

로봇 머니플레이터의 정상상태 위치오차를 제거할 수 있는 퍼지제어 알고리즘

강 철구(건국대 기계공학과), *곽 희성(건국대 대학원)
Chul-Goo Kang(Kon-Kuk Univ), *Hee-Sung Kwak(Kon-Kuk Univ)

ABSTRACT

In order to eliminate position errors existing at the steady state in the motion control of robotic manipulators, a new fuzzy control algorithm is proposed using three variables, position error, velocity error and integral of position errors as input variables of the fuzzy controller. Three dimensional look-up table is used to reduce the computational time in real-time control, and a technique reducing the amount of necessary memory is introduced. Simulation and experimental studies show that the position errors at the steady state are decreased more than 90 % compared to those of existing fuzzy controller when the proposed fuzzy controller is applied to the 2 axis direct drive SCARA robot manipulator.

1. 서론

점차 산업현장에서 사용이 확대되고 있는 직접 구동 로봇 머니플레이터⁽⁷⁾는 그 동특성이 매우 비선형적이고, 시변(time-varying)이기 때문에, 운동제어 문제가 상당히 어렵다⁽²⁾. 이러한 로봇 머니플레이터의 운동제어 성능을 향상시키기 위하여, 여러가지 고등제어이론을 개발하거나 적용하려는 노력이 있었다. 그 중의 한 가지 방법으로서, 플랜트의 수학적인 모델에 관계없이 플랜트 거동에 대한 대략적인 지식으로부터, 인간의 의사결정 메카니즘과 유사한 논리를 사용하여 제어입력을 구하는 퍼지논리제어 기법이 있다.

퍼지제어 이론은 1965년 Zadeh⁽¹⁵⁾에 의하여 애매모호한 대상물을 취급하기 위하여, 처음으로 도입되었다. 그는 퍼지제어 이론이, 시스템의 거동이 매우 복잡하거나 또는 해석적으로 잘 정의되지 않는 경우에 언어변수(linguistic variable)와 퍼지논리(fuzzy logic)를 사용하여 여러 분야에 적용될 수 있음을 제안하였다⁽¹⁶⁾. 1974년에 Mamdani⁽¹⁰⁾가 퍼지논리 제어알고리즘을 실험용 증기기관 제어에 처음으로 적용한 이후, 퍼지논리 제어를 산업현장에 적용한 예가 많이 보고 되고 있다^(9,13,14). Li and Lau⁽⁸⁾는 퍼지논리제어를 서보모터 시스템에 적용하였고, 퍼지제어기가 비례-적분-미분 제어기나 모델기준적응제어기에 비해 정상상태 오차, 정착 시간, 응답 시간 등의 견지에서 제어성능이 더 우수함을 보였다. Haung and Tomizuka⁽³⁾는 퍼지제어기를 2차원 운동추종 제어에 적용하였고, 추종정밀도나 응답속도 면에서 비례-미분 제어기에 비하여 우수함을

시뮬레이션 연구를 통하여 보였다. Scharf and Mandic⁽¹²⁾은 퍼지제어기를 간접구동 로봇 머니플레이터의 운동제어에 적용하였고, 퍼지제어의 계단응답과 추종성능이 가끔 PID 제어의 경우보다 우수함을 보였다. Abdelnour et al.⁽¹¹⁾은 퍼지제어기의 입력변수로서, 위치오차, 속도오차, 가속도오차를 갖는 3항 퍼지제어기를 제안하고 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 박현수 등⁽¹⁷⁾은 과도응답이 좋은 속도형 퍼지제어기와 정상상태 오차가 작은 위치형 퍼지제어기 사이에 퍼지한 스위칭이 일어나게 한 가변구조 퍼지제어기를 제안하였다. Kang and Kwak⁽⁵⁾은 퍼지논리제어 알고리즘을 직접구동 SCARA 머니플레이터의 위치추종제어에 적용하여, 퍼지논리제어기가 PID제어에 비하여 위치추종성능이 비슷하거나 우수함을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 보였다. 그런데 Kang and Kwak의 연구에서, 퍼지논리제어를 사용할 경우 정상상태에서 Coulomb 마찰 등에 의한 위치오차가 항상 존재하였다.

