

## TMS320C40를 이용한 이중아암 로봇의 퍼지제어 시스템 설계

### Design of Fuzzy Control System for Dual-Arm robot Based-on TMS320C40

김 종 수<sup>1</sup>, 정 동 연<sup>1</sup>, 한 성 현<sup>2</sup>

1. 경남대학교 대학원 기계설계학과 박사과정
2. 경남대학교 공과대학 기계자동화공학부

#### Abstract

In this paper, a self-organizing fuzzy controller(SOFC) for the industrial robot manipulator with a actuator located at the base is studied. A fuzzy logic composed of linguistic conditional statements is employed by defining the relations of input-output variable of the controller. In the synthesis of a FLC, one of the most difficult problems is the determination of linguistic control rules from the human operators. To overcome this difficult, SOFC is proposed for a hierarchical control structure consisting of basic level and high level that modify control rules. The proposed SOFC scheme is simple in structure, fast in computation, and suitable for implementation of real-time control. Performance of the SOFC is illustrated by simulation and experimental results for robot with four joints.

#### I. 서 론

산업분야에서 생산공정의 자동화를 위하여 산업용 로봇의 사용이 급증함에 따라 로봇 매니플레이터 제어기의 성능 향상을 통하여 현 생산 시스템에 로봇의 활동 범위를 확대 시키기 위해 로봇 운동의 정확성, 고속성, 안정성의 기능이 절실히 요구되어 지고 있다. 지금까지의 산업용 로봇의 제어방식은 로봇 매니플레이터의 비선형 동특성을 거의 무시한 상태에서 고전적 선형 서보 제어 방식인 PD 및 PID제어방식에 주로 의지하고 있는 실정이다. 이러한 제어 기법은 설계되는 제어기의 게인 값이 고정된 게인 값이므로, 이러한 고정된 제어 이득을 갖는 제어기는 외부환경 및 빈번한 부하하중과 파라미터의 변화에 능동적으로 대응할

수 있는 능력이 부족하므로, 파라미터 변동이나 고속 운전시 발생하는 비선형성의 증가, 그리고 부하변동 등이 외란으로 작용하는 한 기존의 제어 방식은 제어기의 견실성을 보장할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 정확한 수학적 모델링 해석보다는 전문가의 지식이나 경험을 퍼지 규칙에 반영하여 퍼지 추론을 통해서 인간의 경험과 직관에 의한 지능형 퍼지 제어 기법을 통해 작업조건 변화 및 시스템 내부 외란 등의 다양한 변화에도 효율적인 응용이 가능한 유연하고 견실한 제어성능을 지니는 새로운 퍼지 제어 알고리즘을 개발하여 이러한 문제점들을 해결하고자 한다.

퍼지 시스템은 지식의 논리적, 구조적 표현을 명확히 할 수 있고 퍼지추론 등의 퍼지 연산을 통해 퍼지 정보처리를 할 수 있으며, 복잡한 시스템에 대한 개략적 기술을 가능하게 하여 자연적인 표현을 사용한 고위의 정보처리가 가능한 시스템이다. 그러나 소속함수와 규칙에 대한 조종 능력이 없어 변화하는 환경에 대해 적응성이 떨어지고 계산 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 자기구성 제어기를 제안한다. 일반적으로 자기구성 제어기라 함은 제어대상의 플랜트와 제어기가 작동하는 환경의 변화에 따라 스스로 변화해 가는 제어기를 말하며, 본 논문에 제안된 제어기의 특징은 스스로 제어성능을 개선해나가는 데 있다. 자기구성 퍼지 제어기는 적절한 제어입력을 출력하면서 환경을 관측하고 이 제어입력으로 인한 결과를 이용하여 다음에 나올 결과를 향상시킨다. 자기구성 퍼지 제어기가 시스템을 규명할 수 있으므로 환경을 정확히 몰라도 제어가 가능해 지며 모델링이 훨씬 간단해진다. 그러므로 자기구성 퍼지 제어기를 이용하면 환경에 대한 최

소의 정보만을 가지고도 제어기를 설계할 수 있다. 본 논문에서는 조정인자와 규칙을 동시에 수정하여 제어 규칙이 점진적으로 수렴하면서 수렴속도를 향상시킬 수 있는 자기구성 퍼지 제어기를 제안한다. 제안된 자기구성 퍼지 제어기는 위에서 언급한 바와 같이 퍼지 제어기의 단점을 보완하는 측면이 있기 때문에 성능향상을 기대할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 퍼지 시스템의 장점을 살리고 단점을 보완하는 퍼지추론기능과 퍼지규칙 조정능력을 갖는 퍼지 알고리즘을 개발하고 외부환경의 변화 즉, 제어대상인 플랜트의 파라미터 변화 및 부하의 변동에 대해서도 능동적이고 우수한 제어성능이 유지될 수 있는 고정도 산업용 로봇 제어기 설계기법을 제안한다.

## II. 본 론

### 2.1 자기구성 퍼지 제어기 구성

퍼지 논리 제어기는 제어 규칙을 반복적인 실험을 통해 만족할 만한 성능이 나올 때까지 시행 착오적인 시도 및 수정과정을 통해 설계를 해야 한다. 비록 체계적인 제어 규칙의 수정 방법들이 제안되고 있지만, 이런 작업들은 지루한 일이다. 따라서 시스템이 원하는 출력을 발휘할 수 있도록 제어규칙을 스스로 조정하는 제어기가 요구된다. 이를 위하여 본 연구에서는 새로운 자기구성 퍼지 제어기를 제안한다. 자기구성 퍼지 제어기는 두 가지 일을 동시에 수행한다. 다시 말하면, 시스템의 규명(Identification)과 제어를 통합한 것이라고 말할 수 있다. 자기구성 퍼지 제어기를 이용하면, 환경에 대한 최소한의 정보만 가지고도 제어기를 설계할 수 있다. 자기구성 퍼지 제어기의 구조는 Fig. 1.에 나타나 있다. Fig. 1.은 기존의 단순 퍼지 제어기에 자동 조정 능력을 부여하기 위해 성능평가 부분과 조정인자 수정부분 그리고 규칙 수정 부분을 추가한 형태이다. 그리고 Fig. 2.는 제안된 자기구성 퍼지 제어기로 구성된 전체 로봇 매니플레이터에 대한 전체 구조를 나타내고 있다.

