

# 슬라이딩 모드를 이용한 다관절 매니플레이터의 다입력 실시간 제어에 관한 연구

이 민 철

부산대학교 공과대학 기계공학과

## A Study on a Multi-Input Real Time Control of Multi-Joint Manipulator Using Sliding Mode

Min Cheol Lee

Dept. of Mechanical Eng., Pusan National University

### Abstract

This paper presents to accomplish successfully a multi-input real time control by applying control hierarchy for sliding mode of multi-joint manipulators whose nonlinear terms are regarded as disturbances.

We could simplify the dynamic equations of a manipulator and servo system, which are composed of linear elements and nonlinear elements, by assuming that nonlinear terms, which are inertia term, gravity force term, Coriolis force term and centrifugal force term, are external disturbance. By simplifying that equation, we could easily obtain a control input which satisfy sliding mode of multi-input system. We proposed a new control input algorithm in order to decrease chattering by changing control input according as effect of disturbance if a control response become within allowance error range.

In this experiments, we used DSP(Digital Signal Processor) controller to suppress chattering by time delay of calculation and to carry out real time control.

### 1. 서 론

산업현장에서 사용되는 로봇트는 생산성 향상 및 신뢰도의 개선을 위해 고속의 실시간 동시제어와 함께 환경변화에 강한 제어성능을 요구한다. 최근의 마이크로프로세서의 발달에 의해 매니플레이터의 실시간 제어에 관한 연구가 보고되고 있으며<sup>(1)</sup>, 특히 로봇트 매니플레이터의 구동부에서 나타나는 마찰력의 영향 및 작업중에 있어서의 부하변동에 의한 파라미터 변동 등에 대응할 수 있는 강인성을 갖춘 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 실제의 로봇트 매니플레이터에 적용하는 연구가 활발히 이루어져 왔다<sup>(2)-(6)</sup>. 특히, Lee와 Aoshima에 의해서 매니플레이터의 동특성에서 나타나는 비선형성분을 외란으로 간주하여 슬라이딩 모드의 적용을 용이하게 함으로 산업용 로봇트에의 적용 가능성을 제시하였다<sup>(6)</sup>. 그러나, 다관절 매니플레이터의 실시간 동시 제어를 수행하기 위한 다입력 계의 슬라이딩 모드의 적용에 관한 연구는 미미한 실정이며,

채터링의 문제도 남아 있어 산업용 로봇트에 적용하기에는 아직 미흡하다.

본 연구에서는 다관절 매니플레이터의 동특성 중 비선형요소인 관성항, 중력, 원심력 및 코리올리힘의 항 등을 외란으로 간주했을 때의 다입력계 슬라이딩 모드의 설계법인 계층제어법(control hierarchy)을 적용하여 실시간 동시 제어가 수행 되어짐을 보이고, 산업용 로봇트에 적용될 수 있도록 채터링을 경감시키는 방법을 제안한다. 계층제어법을 적용할 때 우선순위의 계층이 슬라이딩 모드에 들어오기까지는 비례제어기를 사용함으로써 중력 및 타관절에 의한 영향을 받지 않도록 하였고, 수렴 속도도 개선되어짐을 보였다. 이 때 외란에 대응하기 위해 부가한 제어 입력의 초기값을 크게 주므로 발생하게 되는 채터링을 줄이기 위해서, 목표입력과 출력의 차이가 허용오차 범위 이내에 들어오면 불감대 영역으로 간주하여 제어입력을 작은값으로 바꾸어 줌으로 채터링이 상당히 경감 되어짐을 실험을 통하여 확인하였다. 또한 제안한 제어 알고리즘이 부하의 변동에 대해서 강인한지를 실험적으로 검토하였다. 실험에서는 연산지연에 의한 채터링을 감소시킬 수 있도록 제어를 고속 연산처리가 가능한 T.I.사의 DSP를 사용해 제어 시스템을 구성하여 실험을 수행하였다.

### 2. 다입력계 슬라이딩 모드 제어<sup>(7),(8)</sup>

입력에 관해서 선형인 다입력 제어계

$$\dot{x} = f(x, t) + B(x, t)u \quad (1)$$

$$x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m$$

를 고려하자. 제어입력  $u$ 의 각성분  $u_i$ 는 절환면을  $s_i(x) = 0$ 으로 둘 때 다음식과 같다.

$$u_i = \begin{cases} u_i^+(\mathbf{x}, t) & \text{if } s_i(\mathbf{x}) > 0 \\ u_i^-(\mathbf{x}, t) & \text{if } s_i(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (i=1, \dots, m) \quad (2)$$

다입력계에서는 각 절환면  $s_i(x) = 0$ 에 도달한 것 만으로는 슬라이딩 모드가 생기지 않고,  $s(x) = (s_1, \dots, s_m) = 0$ 에 수렴해서야 비로서 슬라이딩 모드가 생긴다<sup>(8)</sup>. 이와같은 다입력계 슬라이딩 모드의 설계법의 하나인 계층제어법은 우선순위

의 계층이  $s_i(\boldsymbol{x})=0$ 에 들어감을 확인한 후 최하위의 계층까지 차례로 슬라이딩 모드에 들어가도록 하여 제어대상을  $s(\boldsymbol{x})=0$ 에 들어가도록 한다. 그러나, 현실의 제어입력 절환 주파수에는 한계가 있어 지연, 히스테리시스 등의 모호성에 의해 제어대상이  $s_i(\boldsymbol{x})=0$ 의 절환선상이 아닌 그 근방에 궤도해인  $\boldsymbol{x}(t)$ 가 존재하므로  $s_i(\boldsymbol{x})=0$ 에 도달한 것으로 가정하는 데에는 문제가 있다.

