

〈論 文〉

# 슬라이딩모드를 이용한 SCARA 로봇의 궤적제어에 관한 연구

이민철\* · 진상영\*\* · 이만형\*\*\*

(1994년 5월 4일 접수)

## A Study on the Trajectory Control of a SCARA Robot Using Sliding Mode

Min Cheol Lee, Sang Young Jin and Man Hyung Lee

**Key Words :** Variable Structure Control(가변구조 제어), Sliding Mode Control(슬라이딩모드 제어), SCARA Robot(스카라 로봇), Switching Line(절 환선), Dead Band Width(불감대 폭)

### Abstract

An industrial robot needs a simple and robust control algorithm obtaining high precision control performance in spite of disturbance and parameter's change. In this paper, for solving this problem, a new sliding mode control algorithm is proposed and applied to the trajectory control of a SCARA type robot. The proposed algorithm has diminished the chattering occurring in sliding mode by setting a dead band along the switching line on the phase plane. It shows that we can easily obtain a simple switching control input satisfying sliding mode in spite of regarding nonlinear terms of a manipulator and servo system as disturbance. A guideline for selection of dead-band width is determined by optimal value of cost function presenting magnitudes of chattering and error. By this algorithm, we can expect the high performance of the trajectory tracking of an industrial robot which needs a robust and simple algorithm.

### 1. 서 론

로봇 매니플레이터의 운동방정식은 비선형이며, 마찰력의 영향 및 작업중의 부하변동과 같은 외란이 존재하므로 설정된 목표궤적을 정확히 추종 제어하기란 일반적으로 용이하지 않다.<sup>(1~6)</sup> 최근 마이크로프로세서의 발달로 매니플레이터의 제어에 있어서 비선형성분을 보상하여 제어성능을 향상시키거나, 파라미터 변동 및 외란 등에 대해 강인한 제어를 실현시키기 위해 마이크로프로세서 및 고속 연산이 가능한 DSP를 이용하여 제어기를 구성한

연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(7~9)</sup> 비선형 성분을 보상하는 경우에는 매니플레이터의 자유도가 높아짐에 따라 비선형성분의 보상을 위한 계산이 복잡해지며, 보상되어진다 하더라도 파라미터의 불확실성, 부하변동 등에 의해 고속 고정도의 실시간제어를 실현하기는 어렵다. 이에 Lee, Aoshima<sup>(6,9)</sup> 등은 DSP를 이용하여 매니플레이터의 관절제어기를 구성하고, 슬라이딩모드 제어를 적용시킴으로써 비선형성, 파라미터 변동, 잡음 등이 존재하는 경우에도 강인한 제어시스템을 실현하고자 하였다. 이때 매니플레이터의 동특성에서 나타나는 비선형성분을 외란으로 간주함으로써 매니플레이터의 자유도가 높은 경우에도 슬라이딩모드 제어의 적용을 용이하게 할수 있는 방법을 제안하였다.<sup>(6,9)</sup> 그러나 이 경우에 슬라이딩모드 제어의 적용시 불연속 제

\*정회원, 부산대학교 기계공학과, 정밀정형 및 금형가공연구센터

\*\*정회원, 삼성전관 생산기술센터

\*\*\*정회원, 부산대학교 제어기체공학과, 정밀정형 및 금형가공연구센터

어입력에 기인하여 발생하는 채터링 경감에 대한 정성적인 분석은 고려하였으나, 정량적인 분석은 미흡하였다.

본 연구에서는 스카라형 로봇 매니플레이터에 대하여 그 동특성에서 나타나는 비선형성분을 외란으로 간주한 슬라이딩모드 제어를 적용하여, 파라미터 변화 및 외란에 강인하면서도 적용하기 쉬운 알고리즘을 제안하고자 한다. 또한 절환면 주변에 발생하는 채터링을 경감시키는 방안으로 절환면 주변에 절환면과 평행한 불감대를 설정하여 과도한 불연속 제어입력으로 기인한 채터링을 경감시키고자 하였다. 이 때 불연속 제어입력에 기인하여 절환면 주변에 발생하는 채터링과 정상상태 오차를 보다 정량적으로 분석하기 위하여 불감대 설정폭에 따른 채터링의 정도를 살펴볼 수 있는 평가함수를 제안한다.

## 2. SCARA형 로봇 매니플레이터의 슬라이딩모드 제어

### 2.1 비선형 성분을 외란으로 간주한 운동방정식

Fig. 1과 같은 2관절 스카라형 로봇 매니플레이터의 운동방정식을 Lagrange-Euler법으로 기술하면 식(1)과 같다.<sup>(10,11)</sup>

$$\begin{aligned} D_{11}\ddot{\theta}_1 + D_{12}\ddot{\theta}_2 + h_{122}\dot{\theta}_2^2 + (h_{112} + h_{121})\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 &= \tau_1 \\ D_{22}\ddot{\theta}_2 + D_{12}\ddot{\theta}_1 + h_{211}\dot{\theta}_1^2 &= \tau_2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} D_{11} &= m_1l_1^2 + I_1 + m_2(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2\cos\theta_2) + I_2 \\ D_{12} &= m_2l_1l_2\cos\theta_2 + m_2l_2^2 + I_2 = D_{21} \end{aligned}$$

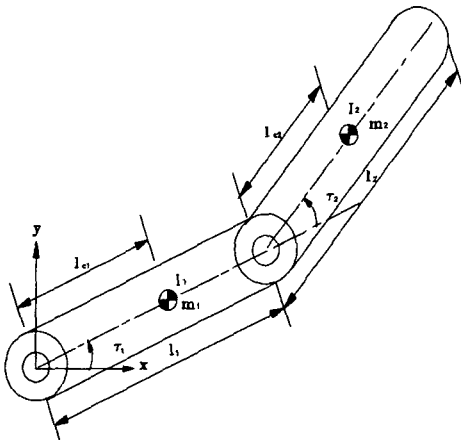


Fig. 1 2 degree of freedom planar manipulator

$$\begin{aligned} D_{22} &= m_2l_2^2 + I_2 \\ h_{122} &= -m_2l_1l_2\sin\theta_2 = -h_{211} \\ h_{112} + h_{121} &= -2m_2l_1l_2\sin\theta_2 \end{aligned}$$

이와 같이 비선형 미분방정식으로 표현되는 로봇 매니플레이터의 동특성으로부터 슬라이딩모드를 발생시키기 위한 절환 제어입력의 절환파라미터를 유도하는 것은 용이하지 않다. 그러나 제어대상이 슬라이딩모드에 일단 들어가면 파라미터의 변동, 비선형성, 외란 등에 강인하다는 것에 착안하면 비선형 성분을 외란으로 간주하여 보다 간편하게 절환 파라미터를 유도할 수 있다.<sup>(8,9)</sup> 이를 위하여 우선  $n$ 관절 매니플레이터의 비선형 운동방정식을 간단히 표기하면 식(2)와 같다.

$$D(\theta)\ddot{\theta} + c(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) = T \quad (2)$$

식(2)로부터 각관절축을 회전축으로서 회전할 때 발생하는 선형성분의 관성모멘트를  $D_L$ , 그 외의 비선형성분을  $D_{NL}(\theta)$ 로 두면 식(3)과 같이 표현된다.

$$(D_L + D(\theta)_{NL})\ddot{\theta} + c(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) = T \quad (3)$$

한편, 각(各)관절 서보계의 운동방정식은 식(4)와 같다.

$$J_M\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + T = ku \quad (4)$$

여기서,  $J_M, B, u$ 는 각각 각관절 구동모터의 회전자 관성모멘트, 점성감쇠계수, 제어입력을 나타낸다.

