

# Cartesian 공간에서 로봇 머니플레이터의 퍼지제어 (Fuzzy control of a robot manipulator in Cartesian space)

\*곽희성(대우중공업), 강철구(건국대학교)

\*Hee-Sung Kwak (Daewoo Heavy Industries Ltd.), Chul-Goo Kang (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. This controller is applied to the tracking control of robotic manipulators in Cartesian space. Three dimensional look-up table is used to reduce the computational time in real-time control. Simulation and experimental studies are conducted to evaluate the control performance for the two axis direct drive SCARA robot system.

## 1. 서 론

직접구동 로봇 머니플레이터는 그 동특성이 매우 비선형적이고, 시변(time-varying)이기 때문에, Cartesian 공간에서 운동 제어 문제가 상당히 어렵다. 이러한 로봇 머니플레이터의 운동제어 성능을 향상시키기 위하여, 여러가지 고등제어 이론을 개발되고 적용되고 있다. 그 중의 한 가지 방법으로서, 플랜트의 수학적 모델에 관계없이 플랜트 거동에 대한 대략적인 지식으로부터, 인간의 의사결정 메카니즘과 유사한 논리를 사용하여 제어 입력을 구하는 퍼지논리제어 기법이 있다.

이 퍼지이론은 1965년 Zadeh에 의하여 처음으로 도입되었다[7]. 그는 퍼지이론이, 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[8]. 1974년에 Mamdani가 퍼지이론을 실험용 증기기관 제어에 처음으로 적용한 이후[6], 퍼지논리 제어를 산업현장에 적용한 예가 많이 보고되고 있다.

Abdelnour et al.[1]은 퍼지제어기의 입력변수로서, 위치오차, 속도오차, 가속도오차를 갖는 3항 퍼지제

여기를 제안하고 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 박헌수 등[9]은 과도응답이 좋은 속도형 퍼지제어기와 정상상태 오차가 작은 위치형 퍼지제어기 사이에 퍼지한 스위칭이 일어나게 한 가변구조 퍼지제어기를 제안하였다. Kang and Kwak[3]은 퍼지논리제어 알고리즘을 직접구동 SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly) 로봇 머니플레이터의 위치추종제어에 적용하여, 퍼지논리제어기가 PID제어에 비하여 위치추종성능이 비슷하거나 우수함을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 보였다. 그런데 Kang and Kwak[3]의 연구에서, 기존의 퍼지논리제어를 사용할 경우 정상상태에서 Coulomb 마찰 등에 의한 위치오차가 항상 존재하였다. 이러한 정상상태의 위치오차를 제거하기 위하여, 강철구 등[10]은 입력변수로서 위치오차, 속도오차 뿐만 아니라 위치오차 적분치를 고려하여 퍼지제어기를 설계하고, 관절좌표계에서 시뮬레이션 및 실험 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 강철구 등[10]에서 제안한 퍼지 논리제어 알고리즘을 Cartesian 공간의 경로추종제어에 적용하여 제어성능을 평가하고 분석한다. 본 연구에서 사용된 로봇은 건국대학교 기계공학과에서 설계 및 제작한 2축 직접구동 SCARA 로봇 머니플레이터 시스템이다.

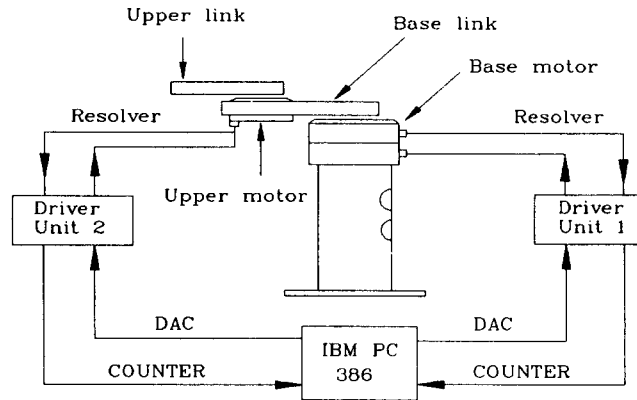


Fig. 1 The schematics of two axis direct drive SCARA robot system

이 로봇은 두개의 NSK(Nippon Seiko Corp.) Megatorque 모터와 드라이버 장치, 두개의 두랄루민 링크와 하부지지대, National Instruments사의 I/O 보드, 리졸버 인터페이스 보드, 카운터 보드, 그리고 IBM PC/386 호환기종 컴퓨터로 구성되어 있다. 리졸버 신호는 드라이버 장치 안에 있는 RDC (Resolver to Digital Converter)에 의해서 A상과 B상의 펄스신호로 바뀌고, 이 펄스 신호는 카운터 보드를 거쳐 위치 및 속도정보로 변환된다. 로봇의 각종 파라미터값은 Kang and Kwak[3]을 참고하기 바란다.

