

# 퍼지-슬라이딩 모드를 이용한 스카라 로봇의 제어에 관한 연구

## A Study on Development of SCARA robot Using Fuzzy-Sliding mode control

고석조, 이민철(부산대 기계공학과), 이만형(부산대 제어기계공학과)

### Key words

fuzzy-sliding mode control(퍼지-슬라이딩 모드 제어), two dead-band(두개의 불감대), state value(상태값),chattering(채터링)

### Abstract

This paper shows that the proposed fuzzy-sliding mode for SCARA robot control could reduce chattering problem in sliding mode control and is robust against parameter uncertainties. It was very small quantities of chattering in the fuzzy-sliding mode control compared with that in sliding mode control with two dead-band. In here, the sliding mode control with two dead-band is the method to reduce some chattering by changing into a continuous variable lower control input gain when a state value in phase plane converged within two dead-band. But, the fuzzy-sliding mode control for more reducing chattering is the method to change control input by sliding mode into that by fuzzy rule within two dead-band. Simulations show that the effect of reducing chattering by the fuzzy-sliding mode is superior to sliding mode control with two dead-band.

### 1. 서론

현재 대부분의 산업용 로봇의 제어방식으로 이용되고 있는 PID제어의 경우에는 고속운동에 제한을 받고, 급격한 파라미터의 변동이 발생하였을 경우 정도면에서 문제가 되고 있다. 이것은 실제 로봇 매니퓰레이터의 운동방정식이 비선형이며, 마찰력의 영향 및 작업중의 부하변동과 같은 외란이 존재하므로, 이들 비선형 성분을 보상하고, 파라미터의 변동에 대응하지 않는 한 그 성능은 개선될 수 없다. 고속·고정도의 로봇 제어를 위해 시스템을 모델링하여 비선형 성분을 보상하려고 해도 시스템을 정확하게 모델링하기가 어렵고, 비록 근사적으로 모델링하더라도 인정한 게인(gain)을 갖는 PID 비선형보상 제어만으로는 고속·고정도의 제치제어를 수행하기가 어렵다. 따라서 이러한 문제점들을 개선하고 보다 우수한 제어성능을 얻고자 강인성을 지닌 슬라이딩 모드 제어를 이용한 로봇의 제어에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다<sup>1~46)</sup>. Lee, Aoshima 등은 로봇 매니퓰레이터의 운동방정식에 나타나는 비선형성분을 외란으로 간주함으로써 운동 방정식을 비연성(decouple)화 시키므로 매니퓰레이터의 자유도가 높은 경우에도 슬라이딩 모드 제어의 적용을 용이하게 하면서, 동시에 기존의 PID 비선형보상 제어에서는 볼 수 없는 강인성을 지닌 알고리즘을 제시하였다<sup>3,4)</sup>. 그러나, 이 방법의 경우 외란으로 간주된 비선형성분의 영향은

제거하기 위해 주어지는 전환제어입력이 전환변을 중심으로 과도하게 증가되므로 채터링이 발생하는 문제점이 있었다. 이러한 채터링을 경감시키기 위해서 전환면 주변에 두개의 불감대를 설정하여 제치의 상태를 나타내는 위상면 상의 상태의 값이 불감대 이내로 수렴하면 제어게인을 작게 가변하여 주므로써 과도한 제어입력에 의한 채터링발생을 경감시키고자 하는 연구가 진행되어 왔다<sup>7,8)</sup>.

한편, 퍼지 제어는 퍼지 이론의 응용 분야 중에서도 유난히 실험이 선행되었고, 널리 주목을 모아 왔던 분야이다. 1974년경에 시작된 퍼지 제어의 시도는 1980년 대에 들어서서 빠르게 실용화 되게 되었다. 퍼지 제어는 전문가의 경험과 지식은 정성적인 언어로 표현하고 퍼지 제어 규칙의 형태로 논리화하는 것이다. 이러한 퍼지 제어 규칙에 의해 구성된 제어를 이용하여 정확한 수학적 모델을 구하기 힘든 시스템에 적용한 결과 우수한 제어 효과를 가지 옴이 밝혀졌다<sup>9,10)</sup>.

