

# 슬라이딩 모드를 이용한 SCARA 로봇의 궤적제어에 관한 연구

진상영, 이민철\*, 이만형\*\*  
부산대학교, \*기계공학과, \*\*제어기계공학과

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

Sang Young Jin, Min Cheol Lee\*, Man Hyoung Lee\*\*  
Pusan National University  
\* Dept. of Mechanical Engineering,  
\*\* Dept. of Control & Mechanical Engineering

### Abstract

In this paper, we suggest a new algorithm diminishing the chattering in sliding mode control by setting a dead-band along the switching line on the phase plane although nonlinear terms of an nonlinear system are regarded as disturbances and apply this algorithm to the trajectory control of SCARA robot. By this algorithm, we can expect the high performance of the trajectory tracking of an industrial robot which needs a robust and simple algorithm.

### I. 서 론

생산공정의 자동화에 이용되는 로봇트 매니플레이터의 동특성을 나타내는 운동방정식은 자유도가 증가함에 따라 그 모델식을 구하기가 어렵다. 또한 모델식이 구해진 다하더라도 작업환경의 변화나 부하변동과 같은 외란의 영향에 대처하면서 위치제어를 고속으로 수행하기란 일반적으로 어렵다. VSC(Variable Structure Control)이론을 근간으로 하는 슬라이딩 모드 제어는 비선형성, 파라미터 변동, 잡음 등에 대하여 강인한 제어 시스템을 실현할 수 있는 제어이론으로써 최근 마이크로프로세서의 발달과 더불어 실제 로봇트 매니플레이터에 적용되어 다각도에서 연구가 진행되고 있다<sup>(1)(2)(4)(6)</sup>. 잘 알려진 바와 같이 VSC이론은 흡입매니폴드(attractive manifold)개념을 기초로 하여 불연속 제어입력으로 시스템의 제어구조를 변화시킨다. 그리고 오차상태공간 내에 미리 정의된 초평면(hyper surface) 상에서 슬라이딩 모드가 형성되며, 슬라이딩 모드에 들어간 제어대상은 초평면에 구속되므로 파라미터 변동이나 외란에 대하여 강인한 시스템을 구현할 수 있다<sup>(3)</sup>. 하지만 슬라이딩 모드가 발생하기 전까지 제어시스템은 불확실한 파라미터에 대하여 매우 민감하고, 초평면에 도달하기까지의 추적시간이 요구되므로 이에 대처하는 방안으로 종래에는 불연속 제어기의 제어입력으로 큰 제어게인을 사용하였다<sup>(3)(4)</sup>. 그러나 산업용 로봇트의 제어에 슬라이딩 모드 제어를 적용시킬 경우 불

연속 제어입력에 기인한 채터링이 발생하고, 매니플레이터의 자유도가 높아짐에 따라 연산시간지연에 의해 그 크기가 가중되므로 고정도를 요구하는 매니플레이터에 악영향을 미친다. 그리고 복잡한 비선형 동특성으로 부터 슬라이딩 모드의 존재조건을 만족시키는 전환파라미터를 구하는 것 역시 용이하지 않다. 이에 Lee와 Aoshima는 매니플레이터의 동특성에서 나타나는 비선형성분을 외란으로 간주하여 다관절 매니플레이터에 대하여 슬라이딩 모드의 적용을 비교적 용이하게 할 수 있음을 제시하였고, 고속연산처리가 가능한 DSP에 의한 제어시스템을 구성하여 높은 전환주파수를 공급함으로써 연산지연에 의한 채터링을 경감시킬 수 있음을 보였다<sup>(5)(6)</sup>. 또한, 제어 결과인 상태변수가 허용오차 범위 이내에 들어오면, 불감대를 가정하여 외란에 대응하기 위한 제어입력의 게인을 작게 전환함으로써 채터링을 경감시키도록 했다. 그러나, 이경우 설정한 불감대 폭에 따른 채터링의 경감 및 정상상태오차의 관계에 대한 정량적인 분석이 미흡했다.