### 2.1.2 퍼지화부

퍼지화부에서는 하나의 정확한 값으로 측정된 입력 변수 값을 적절한 퍼지값(퍼지함수)으로 바꾸는 역할을 한다. 즉, 입력데이터를 적절한 언어값으로 변환한다. 또한 입력변수값의 영역을 이에 상응하는 전체집합으로 크기 변환하는 작업을 수행하는 부분이다. 즉, 제어기의 입력변수의 값을 측정하여, 입력 변수값의 영역을 이에 대응하는 전체집합으로 사상시켜, 입력데이터를 적당한 언어적인 값으로 변환시키고 이 언어적 값은 다시 멤버쉽 함수로 바꾸어 주는 역할을 한다.

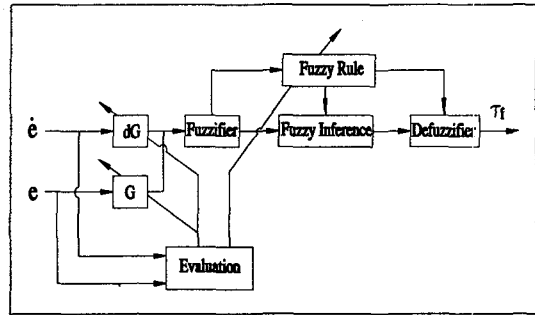


Fig 1. The block diagram of structure for self organizing fuzzy controller.

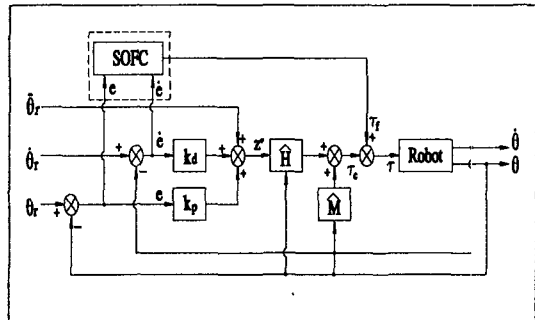


Fig 2. The block diagram of proposed fuzzy control structure for robot manipulator.

### 2.1.1 퍼지 추론부

퍼지 추론은 If-then 형식으로 구성되며, If 뒤에는 전건부가 오고 then뒤에는 후건부가 오게 된다. 플랜트 제어에 필요한 플랜트의 상태에 관한 정보를  $x_1$ 과  $x_2$ , 플랜트로의 출력을  $y$ 로 하면 If-then 형식의 퍼지 제어 규칙은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R^i : \text{If } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2}, \\ \text{then } y \text{ is } B_i \quad i=1,2,\dots,n$$

여기서,  $i$ 는 제어 규칙의 번호를,  $x_1$ 과  $x_2$ 는 전건부 변수를 나타내며 그리고  $y$ 는 후건부 변수를 나타낸다.

퍼지 추론부는 실제 입력이 주어졌을 때 적용 가능한 제어 규칙을 이용하여 퍼지 추론을 함으로서 출력을 계산하게 된다. 퍼지추론에 사용되는 퍼지 변수에는 연속형과 이산형이 있으며 연속형에는 범종형과 삼각형이 있다. 초기에는 범종형을 이용했지만, 최근에는 거의가 삼각형을 나타내고 있다. 이것은 삼각형 쪽의 계산이 편하고, 성능에 있어서도 범종형과의 차이가 거의 없기 때문이다. 본 연구에서도 삼각형 퍼지 변수를 사용하였다.

퍼지 제어에 필요한 퍼지 추론기에는 여러가지 Fuzzy Reasoning 방식을 채택할 수 있고 직접, 간접, 혼합형의 3가지가 있다. 이 방식들은 각기 추론에 필요한 연산을 나름대로의 효율성을 가지고 추론결과와 과정에 도움을 주기 위해 제시되었다. 본 논문에서는 직접법의 Mamdini의 최대-최소(Max-Min)방식에 의한 추론법을 사용하였다.

### 2.1.3 지식 베이스부

룰(Rule) 베이스 메모리는 퍼지 시스템의 두뇌에 해당되는 부분으로, 필요한 정보를 일시적으로 또는 영구적으로 보관하는 역할을 한다. 이 메모리는 소속함수들이 갖는 0과 1 사이의 수치를 가지고 있고, 또 추론의 연산이 용이하게 되는 메모리 구조를 취해야 하므로 '퍼지 메모리' 라고도 한다. 이 퍼지 메모리는 다음과 같은 If-then 룰 들로 구성되며, 각각의 룰은 Fuzzy 명제들로 구성되어 있고 이 명제는 멤버쉽 함수로 나타낼 수 있다.

- $R_1$  : If  $x_1$  is  $A_{11}$  and  $x_2$  is  $A_{12}$ ,  
then  $y$  is  $B_1$  .
- $R_2$  : If  $x_1$  is  $A_{21}$  and  $x_2$  is  $A_{22}$ ,  
then  $y$  is  $B_2$  .
- ⋮
- $R_n$  : If  $x_1$  is  $A_{n1}$  and  $x_2$  is  $A_{n2}$ ,  
then  $y$  is  $B_n$  .