본 연구에서는 슬라이딩 모드 제어에서 문제가 되는 채터링을 경감하는 방안으로 퍼지 이론을 도입하여 채터링 경감과 강인성을 동시에 지닌 퍼지-슬라이딩 모드 제어를 구성하고자 하였다. 제안된 퍼지-슬라이딩 모드 제어기의 채터링 경감 효과를 검증하기 위하여 4축 스카라(SCARA: Selected Compliance Articulated Robot Assembly) 로봇 매니퓰레이터에 퍼지-슬라이딩 모드 제어를 적용함으로써 기존의 두개의 불감대를 분

슬라이딩 모드 제어를 사용한 경우와 시뮬레이션에 의해 비교 검토하여 그 우수성을 입증하고자 한다.

## 2. 피지-슬라이딩 모드 제어기의 설계

### 2.1 슬라이딩 모드 제어

본 연구의 제어대상인 스카라 로봇은 Fig. 1과 같은 4자유도를 갖는 매니퓰레이터로서 XYZ로 표현되는 기준좌표계에 대하여 각각의 관절좌표계를 Denavit-Hartenberg 표시법에 의하여 설정하고 Lagrange-Euler 공식을 적용하면 매니퓰레이터의 운동방정식은 식 (1)~(4)와 같이 유도된다<sup>15)</sup>.

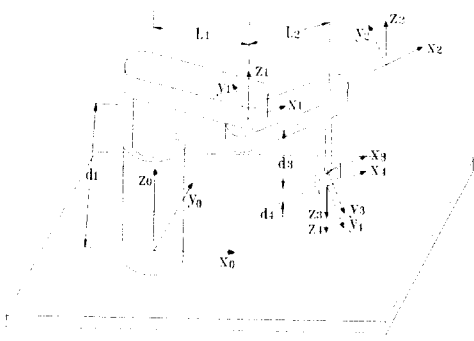


Fig. 1 SCARA robot

$$H_{11} \ddot{\theta}_1 + H_{12} \ddot{\theta}_2 + H_{13} \ddot{\theta}_3 + h_{112} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + h_{122} \dot{\theta}_2^2 + \nu_1 \dot{\theta}_1 + f_1 \text{sgn}(\dot{\theta}_1) = \tau_1 \quad (1)$$

$$H_{21} \ddot{\theta}_1 + H_{22} \ddot{\theta}_2 + H_{23} \ddot{\theta}_3 + h_{211} \dot{\theta}_1^2 + h_{212} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + h_{221} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \nu_2 \dot{\theta}_2 + f_2 \text{sgn}(\dot{\theta}_2) = \tau_2 \quad (2)$$

$$H_{33} \ddot{d}_3 + G_3 + \nu_3 \dot{d}_3 + f_3 \text{sgn}(\dot{d}_3) = \tau_3 \quad (3)$$

$$H_{41} \ddot{\theta}_1 + H_{42} \ddot{\theta}_2 + H_{43} \ddot{\theta}_3 + \nu_4 \dot{\theta}_1 + f_4 \text{sgn}(\dot{\theta}_1) = \tau_4 \quad (4)$$

단, 여기서  $H_{ij}\ddot{\theta}_j$ ,  $h_{ijk}\dot{\theta}_k$ ,  $G_3$ ,  $\nu(\dot{\theta}_i)$  및  $f_i \text{sgn}(\dot{\theta}_i)$ 는 각각 관성력, 코리올리력, 원심력, 중력, 점성 마찰력, 분봉 마찰력에 관한 항이다.

