

# 로봇 매니플레이터의 좌표제어에 관한 연구

권혁진\*, 문동욱, 서제근, 남문현  
 건국대학교 전기공학과

## A study of Robot Manipulator's Coordinating Control

Hyuk-Jin Kwon\*, Dong-Wook Moon, Jae-Kun Suh, Moon-Hyon Nam  
 Dept. of Electrical Engineering, Kon-Kuk Univ.

### Abstract

In this paper, the trajectory needed to be tracked by the manipulator was defined in a new plot differently from conventional methods. And the trajectory provides solution directly related to coordinates of output variables from the plant. So, it overcomes nonlinearity between joint and Cartesian coordinates in movement mode and it makes use of Inverse Kinematics unnecessary, which was obstacle for real-time control.

The 2-axis SCARA robot was modelled and simulation was performed to validate in this paper. And it proved this has better performance in rapidity and decrease of position-error, compared to the conventional FLCs.

### 1. 서론

로봇의 사용 용도와 분야가 사회전반에 걸쳐 광범위해짐에 따라 인간이 교시기구(Teach pendant)를 이용하여 로봇을 제어하는 단순한 play-back 방식에서 벗어나 스스로 판단하고 제어할 수 있는 지능을 가진 로봇이 필요하게 되었고 이러한 지능적이고 복잡한 작업의 실시간 처리가 요구되었다. 로봇의 운용은 로봇의 각 관절 각도가 주어졌을 때 end-effector의 위치와 접근 방향을 구해내는 기구학과 end-effector의 위치와 접근 방향이 주어졌을 때 로봇의 각 관절각도를 구하는 역기구학을 이용한다.[1,2] 따라서 로봇으로 하여금 실시간 작업을 하게 하기 위해서는 기구학과 역기구학의 처리 시간을 줄여야만 한다. 현재 사용되고 있는 로봇은 각 관절의 독립적인 제어만으로 운용되고 있는 실정이다. 이에 따라 간단한 고전적 제어방법들의 응용은 가능하지만[3], 고속운동이나 빈번한 부하변동에 의해 역학적으로 나타나는 각 관절간의 비선형성(nonlinearity)과 연성(coupling) 및 불확실성(uncertainty) 등으로 로봇의 성능과 응용범위 등은 크게 제약을 받게 된다. 따라서 본 논문에서는 기존 제어를 발생시키는 새로운 방법을 제시하였고, 이 제력은 정의에 따라 플랜트 출력변수의 좌표와 연관된 직접적인 출력수를 제공하므로 기존 추종제어의 단점인 고속모드에서의 조인트와 Cartesian 좌표 사이의 비선형을 극복할 수 있게하고, Inverse Kinematics의 사용을 불필요하게 만들어 실시간 제어를 극복하였다.

이 제력은 기구학과 역기구학을 사용하지 않고 로봇의 좌표를 제어[5,6,10]하는 개선된 알고리즘이 가능하게 하고, 이 알고리즘이 조인트간의 상호연관성을 충분히 제어가 반영하게 하고, 부하변동이나 고속도 동작에서 제력을 잘 추종한다는 것을 보인다.

### 2. 좌표제어시스템

#### 2.1 제력의 정의

본 논문에서는 제력을 3차원 공간에서 두 곡면이 만나는 곡선으로 구현하였다(그림1참조).

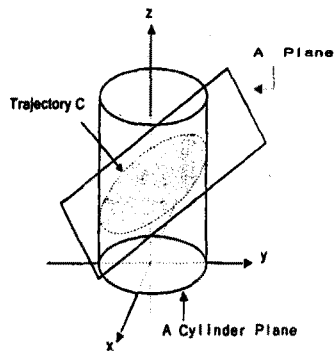


그림1. 제력의 구현

여기서 곡선 C를 매니플레이터가 추종할 제력이라고 정의한다. 따라서 매니플레이터의 끝점이 두곡면의 방정식을 모두 만족하면 제력상에 존재하게 되고, 이런 상태에서 제력을 따르게 하는 움직임이 주어진다면, 매니플레이터는 제력을 훌륭하게 추종할 것이다.