룰 베이스의 설계방법으로는 직관적이고 발견적인 전문가의 경험에 의뢰하는 경우와 모델에 기초하여 시뮬레이션의 모델의 자료를 이용하는 방법과 모델과 무관한 방식인 학습과 실험자료에 의한 방법으로 설계할 수 있다.

### 2.1.4 비퍼지화부

퍼지 제어의 퍼지 추론결과는 제어입력 전체 집합에 정의 된 퍼지 집합으로 출력된다. 제어에서 퍼지 집합을 플랜트의 조작량으로서 출력하면 플랜트를 움직이게 할 수 없다. 만약 퍼지 제어기와 플랜트 사이에 개입한다면, 애매한 지시를 내리면 인간은 그 의미를 이해하고, 어떤 수치로 변환하여 조작량을 결정할 것이다. 이와 같이 출력부 전체집합에서 정의된 퍼지 제어 조작량을 명확한 비퍼지 제어 조작량으로 변환시켜 주는 작업을 비퍼지화(Defuzzification) 또는 일점화라 한다. 비퍼지화에는 크게 최대값 방법(Max Criterion Method), 최대 평균법(Mean of Maximum Method) 그리고 무게 중심법(Center of Area Method) 등의 방법이 사용되고 있으며 퍼지 제어기의 성능에 영향을 미치는 요소가 많으므로 어느 비퍼지화 방법이 어떻다고 일반적으로 말하기 어려우나 무게 중심법이 다른 방법들에

비해서 우월한 성능을 나타낸다고 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 무게 중심법을 사용하였다.

### 2.2 자기구성 퍼지 제어기의 제어칙

구조 불확실성 및 비구조 불확실성으로 부터 발생하는 오차를 보상하기 위하여 실험 대상인 듀얼암 로봇의 운동방정식으로 부터 다음과 같이 정의 할수 있다.

$$H(\theta) \ddot{\theta} + M(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + F(\dot{\theta}) = \tau \quad (1)$$

여기서,  $M(\theta, \dot{\theta})$ 항은 원심력 및 코리올리력 합과 중력항을 포함하는 것으로서, 식(2)와 같다.

$$M(\theta, \dot{\theta}) = V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (2)$$

여기서,  $V(\theta, \dot{\theta})$ : 원심력 및 코리올리력,  
 $G(\theta)$ : 중력항

전체 제어기의 오차 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\hat{H}(\theta) z^* + \hat{M}(\theta, \dot{\theta}) + \tau_f = \tau \quad (3)$$

여기서,  $z^* = \theta_d + K_d(\theta_d - \dot{\theta}) + K_p(\theta_d - \theta)$   
식(3)에 식(1)를 대입 정리하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{H}(\theta) z^* + \hat{M}(\theta, \dot{\theta}) + \tau_f \\ = H(\theta) \ddot{\theta} + \hat{M}(\theta, \dot{\theta}) + F(\dot{\theta}) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)(4)로 부터 다시 표현하면 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = \hat{H}(\theta)^{-1} [ \Delta H(\theta) \ddot{\theta} \\ + \Delta M(\theta, \dot{\theta}) + F(\dot{\theta}) - \tau_f ] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 우변항을

$$\Delta H(\theta) \ddot{\theta} + \Delta M(\theta, \dot{\theta}) + F(\dot{\theta}) = \tau_f \quad (6)$$

로 정의 하면, 퍼지 제어기의 출력신호로 적용하면, 점진적으로 우변이 영으로 수렴하게 되어 이상적인 시스템에 접근하게 된다. 만약,  $\Delta H = \Delta M = 0$  그리고  $F=0$ 이 되는 것과 같은 결과가 되도록 제어 입력값이 갱신되어진다면 가장 이상적인 상태로서 우변항은 영이다. 이러한 원리에 의하여 자기구성 퍼지제어기에 출력되는  $\tau_f$  에 의해 최종 출력  $\tau$ 에 가감되어 점진적으로 우변이 영으로 수렴하게 되어 이상적인 시스템에 접근하게 된다.

### 2.2.1 자기구성 퍼지제어기의 교정량 추론

$nT$ 의 샘플 순간에 입력  $u(nT)$ 에 의한 플랜트의 출력  $y(nT)$ 가 발생된다. 이때 모델에서 발생하는 출력 요구량이  $S(nT)$  였다면  $y(nT)$ 에서  $S(nT)$ 로 변하기 위하여 입력의 교정량이 필요하게 될것이다.

$$e(nT) = S(nT) - y(nT) \quad (7)$$

$$ce(nT) = e(nT) - e((n-1)T)$$

이때의  $e$ 값은 매 샘플시간 마다의 기준입력과 플랜트의 출력 사이의 오차이다. 교정량  $\tau_{\Delta}$ 의 추론과정은 기존의 추론법을 이용하지 않고 오차  $e$ 을 가지고 이미 정해놓은 값을 출력시키는 방법을 사용하였다. 이때 사용된 퍼지변수는 다음과 같다.

- If  $e$  is PB then  $\tau_{\Delta}$  PB,
- If  $e$  is PS then  $\tau_{\Delta}$  PS
- If  $e$  is ZERO then  $\tau_{\Delta}$  ZERO,
- If  $e$  is NS then  $\tau_{\Delta}$  NS
- If  $e$  is NB then  $\tau_{\Delta}$  NB

$\tau_{\Delta}$ 은 퍼지제어기에서 발생하는 출력의 30%의 값으로 하였다.