본 논문에서는 정상상태에서 존재하는 위치오차를 제거하기 위하여, 퍼지제어기의 입력변수로서 위치오차, 속도오차 뿐만 아니라 위치오차적분치를 고려하여 퍼지제어기를 설계하고, 시뮬레이션 및 실험 연구를 수행하였다. 실시간 제어시 계산 시간을 단축하기 위하여 3차원 순람표(look-up table)⁽¹⁾를 만들어 이용하되, 메모리를 작게 사용하기 위한 기법을 고안하였다. 통상적으로 Coulomb 마찰에 의한 정상상태 위치오차는 크지 않기 때문에, 이 작은 오차를 효과적으로 제거하기 위하여 정상상태 구간 동안만 위치오차적분치를 계산하여 사용하였다. 본 연구에서 사용된 로봇은 2절에서 소개하는 건국대학교

기계공학과에서 직접 설계 및 제작한 2축 직접구동 SCARA 로봇 머니플레이터 시스템이다. 3절에서는 본 논문의 핵심인, 위치추종오차를 제거할 수 있는 퍼지제어기를 제안한다. 4절에서는 시뮬레이션 및 실험 연구의 결과를 보여 주고, 5절에서는 결론을 기술한다.

2. 2축 직접구동 SCARA 로봇 시스템

2축 직접구동 SCARA 로봇 시스템의 구성도는 Fig. 1과 같다. 이 로봇은 두개의 NSK(Nippon Seiko Corp.) Megatorque 모터와 드라이버 장치, 두개의 듀랄루민 링크와 하부지지대, National Instruments사의 I/O 보드, 리졸버 인터페이스 보드, 카운터 보드 그리고 IBM PC/386 호환기종 컴퓨터로 구성되어 있다. 리졸버 신호는 드라이버 장치안에 있는 RDC(Resolver to Digital Converter)에 의해서 A상과 B상의 펄스신호로 바뀌고, 이 펄스 신호는 카운터 보드를 거쳐 위치 및 속도정보를 변환된다. 아래 모터와 위 모터의 리졸버 신호 해상도는 각각 38400 count/rev과 25600 count/rev이다. 이 로봇 머니플레이터에 대한 구체적인 동역학 모델은 참고문헌(5)을 참고하기 바란다.

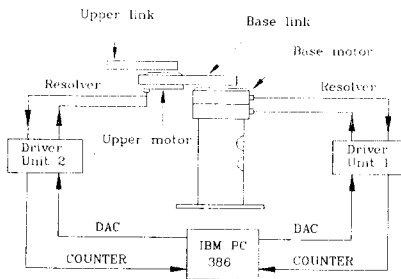


Fig. 1 The schematics of two axis direct drive SCARA robot system

3. 퍼지제어기의 설계

3.1. 정의와 용어

전체집합이 X 일 때 퍼지집합 A 는 소속함수 $\mu_A(x)$ 에 의하여 정의된다. 소속함수 $\mu_A(x)$ 는 X 에 있는 각 점 x 에 대하여, 0과 1 사이의 값을 지정한다. 0은 원소 x 가 퍼지집합 A 에 소속되지 않음을 의미하고, 1은 완전히 소속됨을 의미하며, 0과 1사이의 값은 소속의 정도를 나타내게 된다. 퍼지집합 A 의 지지(support)는 $\mu_A(x) > 0$ 인 모든 점들의 집합(보통집합)이다. 지지가 X 의 한 점이고, $\mu_A(x) = 1$ 인 퍼지집합을 퍼지단일집합(fuzzy singleton)이라고 한다. 퍼지집합연산과 퍼지논리는 여러 가지 방법으로 정의될 수 있다⁽¹¹⁾. 본 연구에서 사용되는 정의