한편, 각 관절구동을 위해 DC모터를 시보계로하여 시보계  $i$ 관절의 운동방정식을 유도하면 식 (5)와 같다.

$$J_{mi} \ddot{\theta}_{mi} + B_{mi} \dot{\theta}_{mi} + \tau_{mi} = k_i u_i \quad (5)$$

여기서,  $J_{mi}$ ,  $B_{mi}$ ,  $\tau_{mi}$ 는 각각 각관절 구동모터의 회전관성모멘트, 점성감쇠계수, 제어입력을 나타내고,  $\tau_{mi}$ 는 모터축에 대한 부하축의 등가관성모멘트를 나타낸다.  $k_i$ 는 모터토크계수, 감속기의 감속비, 전기가사 지향에 의해 결정되는 항이다. 비선형성분을 외란으로 간주한 슬라이딩 모드 제어를 적용하기 위해서 식 (1)~(5)로부터 관성모멘트의 비선형요소, 원심력, 코리올리력, 마찰

력, 중력 등을 외란으로 간주하여 변수  $F_i$ 로 두면 매니퓰레이터와 시보계를 합친  $i$ 관절의 운동방정식은 식 (6)과 같다.

$$J_i \ddot{\theta}_{Li} + B_i \dot{\theta}_{Li} + F_i = k_i u_i \quad (6)$$

여기서  $J_i$ 는 식 (1)~(5)에서 나타나는 관성모멘트의 선형요소만의 합을 나타내고,  $B_i$ 는 모터회전자의 감쇠계수항, 역기전력에 의한 항, 매니퓰레이터의 점성감쇠계수항의 합을 나타낸다.  $F_i$ 라고  $k_i$ 는 제어게인을 나타낸다.

식 (6)과 같이 간단화된 운동방정식을 가지는 시스템에 대하여 게가 슬라이딩 모드상에 존재하기 위한 슬라이딩 모드 제어 입력을 구하면 식 (7)과 같다<sup>16)</sup>.

$$u_i = \psi_{ai} e_i + \psi_{fi} + \psi_{\dot{\theta}_i} \dot{\theta}_{di} + \psi_{\ddot{\theta}_i} \ddot{\theta}_{di} \quad (7)$$

$$\psi_{ai} = \begin{cases} \alpha_{1i} & \text{if } s_i e_i > 0 \\ \alpha_{2i} & \text{if } s_i e_i < 0 \end{cases}$$

$$\psi_{fi} = \begin{cases} u_{fi}^+ & \text{if } s_i > 0 \\ u_{fi}^- & \text{if } s_i < 0 \end{cases}$$

$$\psi_{\dot{\theta}_i} = \begin{cases} \beta_{1i} & \text{if } s_i \dot{\theta}_{di} > 0 \\ \beta_{2i} & \text{if } s_i \dot{\theta}_{di} < 0 \end{cases}$$

$$\psi_{\ddot{\theta}_i} = \begin{cases} \gamma_{1i} & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} > 0 \\ \gamma_{2i} & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} < 0 \end{cases}$$

$$\psi_{fi} = \begin{cases} u_{fi}^+ = M_{1i} + M_{2i} \times f(e_i) & \text{if } s_i > 0 \\ u_{fi}^- = -M_{1i} - M_{2i} \times f(e_i) & \text{if } s_i < 0 \end{cases}$$

$$\text{단, } f(e) = |e|$$

여기서  $s_i$ 는 각도의 추종오차  $e$ 와 오차의 속도  $\dot{e}$ 를 상태로

하는 오차상태공간 상에서 슬라이딩 모드가 발생하는 전환점을 의미 한다. 또한  $\psi_{fi}$ 와  $\psi_{\ddot{\theta}_i}$ 는 레도제어를 수행할 때  $\dot{\theta}_{di}$ ,  $\ddot{\theta}_{di}$ 에 의한 영향으로 슬라이딩 모드의 존재조건으로부터 벗어나는 것을 제거하기 위한 입력으로 feed-forward 요소이며,  $\psi_{fi}$ 는 외란을 억제하기 위한 제어입력이다.