본연구에서는 조립작업 등에서 널리 사용되고 있는 SCARA형 로봇트의 관절1, 2를 제어대상으로 하여, 비선형성분을 외란으로 간주한 슬라이딩 모드 제어기법을 궤적제어에 적용할 때 수반되는 불감대의 폭에 따른 채터링의 경감 및 정상상태오차의 정량적인 관계를 제시한다. 또한 채터링의 경감을 위해 전환면에 따른 불감대 영역을 설정해서 그 설정값에 따른 채터링 경감을 검토한다. 매니플레이터의 동특성중 비선형성분인 관성력, 원심력 및 코리올리력 등을 외란으로 간주함으로써 전환파라미터를 비교적 간단히 구할 수 있음을 확인하였다. 또한 다입력 슬라이딩 모드의 설계법인 계층제어법을 적용하여 실시간 동시제어를 가능하게 하였다. 또한 초평면 주변에서의 과도한 불연속 제어입력에 기인한 채터링은 초평면 주변에 불감대를 설정하므로 감소되어짐을 보인다. 즉, 위상면체적상에서의 상태변수가 설정한 불감대 이내로 수렴하는 경우 과도한 제어입력이 인가되지 않도록 하므로 채터링을 경감시킬 수 있음을 보인다.

## II. 슬라이딩 모드 제어기 설계

### 1. 시스템의 모델링

본 연구의 제어대상인 SCARA 로봇은 Fig. 1과 같이 2자유도 평면 매니플레이터로서 표현될 수 있으며 Lagrange's 운동방정식을 이용하면 다음 식(1)과 같은 폐형운동방정식으로 기술된다<sup>(7)</sup>.

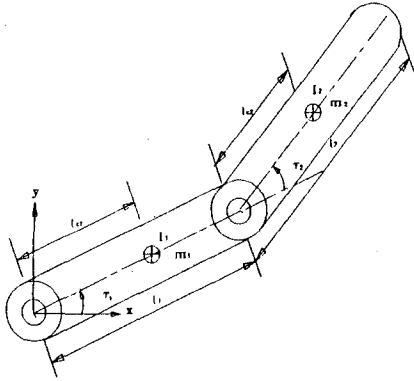


Fig. 1 Mass properties of 2 d.o.f planar manipulator

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

여기서,

$$\begin{aligned} H_{11} &= m_1 l_{c1}^2 + I_1 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos \theta_2) + I_2 \\ H_{12} &= m_2 l_1 l_{c2} \cos \theta_2 + m_2 l_{c2}^2 + I_2 = H_{21} \\ H_{22} &= m_2 l_{c2}^2 + I_2 \\ h_{122} &= -m_2 l_1 l_{c2} \sin \theta_2 = -h_{211} \\ h_{112} + h_{121} &= -2m_2 l_1 l_{c2} \sin \theta_2 \end{aligned}$$

식(1)의 각 항은 관성모멘트와 원심력 및 코리올리력을 나타내고 있다. 그리고 관절구동 서보계의 운동방정식은 식(2)와 같이 기술된다<sup>(8)</sup>.

$$J_m \ddot{\theta}_i + B_i \dot{\theta}_i + \tau_i = k_i u_i \quad (2)$$

여기서,  $J_m$ ,  $B_i$ ,  $u_i$ 는 각각 축관절 구동모터의 회전자 관성모멘트, 점성감쇠계수, 제어입력을 나타낸다. 위의 운동방정식 (1)(2)로부터 관성모멘트의 비선형요소, 원심력과 코리올리력등을 외란으로 간주하여 변수  $F_i$ 로 두면 매니플레이터와 서보계를 합친 운동방정식은 식(3)과 같이 비교적 간단히 기술될 수 있다.

$$J_i \ddot{\theta}_i + B_i \dot{\theta}_i + F_i = k_i u_i \quad (3)$$

여기서,  $J_i$ 는 식(1)(2)에서 관성모멘트의 선형요소를 나타낸다.

### 2. 절환파라미터의 유도

위의 식(3)과 같이 간단화된 운동방정식에 대하여 계가 슬라이딩 모드상에 존재하도록 하는 절환파라미터를 유도하기 위해 우선 매니플레이터의 각 관절의 목표각도, 각속도, 각가속도를 각각  $\theta_d$ ,  $\dot{\theta}_d$ ,  $\ddot{\theta}_d$ , 측정된 각도를  $\theta_i$ 로 두면 그 추종오차와 오차의 속도 및 가속도는 식(4)와 같다.

$$e_i = \theta_i - \theta_d, \quad \dot{e}_i = \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_d, \quad \ddot{e}_i = \ddot{\theta}_i - \ddot{\theta}_d \quad (4)$$

오차상태공간상에서 슬라이딩 모드가 발생하는 절환선은 식(5)와 같이 정의한다.