와 용어를 요약하면 아래와 같다. 먼저, 두 퍼지집합 A 와 B 의 합집합 $A \cup B$ 는 각 원소 x 에 대한 다음과 같은 소속함수

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, x \in X$$

에 의하여 정의되고, 교집합 $A \cap B$ 는 각 원소 x 에 대한 다음과 같은 소속함수

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, x \in X$$

에 의하여 정의된다. 합집합과 교집합에 대한 위의 정의는 Zadeh가 처음으로 제안하였다⁽¹⁵⁾.

퍼지관계(fuzzy relation) R 는 다음과 같이 표현되는 퍼지집합으로 정의된다.

$$R_{X_1 \times \dots \times X_n} = \{((x_1, \dots, x_n), \mu_R(x_1, \dots, x_n)) \mid (x_1, \dots, x_n) \in X_1 \times \dots \times X_n\}$$

본 연구에서 채택한 퍼지조건명제(fuzzy implication)는 여러가지 중에서 다음과 같은 Larsen's product rule을 사용한다⁽⁶⁾.

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) \mu_B(y), x \in X, y \in Y$$

Mamdani⁽¹⁰⁾는 두 소속함수의 곱 대신에 최소값 $\min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$ 를 퍼지조건명제로 사용하였다. 퍼지조건명제에 대한 이 두 연산이 퍼지논리제어기를 설계할 때 가장 많이 사용된다. 퍼지추론(fuzzy inference)은 일반적으로 합성추론규칙(compositional rule of inference)에 기반을 두고 있으며⁽¹⁶⁾, 합성추론규칙은 논리학의 modus ponens를 확장한 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 Zadeh에 의하여 제안된 다음과 같은 sup-min 합성을 사용한다.

$$B' = A' \circ (A \rightarrow B)$$

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{x \in X} \min\{\mu_{A'}(x), \mu_{A \rightarrow B}(x, y)\}$$

언어변수(linguistic variable)는 그 값으로써 자연언어의 단어(예를 들면, 크다, 작다 등)를 취하는 변수이다. 이 단어들은 보통 퍼지집합의 이름이 된다.

3.2. 제안된 퍼지제어기

일반적으로 기계시스템에 대한 위치제어를 수행할 경우, Coulomb 마찰 등에 의하여 정상상태에서 위치오차가 남게 된다. 위치오차 및 속도오차를 입력변수로 사용하는 퍼지제어기는 정상상태에서 발생하는 이러한 위치오차를 제거해 주지 못

한다. 그런데 PD제어에 적분동작을 추가하면 정상상태 오차가 줄어들어 착안하여, 본 논문에서는 위치오차, 속도오차와 더불어 위치오차적분치를 제어기의 입력변수로 사용하는 퍼지제어기를 제안한다.

일반적으로 정상상태의 위치추종오차가 크지 않기 때문에, 이 작은 오차를 효과적으로 제거하기 위하여 정상상태 구간 동안만 위치오차를 적분하고, 이 값을 제어기의 입력변수로 사용한다. 정상상태의 판단은 한 샘플링 시간당 위치오차의 변화량이 일정한 값 이하이고, 위치오차가 Coulomb 마찰에 의하여 발생할 수 있는 최대오차값 이하일 때로 한다. 제안된 퍼지제어 시스템의 구성을 블록선도로 나타내면 Fig. 2와 같다. 샘플러(sampler)와 영차홀드(zero order hold; ZOH)는 D/A 변환기(DAC)에 의하여 실현된다. 위치신호, 속도신호, 위치오차 적분신호는 디지털 신호이고, 퍼지제어기의 작동은 마이크로 프로세서와 메모리(RAM)에 의하여 실현된다. 퍼지제어기의 구조를 그리면 Fig. 3과 같다.