제  $i$ 관절에서 슬라이딩 모드가 발생하기 위해서는 슬라이딩 모드의 존재조건  $ss < 0$ 을 만족해야 한다. 식 (7)에 정의된 제어 입력과 비선형 성분을 외란으로 간주한 식 (6)을 이용하면 비교적 간단히 슬라이딩 모드의 존재 조건을 만족하는 조건식을 이용하여 전환파라미터의 경계값을 구할 수 있게 된다<sup>16)</sup>. Table 1과 같은 스카라 로봇의 사양에 대하여 슬라이딩 모드의 존재 조건을 만족시키는 전환파라미터의 경계치를 구하면 Table 2와 같이 계산된다.

한편 다입력계의 슬라이딩 모드 제어를 실현하기 위하여 식 (7)에서 제시한 제어입력을 계층제어법에 의해서 부가한다. 이 때 우선순위의 계층이 슬라이딩 모드에 들어가까지는 하위순위로 가장한 계층이 우선순위의 운동에 의한 간섭을 극복할 수 있도록 비례제어입력을 증가하는 하이브리드(hybrid)방식을 이용하였다. 즉, 우선순위의 계층이  $|s_i| < \epsilon_i$ 를 만족하면 슬라이딩

Table 1 Specification of SCARA robot

	Axis 1	Axis 2
Mass of link (kg)	15.07	8.99
Length of link (m)	0.35	0.30
Viscosity coefficient of link (gf·cm/rpm)	0.81	0.35
Inertia of motor (g·cm·sec <sup>2</sup> )	0.51	0.14
Damping coefficient of motor (kgf·cm)	0.2	0.1
Electromotive force constant (V/krpm)	22.5	21.0
Torque constant (kgf·cm/A)	2.19	2.04

Table 2 Limit values of switching parameters

	Axis 1	Axis 2
$c_i \text{ lim}$	$c_1 < 451.74$	$c_2 < 346.47$
$\alpha_i \text{ lim}$	$\alpha_{11} < -173.98, s_1 e_1 > 0$	$\alpha_{12} < -160.22, s_2 e_2 > 0$
	$\alpha_{21} > -173.98, s_1 e_1 < 0$	$\alpha_{22} > -160.22, s_2 e_2 < 0$
$\beta_i \text{ lim}$	$\beta_{11} < 35.2, s_1 \dot{\theta}_1 > 0$	$\beta_{12} < 32.5, s_2 \dot{\theta}_2 > 0$
	$\beta_{21} > 35.2, s_1 \dot{\theta}_1 < 0$	$\beta_{22} > 32.5, s_2 \dot{\theta}_2 < 0$
$\gamma_i \text{ lim}$	$\gamma_{11} < 0.078, s_1 \ddot{\theta}_1 > 0$	$\gamma_{12} < 0.094, s_2 \ddot{\theta}_2 > 0$
	$\gamma_{21} > 0.078, s_1 \ddot{\theta}_1 < 0$	$\gamma_{22} > 0.094, s_2 \ddot{\theta}_2 < 0$

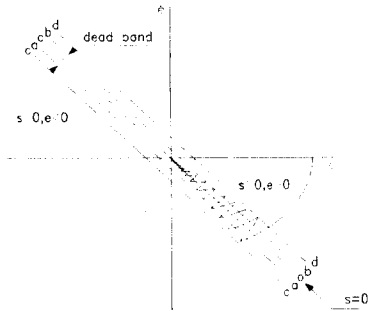


Fig. 2 Phase plane with a dead band around the switching line

모드에 들어간 경우로 간주하여 순차적으로 최하위계층까지의 슬라이딩 모드에 들어가게 하는 것이다.