제  $i$ 번째 관절에 대해 식(4)에서의 관성모멘트 행렬중 비선형으로 나타나는 비(非)대각요소, 원심력과 코리올리력 등의 비선형요소를 전부 외란으로 간주하여 변수  $F_i$ 로 두면 매니플레이터와 서보계를 합한 전체 운동방정식은 식(3)과 식(4)로부터 식(5)와 같은 비교적 간단한 운동방정식으로 기술될 수 있다.

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + F = ku \quad (5)$$

여기서,  $J$ 는 식(3)에서의 질량 관성모멘트의 대각선요소와 식(4)에서의 각관절 구동모터의 회전자 질량 관성모멘트를 합한 선형성분의 질량관성요소를 나타내는  $n \times n$  행렬이다.  $F$ 는 외란으로 간주한 변수  $F_i$ 로 구성된  $n$ 차원 벡터이다.

### 2.2 채터링을 고려한 절환 제어입력

식(5)와 같이 간단화된 운동방정식을 이용하여

계가 슬라이딩모드 상에 존재하도록 하는 절환과라미터를 유도하기 위해 우선 매니플레이터의 제  $i$  번째 관절의 목표각도, 각(角)속도, 각(角)가속도를 각각  $\theta_{di}$ ,  $\dot{\theta}_{di}$ ,  $\ddot{\theta}_{di}$ 로 두고,  $i$  번째 관절의 측정된 회전각도를  $\theta_i$ 로 두면 그 추종오차와 오차의 속도 및 가속도는 식(6)과 같다.

$$e_i = \theta_i - \theta_{di}, \dot{e}_i = \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{di}, \ddot{e}_i = \ddot{\theta}_i - \ddot{\theta}_{di} \quad (6)$$

오차 상태공간상에서 슬라이딩모드가 발생하는 절환조건을 구하기 위하여 절환면을 나타내는 변수  $s_i$ 를 식(6)에서 정의한 오차와 오차의 속도를 이용하여 정의하면 식(7)과 같다.

$$s_i = c_i e_i + \dot{e}_i \quad (7)$$

여기서,  $c_i$ 는 각(各)관절의 절환면의 기울기를 나타낸다. 한편, 오차 상태벡적이 절환선( $s_i=0$ ) 상에서 슬라이딩모드가 발생할 수 있도록 하기 위해서는 식(8)과 같은 슬라이딩모드 존재조건을 만족해야만 한다.<sup>(4,5)</sup>

$$s_i \dot{s}_i < 0 \quad (8)$$

즉, 오차 상태공간에서 정의된 변수  $s_i$ 가 양의 값을 가질 경우 그 변화율은 음의 값을 가지게 하고,  $s_i$ 가 음의 값을 가지는 경우에는 그 변화율은 양의 값을 가질 수 있도록 제어입력을 인가 하면 오차 상태벡적이 항상 절환면 상에 존재하게 되어 하므로 슬라이딩모드에 들어가게 된다. 이러한 슬라이딩모드를 발생하게 하는 제어입력은 오차 상태벡적이 절환면을 향해 수렴할 수 있도록  $s_i$ 의 부호에 따라 절환되어야 하므로, 식(9)와 같이 정의된다.

$$u_i = \begin{cases} u_i^+ & \text{if } s_i > 0 \\ u_i^- & \text{if } s_i < 0 \end{cases} \quad (9)$$

슬라이딩모드의 존재조건을 만족하는 제어입력을 유도하기 위하여 식(8)에 매니플레이터와 서보계를 함께 고려한 운동방정식(5)를 대입하면 식(10)과 같은 관계가 얻어진다.

$$\begin{aligned} s_i \dot{s}_i &= s_i (c_i \dot{e}_i + \ddot{e}_i) \\ &= s_i (c_i (s_i - c_i e_i) \\ &\quad + \frac{1}{J_i} (k_i u_i - B_i (\dot{e}_i + \dot{\theta}_{di}) - F_i) - \ddot{\theta}_{di}) \\ &= s_i^2 (c_i - \frac{B_i}{J_i}) + s_i (- (c_i - \frac{B_i}{J_i}) c_i e_i + \frac{k_i u_i}{J_i} \\ &\quad - \frac{B_i}{J_i} \dot{\theta}_{di} - \frac{F_i}{J_i} - \ddot{\theta}_{di}) < 0 \end{aligned} \quad (10)$$

슬라이딩모드의 존재조건인 식(10)을 만족하기 위해서는  $c_i < B_i/J_i$ 일 때

$$\begin{aligned} \frac{k_i u_i^+}{J_i} &< (c_i - \frac{B_i}{J_i}) c_i e_i + \frac{F_i}{J_i} + \frac{B_i}{J_i} \dot{\theta}_{di} + \ddot{\theta}_{di} \\ \text{if } s_i > 0 \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} \frac{k_i u_i^-}{J_i} &> (c_i - \frac{B_i}{J_i}) c_i e_i + \frac{F_i}{J_i} + \frac{B_i}{J_i} \dot{\theta}_{di} + \ddot{\theta}_{di} \\ \text{if } s_i < 0 \end{aligned} \quad (11b)$$

로 주면 된다. 이 때 식(10)은 항상 음의 값이 되어 슬라이딩모드가 존재하게 된다. 슬라이딩모드의 존재조건을 만족시키는 불연속 제어입력을 제어대상인 계에 인가하면 슬라이딩모드로 계를 강제적으로 구속시킬 수 있어 외란이나 파라미터의 변동에도 강인한 제어특성을 얻을 수 있다. 그러나 슬라이딩모드가 발생하기 전까지 제어계는 불확실한 파라미터에 대하여 매우 민감하고, 초평면에 도달하기까지의 추적시간이 요구된다. 따라서 이를 개선하는 방안으로 종래에는 불연속 제어기의 제어입력 중 외란에 대응하여 인가하게 되는 제어입력을 큰 제어계인으로 사용하였다. 그러나, 불연속 제어입력은 절환면의 양측에서 부호를 달리하므로 급격한 제어입력의 변화를 초래한다. 그리고 산업용 로봇의 제어에 적용시킬 경우 불연속 제어입력은 채터링을 유발하고, 매니플레이터의 자유도가 높아짐에 따라 연산시간 지연에 의해 그 크기가 가중되어 고정도를 요구하는 매니플레이터에 악영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 식(11)을 만족시키는 제어입력을 식(12)와 같이 제안하므로 채터링을 줄이고자 한다.