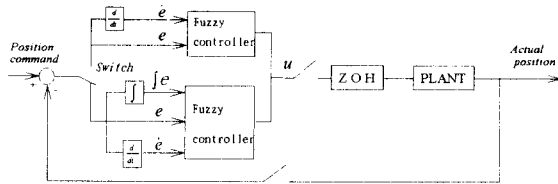


Fig. 2 The block diagram of the proposed fuzzy control

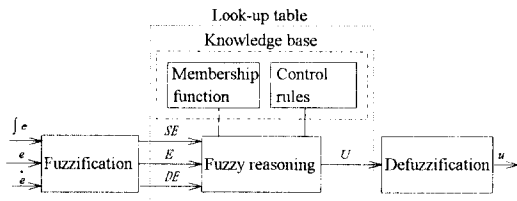


Fig. 3 The structure of the fuzzy controller

퍼지제어기의 입력변수는 각위치오차 e (rad)와 각위치오차의 적분치 $\int e$ (rad·sec), 각속도오차 \dot{e} (rad/sec)이고, 퍼지제어기의 출력변수는 드라이버 장치에 들어가는 제어입력 u (N·m)이다.

$$e = \text{position command} - \text{actual position}$$

$$\dot{e} = \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T}$$

$$\int e = \sum_{i=j}^k e(iT)T$$

여기서 T 는 샘플링 시간(sampling time)이다. 퍼지논리제어기에

서 $e, \dot{e}, \int e$ 는 퍼지화(fuzzification)연산자에 의하여 언어변수인 E, DE, SE 로 사상된다. 언어변수 E 와 DE 의 값은 퍼지집합인 PL (Positive Large), PS (Positive Small), ZO (Zero), NS (Negative Small), NL (Negative Large)로 구성되고, 언어변수 SE 의 값은 P (Positive), Z (Zero), N (Negative)로 구성되어 있다. 퍼지제어기의 지식베이스(knowledge base)는 데이터베이스(data base)와 규칙베이스(rule base)로 구성되어 있다. 데이터베이스는 언어변수의 값에 대한 소속함수를 정의하고, 규칙베이스는 퍼지제어규칙을 표현한다. 입력공간과 출력공간의 퍼지집합을 유한 개의 구간(양자화)으로 나누지 않고, 여기서는 위치오차, 속도오차, 위치오차적분치 및 제어입력을 -1.0에서 1.0사이의 값으로 선형크기변환사상(linear scaling mapping)을 한다. Table 1은 이들 변수에 대한 표준값을 보여주고 있고, 변수의 하첨자 1은 아래 축을 의미하고, 2는 위 축을 의미한다.

Table 1. The linear scaling mapping of the position error, integral of the position errors, velocity error and control input

표준값	e_1 (rad)	e_2 (rad)	$\int e_1$ (rad·sec)	$\int e_2$ (rad·sec)	\dot{e}_1, \dot{e}_2 (rad/s)	u_1 (N·m)	u_2 (N·m)
-1.0	-0.30	-0.10	-0.00030	-0.0008	-4.00	-145.0	-9.8
-0.5	-0.15	-0.05	-0.00015	-0.0004	-2.00	-72.5	-4.9
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	0.15	0.05	0.00015	0.0004	2.00	72.5	4.9
1.0	0.30	0.10	0.00030	0.0008	4.00	145.0	9.8

Table 1에서, 제어입력의 최대값은 Megatorque 모터가 발생할 수 있는 최대토크이다. 각위치오차와 각위치오차적분치 그리고 각속도오차의 최대값은 크기사상을 결정하며, 이 값이 작을수록 추종오차는 작아지지만 일반적으로 시스템은 덜 안정해진다. 이 값들은 PID제어의 비례이득, 적분이득, 미분이득의 역수와 비슷하게 작용한다. 하지만 퍼지제어의 제어동작은 비선형적으로 작동한다는 점이 PID제어와 다르다.