채터링의 감소를 위해 전환선 주변의 임의의 영역을 불감대로 가정할 후, 그 불감대를 Fig. 2와 같이 설정하였다<sup>(25)</sup>. Fig. 2에서  $o-o$ 는  $s=0$ 인 전환선을 나타낸다. 계층제어법의 적용시 우선순위 계층의 수렴정도를 편별하기 위한  $|s|=\varepsilon$ 은 보조선  $c-c$ 와  $d-d$ 로 나타내었다. 또 전환선 주변의 채터링을 경감시키는 방안으로 식 (8)와 같이 상태변수와 전환면 사이의 거리를  $D$ 로 정의하였다.

$$D = \frac{|c_i e_i + \dot{e}_i|}{\sqrt{c^2 + 1}} \quad (8)$$

즉,  $D=\varepsilon$ 의 값을 가지는 보조선  $a-a$ 와  $b-b$ 를 불감대로 선정하여 상태변수의 절대치가 이 영역으로 수렴하면 식 (7)의 제어입력식에서 외란에 대응하기위한 입력  $u_i$ 의  $M_i$  크기를 줄어줌으로써 과도한 제어 입력의 급격한 변화에 따른 채터링을 경감시키게 하였다<sup>(25)</sup>.

## 2.2 퍼지-슬라이딩 모드 제어

채터링을 줄이기 위한 방안으로 식 (7)에서 외란에 대응하는 제어입력인  $u_i$  대신 퍼지 규칙에 의한 적절한 제어 입력인  $u_{i,ss}$ 를 선택할 수 있도록 한다. 식 (7)의  $u_i$  대신  $u_{i,ss}$ 를 사용하면 식 (7)과 슬라이딩 모드의 존재 조건식으로 부디 각각 식 (9)와 식 (10)이 구해진다.

$$u_i = \phi_{oi} e_i + \phi_{fuzzy} + \phi_{\beta i} \dot{\theta}_{di} + \phi_{\gamma i} \ddot{\theta}_{di} \quad (9)$$

$$s_i \dot{s}_i = s_i (c_i \dot{e}_i + \dot{e}_i) = s_i^2 (c_i - \frac{B_i}{J_i}) + s_i e_i (\frac{B_i}{J_i} c_i + \frac{k_i}{J_i} \phi_{oi} - c_i^2) + (\frac{k_i}{J_i} \phi_{fuzzy} - \frac{F_i}{J_i}) s_i + (\frac{k_i}{J_i} \phi_{\beta i} - \frac{B_i}{J_i}) s_i \dot{\theta}_{di} + (\frac{k_i}{J_i} \phi_{\gamma i} - 1) s_i \ddot{\theta}_{di} < 0 \quad (10)$$

식 (10)의 우변에서 외란에 대응하는 세번째 항을 제외하면 다음 항들은 식 (7)에서 제안한 각 항에 관련된 전환과파라미터를 사용하여 구하였다. 슬라이딩 모드 존재조건을 만족하도록 하기 위하여  $u_{i,ss}$ 와  $s_i$ 의 관계를 유도해 보면 식 (11)과 같은 규칙을 얻을 수 있다.

$$\text{IF } s > 0, \text{ decreasing } u_{i,ss} \text{ will result in decreasing } s \dot{s} \quad (11)$$

$$\text{IF } s < 0, \text{ increasing } u_{i,ss} \text{ will result in decreasing } s \dot{s}$$

식 (11)의 관계를 이용하여  $s \dot{s} < 0$ 를 만족할 수 있는 외란에 대응하는 적절한 제어 입력  $u_{i,ss}$ 를 선택할 수 있다. 제안된 퍼지 제어기의 입력으로는  $s$ 와  $\dot{s}$ 의 퍼지화된 변수인  $s_f$ 와  $\dot{s}_f$ 를 사용하며, 출력으로서는  $u_{i,ss}$ 에 대한 퍼지화된 변수인  $u_f$ 를 사용한다.

