

DSP를 이용한 스카라 로봇의 퍼지-슬라이딩 모드 제어

Fuzzy-Sliding Mode Control for SCARA Robot Based on DSP

고 석 조, 이 민 철
(Seok-Jo Go and Min-Cheol Lee)

Abstract : This paper shows that the proposed fuzzy-sliding mode control algorithm for a SCARA robot could reduce the chattering due to sliding mode control and is robust against a change of payload and parameter uncertainties. That is, the chattering can be reduced by changing control input for compensating disturbances into a control input by fuzzy rules within a pre-determined dead zone. The experimental results show that the chattering can be reduced more effectively by the fuzzy-sliding mode control algorithm than the sliding mode control with two dead zones. It is proved experimentally that the proposed control algorithm is robust to a change of payload. The proposed control algorithm is implemented to the SCARA robot using a DSP(board) for high speed calculations.

Keywords : fuzzy-sliding mode control, chattering, fuzzy rules, two dead zones

I. 서론

현재 대부분의 산업용 로봇의 제어 방식으로는 PID 제어가 이용되고 있는데, PID 제어의 경우 파라미터 변동이나 부하 변동 및 고속 운전 시에 발생하는 비선형 성분 등의 외란에 대응하지 못하므로 고속 운전 시에는 고정도의 제어가 어렵다. 이것은 실제 로봇 매니플레이터의 운동방정식이 비선형이며, 마찰력의 영향 및 작업 중의 부하 변동과 같은 외란이 존재하므로 이러한 비선형 성분을 보상하고 파라미터의 변동에 대응하지 않는한 그 제어 성능은 개선될 수 없다. 이를 개선하기 위해서 시스템을 모델링하여 비선형 성분을 보상한 후 PID 제어를 수행하는 계산도 크법을 들 수 있으나, 이 경우 역시 계산이 복잡하며 시스템을 정확히 모델링하기가 어렵고 비록 근사적으로 모델링하더라도 비선형 성분을 정확히 보상에 줄 수 없으므로 부하변동이 있거나, 고속운동에 의해 비선형 성분의 영향이 크게 작용될 경우에는 목표 궤적을 정확히 제어하기가 어렵다.

PID 제어의 이러한 문제점을 해결하기 위해서 강인성을 지닌 슬라이딩 모드 제어를 이용한 로봇의 실시간 제어에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다[1][2][3]. 로봇 매니플레이터의 제어에 슬라이딩 모드 제어를 적용시킬 경우 매니플레이터의 운동방정식에 나타나는 복잡한 비선형 성분으로부터 슬라이딩 모드의 존재 조건을 만족시키는 절환 파라미터를 구하는 것 역시 용이하지 않다. 이에 Lee와 Aoshima는 로봇 매니플레이터의 운동방정식에 나타나는 비선형 성분을 외란으로 간주하여 운동 방정식을 비연성(decouple)화 시키므로 매니플레이터의 자유도가 높은 경우에도 슬라이딩 모드 제어의 적용을 용이하게 하였고, 동시에 기존의 PID 비선형 보상 제어에서는 볼 수 없는 강인

성을 지닌 알고리즘을 제시하였다[3][4]. 그러나, 이 방법의 경우 외란으로 간주된 비선형 성분의 영향을 제거하기 위해 주어지는 절환 제어입력이 절환면을 중심으로 과도하게 인가되므로 채터링이 발생하는 문제점이 있었다. 이러한 채터링 문제는 슬라이딩 모드 제어를 실제 시스템에 적용할 경우 시스템의 구성 요소에 매우 해로운 영향을 주게 된다. 따라서 본 연구의 선행 연구에서는 이 채터링의 경감을 위해 불감대(dead zone)를 이용하여 채터링을 경감시키고자 하는 연구가 진행되어 왔다[5][6][7]. 즉 절환선 주변에 가상의 두개의 불감대를 설정하여 궤적의 상태를 나타내는 위상면 상의 상태의 값이 불감대 이내로 수렴하면 그 상태값의 크기에 따라 제어 계인을 작게 가변하여 줌으로써 외란에 대응하는 과도한 제어입력에 의한 채터링 발생을 경감시키고자 하였다. 이와 같은 불감대를 이용함으로써 불감대를 두지 않은 슬라이딩 모드 제어에 비교해서는 큰 채터링의 경감이 확인되었다. 그러나 실제 산업용 로봇에 적용하였을 경우, 불감대를 두지 않은 슬라이딩 모드 제어에 비교해서는 큰 채터링의 경감이 있었지만 실제 산업용 로봇에 적용하기에 만족할 만큼의 채터링 경감 효과를 가져오진 못했다[5][6][7]. 이것은 불감대를 사용한 경우 상태공간 상에서 상태값의 변화율을 고려하지 않고 상태값의 위치에 의해서만 절환 제어 입력값을 선정하였기 때문으로 그 원인을 들 수 있다.

한편 퍼지 제어는 퍼지 이론의 응용 분야 중에서도 유달리 실행이 선행되었고, 널리 주목을 모아 왔던 분야이다. 1974년 경에 시작된 퍼지 제어의 시도는 1980년 대에 들어서 빠르게 실용화되게 되었다. 퍼지 제어는 전문가의 경험과 지식을 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 가져옴이 밝혀졌다[8][9][10][11]. 따라서 1990년대에는 퍼지 이론을 슬라이딩 모드 제어에 결부시킨 퍼지-슬라이딩 모드 제어에 대한 연구가 이루어지기 시작하였다[12][13]. 그러나 이러한 연구들은 시뮬레이션에 의한 제어기의 검증과정만

접수일자 : 1999. 6. 14., 수정완료 : 1999. 12. 16.

고석조 : 부산대학교 대학원 지능기계공학과

이민철 : 부산대학교 기계공학부

※ 본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터(과제번호 : 98K3-0909-05-04-3)의 연구비와 1999년도 두뇌한국21사업 핵심분야에 의하여 지원되었습니다.

거쳤기 때문에 실제 산업용 로봇에 적용 가능한지에 대한 실험적 평가는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 불감대를 가진 슬라이딩 모드 제어에서 문제가 되었던 채터링을 더욱 경감시키기 위한 방안으로 퍼지 이론을 도입하여 채터링 경감과 강인성을 동시에 지닌 퍼지-슬라이딩 모드 제어를 구성하고자 한다. 제안된 방법에서는 로봇 매니플레이터의 운동방정식에 나타나는 비선형 성분을 외란으로 간주함으로써 슬라이딩 모드의 절환파라미터를 쉽게 결정할 수 있다는 이점을 이용하고자 하였다. 또한 선행연구에서 제안한 슬라이딩 평면상에서 미리 설정한 가상의 불감대 이내에서 상태값의 위치에 따라 외란에 대응하는 절환 제어입력을 가변하는 경우에 비교해서 상태값의 변화율도 동시에 고려하는 퍼지 규칙을 도출함으로써 절환 제어입력이 절환면을 중심으로 과도하게 인가되는 문제를 해결하여 채터링을 더욱 줄이면서 궤적 추종 오차도 줄이고자 하였다. 제안한 방법은 슬라이딩 모드에 의해 시스템의 안정성이 보장되는 범위 내에서 퍼지 규칙이 결정되므로 퍼지 제어기 설계에 있어서의 안정성 문제를 해결할 수 있다. 본 논문에서는 시뮬레이션에 의한 제어기의 성능평가 뿐만 아니라 제안된 퍼지-슬라이딩 모드 제어기에 의한 채터링 경감 및 위치 추종 성능을 실험적으로 평가하기 위해 실제 산업용 로봇에 적용함으로써 제어기의 성능을 평가하고자 한다.