$$u_i = \psi_{ai} e_i + \psi_{fi} + \psi_{\theta_i} \dot{\theta}_{di} + \psi_{\gamma_i} \ddot{\theta}_{di} \quad (12)$$

단,

$$\psi_{ai} = \begin{cases} \alpha_i & \text{if } s_i e_i > 0 \\ -\alpha_i & \text{if } s_i e_i < 0 \end{cases}$$

$$\psi_{\theta_i} = \begin{cases} \beta_i & \text{if } s_i \dot{e}_i > 0 \\ -\beta_i & \text{if } s_i \dot{e}_i < 0 \end{cases}$$

$$\psi_{\gamma_i} = \begin{cases} \gamma_i & \text{if } s_i \ddot{e}_i > 0 \\ -\gamma_i & \text{if } s_i \ddot{e}_i < 0 \end{cases}$$

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

$$M_{1i} = \begin{cases} M_{1Si} & \text{if } s_i e_i < 0 \\ M_{1Li} & \text{if } s_i e_i > 0 \end{cases}$$

여기서,  $\psi_{\theta_i}$ 와  $\psi_{\gamma_i}$ 는 제도제어를 수행할 때  $\dot{\theta}_{di}$ ,  $\ddot{\theta}_{di}$ 에 의한 영향으로 슬라이딩모드의 존재조건으로부터

터 벗어나는 것을 방지하는 입력이며,  $\psi_{ri}$ 는 외란  $F_i$ 에 대응하기 위해 부가하는 입력이다. 이 때 외란으로 가정한 비선형성분의 크기는 오차가 수렴되어짐에 따라 줄어든다는데 착안하여  $\psi_{ri}$ 의  $M_{2i}$ 의 값이 오차의 절대값에 비례하도록 주므로 채터링의 영향을 줄일 수 있도록 하였다. 또한 오차 상태공간상의 절환면 주변에서 발생하는 상태변수의 급격한 가감속에 의해 발생하는 채터링을 줄이기 위해  $e_i$ 가 양인 경우  $s_i < 0$ 의 영역에서는  $u_{ri}$ 의 절대값을 크게 주고,  $s_i > 0$ 의 영역에서는  $u_{ri}$ 의 절대값을 작게 주므로 급격한 속도변화를 줄여주어 채터링을 경감시키고자 하였다.<sup>(9)</sup> 다입력계의 슬라이딩모드 제어를 실현하기 위하여 식(12)에서 제시한 제어입력을 계층제어법에 의해 부가한다. 이 때 우선순위의 계층이 슬라이딩모드에 들어가기까지는 하위순위로 가정한 계층이 우선순위의 운동에 의한 간섭을 극복할 수 있도록 비례제어입력을 인가하는 하이브리드제어(hybrid control) 방식을 이용하였다. 즉, 우선순위의 계층이  $|s_i| < \epsilon$ 을 만족하면 슬라이딩모드에 들어간 경우로 간주하여 순차적으로 최하위계층까지 의사 슬라이딩모드에 들어가게 하는 것이다.<sup>(8,9)</sup>

한편, 슬라이딩모드에 들어가기 위한 절환 파라미터의 경계값을 구하기 위해 식(10)에 식(12)를 대입하면 식(13)의 관계가 얻어진다.

$$\begin{aligned} s_i \dot{s}_i &= s_i (c \dot{e}_i + \dot{e}_i) \\ &= s_i^2 (c_i - \frac{B_i}{J_i}) + s_i e_i (\frac{B_i}{J_i} c_i + \frac{k_i}{J_i} \psi_{ai} + c_i^2) \\ &\quad + (\frac{k_i}{J_i} \psi_{ri} - \frac{F_i}{J_i}) s_i + (\frac{k_i}{J_i} \psi_{\beta i} - \frac{B_i}{J_i}) s_i \dot{\theta}_{di} \\ &\quad + (\frac{k_i}{J_i} \psi_{\gamma i} - 1) s_i \ddot{\theta}_{di} < 0 \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)을 만족하기 위해서는

$$c_i - \frac{B_i}{J_i} < 0 \quad (14a)$$

$$\begin{cases} k_i \alpha_i + B_i c_i + J_i c_i^2 < 0 & \text{if } s_i e_i > 0 \\ -k_i \alpha_i + B_i c_i + J_i c_i^2 > 0 & \text{if } s_i e_i < 0 \end{cases} \quad (14b)$$

$$\begin{cases} u_{ri} = M_{1i} + M_{2i} \times |e_i| < F_i / k_i & \text{if } s_i > 0 \\ u_{ri} = -M_{1i} - M_{2i} \times |e_i| < F_i / k_i & \text{if } s_i < 0 \end{cases} \quad (14c)$$

$$\begin{cases} k_i \beta_i - B_i < 0 & \text{if } s_i \dot{\theta}_{di} > 0 \\ -k_i \beta_i - B_i > 0 & \text{if } s_i \dot{\theta}_{di} < 0 \end{cases} \quad (14d)$$

$$\begin{cases} k_i \gamma_i - J_i < 0 & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} > 0 \\ -k_i \gamma_i - J_i > 0 & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} < 0 \end{cases} \quad (14e)$$

로 주면된다. 식(14)에 의하면 매니플레이터의 자

유도와는 관계없이 각링크의 절환 파라미터가  $J_i$ ,  $B_i$ ,  $K_i$ ,  $F_i$ 의 절대값의 최대값을 알면 용이하게 구해짐을 알 수 있다.

이상에서 구한 절환조건을 만족하는 값으로 초평면의 기울기값  $c_1$ ,  $c_2$ 를 선정하여, 절환면 주변에서 채터링을 줄일 수 있도록 제적의 가감속을 고려한 제어입력 식(14)를 인가하는 경우 수렴한 이후 발생하는 채터링이 어느 정도 경감되어짐이 확인되어지고 있다.<sup>(8,9)</sup>

### 2.3 절환면에 따른 불감대 설정에 의한 채터링의 경감

오차 상태공간상의 절환면 주변에서 상태변수값이 의사 슬라이딩모드가 발생하는 영역이내에 들어왔을 경우에는 제어입력의 부호변화와 함께 과도한 계인의 변화에 의한 채터링이 식(12)와 같이 제안한 알고리즘만으로는 어느 정도 이상 경감되어지지 않음이 확인되었다. 여기서는 슬라이딩모드 영역이내에서 발생하는 채터링을 더욱 경감시키기 위해 계가 슬라이딩모드 영역이내에 들어오면 외란에 대응하기 위한 제어입력의 계인을 낮은 계인으로 절환해 주는 방안을 제안한다. 즉 절환면에 평행한 가상의 불감대를 설정함으로써 가정된 불감대 영역이내에서는 외란에 대응되는 제어계인을 낮은 계인으로 바꾸어 주므로 절환면에서 발생하는 급격한 입력변화에 따른 채터링을 경감시키고자 한다.