퍼지집합(언어변수의 값)의 소속함수는 제어성능에 많은 영향을 미친다⁽⁵⁾. 본 논문에서는 동일한 지지크기와 삼각형모양을 가진 소속함수를 사용한다. Fig. 4는 위치오차, 속도오차 및 제어입력에 대한 소속함수를, Fig. 5는 위치오차적분치에 대한 소속함수를 보여주고 있다.

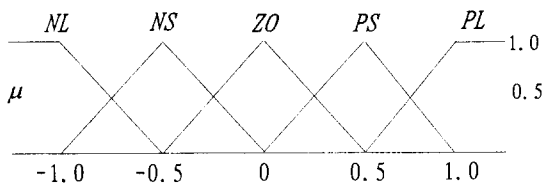


Fig. 4 Membership functions of the position error, velocity error and control input

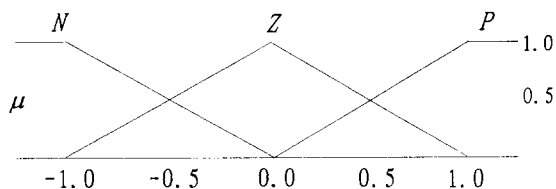


Fig. 5 Membership functions of the integral of position errors

퍼지제어규칙(fuzzy control rule)은 IF-THEN 형식의 퍼지조건문(fuzzy conditional statement)으로 구성되어 있다. 퍼지제어규칙의 한 예를 들면 다음과 같다.

- R_1 : If E is ZO and DE is ZO and SE is N , then U is NS .
- R_2 : If E is PS and DE is NS and SE is Z , then U is ZO .

각 제어규칙은 퍼지관계 $R_1 = \{(ZO \text{ and } ZO \text{ and } N) \rightarrow NS\}$ 와 $R_2 = \{(PS \text{ and } NS \text{ and } Z) \rightarrow ZO\}$ 로 표현될 수 있으며, 여기서 'and' 와 '→' 는 최소값과 Larsen's product rule에 의하여 연산된다. 전체 퍼지제어규칙은 다른 하나의 퍼지관계로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R = \text{also} (R_1, R_2, \dots, R_n)$$

여기서 *also*는 문장접속사이다. 직접구동 로봇 머니플레이터를 구동하기 위하여, 본 연구에서 사용한 퍼지제어변수의 입력변수는 2개 또는 3개 이므로, 퍼지제어변수는 2차원 및 3차원적인 표 2 가지가 있어야 한다. 3차원적인 표는 가능한 한 단순화하고 순람표를 만들 때 소요 메모리를 작게 하기 위하여, 위치오차와 속도오차가 ZO 일 때만 위치오차분치에 따라 제어규칙을 2차원적인 표와 다르게 하고, 나머지에 대해서는 2차원적인 표와 동일한 제어규칙을 쓰도록 한다.

Table 2. Fuzzy control rules for the position control of the robotic manipulator (The case input variables are E

and DE , or the case input variables are E , DE and SE with $SE=Z$)

$E \setminus DE$	NL	NS	ZO	PS	PL
NL	NL	NL	NL	NS	ZO
NS	NL	NL	NS	ZO	PS
ZO	NL	NS	ZO	PS	PL
PS	NS	ZO	PS	PL	PL
PL	ZO	PS	PL	PL	PL

- If $E = ZO$, $DE = ZO$ and $SE = P$, then $U = PS$.
- If $E = ZO$, $DE = ZO$ and $SE = N$, then $U = NS$.

이렇게 함으로써 제어기의 입력변수가 2개에서 3개로 늘어나더라도 실질적인 퍼지제어규칙은 25개에서 27개로 늘어나는 데 그친다.