상기의 목적을 달성하기 위하여 먼저 상태 공간상의 위상 궤적 운동에 따른 퍼지 규칙을 도출하고, 이 도출된 퍼지 규칙으로부터 퍼지-슬라이딩 모드 제어를 구성한다. 즉 절환선 주변에서 상태값의 크기와 그 상태에서의 변화율을 퍼지 변수로 사용하여 퍼지 논리를 도출하고, 도출된 퍼지 논리에 의해서 외란에 대응하는 제어입력을 결정함으로써 채터링을 경감시키고자 한다. 제안된 퍼지-슬라이딩 모드 제어기의 채터링 경감 효과를 검증하기 위하여 퍼지-슬라이딩 모드 제어와 기존의 두개의 불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어를 사용한 경우와 시뮬레이션에 의해 비교 검토하여 그 우수성을 입증하고자 한다. 또한 실험적으로 퍼지-슬라이딩 모드 제어의 우수성을 검증하기 위해 실제 산업용 로봇의 실시간 제어에 적용한다. 이때 부하 변동 등의 외란에 대한 퍼지-슬라이딩 모드 제어의 강인성을 평가하기 위하여 부하질

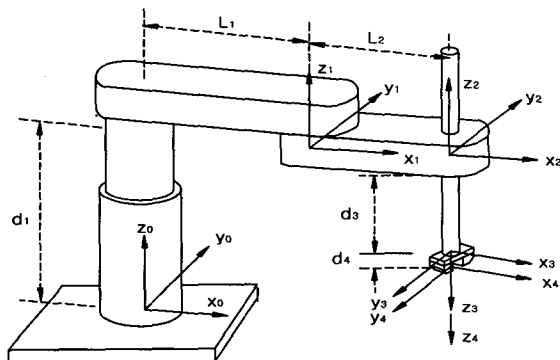


그림 1. 스카라 로봇의 좌표계.
Fig. 1. SCARA robot coordinates.

량을 부가한다. 실험에서는 고속·고정도의 실시간 궤적 제어를 위해서 DSP(Digital Signal Processor)를 이용하여 제어기를 구성하였다.

II. 퍼지-슬라이딩 모드 제어기의 설계

1. 슬라이딩 모드 제어

본 연구의 제어대상인 스카라 로봇은 그림 1과 같은 4 자유도를 갖는 매니플레이터이며, 서보계를 포함하는 제 i 번째 관절의 운동방정식은 (1)과 같이 유도된다[5][6][7][14].

$$J_i \ddot{\theta}_i + B_i \dot{\theta}_i + F_i = k_i u_i \tag{1}$$

여기서, J_i 는 제 i 번째에서의 매니플레이터와 서보계의 관성모멘트의 선형요소만의 합을 나타내고, B_i 는 모터회전자의 감쇠계수항, 역기전력에 의한 항, 매니플레이터의 점성 감쇠계수항의 합을 나타낸다. 변수 F_i 는 관성모멘트의 비선형 요소, 원심력, 코리올리력, 마찰력, 중력 등의 외란으로 나타낸다.

비선형 미분방정식으로 표현되는 4 자유도 로봇 매니플레이터에 대해서 슬라이딩 모드 제어를 적용하기 위한 절환파라미터를 유도하는 것은 쉽지 않다. 그러나 (1)과 같이 비선형 성분을 모두 외란으로 간주함으로써 선형시스템의 경우와 같이 절환파라미터를 쉽게 유도할 수 있다.

(1)과 같이 간단화된 운동방정식을 가지는 시스템에 대하여 제 i 슬라이딩 모드 상에 존재하기 위한 슬라이딩 모드 제어입력을 다음과 같이 정의하였다[4][5][6][7].

$$u_i = \psi_{ai} e_i + \psi_{fi} + \psi_{\beta i} \dot{\theta}_{di} + \psi_{\gamma i} \ddot{\theta}_{di} \tag{2}$$

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

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

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

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

여기서 $\psi_{\beta i}$ 와 $\psi_{\gamma i}$ 는 궤적 제어를 수행할 때 $\dot{\theta}_{di}$, $\ddot{\theta}_{di}$ 에 의한 영향으로 슬라이딩 모드의 존재조건으로부터 벗어나려는 것을 방지하기 위한 제어입력으로 피드 포워드(feed-forward) 요소이며, ψ_{fi} 는 외란을 억제하기 위해 주어지는 제어입력이다. ψ_{fi} 에서 M_{1i} 는 외란의 최대값을 고려하여 그 크기를 결정한다.

그리고 슬라이딩 모드가 발생하는 절환선은 다음과 같이 정의하였다.

$$s_i = c_i e_i + \dot{e}_i \tag{3}$$

c_i 는 절환선의 기울기이고, e_i 는 측정된 매니플레이터의 위치 각도와 기준각도에 대한 추종오차이다.

제 i 번째 관절에서 슬라이딩 모드가 발생하기 위한 슬라이딩 모드의 존재 조건식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 s_i \dot{s}_i &= s_i(c_i \dot{e}_i + \ddot{e}_i) \\
 &= s_i^2(c_i - \frac{B_i}{J_i}) + s_i e_i (\frac{B_i}{J_i} c_i + \frac{k_i}{J_i} \phi_{ai} - c_i^2) \\
 &\quad + (\frac{k_i}{J_i} \phi_{fi} - \frac{F_i}{J_i}) s_i + (\frac{k_i}{J_i} \phi_{\beta i} - \frac{B_i}{J_i}) s_i \dot{\theta}_{di} \\
 &\quad + (\frac{k_i}{J_i} \phi_{\gamma i} - 1) s_i \ddot{\theta}_{di} < 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

(4)를 만족하도록 정리하면 (2)에서 정의된 각 절환파라미터의 조건식은 $c_i - \frac{B_i}{J_i} < 0$ 일 때 다음과 같다.

$$\begin{cases} k_i a_{1i} + B_i c_i - J_i c_i^2 < 0 & \text{if } s_i e_i > 0 \\ k_i a_{2i} + B_i c_i - J_i c_i^2 > 0 & \text{if } s_i e_i < 0 \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} u_{fi}^- = M_{1i} + M_{2i} \times |e| < F_i / k_i & \text{if } s_i > 0 \\ u_{fi}^+ = -M_{1i} - M_{2i} \times |e| > F_i / k_i & \text{if } s_i < 0 \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} k_i \beta_{1i} - B_i < 0 & \text{if } s_i \dot{\theta}_{di} > 0 \\ k_i \beta_{2i} - B_i > 0 & \text{if } s_i \dot{\theta}_{di} < 0 \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} k_i \gamma_{1i} - J_i < 0 & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} > 0 \\ k_i \gamma_{2i} - J_i > 0 & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} < 0 \end{cases} \tag{8}$$

슬라이딩 모드 존재조건을 만족하는 절환파라미터를 유도하기 위하여 표 1과 같은 스카라 로봇의 사양에 대한 시스템 파라미터인 J_i 와 B_i 를 계산한다. 계산된 시스템 파라미터를 이용하면 각 축의 절환면의 기울기를 1축인 경우 161 미만, 2축인 경우 198 미만의 값으로 선정할 수가 있다. 여기서 시스템의 응답성을 좋게 하기 위해서는 절환면의 기울기를 허용범위 내에서 큰 값으로 선정해야한다. 그러나, 실제 시스템에 적용할 경우에는 절환면의 기울기가 커지면 슬라이딩 절환면 상에서의 속도 성분이 증가하게 되므로, 모터의 최대 토크 및 속도의 제약으로 슬라이딩 모드 절환면을 추종하지 못하는 문제가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 실제 시스템의 특성을 고려해서 절환면의 기울기를 1, 2축 각각 $c_1 = 5, c_2 = 5$ 로 선정하였으며, 절환면의 기울기에 의해 유도된 절환파라미터의 한계값은 표 2와 같이 계산된다. 예를 들면 α_i 의 경우, k_i, B_i 와 J_i 는 표

표 1. 스카라 로봇의 사양.

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 (gr·cm/rpm)	0.81	0.35
Inertia of motor (g·cm·sec ²)	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
Amateur resistance (Ω)	1.5	4.2

표 2. 절환파라미터의 한계값.