### 2.2.2 자기구성 퍼지 제어기의 기본 규칙의 수정

퍼지제어기의 성능을 개선할 때 규칙의 수정 방법은 크게 3가지로 나누어 진다. ① 제어규칙의 수정, ② 조정인자(scaling factors)의 수정, ③ 제어규칙과 이득함을 동시에 수정 여기서 두번째 방법은 시스템의 제어성능을 향상시킬 수 있으나 적절한 퍼지 제어규칙이 미리 설정되어 있다는 전제가 뒤따른다. 세번째와 같은 변경 방법도 시스템의 성능을 향상시킬 수 있으나 제어규칙과 조정인자의 두 성분을 동시에 어떻게 적절히 바꿀 수 있느냐 하는 문제가 아직 연구과제로 남아있다. 일반적인 자기구성 퍼지제어기는 첫번째의 방법, 제어 규칙의 수정에 의존한다. 본 연구에서는 규칙을 바꾸는 것 뿐 아니라 조정인자도 동시에 수정하였다.

조정인자의 수정은 초기의 규칙에 의하여 실행후 이때의 출력을 가지고 -6과 6사이의 퍼지값을 정규화 시켜준다. 조정인자를 수정하는 이유는 유연한 매니플레이터와 같이 진동하는 대상에서는 정확한 오차와 오차의 변화량을 찾기 어렵다. 값을 정확하게 찾아내지 않으면 ZO 부근에만 정규화 되어있거나 그렇지 않으면 -6과 6을 넘어 버리는 경우가 있다. 이럴 경우 규칙의 정확한 적용은 힘이 든다. 초기규칙을 가지고 실행한 결과가 나오면 정확한 조정인자를 찾아 다시 퍼지화를 시킨후 새로운 규칙과 함께 적용 시켜나간다. 앞에서 추론된  $\tau_{\Delta}$ 은 초기의 규칙에 의한  $\tau_{old}$ 와 합쳐서 새로운 출력  $\tau_{NEW}$ 을 추론해 낸다.

$$\tau_{NEW} = \tau_{old} + (\tau_{\Delta} \times u) \quad (8)$$

여기서 이득  $u$ 는 해당 샘플링 시간마다  $\tau_{\Delta}$ 이 곱해주는 값이다.

다음은 자기구성 퍼지 제어기의 제어 알고리즘 프로세스로서 다음과 같이 일곱 단계로 진행된다.

- 단계1. 초기의 조잡한 제어규칙에서 제어
- 단계2. 매 샘플시간마다 기준입력과 플랜트 출력오차  $e$ 를 계산
- 단계3.  $e$ 을 가지고  $\tau_{\Delta}$ 을 계산
- 단계4. 새로운 제어규칙  $u_{NEW}$ 을 생성
- 단계5. 새로운 제어 규칙으로 플랜트를 제어
- 단계6. 0.05sec 마다  $e_{max}$ ,  $e_{min}$ ,  $ce_{max}$ ,  $ce_{min}$ 을 측정하여 조정인자를 바꾼다.
- 단계7. 단계 2 부터 반복

## III. 시뮬레이션 및 실험

### 3.1 시뮬레이션

제안된 자기구성 퍼지 제어기의 제어성능의 신뢰성을 확인하기 위하여 듀얼암 로봇의 2자유도 평면 회전관절에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 듀얼암 로봇의 동적 방정식에서 1, 2 관절만 고려한 상태에서 수행하였다. 듀얼암 로봇은 1, 2관절에 가장 큰 비중이 주어지고 있으며, 3, 4 관절까지 포함하지 않아도 충분히 제어 알고리즘의 신뢰성을 확인할 수 있다. 사용되어진 파라미터는 실제 대상 로봇인 Dual-Arm Robot으로 하여 적용하였다. 시뮬레이션에 사용된 계수는 Table 1 ~ Table 3에 주어져 있으며, Fig. 3은 4관절로봇의 기본 구조를 나타내고 있다.

Table 1. The specification of a Dual-Arm robot.

각 링크의 질량(kg)		각 링크의 길이(m)		각 링크의 점성 마찰력 (Nms)	
m1,5	15.067	l1,5	0.35	f1,5	2.21
m2,6	8.994	l2,6	0.26	f2,6	0.7
m3,7	3.0	l3,7	0.256	f3,7	0.7
m4,8	1.0	l4,8	0.05	f4,8	0.0003

Table 2. The specification of a Dual-Arm robot.

감속기	감속비		각링크의 관성모멘트(kgm <sup>2</sup> )	
Harmonic Driver	n1,5	1/50	J1,5	0.821
Harmonic Driver	n2,6	1/50	J2,6	0.136
Ball screw and Timing belt	n3,7	1/45	J3,7	0.045
Timing belt	n4,8	1/12	J4,8	0.0014

Table 3. The specification of motor of a Dual-Arm robot.

항 목	1,5축	2,6축	3,7축	4,8축
모터 질량(kg)	1.7	1.2	0.5	0.5
정격토크(Nm)	1.27	0.64	0.159	0.159
관성모멘트 (kgm <sup>2</sup> )	$0.36 \times 10^{-4}$	$0.20 \times 10^{-4}$	$0.026 \times 10^{-4}$	$0.026 \times 10^{-4}$
최대 토크 마찰력(Nm)	0.04	0.04	0.03	0.03
정격회전수 (rpm)	3000	3000	3000	3000
기계적 시정수(ms)	0.5	0.7	1.0	1.0