$$s_i = c_i e_i + \dot{e}_i \quad (5)$$

비선형성분을 외란으로 가정하므로 외란을 억제하기 위한 제어입력은 식(6)과 같다<sup>(6)</sup>.

$$u_i = \psi_d e_i + \psi_f + \psi_{\dot{\theta}_d} \dot{\theta}_d + \psi_{\ddot{\theta}_d} \ddot{\theta}_d \quad (6)$$

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

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

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

$$\psi_f = \begin{cases} u_f^- = M_{11} + M_{21} \times |e_i| & \text{if } s_i > 0 \\ u_f^+ = -M_{11} - M_{21} \times |e_i| & \text{if } s_i < 0 \end{cases}$$

$$M_{11} = \begin{cases} M_{1s} & \text{if } s_i e_i < 0 \\ M_{1u} & \text{if } s_i e_i > 0 \end{cases}$$

여기서,  $\psi_d$ 와  $\psi_{\dot{\theta}_d}$ 는 궤도제어를 수행할 때  $\dot{\theta}_d$ ,  $\ddot{\theta}_d$ 에 의한 영향으로 슬라이딩 모드의 존재조건으로부터 벗어나는 것을 제거하는 입력이며,  $\psi_f$ 는 외란을 억제하기 위한 제어입력이다.

본연구에서는 다입력계의 슬라이딩 모드 제어를 실현하기 위하여 식(6)에서 제시한 제어입력을 계층제어법에 의해 부가하면서 우선순위의 계층이 슬라이딩 모드에 들어가기까지 하위순위로 가정한 계층이 우선순위의 운동에 의한 간섭을 극복할 수 있도록 비례제어입력을 인가하는 하이브리드 제어(hybrid control)를 실행하였다. 즉, 우선순위의 계층이  $|s_i| < \epsilon$ 을 만족하면 슬라이딩 모드에 들어간 경우로 간주하여 순차적으로 최하위계층까지의 슬라이딩 모드에 들어가게 하는 것이다. 그리고 식(6)

에서와 같이 채터링의 영향을 줄일 수 있도록 오차상태 공간상의 절환면 주변에서 상태변수의 가감속을 고려하여  $e_i$ 가 양인 경우  $s_i < 0$ 의 영역에서는  $u_i$ 의 절대값을 작게 주고,  $s_i > 0$ 의 영역에서는  $u_i$ 의 절대값을 크게 주도록 하였다. 그리고 Table 1과 같이 주어진 SCARA 로봇의 사양에 대하여 슬라이딩 모드의 존재조건 식(7)을 만족시키는 절환파라미터들의 경제치는 Table 2와 같이 제안된다.

$$s_i \dot{s}_i = s_i(c_i \dot{e}_i + \ddot{e}_i) = s_i^2(c_i - \frac{B_i}{J_i}) + s_i(-c_i - \frac{B_i}{J_i})c_i e_i + \frac{k_i \mu_i}{J_i} - \frac{B_i}{J_i} \ddot{\theta}_d - \frac{F_i}{J_i} - \ddot{\theta}_d < 0 \quad (7)$$

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	$H_u$	0.208	0.076	Kg m <sup>2</sup>
Natural frequency	$\omega_{n_i}$	$4.3 \pi$	$6 \pi$	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/Am
Mass of rotor	$M_r$	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 values of switching parameters 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

이상에서 구한 절환조건을 만족하는 값으로 초평면의 기울기값  $c_1, c_2$ 를 선정하고 절환면 주변에서 채터링을 줄일 수 있도록 궤적의 가감속을 고려한 제어입력 식(6)을 인가하는 경우 수렴한 이후 발생하는 채터링을 어느 정도 경감시킬 수 있음이 확인되었다. 본 연구에서는 오차상태공간상의 절환면 주변에서 상태변수값이 충분히 이에 수렴하였을 경우에 제어입력의 부호변화와 함께 과도한 계인의 변화가 발생하지 않도록 절환면에 평행한 불감대를 설정함으로써 절환면에서 발생하는 채터링을 경감시키는 방법을 제안한다. 그리고 불감대의 폭과 불감대 내에서 계인  $M_{1i}$ 의 크기가 매니퓰레이터의 목표추종에 있어 채터링 경감에 미치는 영향을 고려하였다.