Table 2. Limit values of switching parameters.

	Axis 1	Axis 2
c_i	$c_1 < 161$	$c_2 < 198$
α_i	$\alpha_{11} < -170.5 \quad s_1 e_1 > 0$ $\alpha_{21} > -170.5 \quad s_1 e_1 < 0$	$\alpha_{12} < -158.5 \quad s_2 e_2 > 0$ $\alpha_{22} > -158.5 \quad s_2 e_2 < 0$
β_i	$\beta_{11} < 35.2 \quad s_1 \dot{\theta}_1 > 0$ $\beta_{21} > 35.2 \quad s_1 \dot{\theta}_1 < 0$	$\beta_{12} < 32.5 \quad s_2 \dot{\theta}_2 > 0$ $\beta_{22} > 32.5 \quad s_2 \dot{\theta}_2 < 0$
γ_i	$\gamma_{11} < 0.22 \quad s_1 \ddot{\theta}_1 > 0$ $\gamma_{21} > 0.22 \quad s_1 \ddot{\theta}_1 < 0$	$\gamma_{12} < 0.165 \quad s_2 \ddot{\theta}_2 > 0$ $\gamma_{22} > 0.165 \quad s_2 \ddot{\theta}_2 < 0$

1의 로봇 사양으로부터 계산될 수 있고, 절환면의 기울기를 5로 정하였으므로 α_i 의 한계값은 표 2와 같이 결정되어질 수 있다.

한편 다입력계의 슬라이딩 모드 제어를 실현하기 위하여 (2)에서 제시한 제어입력을 계층제어법에 의해서 부가한다[3][7]. 이 때 우선 순위의 계층이 슬라이딩 모드에 들어가기까지는 하위 순위로 가정한 계층이 우선 순위의 운동에 의한 간섭을 극복할 수 있도록 비례제어입력을 인가하는 하이브리드(hybrid)방식을 이용하였다. 즉 우선 순위의 계층이 $|s_i| < \epsilon_i$ 를 만족하면 슬라이딩 모드에 들어간 경우로 간주하여 순차적으로 최하위계층까지 의사 슬라이딩 모드에 들어가게 한다.

비선형 성분을 외란으로 간주한 슬라이딩 모드 제어에서 발생하게 되는 채터링 문제를 해결하기 위하여 선행연구에서는 불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어를 사용하였다. 채터링의 경감을 위해 절환선 주변의 임의의 영역을 불감대로 가정한 후, 그 불감대를 그림 2와 같이 설정하였다. 그림 2에서 o-o는 $s_i=0$ 인 절환선을 나타낸다. 계층제어법의 적용 시 우선 순위 계층의 수렴정도를 판별하기 위한 $|s_i| < \epsilon_i$ 은 보조선 c-c와 d-d로 나타내었다.

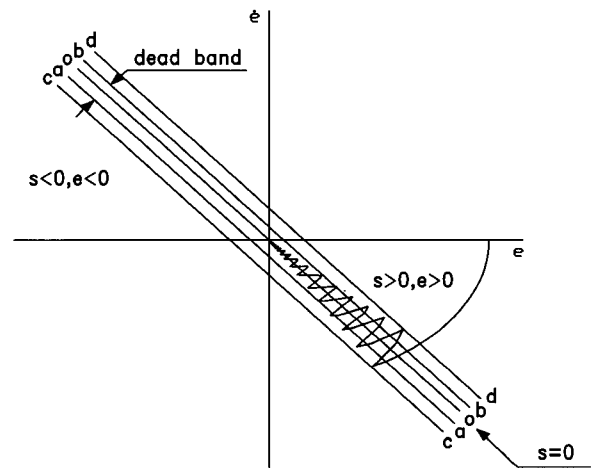


그림 2. 절환선 주변에 불감대를 가진 상태공간.

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

또 절환선 주변의 채터링을 경감시키는 방안으로 (9)와 같이 상태변수와 절환면 사이의 거리를 D로 정의하였다.

$$D = \frac{|c_i e_i + \dot{e}_i|}{\sqrt{c_i^2 + 1}} \quad (9)$$

즉, $D = \epsilon$ 의 값을 가지는 보조선 a-a와 b-b를 불감대로 설정하여 상태변수의 절대치가 이 영역으로 수렴하면 (2)의 제어입력식에서 외란에 대응하기 위한 입력 ψ_{fi} 의 M_{ii} 크기를 줄여줌으로써 과도한 제어입력의 급격한 변화에 따른 채터링을 경감시키고자 하였다[5][6][7].

이와 같은 불감대를 이용함으로써 불감대를 두지 않은 슬라이딩 모드 제어에 비교해서는 큰 채터링의 경감이 확인되었다. 그러나 실제 산업용 로봇에 적용하기에 만족할 만큼의 채터링 경감 효과를 가져오진 못했다[5][6][7]. 이것은 불감대의 설정이 상태공간 상에서 상태값의 위치에 따라서만 결정됨으로 해서 상태값의 변화율을 고려하지 않았기 때문으로 그 원인을 들 수 있다.

2. 퍼지-슬라이딩 모드 제어

제안된 퍼지-슬라이딩 모드 제어에서는 상태값의 크기 외에도 상태값의 변화율을 고려하여 슬라이딩 모드 제어에서 문제가 되는 채터링을 경감시키고자 한다. 즉 절환선 주변에서 상태값의 크기와 그 상태의 변화율의 크기를 퍼지 변수로 사용하여 퍼지 논리를 도출하고 도출된 퍼지 논리에 의해서 외란에 대응하는 제어입력을 결정할 수 있도록 한다. 이에 채터링을 줄이기 위한 방안으로 (2)에서 외란에 대응하는 제어입력인 ψ_{fi} 대신 퍼지 규칙에 의해 선택된 제어입력인 ψ_{fuzzy} 를 사용한다. 외란에 대응하는 제어입력인 ψ_{fuzzy} 를 제외한 다른 항들은 슬라이딩 모드 제어에서 제안한 절환파라미터의 조건식을 사용하였다. 그리고 외란에 대응하는 제어입력 ψ_{fuzzy} 는 $s_i \dot{s}_i < 0$ 을 만족할 수 있는 적절한 제어입력값을 퍼지 규칙에 의해 선택한다.

제안된 퍼지 제어기의 입력으로는 s_i 와 \dot{s}_i 의 퍼지화된 변수인 s_{fi} 와 \dot{s}_{fi} 를 사용하며, 출력으로서는 ψ_{fuzzy} 에 대한 퍼지화된 변수인 u_{fi} 를 사용한다. 이 경우 퍼지화된 변수로 규격화하기 위하여 규격화 정수(scaling factor)를 사용한다.

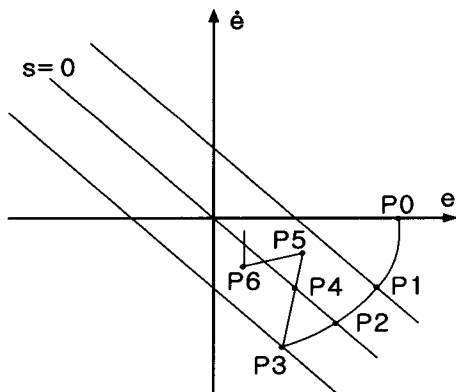


그림 3. 위상 궤적 운동.
Fig. 3. Phase trajectory.

먼저 퍼지 입력에 대해서는 K_1, K_2 의 규격화 정수를 사용하여 s 와 \dot{s} 를 퍼지화된 변수인 s_{fi} 와 \dot{s}_{fi} 로 각각 규격화하였으며, 퍼지 출력에 대해서는 K_3 의 규격화 정수에 의해서 퍼지화된 변수인 u_{fi} 를 외란에 대응하는 출력 ψ_{fuzzy} 로 계산하여 출력한다. 위의 규격화 정수의 결정은 제어 대상에 대한 전문가의 경험과 지식을 바탕으로 전문가의 판단에 의해서 선택되어 진다. 그리고 퍼지 입력에서의 소속 함수에는 PB(Positive Big), PM(Positive Medium), ZO(Zero), NM(Negative Medium), NB(Negative Big)인 5개의 퍼지 변수를 사용하고, 퍼지 출력의 소속 함수에서는 PS(Positive Small)과 NS(Negative Small)를 첨가하여 7개의 퍼지 변수를 사용한다.