Fig. 3과 같은 상태공간 상의 위상궤적 운동에서 각 상태에 대한 퍼지 규칙을 세워 보자. 먼저 의사슬라이딩 모드에 들어가는 P1에서의 상태는  $s$ 가 양이고  $\dot{s}$ 가 음이 된다. 이 상태에 대하여 퍼지 변수를 사용하여 표현하면  $s_f = PB$ ,  $\dot{s}_f = NM$ 과 같이 나타나고, 제어 입력으로는 상태값을 전환선으로 빠르게 접근시키기 위해  $u_f = NS$ 을 인가하도록 한다. P2에서는  $s_f = ZO$ ,  $\dot{s}_f = NB$ 과 같이 되므로 상태값이 전환선을 벗어나려고 한다. 따라서, 제어 입력은  $u_f = PM$ 을 인가 해야 한다. 이와같은 방법

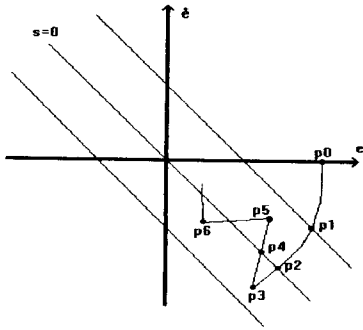


Fig. 3 Phase-trajectory

Table 3 Fuzzy Rule

$s_{fi}$ \ $s_{fi}$	PB	PM	ZO	NM	NB
PB	NB	NB	NM	NS	ZO
PM	NB	NM	NS	ZO	PS
ZO	NM	NS	ZO	PS	PM
NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO	PS	PM	PB	PB

으로 Fig. 3에서의 각 상태 P1~P5에 대하여 IF ~THEN형식의 논리형을 사용하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

- P1 : IF  $s_{fi}$  is PB and  $s_{fi}$  is NM , THEN  $u_{fi}$  is NS .  
 P2 : IF  $s_{fi}$  is ZO and  $s_{fi}$  is NB , THEN  $u_{fi}$  is PM .  
 P3 : IF  $s_{fi}$  is NB and  $s_{fi}$  is NB , THEN  $u_{fi}$  is PB . (12)  
 P4 : IF  $s_{fi}$  is ZO and  $s_{fi}$  is PB , THEN  $u_{fi}$  is NM .  
 P5 : IF  $s_{fi}$  is PM and  $s_{fi}$  is PB , THEN  $u_{fi}$  is NB .

식 (12)와 같이 나타나는 제어 규칙을 표로 나타내면 Table 3과 같이 구성된다. 여기서 사용한 제어 규칙의 추론은 무게 중심법을 사용하였다<sup>(9,10,11)</sup>.

### 3. 시뮬레이션 및 고찰

이상에서 제시한 불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어기와 퍼지-슬라이딩 모드 제어기의 성능을 비교 평가하기 위하여 4축 스카라형 로봇의 2자유도에 대해 4위의 Runge-Kutta 수치적분법으로 시뮬레이션을 수행하였다.

다관절 매니퓰레이터에 슬라이딩 모드 제어를 실현하기위해 링크1을 최우선순위로 하여 링크 2의 순서로 슬라이딩 모드가 발생하도록 계층제어법을 적용하였고 각링크의 상태를  $s_1, s_2$ 로 정의하였다. 그리고 오차상태공간에서  $s_1$ 이  $\epsilon$ 이내로 수렴할 때까지 하위계층인 링크 2~4는 비례제어 입력이 인가되도록 하였고  $s_1$ 이  $\epsilon$ 이내로 수렴하였을 때 링크 2의 슬라이딩 모드가 발생하도록 하였다. 시뮬레이션에 사용된 전환면의 기울기와 전환

Table 4 switching parameters

	Axis 1	Axis 2
$c_i$	5	5
$\alpha_i$	$\alpha_{11} = -180, s_{1e1} > 0$ $\alpha_{21} = -160, s_{1e1} < 0$	$\alpha_{12} = -170, s_{2e1} > 0$ $\alpha_{22} = -150, s_{2e1} < 0$