퍼지추론(또는 근사추론)은 sup-min 합성연산자에 의하여 수행된다. 예를 들어, 위의 두 퍼지제어규칙(1)을 고려해 보자. 퍼지제어기의 입력이 $E' = 0.3$, $DE' = -0.25$, $SE' = -0.25$ 인 퍼지단일집합이라고 하자. 본 연구에서 채택한 추론 메커니즘을 그림으로 표현하면 Fig. 6과 같다.

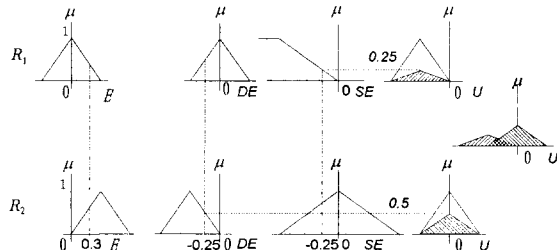


Fig. 6 Graphical representation of the inference mechanism

비퍼지화(defuzzification)는 퍼지제어 동작을 비퍼지제어 동작으로 바꾸는 역할을 한다. 많은 비퍼지화 전략 중에서 본 연구에서는 다음과 같이 정의되는 무게중심법(center average method)을 채택한다.

$$U = \frac{\sum \bar{U}_i \times [\mu(\bar{U}_i)]}{\sum \mu(\bar{U}_i)} = \frac{[-0.5 \times 0.25] + [0 \times 0.5]}{(0.25) + (0.5)} = -0.167$$

실제 제어입력 u (N·m)는 U 값에 크기변환계수 147/1 (아래 모터)와 9.8/1 (위 모터)을 곱함으로써 구해진다. 퍼지추론 및 비퍼지화에 소요되는 계산시간을 본 시스템에서 측정해 본 결과

수 msec이므로, 실시간제어에서 이 시간을 줄이기 위하여, 본 연구에서는 E , DE 와 SE 의 표준값에 대한 U 를 미리 계산하여 3차원 순람표(look-up table)를 만들고, 특정한 $e, \dot{e}, \int e$ 에 대한 u 값은 순람표를 선형보간(linear interpolation)하여 사용한다. 순람표를 만들 때, 필요한 메모리의 크기와 논리의 정확도를 고려하여, E 와 DE 는 0.1 간격으로 하되, $SE = 0$ 일 때는 -1에서 1까지 21×21 개의 U 값을 구하고, 그 외의 SE 값에 대해서는 -0.5에서 0.5까지 $11 \times 11 \times 21$ 개의 U 값을 구하여 메모리(RAM)에 저장해 둔다. 이렇게 함으로써, $21 \times 21 \times 21$ 의 3차원 순람표와 비교하여 약 70%의 메모리를 절약할 수 있다. 정상상태가 아닌 과도응답상태에서는 순람표에서 $SE = 0$ 일 때의 값을 사용한다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

퍼지제어기의 입력변수에 위치오차적분치를 추가함으로써 정상상태에서 위치오차를 줄일 수 있음을 보이기 위하여, 2절에서 기술한 2축 직접구동 SCARA 로봇에 대하여 시뮬레이션 및 실험 연구를 수행하였다. 시뮬레이션에서 제어기는 이산시간모델로 하고, 플랜트는 연속시간모델로 두었다. 연속시간모델을 풀기 위하여 4차 Rung-Kutta 알고리즘을 사용했다. 시뮬레이션 프로그램과 실시간 프로그램은 모두 C 언어를 이용하여 프로그래밍하였다. 샘플링 시간 T 는 시뮬레이션과 실험에서 모두 5 msec로 두었다. 실시간 프로그램에서 샘플링 순간의 실험은 타이머 인터럽트 함수로 하였다. 실시간 제어에서 매 샘플링시 인터럽트 서비스 루틴의 계산시간은 약 0.78 msec 이었다. 아래 축 및 위 축의 목표궤적은 동일한 7차 다항식으로 주어지며, Fig. 7에 주어진 것과 같다.