외란에 대응하는 퍼지 제어입력 ψ_{fuzzy} 의 결정을 위해서 그림 3과 같은 상태공간 상의 위상 궤적 운동에서 각 상태에 대한 퍼지 규칙을 세워 보자. 먼저 의사 슬라이딩 모드에 들어가는 P1에서의 상태는 s 가 양이고, \dot{s} 가 음이 된다. 이 상태에 대하여 퍼지 변수를 사용하여 표현하면 $s_{fi}=PB, \dot{s}_{fi}=NM$ 과 같이 나타나며, 위상궤적이 절환선으로 접근하는 방향이므로 제어입력은 $u_{fi}=NS$ 을 인가하도록 한다. P2에서는 $s_{fi}=ZO, \dot{s}_{fi}=NB$ 과 같이 나타나며, 위상궤적이 절환선을 벗어나려고 하는 경향이 나타나므로 제어입력은 $u_{fi}=PM$ 을 인가해야 한다. 이와 같은 방법으로 그림 3에서의 각 상태 P1~P5에 대하여 If~then형식의 논리형을 사용하면 (10)과 같이 나타낼 수 있다. (10)과 같이 나타나는 제어 규칙을 정리하면 표 3과 같이 구성된다.

- P1 : If s_{fi} is PB and \dot{s}_{fi} is NM, then u_{fi} is NS. (10)
- P2 : If s_{fi} is ZO and \dot{s}_{fi} is NB, then u_{fi} is PM.
- P3 : If s_{fi} is NB and \dot{s}_{fi} is NB, then u_{fi} is PB.
- P4 : If s_{fi} is ZO and \dot{s}_{fi} is PB, then u_{fi} is NM.
- P5 : If s_{fi} is PM and \dot{s}_{fi} is PB, then u_{fi} is NB.

본 연구에서 사용한 퍼지 추론 방법은 최대 평균법(height method)을 사용하였다. 최대 평균법을 사용한 경우의 추론 결과식의 계산은 무게 중심법을 사용한 경우에 비교해서 그 계산량을 크게 감소시킬 수 있다. 그러나 이 방법을 사용할 경우에 유의해야할 점은 퍼지 출력의 소속 함수에서 삼각형 퍼지 변수의 밑변의 길이가 모두 같아야 한다는 제약 조건이 있다[8][9].

최대 평균법을 사용한 경우의 비퍼지화에 대한 설명을 위해서 다음과 같은 2개의 퍼지 제어 규칙에 대하여 고려한다.

- If x_1 is A_{11} and x_2 is A_{12} then y is B_1 . (11)
- If x_1 is A_{21} and x_2 is A_{22} then y is B_2 .

여기서 x_1 과 x_2 는 퍼지 입력변수이고 y 는 퍼지 출력변수이다. 그리고 A_{11}, A_{12}, A_{21} 과 A_{22} 는 전건부의 소속함수이고 B_1 과 B_2 는 후건부의 소속함수이다.

표 3. 퍼지 테이블.
Table 3. Fuzzy table.

$S_{fi} \backslash S_{fi}$	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

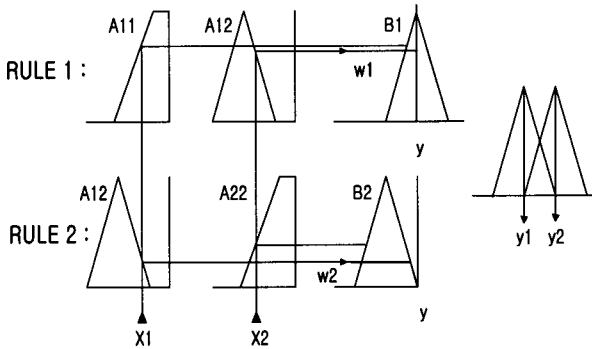


그림 4. 최대 평균법.
Fig. 4. Height method.

위의 두 가지 규칙에서 최대 평균법에 의한 추론 과정을 보면 그림 4와 같다. 그림 4에서 추론 과정은 3가지 부분으로 되어있다. 우선 전체 x_1, x_2 가 주어지고 각 규칙의 적합도 ω_i 를 계산하는 부분, 다음으로 규칙마다 추론 결과 B_i 를 구하는 부분, 세 번째는 이들의 결과를 종합하여 규칙 전체의 추론 결과 y^o 를 계산하는 부분이다. 적합도 ω_1 과 ω_2 를 구하기 위해서 각 퍼지 입력에 따른 적합도에서 작은 값을 적합도로 취하는 카티션 곱(cartesian product)을 사용하였으며, 최대 평균법에 의한 추론 결과인 y^o 의 계산은 다음과 같다.

$$\omega_1 = A11(x_1) \wedge A12(x_2) \tag{12}$$

$$\omega_2 = A21(x_1) \wedge A22(x_2)$$

$$y^o = \frac{\omega_1 y_1 + \omega_2 y_2}{\omega_1 + \omega_2} \tag{13}$$

III. 시뮬레이션 및 고찰

불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어기와 본 연구에서 제안한 퍼지-슬라이딩 모드 제어기의 제어 성능을 비교 평가하기 위하여 4축 스카라형 로봇의 2자유도에 대한 시뮬레이션을 수행함으로써 각 제어기의 궤적 제어에 대한 채터링 경감 효과를 비교한다. 스카라 로봇에 의한 위치 제어에서 1축과 2축의 경우가 외란으로 간주한 원심력, 코리올리력 등의 비선형 요소에 의한 영향이 가장 크므로 1축과 2축에 대한 위치 제어를 우선적으로 선정하여 수행하였다. 그러나 실제 시스템의 경우 3축과 4축이 1축과 2축의 동

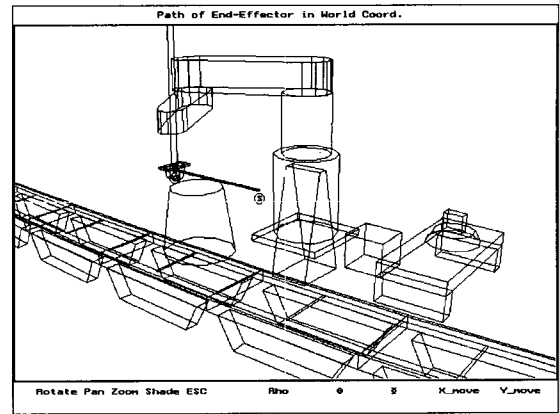


그림 5. 연속경로법에 의한 궤적 계획.
Fig. 5. Trajectory planning by continuous path method.

특성에 영향을 미치므로 시뮬레이션 시에는 이점을 고려하여 3축과 4축의 영향을 1축과 2축의 운동방정식에 반영하였다.

궤적 제어를 위하여 선행연구에서 구성한 OLP (off-line programming)에서 연속경로법에 의한 궤적 계획으로 궤적을 생성한다[15]. 여기서 사용된 궤적은 그림 1의 기준 좌표계에 대하여 출발점 (400 mm, 150 mm)에서 도착점 (400 mm, -150 mm)에 이르는 직선 궤적이다. 그림 5는 궤적을 수행한 이후의 OLP 화면이다.