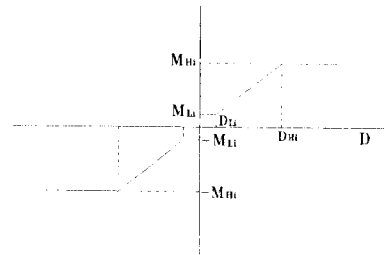


Fig. 4 Continuous Dead-band

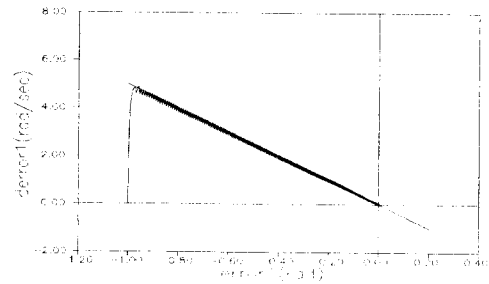


Fig. 5 Phase trajectory of axis 1 with two dead-band

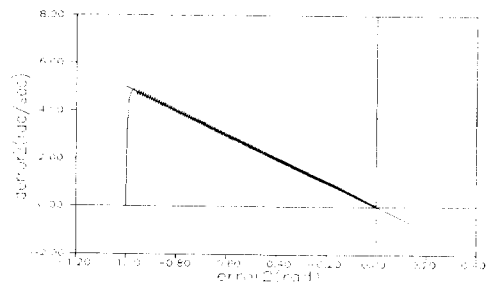


Fig. 6. Phase trajectory of axis 2 with two dead-band

파라미터는 슬라이딩 모드의 존재조건을 만족시키는 범위내에서 Table 4에 나타내었다.

먼저, Fig. 2와 같이 제한된 기준의 슬라이딩 모드 제어에 대하여 Fig. 4와 같이 불감대의 영역을 두개로 나누어 설정한 후 이 불감대 영역 이내로 상태값이 들어오면 외란에 대응하기 위한 제어입력  $M_{H1}$ 를 연속적으로 상태에 따라 가감할 수 있도록 한 제어입력  $M_{L1}$ 를 연속적으로 상태에 따라 가감할 수 있도록 하였다. 이 경우 스텝 입력에 대한 각 축의 출력 결과인 위상궤적 선도는 각각 Fig. 5, Fig. 6과 같다.

다음으로 퍼지-슬라이딩 모드 제어의 경우는 Fig. 7과 같은



Fig. 7 Membership function

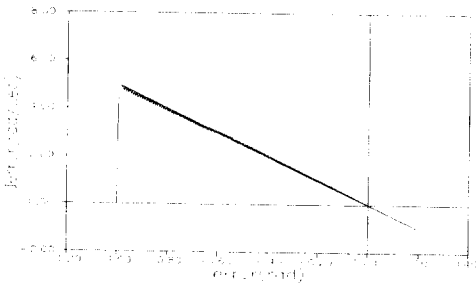


Fig. 8 Phase trajectory of axis 1 with fuzzy-sliding mode controller

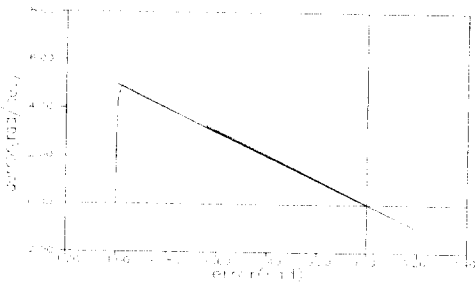


Fig. 9 Phase trajectory of axis 2 with fuzzy-sliding mode controller

귀속함수를 두었다. 이 경우의 스텝 입력에 대한 각 축의 출력 결과인 위상궤적 선도는 각각 Fig. 8, Fig. 9와 같다.