## 2. 퍼지제어기 설계

본 논문에 사용된 퍼지제어 시스템의 구성을 블록선도로 나타내면 Fig. 2와 같다. 샘플러(sampler)와 영차홀드(zero order hold; ZOH)는 D/A 변환기에 의하여 실현된다. Fig. 2에서 스위칭의 의미는 과도응답 상태에서 위치오차와 속도오차를 입력변수로 사용하는 퍼지제어기를 가동하다가, 위치오차와 속도오차가 일정한 범위 내로 들어오면, 그 때부터 위치오차 적분치를 입력변수로 추가한 퍼지제어기를 가동한다는 것이다. 퍼지제어기의 구조를 그리면 Fig. 3과 같다.

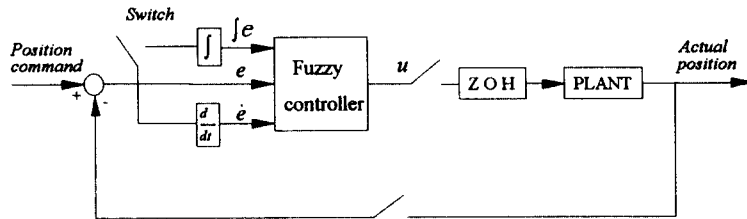


Fig. 2 The block diagram of the proposed fuzzy control

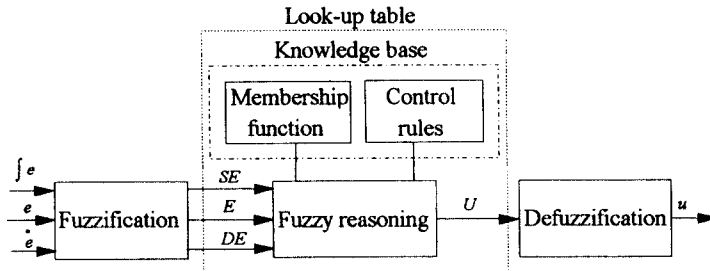


Fig. 3 The structure of the fuzzy controller

본 논문에서 퍼지제어기의 입력변수는 아래와 같은 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.

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

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

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

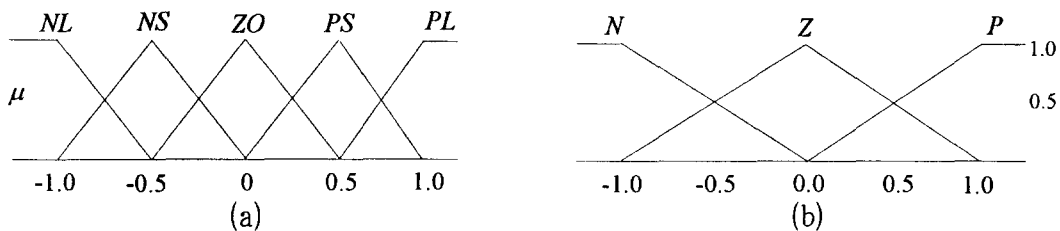
여기서  $T$ 는 샘플링시간(sampling time)이다. 퍼지제어기에서  $e$ ,  $\dot{e}$ ,  $\int e$ 는 퍼지화(fuzzification)연산자에

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. Table 1은 이들 변수에 대한 선형크기사상을 하였을 경우 표준값을 보여주고 있다. 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

퍼지집합의 소속함수도 역시 제어성능을 결정하는 중요한 변수가 된다[3]. 본 논문에서는 동일한 지지 크기와 삼각형 모양을 가진 소속함수를 사용한다. Fig. 4에서 (a)는 위치오차, 속도오차 및 제어입력에 대한 소속함수를, (b)는 위치오차 적분치에 대한 소속함수를 보여주고 있다.



**Fig. 4** Membership functions for (a) position error, velocity error, and control input, (b) integral of position errors

퍼지제어규칙(fuzzy control rule)은 IF-THEN 형식의 퍼지조건문(fuzzy conditional statement)으로 구성

된다. 본 논문에서 사용한 퍼지제어규칙은 Table 2와 같다.

**Table 2** Fuzzy control rules for the position control of the robotic manipulator

*If input variables are E and DE, or E, DE and SE with SE=Z, then U are*

$E \setminus DE$	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.*

본 연구에서 채택한 퍼지조건명제(fuzzy implication)는 여러 가지 중에서 다음과 같은 Larsen's product rule을 사용한다[4].

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

퍼지추론(fuzzy inference)은 일반적으로 합성추론규칙(compositional rule of inference)에 기반을 두고 있으며[8], 합성추론규칙은 논리학의 modus ponens를 확장한 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 Zadeh에 의하여 제안된 다음과 같은 sup-min 합성을 사용한다.