본 연구에서는 계층제어법을 적용하는데 있어 우선순위의 계층이  $s_i(\boldsymbol{x})=0$ 에 들어감을 확인하는 것 대신에  $|s_i(\boldsymbol{x})| < \varepsilon$ 에 들어간 것이 확인 되면 우선순위의 계층이 슬라이딩 모드에 들어간 것으로 간주하여 제어대상 전체가 의사 슬라이딩 모드(quasi sliding mode)를 수행하도록 하며,  $\varepsilon$ 의 값에 따른 제어성능에의 영향을 실험을 통해서 검토한다.

최전하는 n개의 관절축으로 구성된 로봇트 매니퓰레이터의 동특성을 나타내는 운동방정식 중에서 관성 모멘트의 비선형 요소, 원심력과 코리올리힘, 중력 등을 전부 외란으로 간주하여  $\mathbf{F}$ 로 두면, 매니퓰레이터와 서보계를 합한 다이내믹스를 나타내는 미분방정식은 다음과 같이 표현 된다<sup>(6)</sup>.

$$\mathbf{J}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{B}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{F} = \mathbf{k} \mathbf{u} \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{J}$ 는 모터의 축과 감속기로부터 이루어진 관성 모멘트와 매니퓰레이터의 동특성 중 관성모멘트의 선형 부분을 나타내는 항의 합으로 된 (n,n) 대각선행렬,  $\mathbf{B}$ 는 모터축과 감속기 및 부하축의 등가 점성마찰계수인 (n,n) 대각선행렬,  $\mathbf{k}$ 는 모터 토크계수, 감속기의 감속비, 전기적 저항 등에 의한 (n,n) 대각선행렬,  $\mathbf{u}$ 는 모터에 가하는 전압의 n차원 벡터이다.

제어대상이 슬라이딩 모드에 들어가기 위해서는 슬라이딩 모드의 존재 조건( $s_i s_i < 0$ )을 만족 시키면 된다<sup>(7)-(9)</sup>. 식 (3)과 같이 서보계를 포함한 다관절 매니퓰레이터의 동특성중 비선형성분을 외란으로 간주함으로써 슬라이딩 모드를 만족하는 제어입력은 비교적 간단히 구해지며, 매니퓰레이터의 제i번째 관절의 제어입력  $u_i$ 는 절환선의 기울기( $c_i$ )가  $c_i < B_i/J_i$ 를 만족할 때 식(4)와 같다<sup>(6)</sup>.

$$u_i = \psi_{\alpha i} e_i + \psi_f i + \psi_{\beta i} \dot{\theta}_{di} + \psi_{\gamma i} \ddot{\theta}_{di}$$

$$\text{단, } \psi_{\alpha i} = \begin{cases} \alpha_i & \text{if } s_i e_i > 0 \\ -\alpha_i & \text{if } s_i e_i < 0 \end{cases}$$

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

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

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

$$f(e_i) = |e_i| + \frac{N}{|e_i| + \delta}$$

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

$$\psi_{\gamma i} = \begin{cases} \gamma_i & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} > 0 \\ -\gamma_i & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $e_i$ 는 목표각도  $\theta_{di}$ 와 관절의 회전각도  $\theta_i$ 와의 차를

나타내는 추종오차이며,  $\psi_{\beta i}$ 와  $\psi_{\gamma i}$ 는 궤도제어를 수행할 때  $\dot{\theta}_{di}$ ,  $\ddot{\theta}_{di}$ 에 의한 영향으로 슬라이딩 모드의 존재조건으로부터 벗어나는 것을 제거하기 위한 입력이다.

본 연구에서는 각 관절에 부가하는 제어입력으로써 식(4)에서 제시한 제어입력을 계층제어법에 의해 부가함과 동시에 우선순위의 계층이 슬라이딩 모드에 들어가기까지의 하위순위의 계층의 제어입력은 비례제어에 의해 부가하도록 하이브리드 제어(hybrid control)에 의한 방법을 제안한다. 즉, 우선순위의 계층이  $|s_i| < \varepsilon$ 를 만족하면 슬라이딩 모드에 들어간 경우로 가정하여 순차적으로 최하위 계층까지 의사 슬라이딩 모드에 들어가게 하여 전체의 제어대상이 슬라이딩 모드에 들어가도록 제어 한다. 이 때 우선순위의 계층이 슬라이딩 모드에 들어가기까지 하위순위의 계층의 제어입력이 없을 경우 우선순위 계층의 운동에 의한 간섭 및 매니퓰레이터의 자세에 따라서는 중력 등의 영향으로 인해 수속과의 반대방향으로 동작하거나 낙하하는 경우가 발생하므로 이 것을 방지하기 위하여 간단한 비례제어를 이용해 하위계층의 관절에 제어입력을 부가한다. 또한  $\varepsilon$ 의 값에 따른 슬라이딩 모드에의 영향은 실험적으로 검토하여 평가한다.