두 제어기의 위상궤적을 비교해보면 퍼지-슬라이딩 모드를 사용한 경우 채터링의 경감 효과가 개선되었음을 알 수 있다. 여기서 퍼지-슬라이딩 모드 제어기의 2축에 대한 위상 궤적을 보면, 전환선 상에서 초기에는 채터링이 거의 없다가 도중에 채터링이 다시 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 위치에러가 감소함에 따라 식 (9)의  $u_{\text{eq}}$ 에 비교해서  $u_{\text{acc}}$ 의 값이 전체 제어 입력에 더 큰 영향을 주었기 때문에 나타나는 현상으로 판단되어 진다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 로봇의 동특성에서 나타나는 비선형성분을 외란으로 가정하여 로봇 시스템의 운동 방정식을 비연성(decouple)화 시키므로 슬라이딩 모드 제어를 로봇에 쉽게 적용(decouple)화 시키므로 슬라이딩 모드 제어를 로봇에 쉽게 적용하도록 한 기존의 슬라이딩 모드 제어에서 문제가 되는 채터

링을 경감시키기 위한 방안으로 퍼지 이분을 도입한 퍼지-슬라이딩 모드 제어기를 제안 하였다. 스카라 로봇의 2자유도에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과 불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어기에 비교해서 퍼지-슬라이딩 모드 제어기에 의한 채터링 경감 효과가 향상되었음이 확인 되었다. 향후 연구 방향은 이러한 보완된 퍼지 규칙을 도출해 스카라 로봇의 4축에 대한 퍼지-슬라이딩 모드 제어기를 구성하고, 이를 DSP를 이용한 실험을 통해 그 타당성을 입증하므로 고기능 스카라 로봇의 제어 알고리즘에 이용되도록 하고자 한다. 그러나, 부분적으로 남아 있는 채터링을 완전히 제거하기 위해서는 보다 더 타당성 있는 퍼지 규칙을 도출 해야 할 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Young, K. K. D., 1978, "Controller Design for Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems," IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol. 8, No. 2, pp. 101 ~ 109.
- (2) Hashimoto, H., et al., 1987, "A Microprocessor-Based Robot Manipulator Control with Sliding Mode," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 134, No. 1, pp. 11 ~ 18.
- (3) Lee, M. C. and Aoshima, N., 1993, "Real Time Multi-Input Sliding Mode Control of a Robot Manipulator Based on DSP," Proc. of SICE '93, pp. 1223 ~ 1228.
- (4) 이 만 철, 壽島伸治, 1992, "슬라이딩 모드를 이용한 로봇 매니퓰레이터의 실시간 제어에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제16권, 제11호, pp. 2011 ~ 2020.
- (5) Fu, K. S., Gonzalez, R. C., and Lee, C. S. G., 1987, ROBOTICS: Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw-Hill.
- (6) 진 상 영, 이 만 철, 이 만 형, 1995, "슬라이딩 모드를 이용한 SCARA 로봇의 궤적제어에 관한 연구", 대한 기계학회 논문집, 제19권, 제11호, pp. 99 ~ 110.
- (7) 신 기 태, 이 만 철, 1994, "슬라이딩 모드 제어를 이용한 SCARA 로봇의 동적 시뮬레이터 개발", 大韓機械學會春季學術大會論文集 第1卷, pp. 577 ~ 582.
- (8) 신 기 태, 이 만 철, 1994, "DSP를 이용한 SCARA 로봇의 슬라이딩 모드 제어", '94韓國自動制御學會論文集, pp. 48 ~ 51.
- (9) 임 정 국, 1992, 기초 퍼지 이론과 응용 퍼지시스템, 정보시대
- (10) 菅野道夫, 1990, Fuzzy Control System, 大英社.
- (11) Mohammad, J., Nader, U., Timothy, J. R., 1993, Fuzzy Logic and Control, Prentice-Hall.