Fig. 2는 매니플레이터의 각관절에 대한 오차상태공간을 표현한 것으로  $o-o'$ 는  $s=0$ 인 절환면을 나타내고, 계층제어법의 적용시 우선순위 계층의

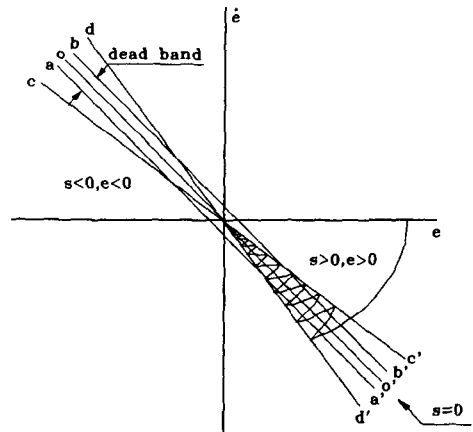


Fig. 2 Phase plane with a dead band around a switching line

수렴정도를 판정하기 위한  $s=|\epsilon|$ 는 보조선  $c-c'$ ,  $d-d'$ 로 나타내며, 절환면 주변에서 궤적의 채터링을 경감시키는 방안으로 고려하였던 불감대를 보조선  $a-a'$ ,  $b-b'$ 로 나타낸다. 여기서 상태 변수가 이미 설정한 불감대 이내로 수렴하였는지의 여부는 상태변수와 절환면 사이의 거리를 나타내기 위하여 점과 직선과의 거리공식을 이용한 식(15)와 같이 정의되는 변수  $D_m$ 을 구한 후, 이 값을 미리 설정된 불감대 폭과 비교함으로써 판정하도록 하였다.

$$D_m = \frac{|c_i e_i + \dot{e}_i|}{\sqrt{c_i^2 + 1}} \quad (15)$$

불감대 폭의 크기 및 불감대 이내에서  $M_i$ 의 수정된 제어제인  $M_d$ 의 크기에 따른 절환면 주변에서의 채터링의 경감효과와 정상상태 오차에의 영향을 관찰하기 위해 식(16), 식(17)과 같은 평가함수를 제안한다.

$$P_1 = \frac{1}{N_1} \sum_{m=1}^{N_1} D_m^2 - \left( \frac{1}{N_1} \sum_{m=1}^{N_1} D_m \right)^2 \quad (16)$$

$$P_2 = \frac{1}{N_2} \sum_{n=1}^{N_2} e_n^2 \quad (17)$$

식(16)은 오차 상태공간상의 절환면 주변에 발생하는 채터링의 크기를 나타내는 함수로서, 절환면으로부터 상태변수의 거리에 대한 분산을 의미한다. 여기서,  $D_m$ 은 상태변수가 절환면과 교차한 이후로부터 측정된 상태변수와 절환면 사이의 거리를 나타내고,  $N_1$ 은 교차한 이후로부터 제어 종료시간까지 획득한 변수  $D_m$ 의 총 데이터수를 나타낸다. 식(17)은 제어결과인 각관절의 회전각도가 목표값의 2% 이내로 수렴한 이후의 정상상태오차인  $e_n$ 의 크기에 대한 제곱 평균값을 나타내는 함수이다. 여기서  $N_2$ 는 각관절의 각(角)변위가 정상상태 이내로 수렴한 이후로부터 제어종료 시간까지 획득한 변수  $e_n$ 의 총 데이터수를 의미한다. 단, 식(17)에서 정의된 평가함수  $P_2$ 의 크기는 각관절의 각(角)변위가 목표값의 2%이내로 수렴한 이후로부터 제어종료 시간까지의 오차의 제곱의 평균값을 나타내므로 각관절에 대한 각(角)변위의 실제오차를 나타내는 것은 아니다.

### 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

#### 3.1 절환 파라미터의 선정

제어대상인 스카라 로봇 매니플레이터의 사양

은 Table 1과 같다. 매니플레이터의 동특성 중 비선형성분을 외란으로 간주하게 되면, 제어 대하여 슬라이딩모드의 존재조건을 만족시키는 절환 파라미터는 식(14)에 의해 보다 간편하게 구할 수 있다. 식(14a)에 의해 슬라이딩모드의 존재조건을 만족시키는 각관절의 절환면의 기울기의 범위를 구하면 식(18)과 같다.

$$\begin{aligned} 0 < c_1 < 21.6 \\ 0 < c_2 < 13.2 \end{aligned} \quad (18)$$

식(18)을 만족하는 절환면의 기울기를 임의로 선정하게 되면 식(12)에서의 절환 파라미터  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$  및 외란  $F_i$ 에 대응하기 위해 고려한  $\psi_{fi}$  등의 범위도 식(14a)~(14b)에서 구해진다. Table 2는 식(18)을 만족하는 절환면의 기울기  $c_1$ ,  $c_2$ 를 각각 5.0으로 두었을 때 절환파라미터들의 상한값을 나

Table 1 Specification of SCARA robot

	Link1 (i=1)	Link2 (i=2)	Units	
Mass of link	$m_i$	10	7	kg
Length of link	$l_i$	0.25	0.18	m
Moment of inertia	$D_{ii}$	0.208	0.076	kg m <sup>2</sup>
Natural frequency	$\omega_{ni}$	4.3 $\pi$	6 $\pi$	rad/sec
Damping coefficient	$\zeta_i$	0.8	0.35	No
Viscous friction coefficient	$B_i$	8.83	2.77	N·sec/m
Torque constant	$k_i$	5	2	kg·m/A
Mass of rotor	$M_{ii}$	0.5	0.3	kg
Radius of rotor	$R_i$	0.02	0.01	m
Total moment of inertia	$J_i$	0.208	0.076	kg m <sup>2</sup>

Table 2 Limit value of switching parameter for sliding mode control

	Link1(i=1)	Link2(i=2)
$c_{i\max}$	21.6	13.19
$\alpha_{i\max}$	-7.243	-1.776
$\beta_{i\max}$	1.766	0.554
$\gamma_{i\max}$	0.082	0.042

타낸다. 한편, 외란  $F_i$ 에 대응하기 위한  $\psi_i$ 의 값은 외란의 최대값이 주어지면 구해질 수 있다.