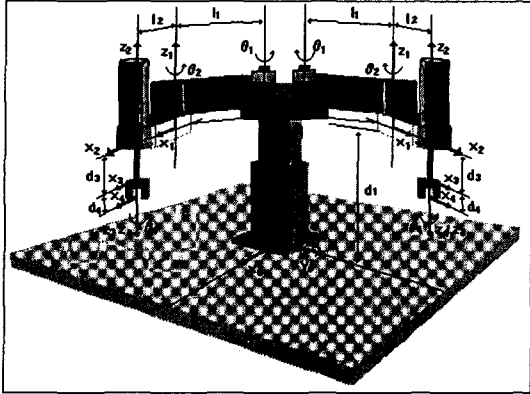


Fig. 3 Coordinates frame of Dual-Arm robot

### 3.1.1 시뮬레이션 방법

제안된 제어기의 성능을 확인하기 위하여 실험 대상인 듀얼암 로봇에 적용하여 스텝 및 정현파 함수형태 그리고 증속-등속-감속의 기준입력에 부하하중을 증가시켜 그 결과를 분석하였다. 샘플링 시간은 1msec이며 2초 동안 수행하는 것으로 하였다. 조정인자와 후건부 규칙을 동시에 변화시킴으로써 더 나은 성능을 얻고자 하였다. 시뮬레이션에 사용되어진 퍼지변수는 등간적인 삼각함수를 사용하였으며 초기의 규칙은 Table 4에 나타내었다. 전장에서 논의한 초기의 조잡한 제어규칙에 의해서 출력오차와 그오차의 변화분을 통하여 조정인자와 후건부 규칙을 변화시켜 성능향상을 꾀하였다. 그리고 Table 5는 언어적 변수에 대한 멤버쉽 값을 나타내고 있다.

Table 4. Fuzzy control rule

ce	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e							
NB				NB	NM		
NM				NM			
NS				NS	ZO		PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM		ZO	PS			
PM			PS	PM			
PB			PM	PB			

여기서,

NB : Negative Big,                      NM : Negative Medium  
 NS : Negative Small,                  PS : Positive Small  
 PM : Positive Medium,                PB : Positive Big  
 ZO : Zero

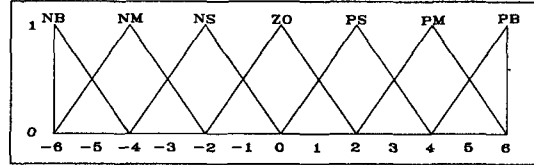


Fig. 4. Linguistic variable

Table 5. Membership for linguistic variable

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
-6	1	0.3	0	0	0	0	0
-5	0.7	0.7	0	0	0	0	0
-4	0.3	1	0.3	0	0	0	0
-3	0	0.7	0.7	0	0	0	0
-2	0	0.3	1	0.3	0	0	0
-1	0	0	0.7	0.7	0	0	0
0	0	0	0.3	1	0.3	0	0
1	0	0	0	0.7	0.7	0	0
2	0	0	0	0.3	1	0.3	0
3	0	0	0	0	0.7	0.7	0
4	0	0	0	0	0.3	1	0.3
5	0	0	0	0	0	0.7	0.7
6	0	0	0	0	0	0.3	1

### 3.1.2 시뮬레이션 결과

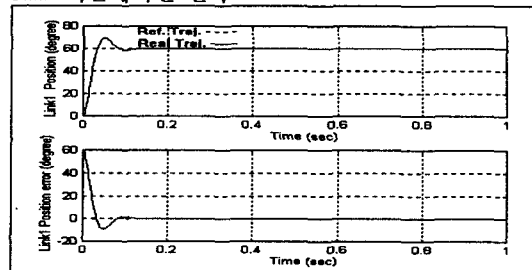


Fig. 5 Simulation results of position trajectory tracking for link 1.(4 kg payload)

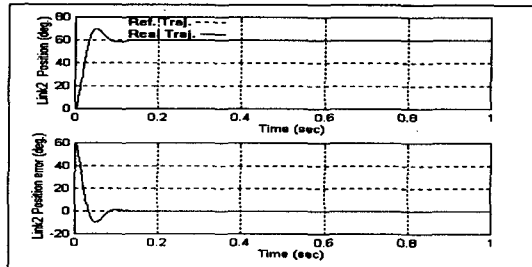


Fig. 6 Simulation results of position trajectory tracking for link 2.(4 kg payload)

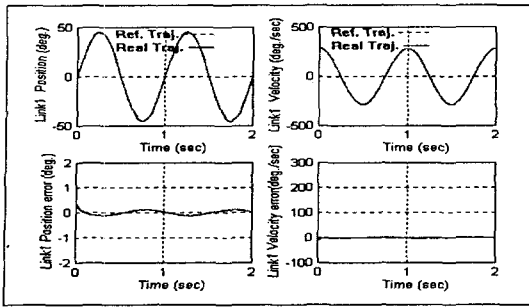


Fig. 7 Simulation results of position and velocity trajectory tracking for link 1.(2 kg payload)

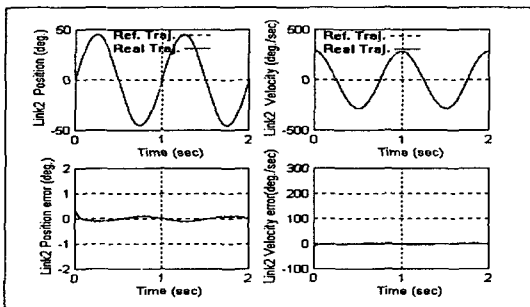


Fig. 8 Simulation results of position and velocity trajectory tracking for link 2.(2 kg payload)

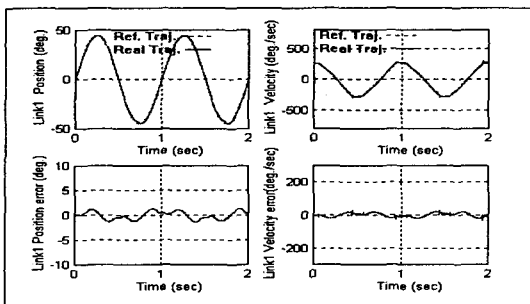


Fig. 9 Simulation results of position and velocity trajectory tracking for link 1.(2 kg payload)

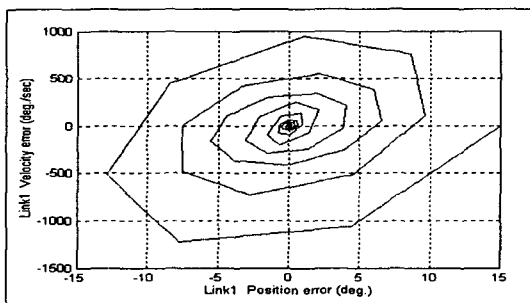


Fig. 10 Stability analysis at error state space.