외란  $\mathbf{F}_i$ 에 대응하기 위하여 부가하는 조작량  $\psi_{ri}$ 의  $M_{1i}$ 를 수렴하는 방향과 같은 방향의 값일 경우는 큰값을, 수렴하는 방향과 반대방향일 경우는 작은 값을 주어 절환선을 경계로 바뀌게 되는 속도의 급격한 변화(가속에서 감속 또는 감속에서 가속)에 의한 채터링을 줄이는 알고리즘을 제안했으나<sup>(6)</sup>,  $M_{1i}$ 의 초기값을 크게 주었을 때는 제어대상이 수렴한 이후에도 채터링이 어느정도 남아 있어 문제가 되었다. 본 연구에서는 이러한 채터링을 없애기 위하여 제어대상이 허용오차 범위 ( $\Delta$ )안에 들어오면 불감대 영역(dead zone)을 형성하도록  $M_{1i}$ 의 초기값을 작게 변경시킴으로써 채터링을 줄이는 방법을 제안한다.

### 3. 로봇트 매니퓰레이터의 제어계 및 절환 파라미터의 추정

본 연구에서 사용한 실험장치와 제어계는 Fig.1과 같다. 슬라이딩 모드 제어시에 발생하는 연산 지연에 의한 채터링을 가능한한 줄이기 위하여 고속연산 처리가 가능한 T.I.사의 TMS32020을 사용한 DSP보드를 제작해 제어기로 사용하였다. 실험에 사용한 로봇트는 3자유도를 가진 일본의 다이킨공업(주)의 미니로봇트 허리(wrist), 어깨(shoulder), 팔꿈치(elbow) 부분의 회전각도를 각각  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ 로 나타내었고 그 동작범위는 다음과 같다.

$$-150^\circ \leq \theta_1 \leq 150^\circ$$

$$-100^\circ \leq \theta_2 \leq 100^\circ$$

$$-100^\circ \leq \theta_3 \leq 70^\circ$$

(5)

여기서  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ 는 링크가 상방향으로 지면(x-y 평면)과 수직으로 향하고 있을 때를  $0^\circ$ 로 하고, 각관절의 회전방향이 반시계 방향일 경우를 정(+)방향으로 하였다. 미니로봇트의 각

관절의 회전각도는 포텐서미터로 부터 전압으로 얻어지며 각 속도는 차분방정식을 이용해 제어기(DSP) 내에서 계산한다. 이 때 샘플링 주기는 최대 0.5ms까지 줄 수 있도록 하였다. 각 관절의 각도는 포텐서미터에 의해 측정하며, 이 때 잡음의 영향이 차분방정식에 의해 구한 속도성분의 오차를 크게 하여, 채터링에도 영향을 미치게 된다. 이러한 잡음에 의한 영향을 없애기 위하여 본 실험에서는 시간평균이동에 의한 디지털 필터를 구성하여 DSP에 의해 실시간으로 잡음을 제거하여 실험을 수행하였다.

슬라이딩 모드를 적용할 경우, 미지 파라미터의 값은 정확히 몰라도 근사값 또는 그 변동범위만 알면 절환 제어입력을 구하는데 필요한 절환 파라미터를 얻을 수 있다<sup>[8]</sup>. 로봇 매니퓰레이터의 동특성에서 나타나는 비선형요소는 외란으로 간주하였으므로, 절환파라미터를 구하기 위해서는 각 관절의 관성모멘트의 선형요소인  $J_i$  ( $i=1, 2, 3$ )와 등가 점성마찰계수인  $B_i$  ( $i=1, 2, 3$ )를 구하면 된다. 신호압축법<sup>(10)</sup>에 의하면 비선형요소가 포함된 계의 선형요소의 미지파라미터를 근사적으로 구할 수 있으므로, 본 연구에서는 신호압축법을 이용하여 추정된  $J_i, B_i$ <sup>[6]</sup>를 이용하여 절환 파라미터인  $c_i, \alpha_i$ 를 구하면 다음과 같다.

$$0 < c_1 < \frac{B_1}{J_1} = 8.6, \quad \alpha_1 < -5.57 \times 10^{-3} \quad \text{if } c_1=8$$

$$0 < c_2 < \frac{B_2}{J_2} = 30.1, \quad \alpha_2 < -0.166 \quad \text{if } c_2=16$$

$$0 < c_3 < \frac{B_3}{J_3} = 11.3, \quad \alpha_3 < -0.013 \quad \text{if } c_3=10 \quad (6)$$

단, 식(4)의 외란에 대응하기 위해 추가하는 제어입력  $\psi_{r1}$  중의  $M_{11}, M_{21}$ 의 한계값은 외란  $F_i$ 의 절대값의 최대값을 알면 구해지지만 실제로는 실시간으로 구하기 어려우므로 경험적으로 적당한 음의값을 주고 있다.