3.2 계층제어법의 적용

다관절 매니퓰레이터의 다입력 슬라이딩모드 제어를 위해 계층제어법을 적용시킨다. 이를 위해 Fig. 1에서의 관절 1을 우선순위계층  $s_1$ 으로, 관절 2를 하위순위계층  $s_2$ 로 정의하였다. 시뮬레이션에서 사용한 절환 제어입력은 Table 3과 같다. 오차 상태공간상에서 관절 1에는 식(12)에 의한 절환제어입력이 주어지고 하위계층인 관절 2에는  $s_1$ 이 의사 슬라이딩모드가 발생하는 값 이내로 수렴할 때까지는 비례제어입력이 인가되어지다가  $s_1$ 이 의사 슬라이딩모드에 들어가는 순간 절환제어입력으로 바뀌어 인가된다. 따라서  $s_1$ 이 의사 슬라이딩 모드에 들어가는 즉시 하위순위  $s_2$ 도 슬라이딩모드에 들어가 제어대상인 계 전체가 슬라이딩모드에 들어가는 상태로 되어 외란에 둔감해지면서도 제어대상 전체가 안정하게 수렴되어진다.

3.3 불감대 설정에 의한 채터링 경감효과

절환면 주변에 불감대를 설정하여 불감대 이내로 계가 수렴하게 되면, 외란으로 간주한 비선형성분에 대응하기 위해 고려된 제어입력  $M_{i1}$  대신 수정된 제어제인  $M_a$ 를 적용함으로써 채터링경감효과를 가져오도록 하였다. 채터링 경감효과를 확인하기 위하여 4위의 Runge-Kutta 수치적분법을 이용한 동적 시뮬레이션을 통하여 검토하였고, 불감대 폭과  $M_a$ 의 크기에 따른 채터링 경감효과에 대한 결과를 정량적으로 분석하므로 불감대 폭의 선택 기준을 제시하고자 한다.

이를 위해 식(16)에서 제시한 평가함수를 이용하여 채터링의 크기를 비교하였다. 여기서 고려된 불감대는 오차 위상평면상에서 절환면과 평행하고,

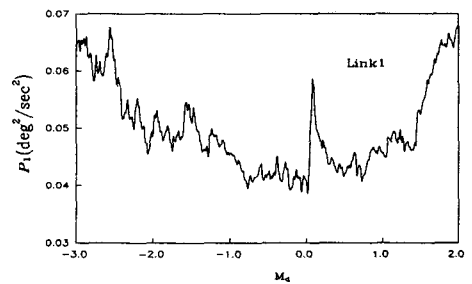
Table 3 Switching control input terms for simulation of sliding mode control

	Link1 (i=1)	Link2 (i=2)
$\psi_{a1}$	-9.5	-6.0
$M_{1L1}$	-3.5	-1.5
$M_{1S1}$	-2.5	-0.6
$M_{21}$	-0.2	-0.2

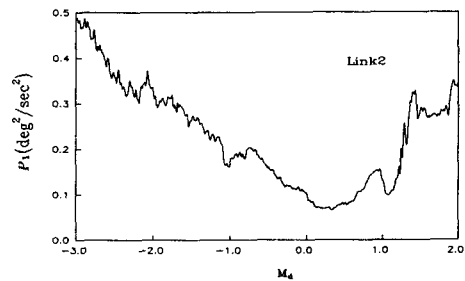
그 폭이 0.01(rad/sec)의 크기를 가지도록 하였으며, 절환주파수는 1kHz로 하였다.

불감대를 고려하지 않은 경우, 관절 1, 2에 대해 절환선의 기울기  $c_1, c_2$ 가 각각 5.0으로 주어질 때 평가함수  $P_1$ 은 관절별로 각각 0.080, 0.410의 값을 가진다. 이에 비해 불감대를 고려하고, 불감대 이내에서 적용되는 수정된 제어제인  $M_a$ 에 따른 각관절에 대한 평가함수  $P_1$ 을 구하면 Fig. 3(a), (b)와 같이 구해진다. 이 때  $M_a$ 의 값이 0 부근에서  $P_1$ 의 값이 0.041, 0.105로 각각 최소값을 가짐을 알 수 있고, 불감대를 설정한 경우가 불감대를 설정하지 않은 경우와 비교하여 관절별로 약 50%와 75% 정도의 채터링의 크기가 경감되어짐을 알 수 있다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 절환면에 평행하고, 폭 0.01(rad/sec)인 불감대를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 관절별 오차위상 평면을 비교한 것으로 불감대를 설정하므로써 과도한 불연속 제어입력으로 기인한 채터링이 경감되어짐을 관찰할 수 있다.

이상의 시뮬레이션 결과를 통해 외란에 대응하기 위해 고려된 제어입력  $M_{i1}$ 를 제어대상의 상태변수



(a)



(b)

Fig. 3(a) The cost function  $P_1$  of joint 1 as modified control gain  $M_a$   
 (b) The cost function  $P_1$  of joint 2 as modified control gain  $M_a$

가 설정한 불감대 영역이내로 들어오면 수정된 제어기인  $M_d$ 로 전환하는 제안한 방법에 의해 채터링 경감효과를 가져올 수 있음이 정량적으로 입증되었다. 이 때  $M_d$ 의 값은 Fig.3에서  $M_d$ 의 값에 따른 평가함수  $P_1$ 의 크기가 최소가 될 때의 값을 선정하

면 된다. 단, 수직 다관절형 로봇의 중력성분과 같이 수렴한 이후에도 외란으로 작용하는 성분이 남는 경우에는 선정된  $M_d$ 의 값이 중력항을 충분히 보상하지 못하므로 채터링은 줄어들으나 정상상태 오차가 발생할 수 있다. 이 경우는 시스템이 허용오