### 3.2 실험

#### 3.2.1 실험장치

제어기 전체구조는 INTEL80486 프로세서를 기반으로 하고 real-time OS 사용하여 제어기와 주변기기를 동시 제어하도록 하고있다. 본 실험에서 사용한 joint 제어기 CPU는 TI사의 DSP TMS320C40를 채용하였다. TMS320C40은 50MHZ clock으로 동작하고 1 instruction 수행시간이 40ns에 이르는 32bit 고속 CPU로, 이를 토대로 1ms의 샘플링 time으로 프로그램을 실행하게 하였다.

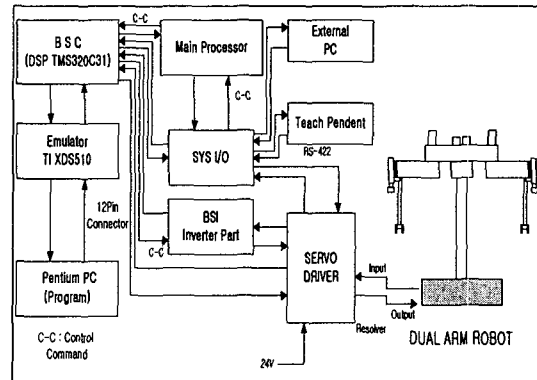


Fig. 11 The block diagram of control system.

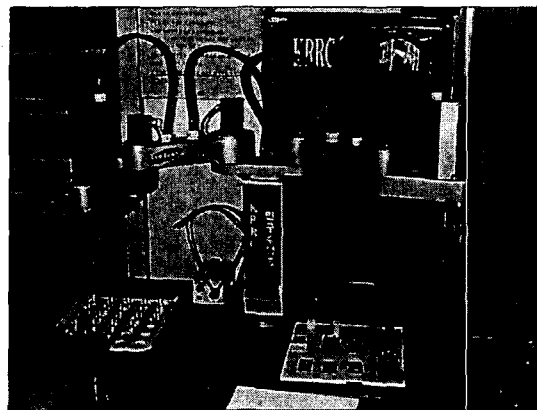


Fig. 12 Experimental set-up.

Fig. 11은 제어기의 전체 구조를 나타낸다. 전체 제어기의 구성은 power supply, servo BSI, noise filter 및 각각의 역할을 수행하는 보드들로 구성되어 있다. 각 구성체간의 통신은 주제어기가 주(host)가 되고 BSC등 나머지는 종(slave)이 되어 명령을 수행한다. 이들 보드들은 main board, system I/O board, user I/O board, BSC(bus interfaced servo controller) board 등으로 구성되어 있으며, 모두 back plan board 에 부착되어 있다.

### 3.2.2 DSP TMS320C4x

디지털신호처리는 신호처리를 디지털적으로 하는 특수한 마이크로 프로세서로서 종래의 아날로그 신호 처리기에서는 실현이 곤란하던 기능을 높은 정확도, 고안정성, 고속성으로 실현할 수 있는 특징을 갖춘 프로세서이다. 이러한 특징을 바탕으로 수학적 연산을 많이 필요로 하는 알고리즘의 프로그램화가 가능하고, 고속성으로 실시간 처리가 이루어진다. 또한 프로그램밍의 유연성으로 시스템의 유연성 또한 향상됨으로서 비용절감 효과와 신뢰성 향상을 기대할 수 있다. 본 연구에서 적용한 디지털신호처리는 TI의 TMS320C4x 계열로서 본 실험에서는 C40을 대상으로 하였다. C40은 데이터 체제가 Floating point 체제로서 명령 수행 시간이 40ns이며 ROM, RAM이 각각 한개 및 두개로서 구성된 원칩 프로세서이다.

TMS320C4x의 구조는 CPU, Multiplier, ALU, ARAU 등으로 구성되어 있다. 각 부분의 특성을 살펴보면 central processing unit (CPU)는 내부 버스(CPU1-2, REG1-2) 예를 들면 multiplier에서는 auxiliary register arithmetic units(ARAUs)에서 간접주소 지정 방법으로 한 사이클에서 두개의 addresses지정이 가능하기 때문이다(데이터는 REG1-2버스로 간다). 그리고, Multiplier는 integer, floating point values로 각각 24bit, 32bit의 한 사이클을 실행한다. 즉, 입력이 각각 24, 32bit이다. 하지만, 출력은 각각 32, 40bit로 된다. 실행 특성으로는 40-ns single cycle instruction execution time, 275 MLOPS(Million operations per second), 320 Mbytes/second의 능력을 제공한다.

### 3.2.3 에뮬레이터

본 연구에서 XDS510 에뮬레이터를 이용하여 연구를 수행하였다. DSP TMS320C4x 및 C5x 전용 에뮬레이터로서 586급 PC와 병렬로 연결되도록 구성되어 있다. TMS320C4x으로 구현한 제어 프로그램을 실험하기 위해, TI XDS510 에뮬레이터를 TMS320C40 CPU 프로세서(BSC)와 586 PC의 사이에 설치하여, 두축을 동시에 제어하면서 실험할 수 있게 하였다. Fig. 13은 에뮬레이터의 셋업 상태를 나타낸다.