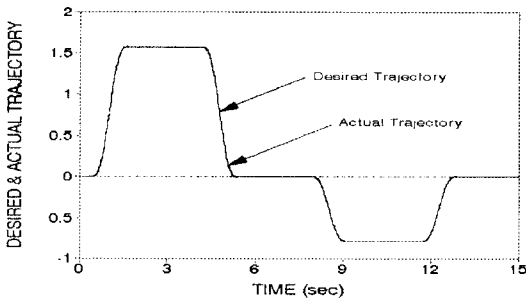


Fig. 7 Desired and actual position trajectories of the upper axis in the experiment when the proposed fuzzy control algorithm is applied (no payload).

Fig. 7은 부하하중(payload)이 0 kg일 때, 위치오차적분치가 고려된 새로운(본 논문에서 제안된) 퍼지제어 알고리즘을 적용하여 실험한 위 축의 결과이다. Fig. 7에서 보면 목표궤적과 실제궤적의 구별이 쉽지 않으므로, 제어성능을 쉽게 알아보기 위하여 각 위치오차를 크게 확대하여 그리도록 한다.

Fig. 8은 위 링크의 끝에 3.76 kg의 부하하중이 작용할 때, 기존의 퍼지제어 알고리즘과 본 논문에서 제안한 새로운 퍼지제어 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션한, 아래 축의 위치오차에 대한 결과이다. Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 조건에서 실험한 결과이다. Fig. 8과 Fig. 9로부터 위치오차적분치를 고려한 제안된 퍼지제어를 사용할 경우 정상상태에서 각 위치오차가 현저하게 줄어듦을 알 수 있다. 또한 과도응답 상태에서는 예측되는 바와 같이 위치추종 제어성능이 거의 동일함을 볼 수 있다. 부하하중이 있는 경우와 없는 경우에, 정상상태에서 위치오차에 대한 두 퍼지제어기의 시뮬레이션 및 실험 결과를 정리하면 Table 3과 같다.

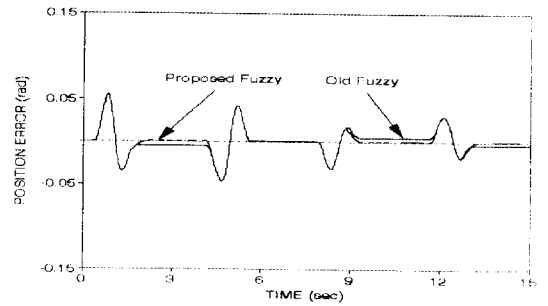


Fig. 8 The position tracking errors of the base axis in the simulation when the old and proposed fuzzy control algorithms are applied (payload = 3.76 kg).

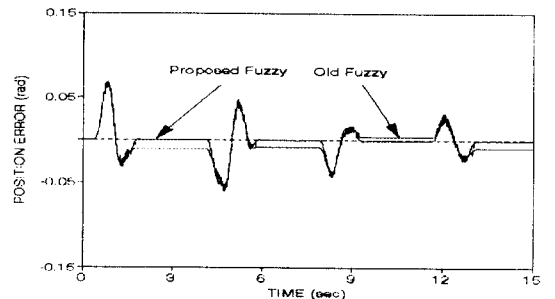


Fig. 9 The position tracking errors of the base axis in the experiment when the old and proposed fuzzy control algorithms are applied (payload = 3.76 kg).