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

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

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.

$$U = \frac{\sum_i \bar{U}_i \times [\mu(\bar{U}_i)]}{\sum_i \mu(\bar{U}_i)}$$

계산시간을 줄이기 위하여, E, DE 또는 E, DE, SE의 대표값들에 대한 U를 미리 계산하여 2차원 또는 3차원 순람표(look-up table)를 만든다. 특정한 입력 변수에 대한 U값은 순람표를 선형 보간하여 구한다.

실제 제어입력  $u$  (N·m)는  $U$  값에 크기변환계수 145 (아래 모터)와 9.8 (위 모터)을 곱함으로써 구해진다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 절에서는 2절에서 제안한 퍼지제어기를 1절에서 기술한 2축 직접구동 SCARA 로봇에 적용하여, Cartesian 공간에서의 위치추종을 실현하고, 그 제어성능을 평가한다. Cartesian 공간에서의 경로추정을 실현하기 위해서 SCARA로봇의 역기구학 문제를 풀어야 한다. 즉, Cartesian 좌표로 주어진 말단장치 (end effector)의 경로로부터, 매 샘플링 순간의 관절좌표를 구해야 한다. 본 논문에서 사용하고 있는 2축 SCARA 로봇에 대해서는 해석적인 역기구학 해를 쉽게 구할 수 있다.

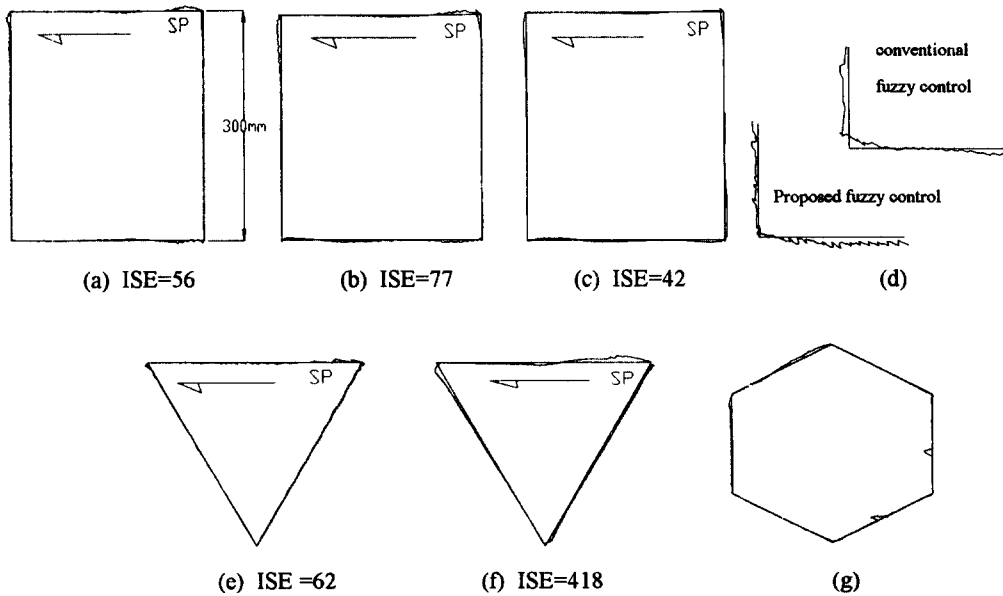
본 연구에서 샘플링 시간은 5msec로 하고, 매 샘플링 순간은 타이머 인터럽트함수를 사용한 실시간 프로그램으로 구현하였다. 경로추종성능을 평가하기 위하여 Fig. 5에서와 같은 다각형 형태의 경로를 선택하였다. 다각형의 각 변에서 속도함수는 LSPB(linear segments with parabolic blends)형태[12]를 가지도록 하였다. LSPB의 속도함수는 한 변의 1/6구간 동안 선형가속을 한 뒤, 등속운동을 하다가, 마지막 1/6구간 동안 선형 감속을 한다. 즉, 속도경로가 공간상에서 사다리꼴 형태를 가진다. Fig. 5는 정사각형, 정삼각형 및 정육각형 경로에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과를 나타낸다. 로봇의 경로 추종성능을 평가하기 위하여, Cartesian 공간에서 매 샘플링 순간의 목표위치와 실제위치의 오차를 구하고, 이 값을 제곱하여 적분한 제곱오차 적분치(integral of squared error; ISE)를 성능지수로 사용하였다. Fig. 5에서 제곱오차적분치의 단위는  $mm^2 \cdot sec$ 이다.