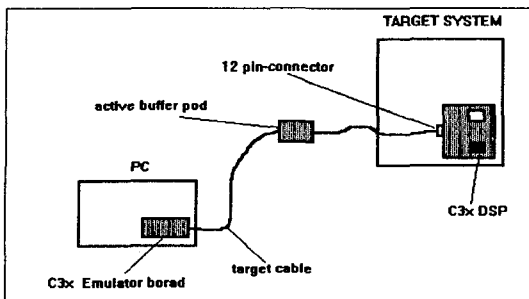


Fig. 12 Equipment setup using the emulator and target system.

### 3.2.4 실험결과

설계된 디지털 퍼지 제어기의 성능 실험을 위하여 듀얼암 로봇의 각 관절에 대한 위치 및 속도 추종 제어 성능 실험을 수행하였다. 각 관절 제어기는 자체 설계된 디지털 신호 처리기인 TMS320C40을 사용한 관절 제어기를 사용하였으며, 제어 알고리즘으로는 TMS320C4x의 어셈블리로 직접 개발한 S/W를 사용하였다.

관절 제어기는 16ms로 입력되는 궤적계획된 데이터를 1ms로 interpolation을 수행한다. 반면에 전류제어는 200  $\mu$ s 단위로 계산이 이루어지게 된다. 따라서, 개발한 어셈블리어 프로그램은 16ms 마다 goal position를 받아, 1ms 마다 interpolation 하여 위치 루프를 보내도록 구성되었다. 실험에 사용한 ROBOT는 Dual-Arm Robot을 이용하였다, 각 관절의 감속기로는 1축과 2축은 하모닉드라이브, 3축과 4축은 볼스큐류 및 타이밍벨트가 사용되었으며, 각각 감속비가 1축과 2축은 50 대 1, 3축과 4축은 각각은 45 대 1 과 12 대 1로 되어 있다. 본 실험에서 적용하여 사용한 에뮬레이터(TI XDS510)은 486 PC와 통신하도록 하여, 실험된 data를 각각 1축과 2축, 3축과 4축 별도로 동시에 두축의 data를 2ms 마다 메모리 순환 저장방식으로 저장하고, 이를 intel hex object format file로 전환하여 10진수로 데이터를 분석할 수 있도록 하였다. 데이터 획득은 모터에 부착된 엔코드 센서를 통해 획득된 위치, 속도 데이터와 제어 프로그램상의 각종 데이터를 RAM 영역상에서 남아 있는 영역(0X103FFF-7FFF)에 저장시켜, 에뮬레이터의 save 명령으로 PC에서 읽어 들이도록 하였다.

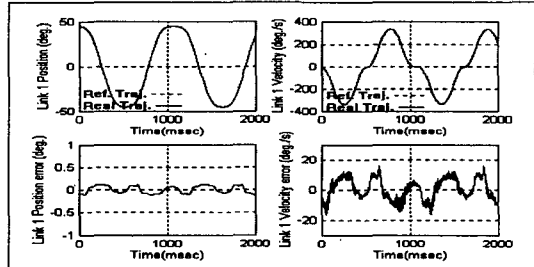


Fig. 14 The experimental results of SOFC for position and velocity trajectory tracking of link 1.(2.0kg payload)

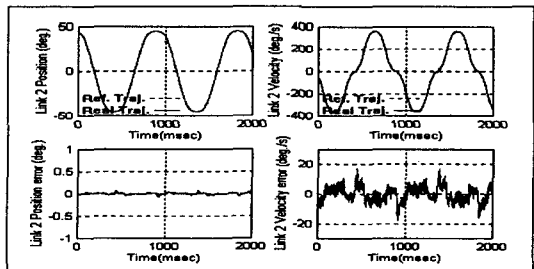


Fig. 15 The experimental results of SOFC for position and velocity trajectory tracking of link 2.(2.0kg payload)

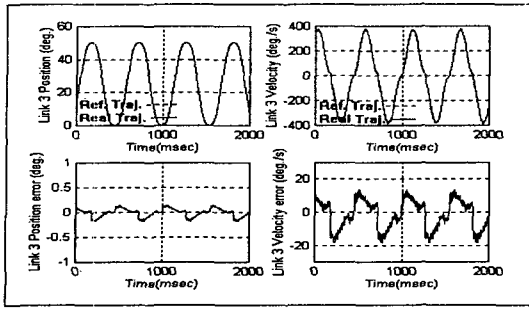


Fig. 16 The experimental results of SOFC for position and velocity trajectory tracking of link 3.(2.0kg payload)

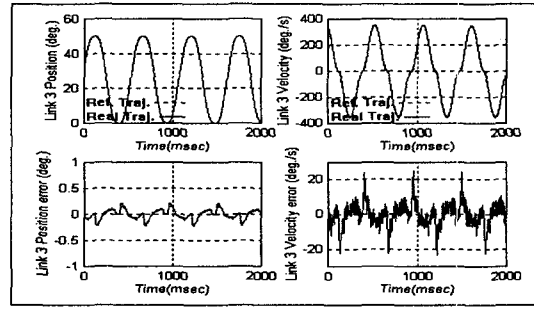


Fig. 20 The experimental results of PID controller for position and velocity trajectory tracking of link 3.(2.0kg payload)

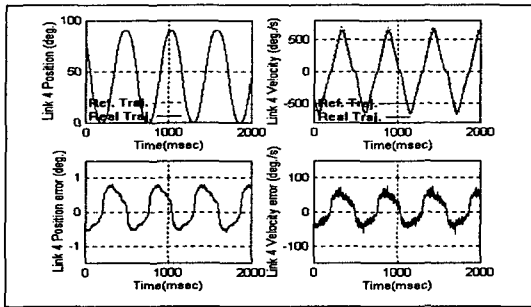


Fig. 17 The experimental results of SOFC for position and velocity trajectory tracking of link 4.(2.0kg payload)

