule Base obtained from Expert

		Linguistic value of change of error						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
Linguistic value of error	NB				NB			
	NM				NM			
	NS				NS			
	ZE			NB NM NS	ZE	PS PM PB		
	PS				PS			
	PM				PM			
	PB				PB			

한다. 본 연구에서 사용한 퍼지 함의는 식(3.2)와 같이 표현되는 라센(Larsen)의 곱 연산 규칙이다.

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

그리고 추론 메커니즘은,

$$\begin{aligned} & (A', B') \circ (A_i \text{ and } B_j \rightarrow C_i) \\ & = [A' \circ (A_i \rightarrow C_i)] \cap [B' \circ (B_j \rightarrow C_i)] \quad (3.3) \\ & \quad (\text{if } \mu_{A' \times B'} = \mu_{A_i} \cdot \mu_{B_j}) \end{aligned}$$

가 된다. 여기서 “ A_i and B_j ”는 $U \cap V$ 안의 퍼지 집합 $A_i \cap B_j$ 이다.

비 퍼지화는 크리스프한 제어 입력 공간 안으로 퍼지 제어 입력 공간을 사상 시키는 것이다. 이를 위해 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 가장 널리 사용되어지고 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 n 은 출력의 양자화 수준의 개수이다.

이상과 같이 단순 퍼지 논리 제어가 구성되었다. 여기에 추가적으로 자기 구성 퍼지 제어기는, 제어 성능 향상을 위한 적응 또는 학습의 역할을 위해 그 자체의 성능을 평가 할 수 있어야 한다. 각 프로세스 출력과 관련된 제어기 성능은 바라는 응답과 실제 응답과의 차이로 측정되어진다. 이 차이로 부터 제어기 출력에 요구되는 바람직한 수정분의 크기를 Table 3.3과 같은 성능지수표로부터 해당하는 지시를 내리게 된다.

Table 3.3 Performance Index Table

		Quantization level of change of error											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Quantization level of error	1	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
	2	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1
	3	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2
	4	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
	5	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
	6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
	7	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
	8	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6
	9	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6
	10	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6
	11	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6
	12	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6

이와 같은 성능 지수표를 이용하여 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 현재보다 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 감독 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 두 함의는

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

$$\begin{aligned} R'(nT) &= \\ E(nT - mT) \times CE(nT - mT) \times V(nT - mT) \end{aligned} \quad (3.9)$$

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

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

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

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

4. 수치 실험 및 고찰

본 연구에서는 수치 실험 대상 플랫폼으로 유연한 관절을 가진 단일 링크 매니퓰레이터와 두개의 링크를 가진 매니퓰레이터를 선정하고, 그리고 SOC의 성능을 비교 평가하기 위해, 현재 일반적으로 매니퓰레이터 위치제어에 대부분 적용되고 있는 PD제어도 함께 실시한다. 이때 모든 수치 실험에서 기준 명령 입력은 1(Rad)의 스텝 입력을 주어 실시하였다. 그리고 수치 실험에 사용된 시스템 파라미터 값들은 Table 4.1와 같다.

Table 4.1 Parameters for flexible joint manipulators

Parameters	Type of manipulator	2 Links	
	1 Link	1st link	2nd link
Stiffness of joint[N/rad]	100	100	100
Inertia of link [kg m ²]	0.052	0.052	0.052
Inertia of motor [kg m ²]	0.05	0.05	0.05
Length of link [m]	0.5	0.5	0.5
Mass of link [kg]	2.5	2.5	2.5
Friction of motor[N sec/rad]	0.05	0.05	0.05

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

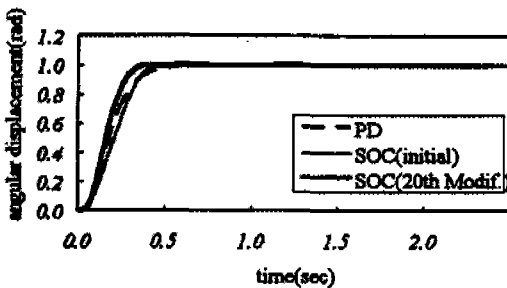


Fig. 4.1 The response of PD & SOC

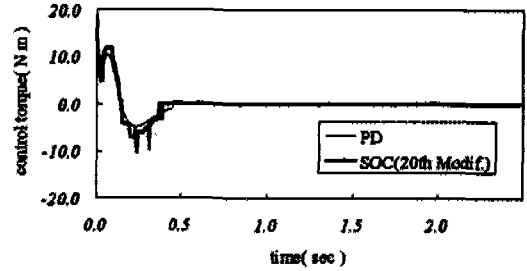
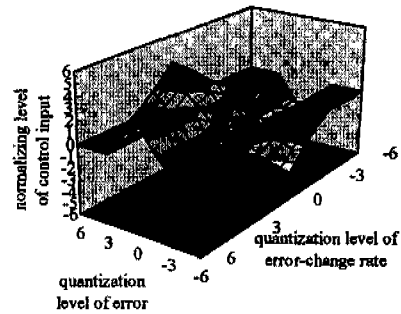
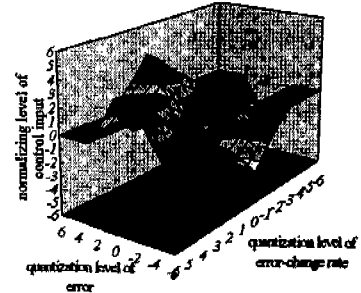