또한 다관절 매니퓰레이터에 슬라이딩 모드 제어를 실현하기 위해 링크 1을 최우선순위로 하여 링크 2의 순서로 슬라이딩 모드가 발생하도록 계층제어법을 적용하였고 각 링크의 상태를 s_1, s_2 와 같이 정의하였다. 그리고 계층제어법에 따라서 오차 상태 공간에서 s_1 이 ϵ 이내로 수렴할 때까지 하위 계층인 링크 2는 비례 제어입력이 인가되도록 하였으며, s_1 이 ϵ 이내로 수렴하였을 때 링크 2의 슬라이딩 모드가 발생하도록 하였다.

먼저, 기존에 제안된 불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어기에 의한 궤적 제어 성능 평가를 하였다. 그림 2와 같이 제안한 가상의 불감대 영역 이내에서 그림 6과 같이 외란에

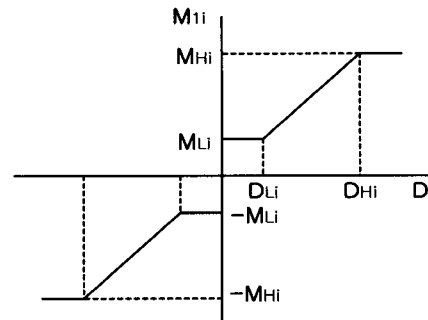


그림 6. 가상의 두 개의 불감대 내의 제어입력.
Fig. 6. Switching control input for compensating disturbances with two dead zones.

표 4. 궤적제어에 사용된 절환파라미터.

Table 4. Switching parameters for sliding mode control with two dead zones.

	Axis 1	Axis 2
c_i	5	5
α_i	-171 $s_{1e1} > 0$ -170 $s_{1e1} < 0$	-159 $s_{2e2} > 0$ -158 $s_{2e2} < 0$
M_{Hi}	-5 $s_1 > 0$ 5 $s_1 < 0$	-4 $s_2 > 0$ 4 $s_2 < 0$
M_{Li}	-1 $s_1 > 0$ 1 $s_1 < 0$	-0.8 $s_2 > 0$ 0.8 $s_2 < 0$
M_{zi}	-5 $s_1 > 0$ 5 $s_1 < 0$	-5 $s_2 > 0$ 5 $s_2 < 0$
D_{Hi}	0.5	0.5
D_{Li}	0.1	0.1
β_i	35 $s_1 \dot{\theta}_1 > 0$ 35.2 $s_1 \dot{\theta}_1 < 0$	32.4 $s_2 \dot{\theta}_2 > 0$ 32.6 $s_2 \dot{\theta}_2 < 0$
γ_i	0.2 $s_1 \ddot{\theta}_1 > 0$ 0.23 $s_1 \ddot{\theta}_1 < 0$	0.1 $s_2 \ddot{\theta}_2 > 0$ 0.2 $s_2 \ddot{\theta}_2 < 0$

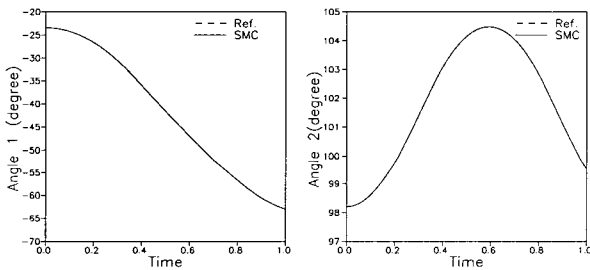


그림 7. 불감대를 둔 슬라이딩 모드에 의한 1축과 2축의 각도.

Fig. 7. Angle of axis 1 and 2 by sliding mode control with two dead zones.

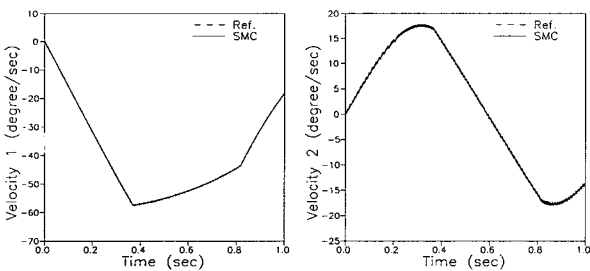


그림 8. 불감대를 둔 슬라이딩 모드에 의한 1축과 2축의 속도.

Fig. 8. Velocity of axis 1 and 2 by sliding mode control with two dead zones.

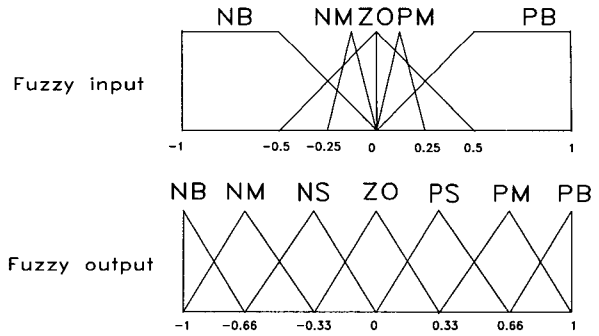


그림 9. 소속 함수.

Fig. 9. Membership function.

표 5. 규격화 정수.

Table 5. Scaling factor.

	K_1	K_2	K_3
Axis 1	0.4	0.2	7
Axis 2	0.2	0.2	5

대응하기 위한 제어입력 M_{Hi} 를 M_{Hi} 와 M_{Li} 사이에서 연속적으로 상태에 따라 가감할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션에 사용된 절환면의 기울기와 절환파라미터는 표 2의 절환 파라미터의 한계값 내에서 표 4와 같이 선정하였다.

표 4의 절환 파라미터를 이용하여 불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어를 사용한 경우의 시뮬레이션 결과를 구하면 1, 2축의 각도 선도 및 속도 선도는 각각 그림 7, 그림 8과 같이 구해진다. 그림 7에서 보는바와 같이 각도 오차는 거의 없으나, 그림 8의 축 2의 속도 선도에서 보면 채터링이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 채터링은 실제 산업용 로봇에 적용할 경우 모터의 떨림을 유발시킨다.

다음은 퍼지-슬라이딩 모드 제어를 사용한 궤적 제어에 대한 시뮬레이션을 수행하여 채터링 경감 여부를 평가한다. 외란에 대응하는 제어입력 ψ_{fuzzy} 를 선정하기 위해서 도출된 퍼지 규칙은 표 3과 같고, 퍼지입력변수에 대한 소속함수의 형태는 절환선 근방에서 퍼지 출력을 강화하기 위해 그림 9와 같이 정한다. 선정된 소속함수의 형태는 로봇 시스템에 대한 전문가의 지식과 경험 그리고 시행착오적인 방법을 통해서 결정되었으며, 시뮬레이션에서 사용된 규격화 정수는 표 5와 같다. 그리고 외란에 대응하는 제어입력 이외의 항은 표 4에서와 같은 기존의 절환파라미터를 이용하였다. 퍼지-슬라이딩 모드 제어기에 의한 궤적 제어 결과인 각 축의 각도 선도와 속도 선도는 그림 10, 그림 11과 같다.

궤적 제어에 대한 두 제어기의 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 그림 7과 그림 10의 각도 선도에서는 모두 궤적을 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 그러나 그림 11의 속도 선도에서 보면 채터링이 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 이는 기존의 슬라이딩 모드 제어보다 제안한 퍼지-슬라이딩 모드 제어의 경우가 채터링을 상당히 경감시키고 있음을 입증한다. 즉 상태값만을 고려한 불감대를 이용한

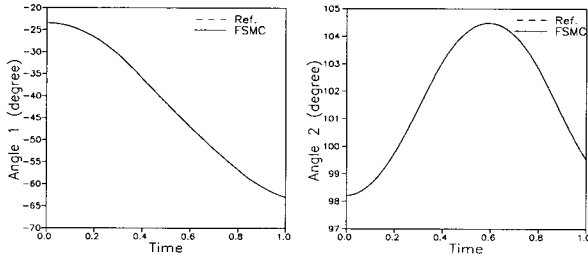


그림 10. 퍼지-슬라이딩 모드에 의한 1축과 2축의 각도.
Fig. 10. Angle of axis 1 and 2 by fuzzy-sliding mode control.