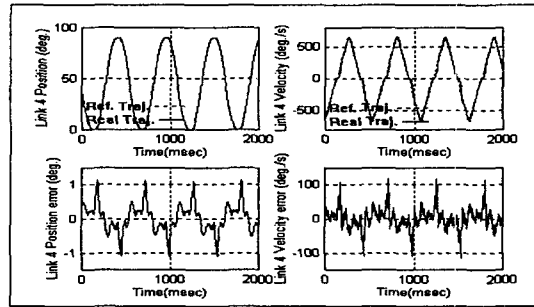


Fig. 21 The experimental results of PID controller for position and velocity trajectory tracking of link 1.(2.0kg payload)

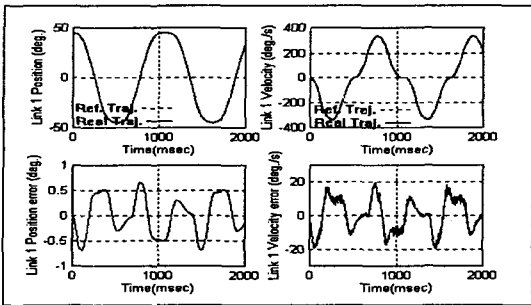


Fig. 18 The experimental results of PID controller for position and velocity trajectory tracking of link 1.(2.0kg payload)

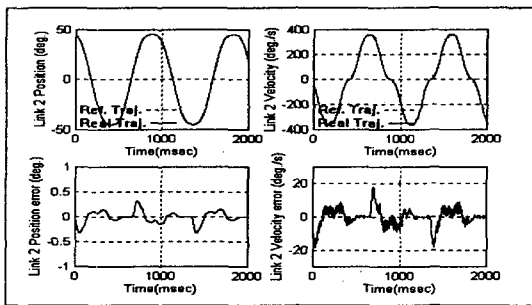


Fig. 19 The experimental results of PID controller for position and velocity trajectory tracking of link 2.(2.0kg payload)

#### IV. 결론

본 연구에서 제안된 자기구성 퍼지 제어 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 정현파 함수 형태의 위치 기준 궤적과 증속-동속-감속의 속도 기준 궤적에 대한 시뮬레이션 수행과 제안된 자기구성 퍼지 제어 기법과 기존의 PID 제어 기법의 성능 비교 수행을 통하여 자기구성 퍼지 제어 알고리즘에 대한 타당성을 입증하였다. 그리고 실제 시스템에 적용하기 위하여 제어를 고속 수치연산용 프로세서인 DSP칩을 이용해 실시간 제어가 이루어지도록 설계하였다. 제어 알고리즘은 직접 어셈블리어로 구현하였고 에뮬레이터를 통하여 알고리즘을 제어기에 다운로드 하도록 하여 그 성능 평가를 수행하였다. 성능 평가는 타당성이 입증된 제어 알고리즘을 설계된 제어기를 통해 관절 좌표상에서 다양한 부하 변동 및 속도 변화에 대한 평가를 수행하는 것이었다. 제어 성능이 기존의 제어 방식에 비하여 상당히 향상되었음을 입증하였다. 따라서 생산 라인에서의 신뢰성에 대한 평가가 보완되면 관련 시스템의 제어기 구현을 통한 제어 시스템의 상품화 가능성을 예증하였다.



## 참 고 문 헌

- [1] C. S. Hsu, "A theory of cell-to-cell mapping dynamical systems " ASME Trans.J.Dynam. Syst.Meas.Contr., Vol .47, pp .931-939, (1980)
- [2] H. T. Jeon, ed., "fuzzy-neural special lecture note, " San 14, Nongseo-ri Kiheung-Yeup Kyungki-do, Korea: Sam Sung Advanced Institute of Technology, Jan. (1992)
- [3] P. J. King and E. H. Mandani, "The Application of Fuzzy Control System to Industrial Process," Automatica, Vol. 13, pp. 235-242, (1977)
- [4] K. I. Tang, "Comparing Fuzzy Logical with Classical Controller Designes," IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernatics, Vol.SMC-17. No. 6, November/December (1987)
- [5] T. J. Procky and E.H.Mandani, "A Linguistic Self-Organizing Process Controller," December, pp.425, (1975,)
- [6] W. J. Book, "Feedback Control of Two Beam Two Joint Systems with Distributed Flexibility," Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, December, pp. 425, (1975)
- [7] S. Shao, "Fuzzy Self-Organizing Controller and It's Application for Dynamic Process", Fuzzy sets and Systems, Vol. 26, pp. 151-164, (1988)
- [8] F. H. Haung, "Efficient Computer Implementation of A Rule-base Three-term Controller," proceedings of the 27th conference on decision and control, December (1988)
- [9] Y. F. Li, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," IEEE control Systems Magazine, April (1989)
- [10] R. Transheit, E.M.Sharf, "Experiments with The Use of A Rule -Based Self- Organizing Controller for Robotics Application," fuzzy sets and Systems, Vol. 26, pp. 195-214, (1988),
- [11] J. D'Azzo, Constantine H.Houpis, "Linear Control System Analysis and Design," pp 523-533
- [12] M. Braae, D. A. Rutherford, "Selection of Parameters for a Fuzzy Login Controller," Fuzzy set and Systems, Vol .2, pp. 185-199, (1979,)
- [13] M. Braae, D.A.Rutherford, "Theoretical and Lingustic Aspects of The Fuzzy Logic Controller," Automatica, Vol. 15, pp. 553-577, (1979)