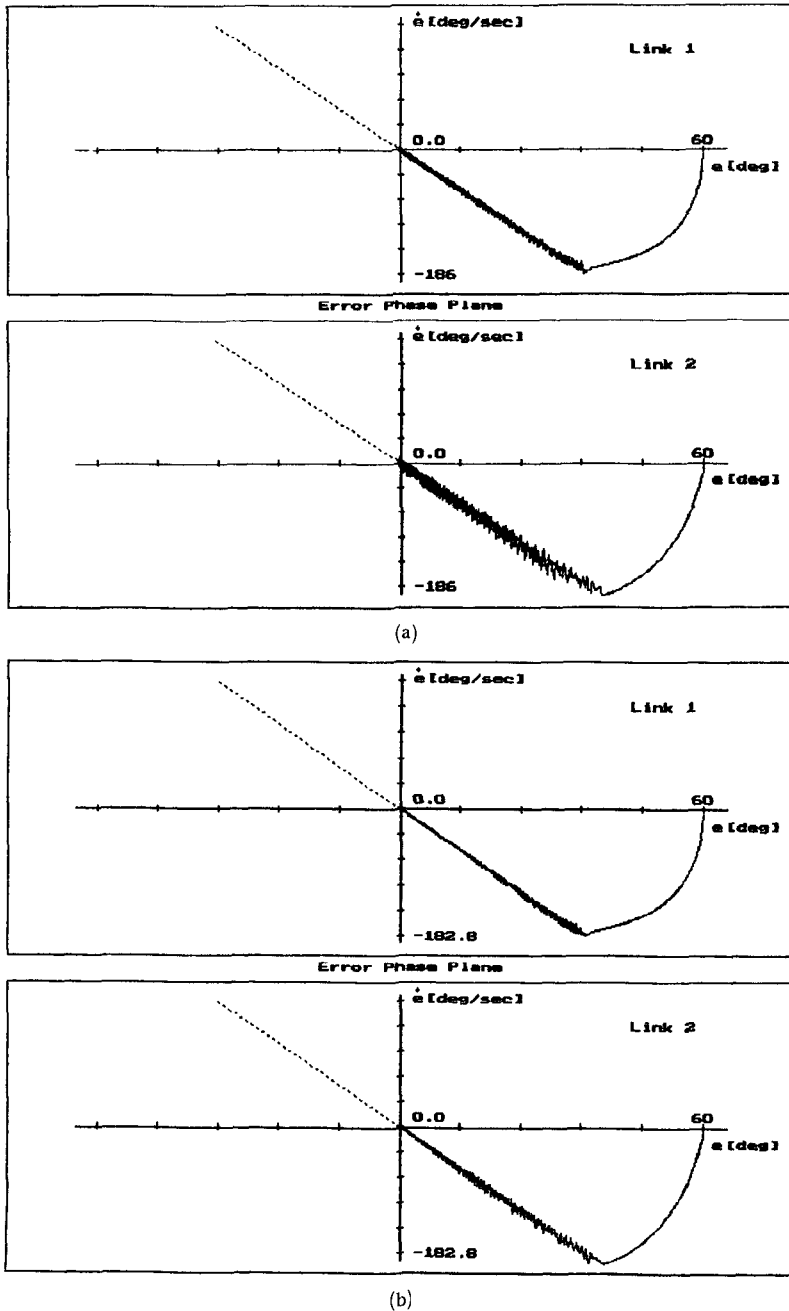


Fig. 4(a) Error state space for each link without dead band

(b) Error state space for each link without dead band where,  $DBW=0.01$ (rad/sec),  $M_d=0$

차를 만족시키는  $M_d$ 의 값을 시행착오적으로 구해야 한다.

3.4 불감대 폭에 따른 제어성능

채터링을 줄이기 위해 불감대를 설정하여 그 범위 이내에서 인가하는 제어제인  $M_d$ 를 너무 작게 주거나, 불감대 폭(DBW)을 너무 크게 주면 외란에 대응하는 제어입력을 인가하지 못하게 되는 경우가 있으며, 이로써 정상상태오차를 발생할 수 있다. 여기서는 채터링 경감효과를 최대로 가져오면서 정상상태오차를 줄일 수 있는 최적의 불감대 폭을 설정하는 방안에 대해 고찰하고자 한다. 이를 위해 3.3절과 동일한 조건하에서 불감대 내에서의 수정된 제어제인  $M_d$ 를 0으로 두고, 불감대의 폭을 초기 0에서 일정간격으로 변화시키면서 각각의 경우에 대해 절환면 주변에 발생하는 채터링의 크기에 관계하는 식(16)에서 정의된 평가함수  $P_1$ 과 목표치에 2% 이내로 수렴한 이후 정상상태오차의 크기를 나타내는 식(17)에서 정의된 평가함수  $P_2$ 를 구하였다. 관절 1, 관절 2에 대하여 불감대 폭에 따른 평가함수  $P_1$  및  $P_2$ 의 크기를 각각 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에 나타낸다. 우선  $P_1$ 에 대하여 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)를 살펴보면, 관절 1의 경우 불감대의 폭이 증가함에 따라 그 값이 점차적으로 감소하다 약 0.025(rad/sec)의 값 부근에서 0.023의 최소의  $P_1$ 값을 가진 후 다시 계속 증가하는 것을 알 수 있다. 관절 2의 경우에도 불감대의 폭이 증가함에 따라  $P_1$ 의 값은 점차적으로 감소하다 약 0.01(rad/sec)의 값 부근에서 0.124인 최소의  $P_1$ 값을 가진 후 그 값이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 불감대 폭이 어느 정도 증가할 때까지는 채터링의 경감을 위하여 고려한 수정된 제어제인  $M_d$ 가 적용될 확률이 커져 채터링의 경감효과가 증대되다가 불감대 폭이 그 이상으로 증가하게 되면 수정된 제어제인  $M_d$ 로는 비선형 요소로 간주된 외란에 대응할 수 없게 되어 슬라이딩 모드에 들어가지 못하므로 오히려 채터링의 크기가 가중된 것과 같은 현상으로 나타나는 것으로 볼 수 있으며, 이를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 한편, 정상상태오차의 크기를 평가하는 함수  $P_2$ 에 대하여 살펴보면 관절 1, 2에 있어 불감대의 폭이 각각  $3 \times 10^{-3}$ (rad/sec),  $4 \times 10^{-3}$ (rad/sec)에 도달할 때까지 평가함수  $P_2$ 의 값이 점차적으로 증가하다 그 이상에서는 값이 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이는 불

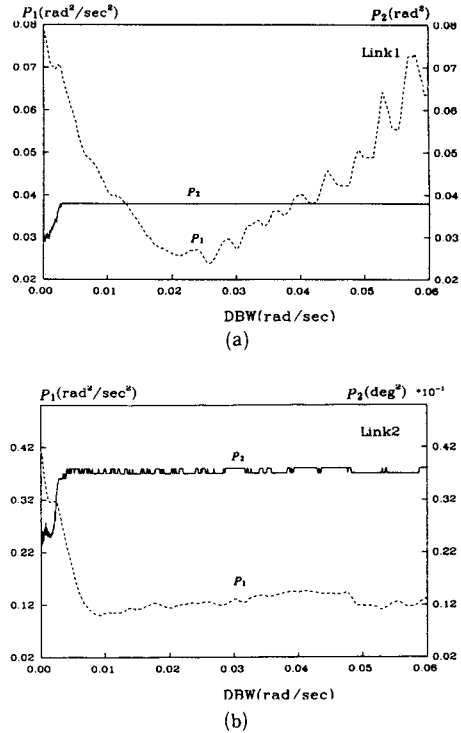


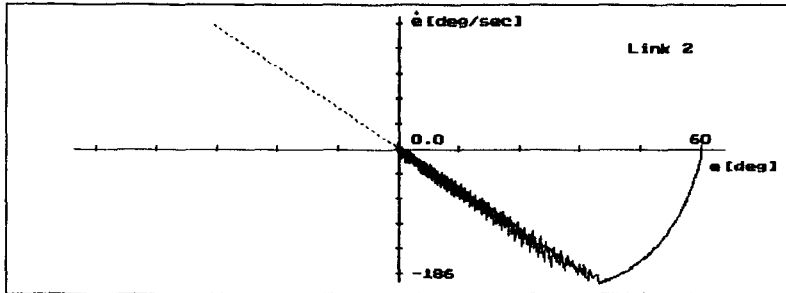
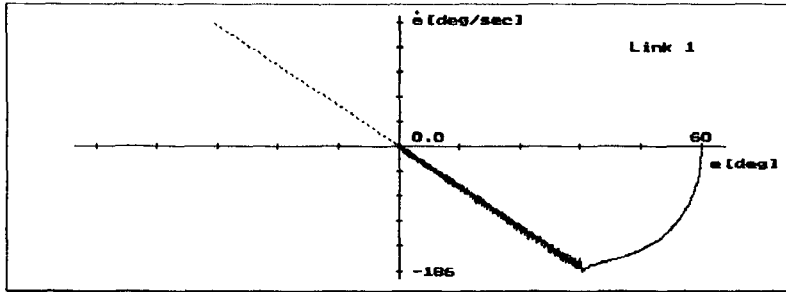
Fig. 5(a) The cost function  $P_1, P_2$  of joint 1 as DBW  
 (b) The cost function  $P_1, P_2$  of joint 2 as DBW