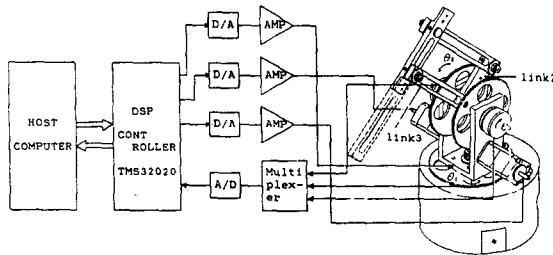


Fig.1 Robot manipulator and its control systems

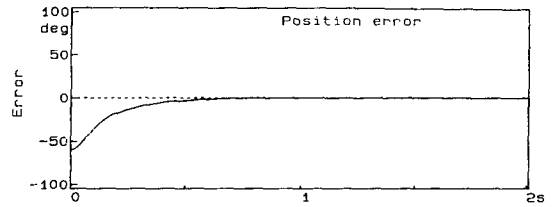
#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 계층제어법을 이용한 3축 동시 슬라이딩 모드 제어

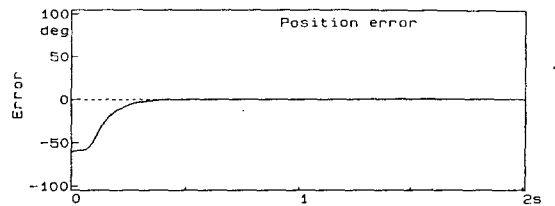
계층제어법에 기초를 두어 제한한 제어알고리즘을 적용시키기 위하여 계층의 우선순위를 링크1( $\theta_1$ ), 링크2( $\theta_2$ ), 링크3( $\theta_3$ )의 순으로 정하여 실험을 수행하였다. 이상적인 슬라이딩 모드는 절환선이  $s_1=0$ 이지만 현실적으로는 동작지연 등에 의해  $s=\Delta s$ 의 근방에서 채터링을 발생시키면서 의사 슬라이

딩 동작을 행하며 수렴한다. 따라서 실험에서는 슬라이딩 모드에 들어간 것을 판단하는 조건을  $|s_1| < \epsilon$ 으로 하여  $\epsilon$ 의 값에 따른 영향을 조사하였다.

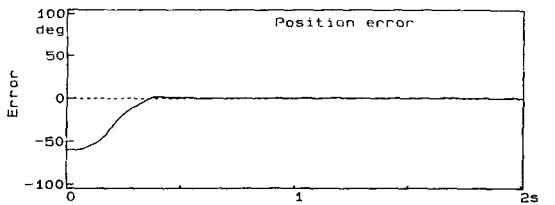
각관절의 초기각도를  $0^\circ$ 로 하고 목표각도를  $60^\circ$ 로 한 후, 실험을 위하여 절환선과 절환 파라미터를  $\theta_1$ 의 경우에 대해서는  $c_1=8, \alpha_1=-0.4, M_{1L1}=-300$ (D/A 변환기의 출력으로는  $-0.7325V$ ),  $M_{1S1}=-200, M_{21}=-500, \theta_2$ 의 경우에 대해서는  $c_2=16, \alpha_2=-0.4, M_{1L2}=-300, M_{1S2}=-100, M_{22}=-500, \theta_3$ 의 경우에 대해서는  $c_3=10, \alpha_3=-0.4, M_{1L3}=-500, M_{1S3}=-200, M_{23}=-500$ 으로 각각 주고, 우선순위의 계층이 슬라이딩 모드에 들어가기 까지 주게 되는 비례제어에 의한 제어입력의 비례계인을  $K_p=-0.4$ , 샘플링 시간을  $T=1ms$ 로 둔후,  $\epsilon = \$200$  ( $\$$ 는 16진수를 의미)으로 주었을 때의 오차의 수렴상태, 속도, 위상면에 대한 각각의 실험결과를 나타내면 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4와 같다. Fig. 2 및 Fig. 3에서  $\theta_2$ 의 수렴상태를 보면  $\theta_1$ 이 슬라이딩 모드에 들어가기 ( $|s_1| < \$200$ 를 만족)까지는 비례제어에 의해 수렴되다가  $\theta_1$ 이 슬라이딩 모드에 들어가는 순간  $\theta_2$ 도 슬라이딩 모드에 들어가 절환선을 따라 수렴하기 시작함을 알 수 있다. 또한 최하위 계층인  $\theta_3$ 도  $\theta_1, \theta_2$ 가 모두 슬라이딩 모드에 들어가기까지는 비례 제어에 의해 수렴되다가 우선순위의 계층( $\theta_1, \theta_2$ )이 모두 슬



(a) Convergence of position error of angle  $\theta_1$  at  $c_1=8, \alpha_1=-0.4, M_{1L1}=-300, M_{1S1}=-200, M_{21}=-500, K_p=-0.4$

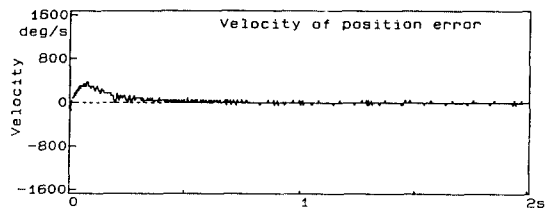


(b) Convergence of position error of angle  $\theta_2$  at  $c_2=16, \alpha_2=-0.4, M_{1L2}=-300, M_{1S2}=-100, M_{22}=-500, K_p=-0.4$

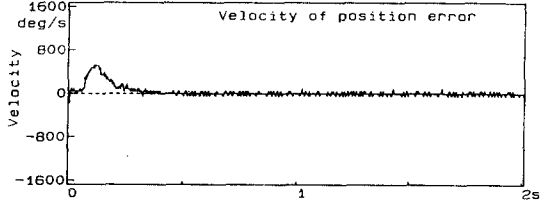


(c) Convergence of position error of angle  $\theta_3$  at  $c_3=10, \alpha_3=-0.4, M_{1L3}=-300, M_{1S3}=-100, M_{23}=-500, K_p=-0.4$