Table 3. Simulation and experiment results for the steady state position errors

	Old fuzzy control	Proposed fuzzy control	
Simulation	base axis (No payload)	-0.0025 rad	0.0000 rad
	upper axis (No payload)	-0.0002 rad	0.0000 rad
	base axis (3.76 kg payload)	0.0054 rad	-0.0001 rad
	upper axis (3.76 kg payload)	0.0003 rad	0.0000 rad
Experiment	base axis (No payload)	-0.0098 rad	0.0007 rad
	upper axis (No payload)	0.0020 rad	0.0003 rad
	base axis (3.76 kg payload)	-0.0108 rad	0.0000 rad
	upper axis (3.76 kg payload)	0.0012 rad	0.0002 rad

5. 결론

위치오차와 속도오차를 입력변수로 하는 기존의 퍼지제어기로 로봇 머니플레이터의 운동제어를 수행할 경우, Coulomb 마찰 등에 의하여 정상상태에서 항상 위치오차가 존재하게 된다. 이를 제거하기 위하여, 본 논문에서는 퍼지제어기의 입력 변수로서 위치오차, 속도오차 뿐만 아니라 위치오차적분치를 고려하여 퍼지제어기를 설계하고 시뮬레이션 및 실험 연구를 수행하였다. 실시간 제어를 계산시간을 단축하기 위하여 3차원 순탐표(look-up table)를 만들어 이용하되, 메모리 사용을 줄이기 위하여 퍼지제어규칙을 단순화하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 2축 직접구동 SCARA로봇 머니플레이터에 적용한 결과 정상상태에서 위치오차는 90 % 이상 줄어들었고, 과도응답은 거의 동일한 제어성능을 보여 주었다.

참고문헌

1. Abdelnour, G. M, Chang, C. H, Huang, F. H, and Cheung, J. Y, "Design of a Fuzzy controller Using Input and Output mapping factors," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol.21, No.5, pp.952-960, 1991
2. Asada, H and Youcef-Toumi, K, *Direct-Drive Robots: Theory and Practice*, The MIT Press, 1987
3. Huang, L.-J and Tomizuka, M, "A self-paced fuzzy tracking controller for two-dimensional motion control," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol.20, no.5, pp. 1115-1124, 1990
4. Kang, C. G, Horowitz, R and Leitmann, G, "Robust deterministic control for robotic manipulators: Part I, II," *ASME DSC*, vol.26,

pp.171-186, 1991

5. Kang, C. G and Kwak, H. S, "Fuzzy logic control for direct drive robot manipulators," *KACC, International sessions*, vol.1, pp. 428-433, october, 1994
6. Lee, C. C, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller-Part I, II," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol.20, no.2, pp. 404-435, 1990
7. Lewis, F. L, Abdallah, C. T and Dawson, D. M, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan Publishing Co., 1993
8. Li, Y. F and Lau, C. C, "Development of fuzzy algorithms for servo systems," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 65-72, April, 1989
9. Maiers, J and Sherif, Y. S, "Applications of fuzzy set theory," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. SMC-15, no.1, pp.175-189, 1985
10. Mamdani, E. H, "Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plant," *Proc. IEE*, vol.121, no.12, pp.1585-1588, 1974
11. Pedrycz, W, *Fuzzy Control and Fuzzy Systems, second extended edition*, John Wiley & Sons, 1993
12. Scharf, E. M and Mandic, N. J, "The application of a fuzzy controller to the control of a multi-degree-of freedom robot arm," *Industrial Applications of Fuzzy Control*, M. Sugeno, ed., Elsevier Science Publishers B.V.(North-Holland), pp.41-62, 1985
13. Sugeno, M, "An introductory survey of fuzzy control," *Infor. Sci.*, vol.36, pp.59-83, 1985
14. Tong, R. M, "A control engineering review of fuzzy systems," *Automatica*, vol.13, pp.559-569, 1977
15. Zadeh, L. A, "Fuzzy sets," *Informat. Control*, vol.8, pp. 338-353, 1965
16. Zadeh, L. A, "Outline of a new approach to the analysis complex systems and decision processes," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol.SMC-3, pp.28-44, 1973
17. 박헌수, 이지홍, 채석, "위치형과 속도형 제어규칙을 갖는 가변구조 퍼지제어기" 한국 퍼지 시스템 학회 논문지, vol.3, No.3, pp.56-67, 1993