감대 폭이 증가할수록 수정된 제어제인  $M_d$ 가 적용될 확률이 커져서 수렴된 지점 부근에서 발생하는 외란에는 오히려 대처할 수 없게 되어 정상상태오차가 증가하게 되기 때문인 것으로 판단되어진다. 따라서 불감대의 폭은  $P_1$ 이 최소가 되는 부근의 값 이하에서 설정해 주는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

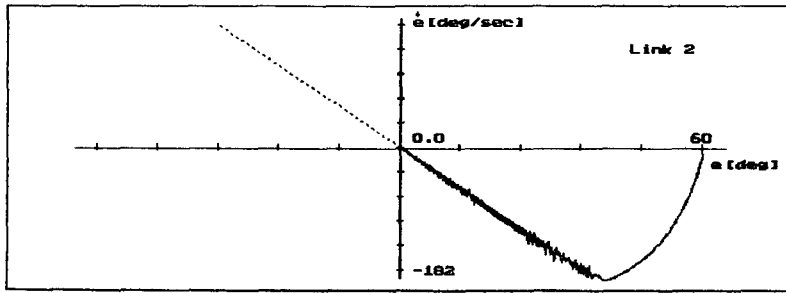
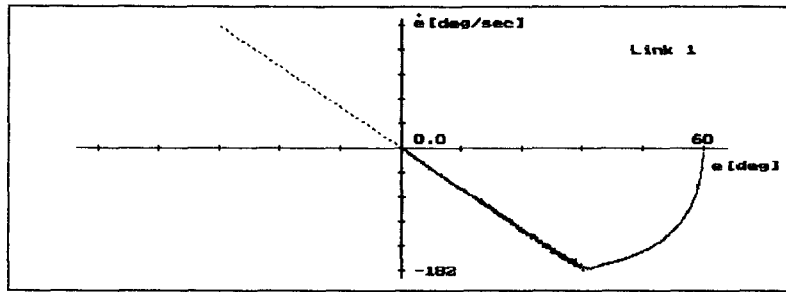
Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 각각 관절 1, 2에 대하여 불감대를 설정하지 않은 경우와 절환면에 나란하게 크기  $2 \times 0.025$ 의 불감대를 설정한 경우의 오차상태공간을 표현한 것이다. 육안으로도 관찰할 수 있듯이 불감대가 설정된 Fig. 6(b)의 경우 이를 고려하지 않은 Fig. 6(a)에 비해 채터링이 크게 줄었음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)상에 나타난 평가함수  $P_1$ 을 통해서도 크기  $2 \times 0.025$ (rad/sec)의 불감대가 설정된 경우 관절 1, 2의 값이 0.023, 0.124로서 불감대가 설정되지 않은 경우의 값 0.080, 0.425에 비해 각각 약 71%와 70%의 채터링이 경감되어짐을 알 수 있다.

이상의 시뮬레이션 결과를 통해 적절한 불감대를





(a)



(b)

Fig. 6(a) Error state space for each link without dead band  
 (b) Error state space for each link with dead band where,  $DBW=2 \times 0.025$ ,  $M_d=0$

설정하여 그 영역이내에 들어오면 제어계인  $M_1$ 를 수정된 제어계인  $M_d$ 로 바꾸어 주므로 채터링을 경감시킬 수 있음이 판명되었으며, 불감대의 설정폭을 정량적으로 선택할 수 있는 방안에 대한 자료를 제시하였다. 이상에서 나타난 평가함수  $P_1$ 과  $P_2$ 의

성질을 비교해 볼 때 불감대 폭의 증가에 따라 서로 상반된 결과를 나타내므로 최적의 불감대의 폭을 선정하기 위해서는 계의 허용오차와 채터링의 경감효과가 동시에 고려되어야 할 것으로 사료된다.

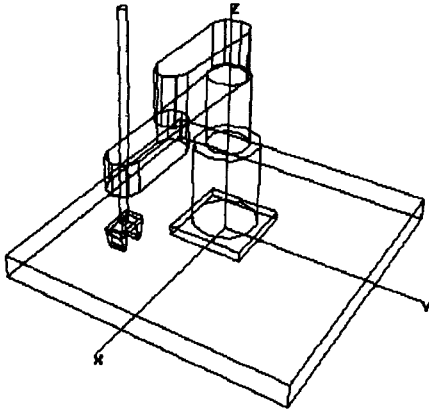


Fig. 7 Establishment of reference coordinate systems for a SCARA robot

3.5 궤적계획된 기준궤적의 추종

본 연구에서 고려하고 있는 SCARA 로봇 매니플레이터의 전체적인 형상과 몸체에 부착된 기준 좌표계 (base coordinates)를 Fig. 7에 나타낸다. 여기서는 앞서 제시한 슬라이딩모드 제어를 SCARA