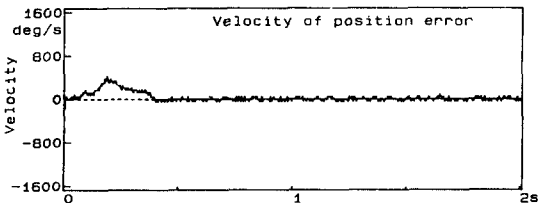
Fig. 2 Experiment results by control hierarchy when sliding mode range be taken at  $|s_1| < \epsilon = \$200$



(a) Velocity of position error of angle  $\theta_1$  at  $c_1=8$ ,  $\alpha_1=-0.4$ ,  $M_{1L1}=-300$ ,  $M_{1S1}=-200$ ,  $M_{21}=-500$ ,  $K_p=-0.4$

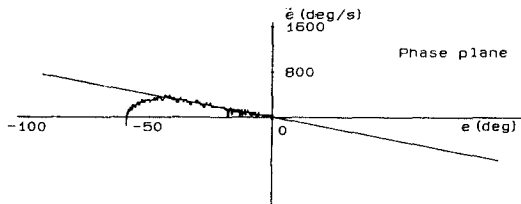


(b) Velocity of position error of angle  $\theta_2$  at  $c_2=16$ ,  $\alpha_2=-0.4$ ,  $M_{1L2}=-300$ ,  $M_{1S2}=-100$ ,  $M_{22}=-500$ ,  $K_p=-0.4$

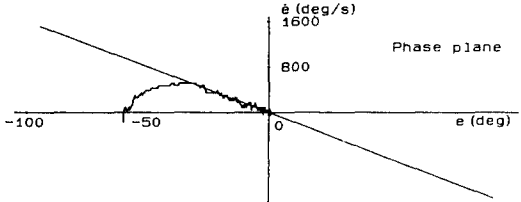


(c) Velocity of position error of angle  $\theta_3$  at  $c_3=10$ ,  $\alpha_3=-0.4$ ,  $M_{1L3}=-300$ ,  $M_{1S3}=-100$ ,  $M_{23}=-500$ ,  $K_p=-0.4$

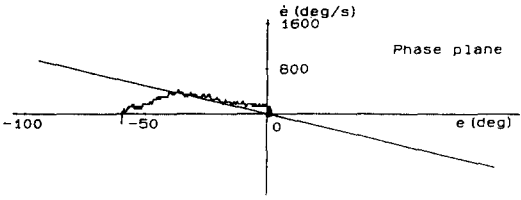
Fig. 3 Experiment results by control hierarchy when sliding mode range be taken at  $|s_1| < \epsilon = \$200$



(a) Phase plane of a position error and velocity of angle  $\theta_1$  at  $c_1=8$ ,  $M_{1L1}=-300$ ,  $M_{1S1}=-200$  and  $M_{21}=-500$ ,



(b) Phase plane of a position error and velocity of angle  $\theta_2$  at  $c_2=16$ ,  $M_{1L2}=-300$ ,  $M_{1S2}=-100$  and  $M_{22}=-500$

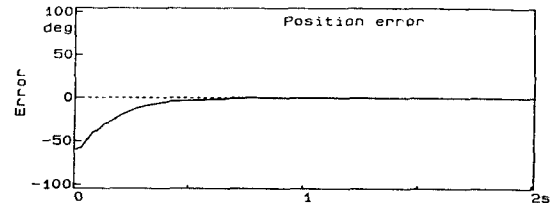


(c) Phase plane of a position error and velocity of angle  $\theta_3$  at  $c_3=10$ ,  $M_{1L3}=-300$ ,  $M_{1S3}=-100$  and  $M_{23}=-500$

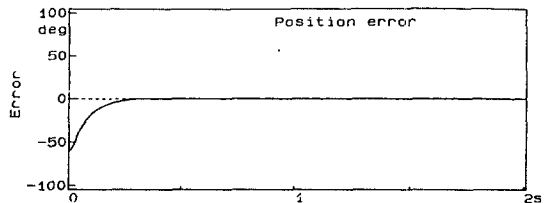
Fig. 4 Experiment results by control hierarchy at  $K_p=-0.4$  and  $\alpha_1=-0.4$ , when sliding mode range be taken at  $|s_1| < \epsilon = \$200$

라이딩 모드에 들어간 직후 슬라이딩 모드에 들어가 수렴되어지고 있다. 따라서, 제어대상 전체가 슬라이딩 모드에 들어가 3축이 동시에 약 0.4초 이내에 목표 각도에 수렴되어짐을 알 수 있다.

$\epsilon$ 의 값에 따른 영향을 조사하기 위하여  $\epsilon = \$5000$ 으로 하고 그 이외의 파라미터는 Fig. 2에서의 실험조건과 동일하게 한 후 실험한 결과인 오차의 수렴상태, 위상면을 나타내면 Fig. 5, Fig. 6과 같다. 오차의 수렴상태를 보면 상위계층이 슬라이딩 모드에 들어가는 판단조건의 범위가 넓어져 하위계층이 빨리 슬라이딩 모드에 들어가 수렴속도는 다소 빨라지고 있으나, 상위계층( $\theta_1, \theta_2$ )의 위상면(Fig.6(a), (b))을 보면 불안정해져 급격한 채터링 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 상위계층이 슬라이딩 모드에 들어가는 판단조건의 범위가 넓어 의사 슬라이딩 모드를 일으키지 않은 상태에서 하위계층의 슬라이딩 모드 동작을 수행함으로써 발생하는 시스템의 불안정이 원인이라고 판단된다.