이것을 공식화하면 다음과 같다.

$$S\phi(y) = 0 \quad \text{---(1)}$$

여기서 S란 (1)식으로 3차원 Cartesian 공간에 표현된 곡선이고,  $y = (y_1, y_2)$ 는 Cartesian Coordinate의 3차원 벡터이고,

$\phi(\cdot)$ 는 제력함수의 2-차원 벡터이다.

$$\text{제력추종오차(trjectory tracking error)} \quad e = \phi(y) \quad \text{---(2)}$$

제력을 따르게 하는 움직임(이하 제력운동이라고 함)은

$\bar{y} = \phi(y)$ 로 표현되며, 여기서  $\bar{y}$ 는 그림(2)에서와 같이 속도를 가진 경로의 길이와 같다. 따라서 적절한 제어법칙을 설계하여 제력추종오차를  $e \rightarrow 0$ 로 보내게 하고, 제력운동의 레퍼런스  $\bar{y}$ 인 경우  $\bar{y} = \dot{y}$ 가 되게 하면, 매니플레이터는 제력을 잘 추종하게 된다.

여기서 정의된 새로운 제력은 각 조인트의 각도를 요구하지 않으므로, Inverse Kinematics는 불필요하게 되었고, 이것은 나란한 매니플레이터를 제어할 때의 과도한 계산량에 의한 시간지연은 방지하는 효과를 준다.

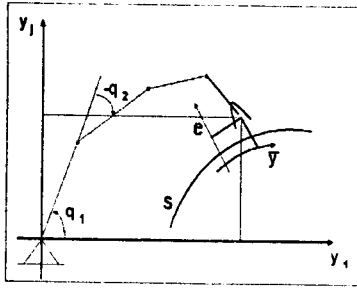


그림2.로봇의 좌표와 궤적추종오차 및 궤적운동의 관계

## 2.2.전체시스템 구성

본 논문에서 제안된 제어시스템의 구성은 그림(3)과 같다.

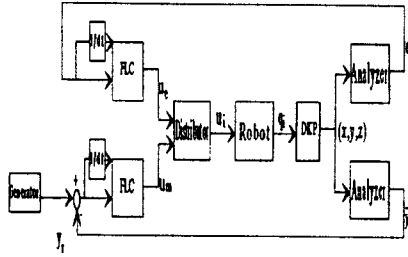


그림3. 제안된 제어시스템

본 논문에서는 궤적추종오차와 궤적운동오차의 제어를 위해서는 퍼지제어기[8]를 사용하였다.전통적인 추종제어(Tracking Control)에서는 조인트 좌표  $q_i$ 와 Cartesian 좌표  $y_i$  사이의 관계가 비선형이기 때문에, 특히 고속도모드에서 조인트가 상당한 왜곡을 가지고 상대좌표 공간으로 변형된다.그러나 좌표제어는 플랜트 출력변수의 좌표와 연관된 직접적인 솔루션을 제공하므로 로봇제어 문제에 이것의 응용은 조화있는 조인트 모션을 보장한다.

일반적으로 기계시스템에 대한 궤적제어를 수행할 경우 Coulomb 마찰토크 등에 의하여 정상상태에서 위치오차가 남게 된다[9]. 그러나 PD제어에 적분동작을 추가하면 정상상태 오차가 줄어들어 착안하여, 본 논문에서는 궤적추종오차,궤적추종오차변화량과 더불어 궤적추종오차직분치를 제어기의 입력변수로 사용하는 퍼지제어기를 사용한다(그림4).

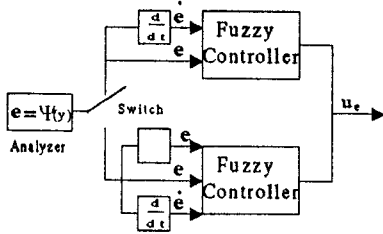


그림4.위치오차에 따른 제어기의 선택

궤적추종오차 보정을 위한 퍼지제어기의 입력변수로는 Analyzer에서 발생하는 궤적추종오차와 오차변화( $e, de$ ), 그리고 궤적추종오차의 직분치( $\int e$ )를 사용했고,궤적운동오차를 위한 입력변수는 궤적운동오차( $e_m = \bar{y}_r - \bar{y}$ )를 사용했고, 출력 변수로는 궤적추종오차와 궤적운동오차의 보상값인  $u_e$ 와  $u_m$

를 사용하였다.