Table 4 Via points on the reference coordinates

x (mm)	y (mm)	time(sec)
200	100	0
300	0	1
200	-100	2

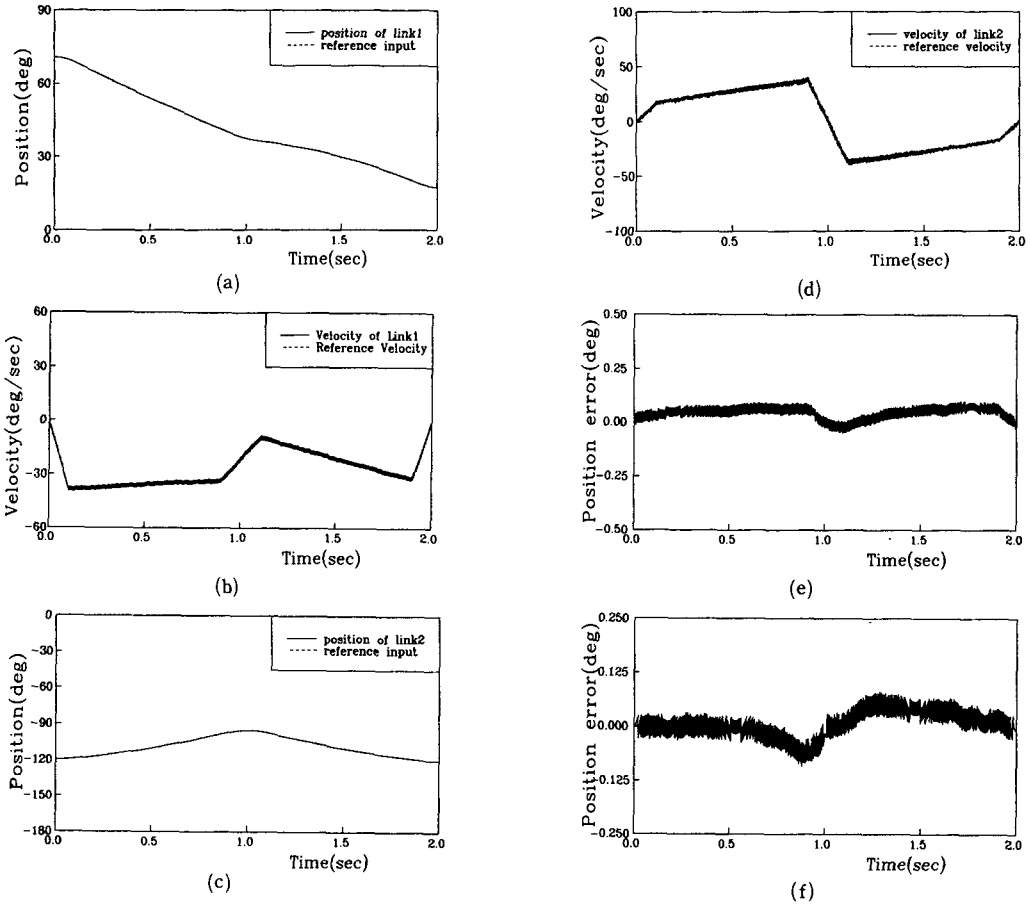


Fig. 8(a) Result of reference position trajectory tracking of joint 1  
 (b) Result of reference velocity trajectory tracking of joint 1  
 (c) Result of reference position trajectory tracking of joint 2  
 (d) Result of reference velocity trajectory tracking of joint 2  
 (e) Position error of joint 1  
 (f) Position error of joint 2

로봇에 적용하였을 때, 제적계획된 기준제적에 대한 추종성능을 검증하고자 한다. 이를 위해 우선 Fig. 7에 표시된 기준좌표계상에서 로봇 매니플레이터의 단말효과기(end-effector)가 경유해야 할 목표지점을 매니플레이터의 작업범위 이내에서 Table 4와 같이 임의의 3지점을 선정하고, 일반적으로 잘 알려진 CP(continuous path)방법 중 직선에 포물선을 혼합한 spline 함수를 사용하여 제적계획을 수행하였다.<sup>(10,11)</sup> 구한 단말효과기의 기준제적으로부터 역기구학을 이용해서 각관절별 목표값을 유도하였다. 앞서 제시한 슬라이딩모드 제어를 수행하기 위하여 절환주파수(switching frequency)를 1kHz로 하였다. 이 때 관절 1의 위치 및 속도 제적의 추종선도는 각각 Fig. 8(a), Fig. 8(b)와 같고, 관절 2의 위치 및 속도제적의 추종선도는 각각 Fig. 8(c), Fig. 8(d)와 같다. 또한 Fig. 8(e)와 Fig. 8(f)는 위치제적의 추종오차를 나타낸다. Fig. 8(e), Fig. 8(f)를 보면 관절 1, 2가 모두 최고 0.1도(deg) 오차범위 이내로 목표치에 수렴하고 있음을 알 수 있다.

이상의 시물레이션 결과에 따르면 강인성을 지니면서도 적용이 용이한 제안한 알고리즘에 의해 제적제어가 가능함이 판명되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고정도의 정확도와 외란에 강인한 제어성능을 필요로 하는 산업용 스카라형 로봇 매니플레이터의 위치 및 속도 제어기의 설계를 위하여 파라미터 변동이나 외란 등에 강인한 슬라이딩모드 제어이론을 이용하여 SCARA형 로봇에 적용시켰다. 이때 슬라이딩모드 제어의 강인성을 지니면서도 알고리즘의 적용을 용이하게 하기 위해 비선형 성분을 외란으로 간주하는 슬라이딩모드 제어기법을 제안하였다. 제안한 알고리즘에 의해서 절환 파라미터를 보다 간편하게 유도할 수 있음을 보였고, 동적 시물레이션을 통해 제안한 알고리즘의 타당성을 입증하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 비선형 성분을 외란으로 간주한 슬라이딩 모드 제어에 있어 문제가 되어 왔던 절환면 주변에서의 불연속 제어입력에 기인하여 발생하는 채터링은 절환면 주변에 절환면과 평행한 불감대를 설정하고 이 이내에서는 외란에 대응하도록 설계된 제어제어

를 수정하여 과도한 제어입력의 변화에 대처하도록 함으로써 어느 정도 경감시킬 수 있음을 확인하였다.

(2) 불감대 이내에서의 채터링의 크기와 일정범위 이내로 계가 수렴한 이후의 정상상태 오차를 고려한 평가함수를 고려함으로써 채터링 경감효과에 관한 보다 정량적인 해석을 가능하게 하였으며, 채터링 경감효과와 정상상태 오차를 고려한 최적의 불감대 폭의 크기를 선정할 수 있는 방안이 제시되었다.

#### 참고문헌

- (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) Slotine, J. J. and Sastry, S. S., 1983, "Tracking Control of Non-linear Systems Using Sliding Surface with Application to Robot Manipulators," *International Journal of Control*, Vol. 38, pp. 465~492.
- (3) Utkin, V. I. 1977, "Variable Structure Systems with Sliding Modes," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 22, No. 2, pp. 212~222.
- (4) Harashima, F., Hashimoto, H. and Maruyama, K., 1986, "Sliding Mode Control of Manipulator with Time-Varying Switching Surfaces," *Trans. of SICE*, Vol. 22, No. 3, pp. 335~342.
- (5) 原島文雄, 橋本秀紀, 1985, "Sliding Modeとその應用-I," *시스템と制御*, Vol. 29, No. 2, pp. 94~103.
- (6) 原島文雄, 橋本秀紀, 1985, "Sliding Modeとその應用-II," *시스템と制御*, Vol. 29, No. 4, pp. 242~250.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 이민철, 靑島伸治, 1992, "슬라이딩모드를 이

- 용한 로봇트 매니플레이터의 실시간제어에 관한 연구,” 大韓機械學會論文集, 第16卷, 第11號, pp. 2011~2020.
- (10) Asada, H., Slotine, J. J. E., 1985, *Robot Analysis and Control*, A Wiley-Interscience Publication.
- (11) Fu, K. S., Gonzalez, R. C. and Lee, C. S. G., 1987, *Robotics : Control, Sensing, Vision and Intelligence*, McGraw-Hill.