Fig. 4.2 Control torque of PD & SOC



(a) Initial Look-up Table



(b) Look-up Table after 20th Modification

Fig. 4.3 Look-up Table

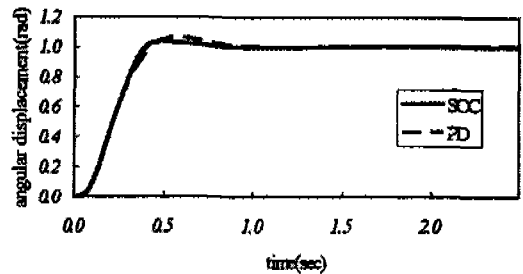


Fig. 4.4 The response of PD & SOC(payload=0.5kg)

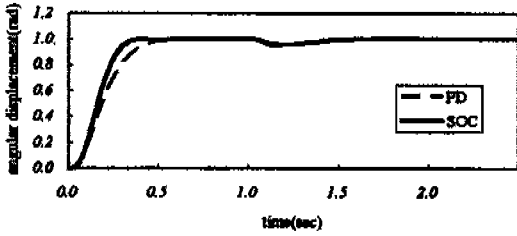


Fig. 4.5 The response of PD & SOC(with disturbance)

Fig. 4.1과 Fig. 4.2는 단일 유연 링크 매니플레이터의 링크 끝단에 부가질량이 없는 상태에서 제어한 결과이다. 여기서 SOC는 Table 3.2와 같은 초기의 규칙 베이스로부터 20번 창조와 수정을 거친 결과이다. Fig. 4.3은 초기의 룩 업 테이블이 20번 창조 수정 과정을 거친 후 변화된 모습을 보여준다. Fig. 4.2에서 볼 수 있듯이 PD의 제어 입력에 비해 SOC가 더 급격한 토크의 변화가 존재함을 볼 수 있다. 이는 규칙베이스의 창조와 수정 그리고 멤버십 함수의 이산화와 양자화에 따른 영향이라 볼 수 있다. 한편 설계된 제어기의 강인성을 비교해 보기 위해, 파라미터 변화는 링크의 끝단에 질량을 부가하였고, 외란은 1.0초 부터 1.05초 동안 크기가 5(N)인 힘을 링크 끝단에 가하였다. 이때 결과를

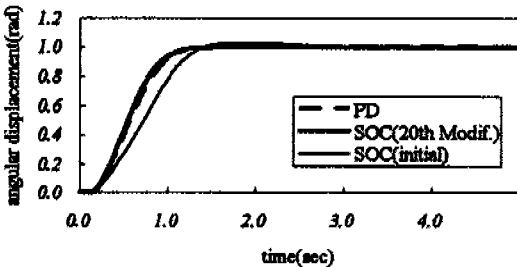


Fig. 4.6 The response of PD & SOC for 1st link

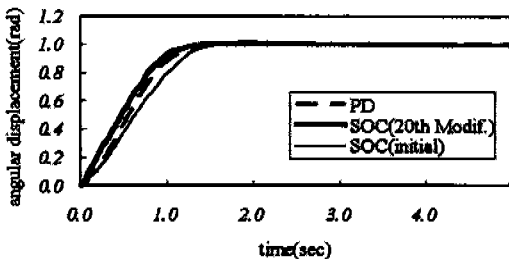


Fig. 4.7 The response of PD & SOC for 2nd link

Fig. 4.4, Fig. 4.5에 보여준다.

2링크 매니플레이터는 링크간의 연성이 이루어져 있기 때문에, 퍼지 제어를 위해서는 4개의 입력변수와 2개의 출력변수로 제어 규칙이 구성되기 때문에 각변수당 7개의 언어집합으로 구분한다면, 총 2401(7×7×7×7)개의 규칙이 필요하다. 하지만 이렇게 많은 규칙들을 직접 전문가가 만들긴 좀처럼 쉽지않다. 따라서 본 연구에서는 각 링크간의 연성은 고려하지 않고, 각 링크를 따로 각각의 룩 업 테이블로 제어하면서, 고려되지 않은 연성이 되어 있는 부분에 대한 보완을 각각의 룩 업 테이블을 수정 창조해 가면서 하도록 하였다. 이러한 방법을 이용하게 되면 하나의 링크 당 49개의 규칙만 필요하기 때문에, 규칙의 수가 총 98(7×7+7×7)개로 줄어드는 잇점이 있어서, 추론 시간도 대폭 줄일 수 있다. 이 방법을 통해 제어한 결과를 Fig. 4.6과 Fig. 4.7에 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 자기구성 퍼지 제어를 설계하고, 유연한 매니플레이터의 위치 제어 수치 실험을 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다. 이전의 규칙 베이스로부터 만족스럽지 못한 응답을 야기하는 부분을 창조 수정해 가면서, 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 베이스를 효과적이고도 간단히 전문가의 지식을 표현할 수 있는 연구가 있어야 할 것이다. 그리고 자기구성 퍼지 제어에 있어서 규칙 베이스가 변화함에 따라, 성능에 큰 영향을 미치는 데이터 베이스와 스케일링 인자의 적절한 변화를 이끌어 낼 수 있는 연구도 함께 이루어져야 할 것이다.

6. 참고 문헌

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 charac-

- teristics of Balanced Robotic Manipulators with Joints Flexibility" *Robotica*, Vol.10, pp.25-34, 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, NOL, pp.1-13, 1975.
 5. H.R.van Nauta Lamke and W.J.M.Kickert, "Application of a Fuzzy Controller in a Warm Water Plant," *Automatica*, Vol.12, 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," *Fuzzy automata and Decision Processes*, M.M.Gupta, G.N.Saridis and B.R.Gaines, Eds. Amsterdam:North-Holland, pp.285-320, 1977.
 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巻, 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.Instn,MEch.Engrs*, Vol.200, pp.59-69, 1986.
 12. CHUEN CHIEN LEE, "Fuzzy Logic in Control systems:Fuzzy Logic Controller-Part I, I," *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS*, Vol.20, No.2, MARCH/APRIL pp.404-435, 1990
 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.