### 3. 불감대 설정

Fig. 2는 매니퓰레이터 각링크의 오차상태공간을 표현

한 것으로  $o-o'$ 는  $s=0$ 인 절환면을 나타내고, 계층제어법의 적용시 우선순위 계층의 수렴정도를 판정하기 위한  $s=|e_i$ 는 보조선  $a-a', b-b'$ 로 나타내며, 앞서 절환면 주변에서 궤적의 채터링을 경감시키는 방안으로 고려하였던 불감대를 보조선  $c-c', d-d'$ 로 나타낸다. 여기서 상태변수가 이미 설정한 불감대 이내로 수렴하였는지의 여부는 식(8)과 같이 정의한 상태변수와 절환면 사이의 거리를 나타내는 변수  $D$ 를 설정된 불감대폭과 비교함으로써 쉽게 판정할 수 있다.

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

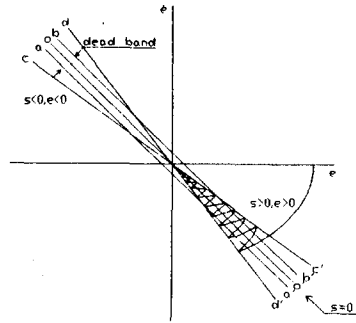


Fig. 2 Configuration of an error state space

### III. 시뮬레이션 및 고찰

이상에서 제시한 제어 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 Table 1의 사양에 준하여 4위의 Runge-Kutta수치적분법으로 시뮬레이션을 행하였다.

우선, 다관절 매니퓰레이터에 계층제어법을 적용시키기 위해 Fig.1에서 매니퓰레이터의 Link 1을 우선순위계층  $s_1$ 으로, Link 2를 하위순위계층  $s_2$ 로 정의하였다. 그리고 오차상태공간상에서  $s_1$ 이 내정된  $\epsilon$ 값 이내로 수렴할 때까지 하위계층인 Link 2에는 비례제어( $Kp=5.5$ )입력이 인가되도록 하였다. 그리고, Table 2에 제시한 절환조건을 만족시키는 임의의 한 예로서 절환면의 기울기  $c_1, c_2$ 를 각각 5.5로 가정하고 이를 기준으로한 절환조건들을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Switching parameters for simulation of sliding mode control

	Link1(i=1)	Link2(i=2)
$\psi_{n_i}$	-9.5	-6.0
$M_{11i}$	-3.5	-1.5
$M_{12i}$	-2.5	-0.6
$M_{2i}$	-0.2	-0.2
$Kp_i$	-1.0	-1.0
$Kv_i$	-1.5	-1.5
$Ki_i$	-0.01	-0.01

Table 3의 제어조건하에서 샘플링시간을 1ms로 하여, 불감대 폭의 크기 및 불감대 이내에서  $M_1$ 의 수정된 제어게인  $M_d$ 의 크기에 따른 절환면 주변에서의 채터링의 경감효과와 정상상태 오차에의 영향을 관찰하기 위해 평가함수들 식(9), 식(10)과 같이 각각 정의하였다.

$$J_1 = \frac{1}{N_1} \sum_{m=1}^{N_1} D_m^2 - \left( \frac{1}{N_1} \sum_{m=1}^{N_1} D_m \right)^2 \quad (9)$$