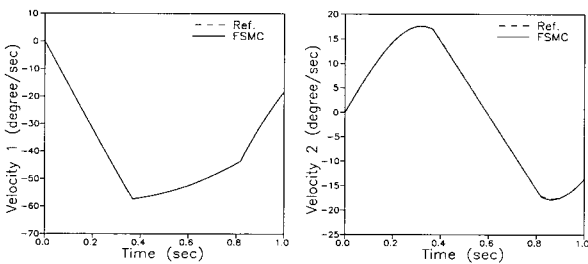


그림 11. 퍼지-슬라이딩 모드에 의한 1축과 2축의 속도.
Fig. 11. Velocity of axis 1 and 2 by fuzzy-sliding mode control.

경우보다 상태값의 변화율도 함께 고려하는 것이 채터링 경감에 유리하다는 것을 시뮬레이션에 의해 확인할 수 있다.

IV. 실험 및 고찰

1. 퍼지-슬라이딩 모드 제어의 채터링 경감 평가

시뮬레이션에 의해 평가된 두 제어알고리즘의 채터링 경감 평가에 대해서 퍼지-슬라이딩 모드 제어기의 우수성을 실험적인 검토를 통해서 검증하고자 한다. 제어 대상으로서는 삼성전자에서 제작한 스카라 타입의 로봇인 FARA SM2 로봇을 사용하며, 로봇 제어기는 DSP(Digital Signal Processor)를 이용하여 제어를 구성하고, 이를 이용해서 2축에 대한 실시간 퍼지-슬라이딩 모드 제어를 수행함으로써 불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어기와 그 제어 성능을 비교 평가한다. 그림 12는 본 실험에 사용된 시스템의 전체 구성도를 블록선도로 나타낸 것이고, 그림 13은 제어대상인 SM2 로봇의 외형이다.

제어 알고리즘의 적용에 앞서 슬라이딩 모드 존재조건을 만족하는 절환파라미터를 유도하여야 한다. 본 연구에서는 절환파라미터의 유도에 필요한 미지의 시스템파라미터의 추정을 위하여 신호 압축법과 보드 선도 비교법 그리고 상호상관계수를 이용하였다[16]. 이것을 이용하여 절환면의 기울기를 1, 2축 각각 $c_1 = 4, c_2 = 4$ 로 선정하고, 절환면의 기울기에 의해 유도된 절환파라미터의 한계값을 구하면 표 6과 같다. 신호압축법에 의한 시스템 규명과정에서는 3축과 4축이 부가된 상태에서 시스템 파라미터가 정해졌기 때문에 3축과 4축의 영향은 1축과 2축의 동특성 규명 시 함께 반영되었다.

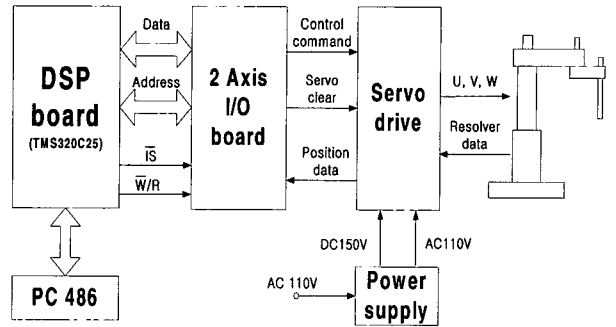


그림 12. 전체 제어 시스템.
Fig. 12. Block diagram of control system.

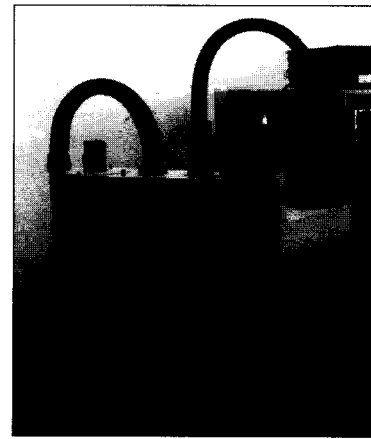


그림 13. SM2 로봇.
Fig. 13. SM2 robot.

표 6. 절환파라미터의 한계값.

Table 6. Limit values of switching parameters.

	Axis 1	Axis 2
c_i	$c_1 = 4 (c_1 < 6.215)$	$c_2 = 4 (c_2 < 12.762)$
α_i	$\alpha_{11} < -0.379, s_1 e_1 > 0$ $\alpha_{21} > -0.379, s_1 e_1 < 0$	$\alpha_{12} < -1.7, s_2 e_2 > 0$ $\alpha_{22} > -1.7, s_2 e_2 < 0$
β_i	$\beta_{11} < 0.266, s_1 \dot{\theta}_1 > 0$ $\beta_{21} > 0.266, s_1 \dot{\theta}_1 < 0$	$\beta_{12} < 0.652, s_2 \dot{\theta}_2 > 0$ $\beta_{22} > 0.652, s_2 \dot{\theta}_2 < 0$
γ_i	$\gamma_{11} < 0.0428, s_1 \ddot{\theta}_1 > 0$ $\gamma_{21} > 0.0428, s_1 \ddot{\theta}_1 < 0$	$\gamma_{12} < 0.485, s_2 \ddot{\theta}_2 > 0$ $\gamma_{22} > 0.485, s_2 \ddot{\theta}_2 < 0$

실험에서 사용된 샘플링시간은 1 msec로 하였고, 의사 슬라이딩 모드로의 수렴여부를 판별하기 위해서 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.5$ 를 설정하여 ϵ_i 이내로 수렴하기 전에는 의사 슬라이딩 모드가 발생하기 전인 것으로 간주하여 비례 제어에 의한 제어입력이 인가되도록 하였다.

궤적 제어 실험에 사용한 궤적은 앞장의 시뮬레이션에서 사용한 것과 같이 OLP의 연속경로법에 의해서 생성된 궤적을 사용하였다. 먼저 불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어

표 7. 궤적제어에 사용된 절환파라미터.

Table 7. Switching parameter for sliding mode control with two dead zones.

	Axis 1		Axis 2	
C_i	4		4	
α_i	-0.3867 $s_{1e1} > 0$ -0.3750 $s_{1e1} < 0$		-1.71 $s_{2e2} > 0$ -0.00 $s_{2e2} < 0$	
M_{Hi}	-0.5 $s_1 > 0$ 0.5 $s_1 < 0$		-0.5 $s_2 > 0$ 0.5 $s_2 < 0$	
M_{Li}	-0.1875 $s_1 > 0$ 0.1875 $s_1 < 0$		-0.1875 $s_2 > 0$ 0.1875 $s_2 < 0$	
M_{Zi}	-1.0 $s_1 > 0$ 1.0 $s_1 < 0$		-1.0 $s_2 > 0$ 1.0 $s_2 < 0$	
D_{Hi}	0.1		0.1	
D_{Li}	0.0375		0.0375	
β_i	-0.125 $s_1 \dot{\theta}_1 > 0$ 0.3125 $s_1 \dot{\theta}_1 < 0$		-0.1875 $s_2 \dot{\theta}_2 > 0$ 0.6250 $s_2 \dot{\theta}_2 < 0$	

에 대한 궤적 제어를 위해서 불감대 이내에서의 외란에 대응하는 제어입력을 그림 6과 같이 두었다. 여기서 사용된 절환파라미터 값은 표 6의 절환파라미터의 한계값 이내에서 표 7과 같이 선정하였다. 불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어에 의한 궤적 결과인 각 축에 대한 각도 및 속도 선도는 그림 14, 그림 15와 같다. 여기서 축 1의 각도 변위는 약 40도이고, 축 2의 각도 변위는 약 12도이다. 실험 결과를 보면 축 2의 각도 선도에서 목표 궤적에의 추종 오차가 최대 0.29도 정도 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 15의 속도 선도를 보면 채터링이 많이 발생함을 알 수 있다. 이러한 채터링은 실제 실험에서 보면 모터의 떨림을 유발시킨다.