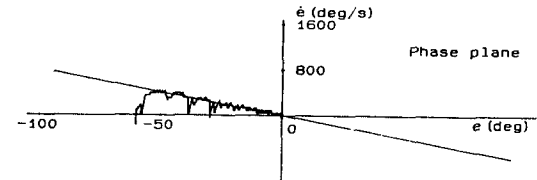


(a) Convergence of position error of angle  $\theta_1$  at  $c_1=8$ ,  $\alpha_1=-0.4$ ,  $M_{1L1}=-300$ ,  $M_{1S1}=-200$ ,  $M_{21}=-500$ ,  $K_p=-0.4$

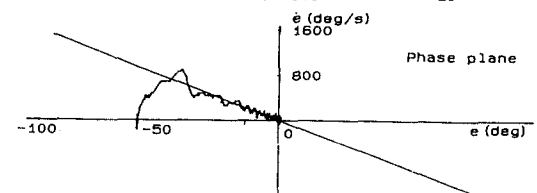


(b) Convergence of position error of angle  $\theta_2$  at  $c_2=16$ ,  $\alpha_2=-0.4$ ,  $M_{1L2}=-300$ ,  $M_{1S2}=-100$ ,  $M_{22}=-500$ ,  $K_p=-0.4$

Fig. 5 Experiment results by control hierarchy when sliding mode range be taken at  $|s_1| < \epsilon = \$5000$



(a) Phase plane of a position error and velocity of angle  $\theta_1$  at  $c_1=8$ ,  $M_{1L1}=-300$ ,  $M_{1S1}=-200$  and  $M_{21}=-500$



(b) Phase plane of a position error and velocity of angle  $\theta_2$  at  $c_2=16$ ,  $M_{1L2}=-300$ ,  $M_{1S2}=-100$  and  $M_{22}=-500$

Fig. 6 Experiment results by control hierarchy at  $\alpha_1=-0.4$  and  $K_p=-0.4$  when sliding mode range be taken at  $|s_1| < \epsilon = \$5000$

#### 4.2 불감대영역의 설정에 의한 체터링의 감소에 관한 고찰

매니퓰레이터의 회전각도가 목표값에 수렴한 후에도 외란에 대응하기 위해 추가하는 제어입력( $\psi_{f1}$ )에 의해 체터링이 남게 된다<sup>(6)</sup>. 회전각도가 허용오차 범위( $|e| < \Delta e$ ) 이내에 들어오면 외란으로 가정한 비선형요소 중 속도 및 가속도 성분에 좌우되는 관성력, 원심력, 코리올리힘 등이 작아져 가정한 외란도 줄어들다는 사실을 이용하면, 줄어든 외란에 대응하기 위해 추가하는 제어입력인  $M_{11}$ 를 작게( $M_d$ ) 줄 수 있어 불감대영역을 형성시킬 수 있다. 따라서 이러한 불감대영역 이내에 들어오면 체터링을 거의 줄일 수 있음이 쉽게 예견되며, 이러한 체터링이 제거되어짐을 실험을 통해서 확인하였다.

실험을 수행한 결과, 슬라이딩 모드의 절환파라미터를 Fig. 2에서의 실험조건과 동일하게 주고  $|s_1| < \epsilon = \$500$ 으로 주었을 때의  $\theta_2$ 의 위치오차의 수렴상태를 확대한 그림을 Fig. 7(a)에, 동일한 조건하에서 허용오차 범위를  $|e| < \Delta e = \$30(0.25^\circ)$ 으로 주었을 경우 불감대영역을 형성하도록 허용오차 범위 이내에서는  $M_{11}$ 를  $M_d = -100$ 으로 변경하였을 때의  $\theta_2$ 의 위치오차의 수렴상태를 확대한 그림은 Fig. 7(b)에 나타낸다. 이 결과를 보면 불감대 영역을 설정한 경우가 설정하지 않은 경우에 비해 체터링이 거의 제거되고 있음을 알 수 있다. 즉 허용오차범위 이내에 들어오면 불감대영역을 형성시키기 위해 외란에 대응되는 제어입력을 작게 변경 시켜 줌으로 체터링을 거의 줄일수가 있음이 판명 되었다. 그러나 이 경우 허용오차 범위 이내에서 정상상태오차가 남게되며 정도를 높이기 위하여 허용오차 범위를 작게 할려면 제어입력을 증가 시켜야 하