본 논문에서 사용된 퍼지제어기의 구성은 그림(5)과 같다.

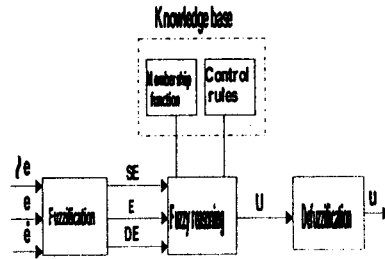


그림5. 사용된 퍼지 제어기

본 논문에서 사용한 퍼지입력변수는 2개 또는 3개이므로, 퍼지 제어규칙은 2가지의 제어규칙으로 이루어져 있어야한다.그러나 입력변수가 2개에서 3개로 늘어나면 제어규칙은 75개가 필요하다. 단순화하기 위해, 궤적추종오차와 궤적추종오차변화량이 20일때만 궤적추종오차직분치에 따라 제어규칙을 입력변수가 2개인 경우와 다르게 하고, 나머지에 대해서는 입력변수가 2개인 경우와 동일한 제어규칙을 썼다. 이렇게함으로써 퍼지제어 규칙은 25개에서 27개로 늘어나는데 그친다.로봇 매니플레이터를 구동하기 위하여, 본 논문에서 사용한 퍼지제어규칙은

Table(1)와 같다.

Table1. 로봇 매니플레이터의 위치제어를 위한 퍼지제어규칙

E \ DE	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZO
NS	NB	NB	NS	ZO	PS
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
PS	NS	ZO	PS	PB	PB
PB	ZO	PS	PB	PB	PB

If E=ZO, DE=ZO and SE=P, then U=PS.

If E=ZO, DE=ZO and SE=N, then U=NS.

그림(3)을 보면, 퍼지 제어기의 출력이 분배기(Distributor)에 들어가 로봇의 제어입력을 결정하게 된다. 분배기의 입력은 두 개이나 출력은 로봇의 자유도와 같게 출력되어야 하므로 적절한 비례식을 설정해야 한다.

$$u_i = K_{ei} u_e + K_{mi} u_m \quad (i=1 \dots n)$$

$K_{ei}$ 와  $K_{mi}$ 는 적절히 선택되어야만 한다.

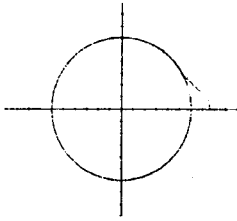
## 3장 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 이론적인 진술을 증명하기 위해 구동장치의 동특성을 고려하여 모델링[7]된 2축 SCARA 로봇을 대상으로 PC(80486)에서 프로그램 작업(C-language)을 통하여 시뮬레이션을 수행하였다.

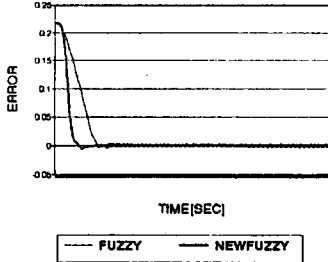
본 논문에서는 2차원 원  $x^2 + y^2 = 0.6^2$ 를 궤적으로 사용하였고, 속도래퍼런스는 1 m/sec로 설정하였다. 성능비교를 위하여 FLC 을 사용하여 함께 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션은 i)무부하 ii) 3.75 Kg 경우에 수행하였고, 궤적추종오차와 궤적운동오차,그때의 토크  $u_1, u_2$  를 나타내었다.

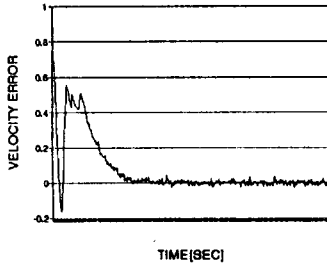
시뮬레이션에 대한 성능비교는 다음과 같다.