퍼지-슬라이딩 모드에 의한 궤적 제어 실험에서는 그림 9의 소속 함수와 표 3의 퍼지 규칙을 사용한다. 이것을 최대 평균법에 의하여 비퍼지화하면 외란에 대응하는 제어입력을 표 8과 같이 구할 수 있다. 외란에 대응하는 제어입력 이외의 절환 파라미터 값은 표 6의 절환파라미터의 한계값 이내에서 선정되었으며 퍼지 입력력 변수의 퍼지화에 사용된 규칙화 정수는 표 9와 같다.

퍼지-슬라이딩 모드 제어에 의한 궤적 제어 결과인 각 축의 각도 선도와 속도 선도는 그림 16, 그림 17과 같다.

두 제어기에 의한 궤적 제어 실험을 비교하면 축 2의 각도 선도인 그림 14와 그림 16에서 보면 퍼지-슬라이딩 모드 제어의 경우 경로의 중간 부근에서 최대 오차가 0.1도 정도로 궤적 추종 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 또한 속도 선도인 그림 17에서는 슬라이딩 모드 제어만 적용한 경우의 속도선도(그림 15)와 비교할 때 채터링 경감 효과가 있음을 확인할 수 있다. 실제 구동 실험에서 보면 모터의 떨림이 크게 감소했음을 정성적으로 평가할 수 있었다. 따라서 실험을 통해서도 퍼지-슬라이딩 모드 제어가 궤적 추종성 및 채터링 경감에서 불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어보다 우수함이 입증되었다.

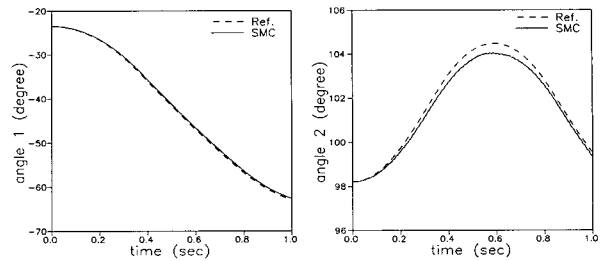


그림 14. 불감대를 둔 슬라이딩 모드에 의한 1축과 2축의 각도.

Fig. 14. Angle of axis 1 and 2 by sliding mode control with two dead zones.

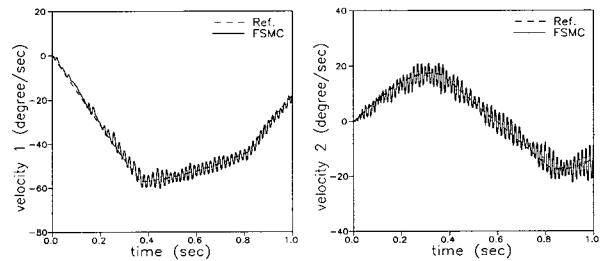


그림 15. 불감대를 둔 슬라이딩 모드에 의한 1축과 2축의 속도.

Fig. 15. Velocity of axis 1 and 2 by sliding mode control with two dead zones.

표 8. 퍼지 테이블.

Table 8. Fuzzy table.

$s_6 \backslash s_6$	P5	P4	P3	P2	P1	ZO	N1	N2	N3	N4	N5
P5	-1.000	-0.932	-0.864	-0.854	-0.849	-0.660	-0.440	-0.377	-0.264	-0.132	0.000
P4	-0.932	-0.760	-0.711	-0.697	-0.719	-0.528	-0.248	-0.165	-0.094	0.000	0.132
P3	-0.864	-0.711	-0.627	-0.612	-0.608	-0.396	-0.138	-0.051	0.000	0.094	0.264
P2	-0.854	-0.697	-0.612	-0.594	-0.527	-0.283	-0.039	0.000	0.051	0.165	0.377
P1	-0.849	-0.719	-0.608	-0.527	-0.457	-0.220	0.000	0.039	0.138	0.248	0.440
ZO	-0.660	-0.528	-0.396	-0.283	-0.220	0.000	0.220	0.283	0.396	0.528	0.660
N1	-0.440	-0.248	-0.138	-0.039	0.000	0.220	0.457	0.527	0.608	0.719	0.849
N2	-0.377	-0.165	-0.051	0.000	0.039	0.283	0.527	0.594	0.612	0.697	0.854
N3	-0.264	-0.094	0.000	0.051	0.138	0.396	0.608	0.612	0.627	0.711	0.864
N4	-0.132	0.000	0.094	0.165	0.248	0.528	0.719	0.697	0.711	0.760	0.932
N5	0.000	0.132	0.264	0.377	0.440	0.660	0.849	0.854	0.864	0.932	1.000

2. 퍼지-슬라이딩 모드 제어의 강인성 평가

실제 로봇은 작업 중에 물체를 운반하는 기능을 수행하므로 부하의 변동이 발생한다. 이러한 부하의 변동으로 나타나는 영향에 대한 제어 알고리즘의 강인성을 검토하기 위하여 그리퍼(gripper)가 부하질량 \bar{m} 를 집었을 때의 퍼지-슬라이딩 모드 제어기에 의한 궤적 제어 실험을 한다. 현재 구성한 시스템에서는 1축과 2축에 대한 제어기만 우선적으로 설계되었기 때문에 부하 변동 실험은 궤적의 시

표 9. 궤적제어에 사용된 절환파라미터.

Table 9. Switching parameter for fuzzy-sliding mode control.

	Axis 1	Axis 2
c_i	4	4
α_i	-0.3867 $s_1 e_1 > 0$ -0.1 $s_1 e_1 < 0$	-1.71 $s_2 e_2 > 0$ -0.1 $s_2 e_2 < 0$
β_i	-0.2 $s_1 \dot{\theta}_1 > 0$ 0.6 $s_1 \dot{\theta}_1 < 0$	-0.20 $s_2 \dot{\theta}_2 > 0$ 0.621 $s_2 \dot{\theta}_2 < 0$
Scaling factor	$K_1 = 40$ $K_2 = 30$ $K_3 = 0.2$	$K_1 = 45$ $K_2 = 35$ $K_3 = 0.15$

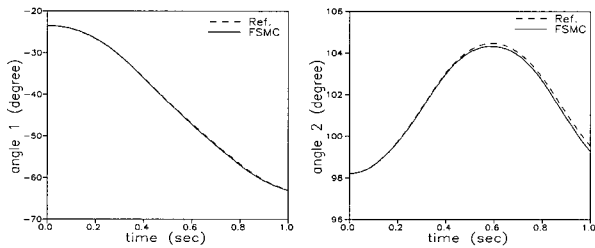


그림 16. 퍼지-슬라이딩 모드에 의한 1축과 2축의 각도.

Fig. 16. Angle of axis 1 and 2 by fuzzy-sliding mode control.

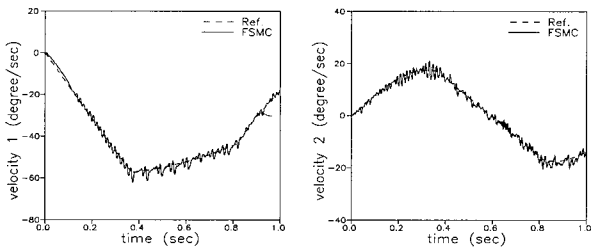


그림 17. 퍼지-슬라이딩 모드에 의한 1축과 2축의 속도.

Fig. 17. Velocity of axis 1 and 2 by fuzzy-sliding mode control.

작 위치부터 스카라 로봇의 4축 그리퍼 부분에 부하질량을 추가한 상태에서 실험을 수행하였다. 여기서 제어입력은 부하질량이 없는 경우에 유도된 절환파라미터 값과 외란에 대응하는 퍼지 출력값을 인가한다. 이러한 제어입력에 대해서 질량을 부가하였을 경우와 부가하지 않았을 경우의 제어 결과를 비교함으로써 부하 변동에 대한 퍼지-슬라이딩 모드 제어 알고리즘의 강인성을 조사한다.