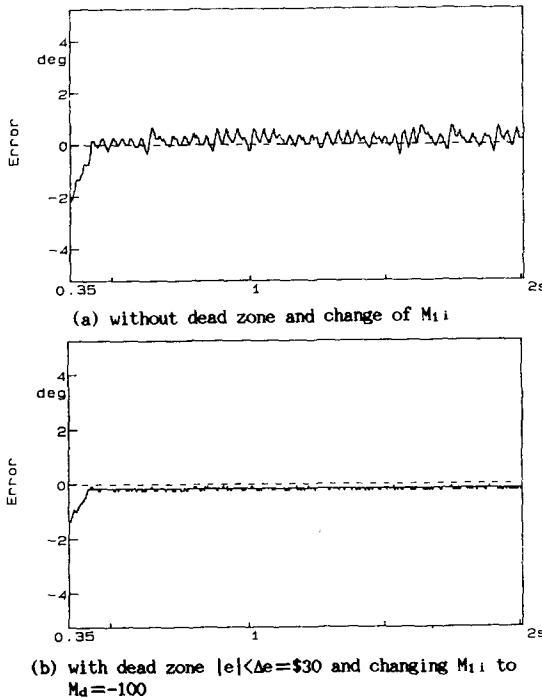


Fig. 7 Magnified diagrams of the position error of the angle  $\theta_2$  by control hierarchy at  $c_2 = 16$ ,  $\alpha_2 = -0.4$ ,  $M_{1L2} = -300$ ,  $M_{1S2} = -100$ ,  $M_{22} = -500$ ,  $K_p = -0.4$  and  $|s_1| < \epsilon = \$500$

므로 체터링이 다시 증가하는 문제가 생기므로 경우에 따라서는 허용오차의 범위와  $M_d$ 의 설정에 신중을 기울여야 된다.

#### 4.3 슬라이딩 모드 제어의 강인성(robustness)에 관한 고찰

제한한 제어알고리즘이 파라미터의 변동 등에 대해 어느정도 강인한지를 실험적으로 검토하기 위하여 Fig. 7과 같은 실험 조건하에 링크3의 선단(end-effector)에 20g정도까지의 추를 달아 payload를 바꾸어도 정상상태 오차와 체터링이 거의 없이 수렴 되어짐이 확인 되었다. 그러나 링크3의 무게(33g)정도인 30g의 추를 달 경우 링크3에서 정상상태 오차가 발생 하였다. 이것은 추에 의한 관성모멘트의 증가로 인해 절환선의 기울기  $c_i$ ( $< B_i/J_i$ )의 최대값도 줄어들게 됨으로 선정 한 기울기가 슬라이딩 모드를 만족하지 못하게 되어 생기는 현상이라고 판단된다. 따라서 부하변동의 최대값을 예측하여 절환선의 기울기를 적절히 선정하면 이 문제는 해결 될 수 있다. 이것을 실험적으로 검토하기 위하여 40g의 추를 단 경우 절환선을  $c_1 = 8$ ,  $c_2 = 5$ ,  $c_3 = 4$ 로 바꾸고, 관성모멘트의 증가에 의한 외란의 증가에 대응하도록  $M_{11}$ 의 값도 증가시켜 실험을 수행한 결과인 오차의 수렴상태, 위상면을 나타내면 각각 Fig. 8, Fig. 9과 같다. 오차의 수렴상태(Fig. 8)를 보면 payload의 변화가 링크3의 무게보다 무거운 40g의 추를 달았음에도 3관절의 목표각도와의 오차가 모두 0에 수렴하고 있다. 그러나, 이 경우 외란에 대응하는 제어입력인  $M_{11}$ 의 값을 증가시킨 관계로 체터링도 증가 되어짐을 알 수 있다.

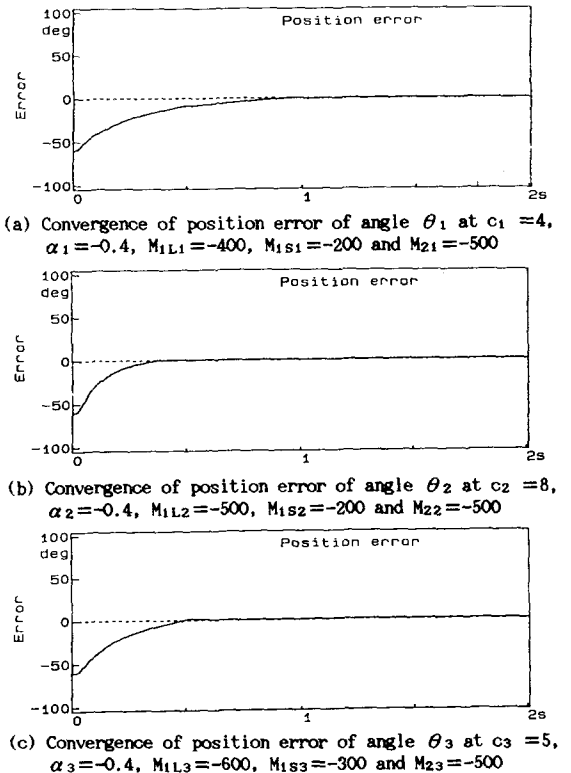
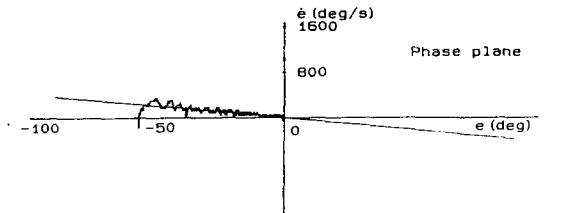
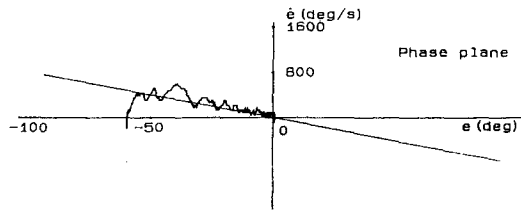