$$J_2 = \frac{1}{N_2} \sum_{n=1}^{N_2} e_n^2 \quad (10)$$

여기서 식(9)는 오차상태공간상의 절환면 주변에 발생하는 채터링의 크기를 나타내는 함수로서, 상태변수가 절환면과 교차한 이후로부터 상태변수와 절환면 사이의 거리를 변수  $D_m$ , 교차한 후부터 제어종료 시간까지 획득한 총 데이터 수를  $N_1$ 으로 정의하면, 식(9)는 절환면으로부터 상태변수의 거리의 차에 대한 분산을 의미한다. 그리고 식(10)은 시간영역에서 목표치의 2%이내에 들어온 정상상태오차  $e_n$ 의 크기의 제곱평균값을 나타내는 함수이다. 여기서  $N_2$ 는 각판절이 정상상태 이내로 수렴한 이후, 이로부터 제어종료시간까지 획득한 총 데이터 수를 의미한다. 링크 1, 2에 대하여 불감대 이내에서 수정된 제어게인  $M_d$ 를 -0.5로 하고, 불감대의 폭을 초기값 0에서 일정간격으로 증가시키면서 식(9)와 식(10)에 의해 계산된 결과를 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에 각각 나타내었다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에서 실선은 불감대 폭의 증가에 따른 채터링의 크기를 나타내는 분산이고, 점선은 정상상태 오차의 크기의 제곱의 평균값을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 불감대의 폭이 증가함에 따라 절환면 주변에 발생하는 채터링의 크기가 줄어들으나 불감대 폭을 일정한 값 이상으로 증가시키면 채터링의 크기가 어느정도 이상은 줄어들지 않음을 알 수 있다. 불감대 폭이 지나치게 작은 경우는 오차상태제적이 불감대 이내로 수렴하는 확률이 작아져서 불감대를 설정하지 않은 경우의 제어게인이 그대로 적용되어 채터링의 경감효과가 작은 경우라고 말할 수 있고, 이의 한 예로서 불감대 폭(DBW)이  $5 \times 10^{-4}$ 인 경우에 대하여 시뮬레이션한 결과는 Fig. 4(a)와 같다. 그리고 불감대의 폭이 일정한 값 이상으로 증가하게 되면 오차상태제적이 불감대 이내로 수렴하게 되므로, 제어게인이 과도하게 변화하지 않도록 고려되어진 수정된 제어게인이 적용되어 채터링의 크기도 따라서 상당히 경감됨을 알 수 있다. 이 한 예로서 불감대의 폭을  $5 \times 10^{-2}$ 로 하여 시뮬레이션한 결과를 Fig. 4(b)와 같다. 즉, Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)를 비교해 보면 채터링의 경감효과가 확연히 드러나고 있음을 알 수 있다. 그리고 절환면 주변의 채터링의 크기를 식(9)에 의해 비교해 보면 약 75%의 채터링 크기의 경감효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

그러나 Fig. 3(a), Fig. 3(b)에서 점선으로 나타낸 정상상태 오차의 크기를 불감대 폭에 따라 살펴보면, 이와는 상반되는 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 채터

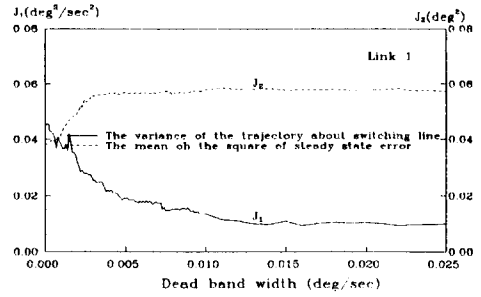


Fig. 3(a) The performance characteristics of Link1

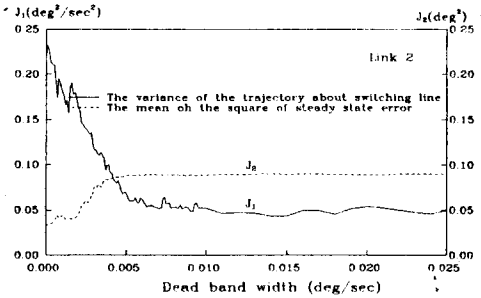


Fig. 3(b) The performance characteristics of Link2

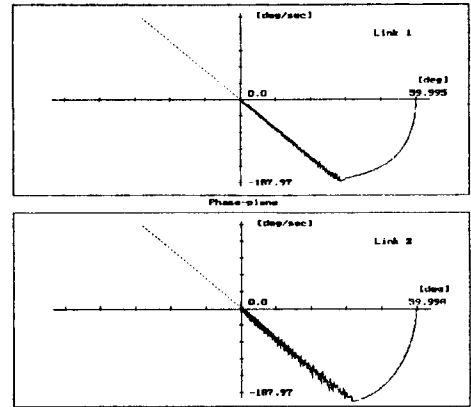


Fig. 4(a) Phase-trajectory in error state space (DBW =  $5 \times 10^{-4}$ )

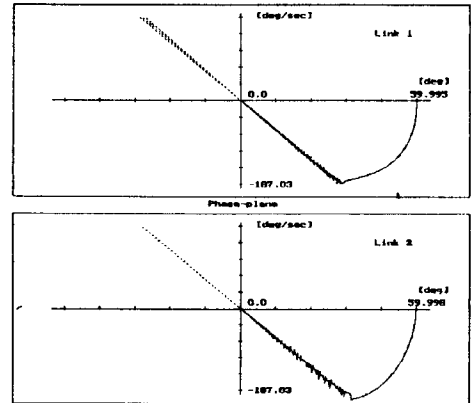


Fig. 4(b) Phase-trajectory in error state space (DBW =  $5 \times 10^{-2}$ )