강인성 평가를 위해서 그림 18과 같은 부하질량을 로봇의 4축 그리퍼 부분에 부착하였다. 실험은 앞서 행한 퍼지-슬라이딩 모드 제어에 대한 궤적 제어 실험과 동일한 조건에서 초기 출발 위치에서 부하질량을 부착하여 실험을

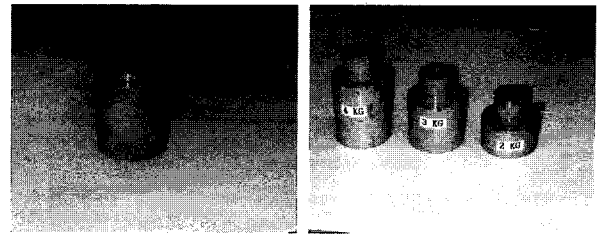


그림 18. 부하질량.

Fig. 18. Payload.

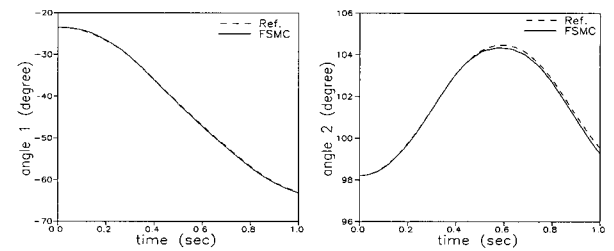


그림 19. 퍼지-슬라이딩 모드에 의한 1축과 2축의 각도 (4 kg 부하질량).

Fig. 19. Angle of axis 1 and 2 by fuzzy-sliding mode control with 4 kg payload.

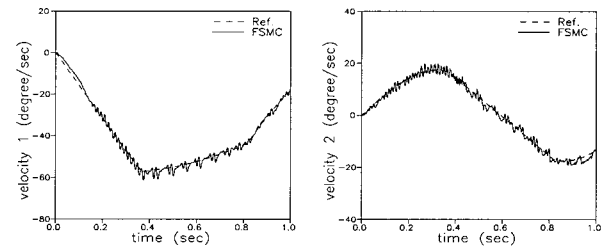


그림 20. 퍼지-슬라이딩 모드에 의한 1축과 2축의 속도 (4 kg 부하질량).

Fig. 20. Velocity of axis 1 and 2 by fuzzy-sliding mode control with 4 kg payload.

수행하였다. 부하질량을 가진 경우의 궤적 제어 실험 결과인 각 축의 각도 선도와 속도 선도는 그림 19, 그림 20과 같다.

4 kg의 부하질량에서의 궤적 실험 결과를 보면 부하질량이 없는 경우의 실험 결과(그림 16, 그림 17)와 비교해서 제어 성능과 채터링 경감 효과 측면에서 크게 차이가 없음을 알 수 있다. 즉 4 kg 정도의 부하 변동에 대해서 제안한 퍼지-슬라이딩 모드 제어가 충분한 강인성을 가지고 있음이 판명되었다.

V. 결론

본 연구에서는 기존의 슬라이딩 모드 제어에서 문제가 되는 채터링을 경감시키기 위한 방안으로 퍼지 이론을 도입한 퍼지-슬라이딩 모드 제어를 제안하였다. 제안된 퍼지-슬라이딩 모드 제어기의 채터링 경감 효과를 비교하기

위하여 스카라 로봇의 2자유도에 대한 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 수행한 결과 불감대를 둔 슬라이딩 모드 제어기에 비교해서 퍼지-슬라이딩 모드 제어기에 의한 채터링 경감 효과가 우수함이 확인되었다. 또한 부하 변동 등의 외란에 대한 퍼지-슬라이딩 모드 제어기의 강인성을 평가하기 위하여 4 kg의 부하질량을 스카라 로봇의 그리퍼 부분에 부착하였다. 4 kg의 부하질량을 부착한 궤적 실험 결과를 통해서 부하변동에 대한 퍼지-슬라이딩 모드 제어기의 강인성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] K. K. D. Young, "Controller design for manipulator using theory of variable structure systems," *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, vol. 8, no. 2, pp. 101-109, 1978.
- [2] Hashimoto, H., et al., "A microprocessor-based robot manipulator control with sliding mode," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 134, no. 1, pp. 11-18, 1987.
- [3] M. C. Lee, and N. Aoshima, "Real time multi-input sliding mode control of a robot manipulator based on DSP," *Proc. of SICE '93*, pp. 1223-1228, 1993.
- [4] 이민철, 靑島伸治, "슬라이딩 모드를 이용한 로봇 매니퓰레이터의 실시간 제어에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 16권, 11호, pp. 2011-2020, 1992.
- [5] 이민철, 진상영, 이만형, "슬라이딩 모드를 이용한 SCARA 로봇의 궤적제어에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 19권, 1호, pp. 99-110, 1995.
- [6] 이민철, 신기태, "슬라이딩모드제어를 이용한 SCARA 로봇의 동적시뮬레이터 개발에 관한 연구," 대한기계학회 논문집(A), 21권, 4호, pp. 535-548, 1997.
- [7] M. C. Lee, K. Son, and J. M. Lee, "Improving tracking performance of industrial scara robots using a new sliding mode control algorithm," *KSME International Journal*, vol. 12, no. 5 pp. 761-772, 1998.
- [8] J. Mohammad, U. Nader, J. R. Timothy, *Fuzzy Logic and Control*, Prentice-Hall, 1993.
- [9] Y. F. Li, and C. C. Lau, "Development of fuzzy algorithms for servo systems", *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 65-72, 1989.
- [10] Chan-Teng Cin and C. S. George Lee, *Neural Fuzzy System*, Prentice-Hall, 1996.
- [11] J. M. Robot, "Fuzzy logic technology and applications," *IEEE Technical Activities Board*, 1994.
- [12] 김정식, 최승복, "퍼지-슬라이딩 모드를 이용한 로봇의 강건추적제어," 대한기계학회 '94년도 춘계학술대회 논문집(I), pp. 758-761, 1994.
- [13] 오민환, 박진배, "로봇 매니퓰레이터를 위한 퍼지 슬라이딩 모드 제어기 설계," '94 한국자동제어학술대회 논문집, pp. 1376-1381, 1994.
- [14] Min C. Lee and S. J. Go, "Real time fuzzy-sliding mode control for SCARA robot based on DSP," *Proc. of 2nd Asian Control Conf.*, vol. II, pp. 599-602, 1997.
- [15] K. Son, M. C. Lee, J. M. Lee, S. H. Han, M. H. Lee, and S. K. Kim, "Real-time evaluation of an off-line programming system for scara robot," *Proc. of 2nd Asian Control Conf.*, vol. I, pp. 89-92, 1997.
- [16] M. C. Lee and N. Aoshima, "Identification and its evaluation of the system with a nonlinear element by signal compression method," *Trans. of SICE*, vol. 25, no. 7, pp. 729-736, 1989.



고 석 조

1969년 2월 20일생. 1994년 부산대학교 기계공학과 졸업. 부산대학교 기계공학과 대학원 석사(1996). 1995-1997 대우전자(인천) 디지털 미디어 사업부 연구원. 1997-1999 부산대학교 대학원 지능기계공학과 박사 수료. 1999-현재 부산대학교 기계기술연구소 전임연구원. 주관심분야는 지능제어, 비선형제어, 로봇 제어, 시스템 규명.



이 민 철

1960년 8월 6일생. 1983년 부산대학교 기계공학과 졸업. 쯔쿠바 대학교 대학원 석사(1988), 동대학 박사(1991). 1991년~현재 부산대학교 기계공학부 부교수. 주 관심분야는 시스템 규명, 로봇제어, 메카트로닉스, DSP를 이용한 디지털 제어기 구현.