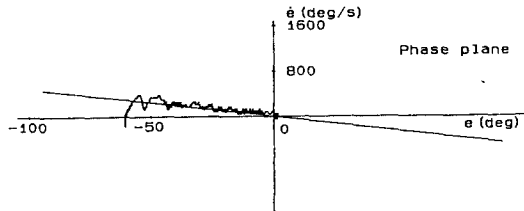
Fig. 8 Experiment results by control hierarchy at  $K_p = -0.4$ ,  $|e| < \$30$ ,  $M_d = -100$  and  $|s_1| < \$500$  when end-effector take payload of 40g



(a) Phase plane of a position error and velocity of angle  $\theta_1$  at  $c_1=4$ ,  $M_{1L1}=-400$ ,  $M_{1S1}=-200$  and  $M_{21}=-500$



(b) Phase plane of position error and velocity of angle  $\theta_2$  at  $c_2=8$ ,  $M_{1L2}=-500$ ,  $M_{1S2}=-200$  and  $M_{22}=-500$



(c) Phase plane of position error and velocity of angle  $\theta_3$  at  $c_3=5$ ,  $M_{1L3}=-600$ ,  $M_{1S3}=-300$  and  $M_{23}=-500$ ,

Fig. 9 Experiment results by control hierarchy at  $\alpha_1 = -0.4$ ,  $K_p = -0.4$ ,  $|e| < \$30$ ,  $M_d = -100$  and  $|s_i| < \$500$  when end-effector take payload of 40g

## 5. 결 론

본 연구에서는 다관절 매니퓰레이터의 동특성 중 비선형 요소인 관성항, 중력, 원심력 및 코리올리힘의 항 등을 외란으로 간주함으로써 매니퓰레이터의 동특성을 정확히 구하지 않아도 되며, 다입력계 슬라이딩 모드의 설계법인 계층제어법의 적용을 용이하게 하여 실시간 동시 제어가 수행 되어짐을 실험을 통해 보였다. 계층제어법의 적용시 우선순위의 계층이 슬라이딩 모드에 들어 오기까지는 비례제어기를 사용하는 하이브리드 제어(hybrid control)의 방식으로 제어함으로써 하위 순위 계층의 관절이 중력 및 타관절에 의한 영향을 받지 않도록 하였다. 이 때 우선 순위의 계층이 슬라이딩 모드에 들어 오는 판단기준에 따른 영향을 검토한 결과, 의사 슬라이딩 모드의 범위를 너무 크게 줄 경우 제어대상이 불안정해져 급격한 채터링 현상이 발생하므로 설계시 주의할 요구한다. 본 연구에서는  $|s_i| < \varepsilon = \$500$  (최대값에 대해 약 4%) 정도까지는 거의 안정된 슬라이딩 모드 제어가 이루어 짐이 확인되었다. 또한

목표각도와 출력각도와의 차가 허용오차범위 이내에 들어오면 불감대영역이 되도록 제어입력을 변경하여 줌으로 슬라이딩 모드 제어의 문제점이 되는 채터링을 제거하도록 하였으며, 제안한 방법이 부하변동 등에 의한 외란에도 강인한 제어(robust control)가 이루어짐을 실험을 통해서 확인 하였다. 실험에서는 제어기로서 고속 연산처리가 가능한 T.I.사의 DSP 를 사용하여 제어 시스템을 구성하므로 실시간 제어를 가능하게 하였고, 연산지연에 의한 채터링을 줄일 수 있었다.

본 연구에서 제안한 알고리즘은 로보트 매니퓰레이터의 동특성을 정확히 구하지 않아도 되며, 알고리즘의 적용이 쉽고, 부하변동 등에 의한 외란에도 강인성을 갖추고 있으면서 불감대영역의 설정으로 채터링을 줄일 수 있어, payload의 변화가 많은 다양한 작업을 요구하는 산업용 로보트에서의 활용이 기대 되어진다.

## 참 고 문 헌

- (1) Nishimoto, K., 1985, "DSP and Its Application to Robot Control", JRSJ, Vol. 7, No.3, pp.339~345.
- (2) 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.
- (3) Noritsugu, T., Wada, T. and Ishida, N., 1989, "Adaptive Variable Structure Control of Pneumatically Actuated Robot", Trans. of SICE, Vol. 25, No.2, pp.200~207.
- (4) Chen, Y.S., Ikeda, H., Mita, T. and Wakui, S., 1989, "Trajectory Control of Robot Arm Using Sliding Mode Control and Experimented Results", JRSJ, Vol.7, No. 6, pp.706~711
- (5) Noritsugu, T., Wada, T. and Takamitsu, T., 1990, "Hybrid Type Position and Force Control of a Pneumatic Robot with Improved Sliding Mode Control Method", Trans. of SICE, Vol.26, No.3, pp.331~338.
- (6) Lee, M.C and Aoshima, N., 1991, " Sliding Mode Control of Manipulator Whose Nonlinear Components are Regarded as External Disturbance", Proc. KACC'91, pp.286~291.
- (7) Utkin, V.I., 1978, " Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems", Mir Moscow
- (8) 原島, 橋本, 1985, "Sliding Mode とその應用 I, II", システムと制御, Vol.29, No.2, pp.94~103.
- (9) Itkis, U., 1976, "Control Systems of Variable Structure", John Wiley.
- (10) Lee, M.C. and Aoshima, N., 1989, "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.