Fig. 5의 (a)는 LSPB의 최대속도를 200 mm/sec로 했을 때 실험결과이고, (b)는 최대속도를 400mm/sec로 했을 때 실험결과이다. 이 경우에 모터의 실제 각속도는 모터가 발생할 수 있는 최대각속도의 20%이내에 있다. (a)와 (b)로부터 속도가 증가함에 따라 ISE가 증가함을 볼 수 있다. Fig. 5의 (c)는 (b)와 똑같은 상태에서 시뮬레이션한 결과이다. (b)와 (c)는 유사한 경향을 보여 주고 있다. Fig.5의 (d)는 위치오차와 속도오차만을 퍼지제어기의 입력변수로 사용하는 보편적인 퍼지제어기와 본 논문에서 제안한 퍼지제어기를 사용했을 때 구석 부분에서의 위치 추종성능을 비교한 것이다.

Fig. 5의 (e)와 (f)는 제안한 퍼지제어기와 PID제어기의 성능을 비교하기 위한 실험결과로서, 제안한 퍼지제어기의 성능이 PID제어기의 성능에 비해 우수함을 알 수 있다. PID 제어기의 파라미터 튜닝을 최적화함으로써 성능을 좀 더 개선할 수 있으나, 시간이 많이 소모된다. 본 연구에서는 시간이 허락하는 한

최대로 제어기 파라미터 튜닝을 수행하였다.

Fig. 5의 (g)는 외란에 대한 제안한 퍼지제어기의 성능을 평가하기 위하여, 운동 중인 로봇링크에 인위적인 충격을 주었을 때 나타나는 실험결과이다. 실제계적중 튀어나온 두 부분이 두 번의 충격외란에 대한 응답을 나타낸다. 제안한 퍼지제어기는 위와 같은 충격외란에 대하여 안정함을 알 수 있다.



**Fig. 5** Position tracking of the two axis direct drive robot manipulator for polygen path; (a) experiment with maximum velocity = 200 mm/sec; (b) experiment with maximum velocity = 400 mm/sec; (c) simulation with maximum velocity = 400 mm/sec; (d) comparison between conventional and proposed fuzzy control; (e) experiment with fuzzy controller; (f) experiment with PID controller; (g) experiment with impact disturbances.

Fig. 5에서 SP는 출발점을 표시한다. 실시간 제어시 인터럽트서비스루틴의 계산시간을 줄이기 위하여 순람표(look-up table)를 사용하였다. IBM PC/386을 사용하여 계산시간을 측정해 본 결과, 순람표를 사용할 경우는 0.78 msec이었고, 순람표를 사용하지 않고 퍼지규칙으로부터 직접 퍼지추론을 수행할 경우는 2.3 msec이었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 Cartesian 공간에서 다각형 형태의 경로를 추종하기 위하여 퍼지제어기를 설계하고, 이를 2축 직접구동 SCARA 로봇 머니플레이터에 적용하여 시뮬레이션 및 실험연구를 수행하였다. 본 로봇제어 시스템은 과도상태에서 위치오차와 속도오차를 입력변수로 갖는 보편적인 퍼지제어기를 사용하다가, 위치오차 및 속도오차가 어떤 범위 내에 들어오게 되면, 위치오차 적분치를 입력변수에 추가한 3입력변수 퍼지제어기를 사용한다. 제안한 퍼지제어기를 사용하여 시뮬레이션 및 실험 연구를 수행한 결과, 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다. (1)속도가 증가할수록 추종성능은 조금씩 떨어진다. (2) PID제어기에 비하여 제안한 퍼지 제어기의 추종성능은 비슷하거나 우수하다. (3) 제안한 퍼지제어기는 충격외란에 대하여 안정하다.

#### 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] Kang, C. G and Kwak, H. S, October, "Fuzzy logic control for direct drive robot manipulators," *KACC*, vol. 1, pp. 428-433. 1994
- [4] 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
- [5] Lewis, F. L, Abdallah, C. T and Dawson, D. M, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan Publishing Co. 1993
- [6] Mamdani, E. H, "Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plant," *Proc. IEE*, vol. 121, no. 12, pp. 1585-1588. 1974
- [7] Zadeh, L. A, "Fuzzy sets," *Informat. Control*, vol. 8, pp. 338-353. 1965
- [8] 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



- [9] 박현수, 이지홍, 채석, "위치형과 속도형 제어규칙을 갖는 가변구조 퍼지제어기," 한국 퍼지 시스템 학회 논문지, vol. 3, No. 3, pp. 56-67. 1993
- [10] 강철구, 곽희성, "로봇 머니플레이터의 정상상태 위치오차를 제거할 수 있는 퍼지제어 알고리즘", 한국정밀공학회 95년도 춘계학술대회논문집, pp.235~240, 1995
- [11] 곽희성, "퍼지논리제어 알고리즘을 이용한 SCARA 로봇의 운동추종제어", 건국대 기계공학과 석사 학위 논문, 1995
- [12] Mark. W. Spong , M. Vidyasagar, Robot dynamics and control ,Wiley ,1989