링 크기의 경감을 위해 불감대의 폭을 증가시키게 되면 오차상태계적이 오차상태공간의 원점으로 수렴함에 따라 불감대 이내에서 제어게인이 작아지는 영향과 함께 외란에 대처할 수 있는 제어게인을 구할 수 없게 되어 상대적으로 정상상태오차의 크기를 증가시키는 결과를 초래하기 때문이다. 여기서 정상상태오차의 크기는 각관절이 목표치의 2%이내로 수렴한 이후로부터 제어종료시간까지 식(10)에 기준한 오차의 통계치이며 제어종료시의 오차를 나타내는 것은 아니다. 따라서 제어종료시의 오차는 Fig. 5(b), Fig. 5(d)와 같이 보다 원점에 수렴함을 알 수 있다. 그러므로 적당한 크기의 불감대 폭을 선정하기 위해서는 계의 허용오차범위에 준하여 채터링 크기의 경감효과와 정상상태 오차의 크기를 함께 고려하여 설계하면 됨을 알 수 있다.

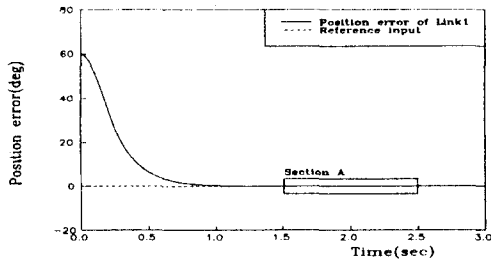


Fig. 5(a) Position error of Link1

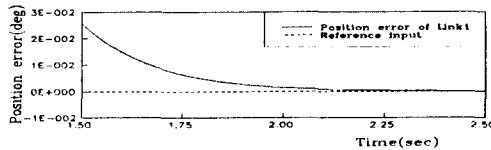


Fig. 5(b) Magnified feature of the Section A of Fig. 5(a)

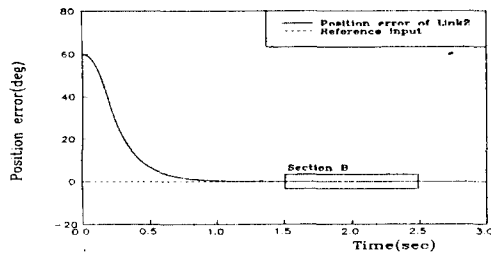


Fig. 5(c) Position error of Link2

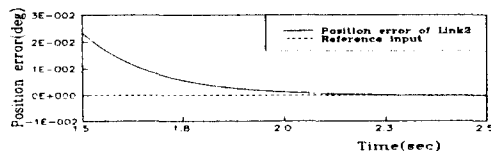


Fig. 5(d) Magnified feature of the Section B of Fig. 5(c)

본 연구에서는 고정도의 정확도와 외란에 강인한 제어 성능을 필요로 하는 산업용 SCARA로봇의 제어기 설계를 위하여 파라미터 변동이나 외란 등에 강인한 슬라이딩 모드 제어이론을 적용하고, 동특성에서 나타나는 비선형성분을 외란으로 간주함으로써 슬라이딩 모드를 실현할 수 있는 절환파라미터를 보다 간편하게 유도함을 보였다. 또한 슬라이딩 모드 제어에 있어 불연속 제어입력에 기인하여 발생하는 채터링은 절환면 주변에 절환면과 평행한 불감대를 설정함으로써 어느정도 경감시킬 수 있음을 확인하였다. 이와함께 최적의 불감대 폭을 선정하기 위해 불감대의 폭에 따라 채터링의 크기와 정상상태 오차를 비교함으로써 위의 두가지 성능이 서로 상반되는 성질을 나타내고 있음을 확인하였고, 이로써 채터링의 크기를 감소시키기 위해 고려된 불감대의 폭은 허용오차에 준하여 적당한 값으로 설계되어야 함을 알 수 있으며, 이를 위한 정량적인 데이터를 제시하여 사용자에게 따른 불감대 폭을 쉽게 선정할 수 있도록 하였다.

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)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)Lee, M.C. and Aoshima, N., "Real Time Multi-Input Sliding Mode Control of a Robot Manipulator Based on DSP", Proc. of SICE'93, pp.1223-1228
- (6)이 민 철, 齊島伸治, "슬라이딩 모드론 이용한 로봇 매니퓰레이터의 실시간 제어에 관한 연구" 大韓機械學會論文集 第16卷 第11號, pp. 2011-2020, 1992.
- (7)H. Asada, J. J. E. Slotine "ROBOT ANALYSYS AND CONTROL", A Wiley-Interscience Publication