A1) 무부하시 궤적  $x^2 + y^2 = 0.6^2$ 에 대한 응답비교



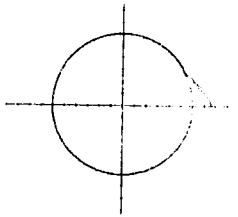
B1) 무부하인 경우, 궤적추종오차



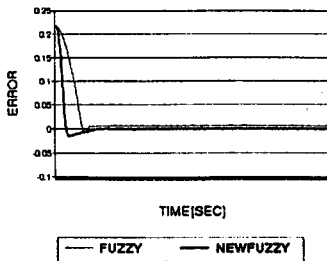
C1) 무부하인 경우, 궤적운동오차

무부하시	FLC	제한된 제어기	FLC 대비성능비교
상승시간( $t_r$ )	0.4	0.216	46%감소
첨두시간( $t_p$ )	0.5	0.28	44%감소
진류오차	0.018174	0.000937	94.8%감소

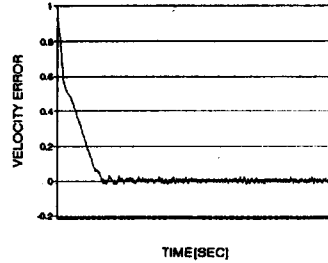
D1) 무부하인 경우, 성능비교



A2) 부하시 궤적  $x^2 + y^2 = 0.6^2$ 에 대한 응답비교



B2) 부하가 3.75Kg인 경우, 궤적추종오차



C2) 부하가 3.75Kg인 경우, 궤적운동오차

부하시 (3.75Kg)	FLC	제한된 제어기	FLC 대비성능비교
상승시간( $t_r$ )	0.528	0.224	57.6%감소
첨두시간( $t_p$ )	0.7	0.34	51.4%감소
진류오차	0.061037	0.008848	85.5%감소

D2) 부하가 3.75Kg인 경우, 성능비교

#### 4장. 결론

본 논문에서는 기준궤적을 발생시키는 새로운 방법을 제시하였고, 이 궤적은 정의에 따라 플레트 출력변수의 좌표와 연관된 직접적인 솔루션을 제공하므로 기존 추종제어의 단점인 고속모드에서의 관절과 Cartesian좌표 사이의 비선형성을 극복할 수 있게 하고, 실시간 제어에 장애가 되는 Inverse Kinematics의 사용을 불필요하게 만들었다.

향후 연구과제로는 본 알고리즘을 다관절 매니퓰레이터로 확장시켜 적용하는 것과 분해기의 계수 K 선정 규칙을 공식화하는 것이다.

#### References

- [1] J. J. Craig, "Introduction to Robotics :mechanics & control," Addison-Wesley, 1986.
- [2] R. P. Paul, "Robot manipulators :mathematics, programming, and control," Cambridge, Mass.: M.I.T. press, 1981.
- [3] J. Y. S. Luh, "Conventional controller design for industrial robots-A tutorial," IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. SMC-13, pp. 298-316, June 1983.
- [4] H. Asada and K. Hara, "Load sensitivity analysis and adaptive control of a direct -drive arm," Proc. Acc, pp. 799-804, 1986.
- [5] I. V. Miroshnik, "Coordinating control of Multivariable Systems," Leningrad :Energatomizdat, 1990.
- [6] I. V. Miroshnik & V. O. Nikiforov, "Adaptive control of Nonlinear plants Spatial Motions," Automation and Remote control, pp. 1238-1245, 1991.
- [7] M. Vukobratovich, D. Stokich, & N. Kirchanski, "Non-adaptive and Adaptive control of Manipulation Robots," New York :Springer-Verlag, 1985.
- [8] Kang, C. G and Kwak, H. S. October, "Fuzzy logic control for direct drive robot manipulators," KACC, International sessions, vol. 1, pp. 428-433. 1994.
- [9] 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.