

#### 4.2 궤도제어의 경우

목표치가 일정하지 않을 경우에는  $\dot{\theta}_{di}$ ,  $\ddot{\theta}_{di}$  가 0 이 아니므로 슬라이딩 모드의 존재조건을 만족시키기 위해서 식(8)을 사용해서 절한 제어입력량을 공급한다. 여기서 Table 1의 파라미터를 사용함으로 식(10d), (10e)로부터  $\beta$ ,  $\gamma$ 의 한계치가 얻어진다. 목표궤도를 정현파, 절환선의 기울기  $c=10$ ,  $\alpha=-0.8$ ,  $\beta=\gamma=-0.5$ ,  $M_{1L}=M_{1S}=-500$ ,  $M_2=-500$ ,  $T=1\text{ms}$ 로 준 실험결과를 Fig.9에 보인다. 다음에  $M_{1L}=-500$ ,  $M_{1S}=-200$ 으로 주고 나머지는 Fig.9의 조건과 같이

주어 실험을 한 결과를 Fig.10에 보인다. 이결과들의 위치 오차의 속도와 위상도(phase diagram)를 보면  $M_{1L}$ 을  $M_{1S}$ 와 같이 주는 것 보다  $M_{1L}$ 을  $M_{1S}$ 보다 크게 주는 것이 채터링을 작게하고, 수축한 후의 채터링도 줄이고 있음을 알 수가 있다.  $M_2$ 의 영향을 조사하기 위해서  $M_2=-200$ 으로 주고 나머지는 Fig.10과 같이 주어 실험을 행한 결과를 Fig.11에 보인다. 이것의 위상도를 보면  $M_2$ 가 적을 수록 오차가 큰 영역에서의 채터링이 줄어들고 있으나 수축 한 후에는 Fig.10과 크게 차이가 없음을 알 수가 있다.

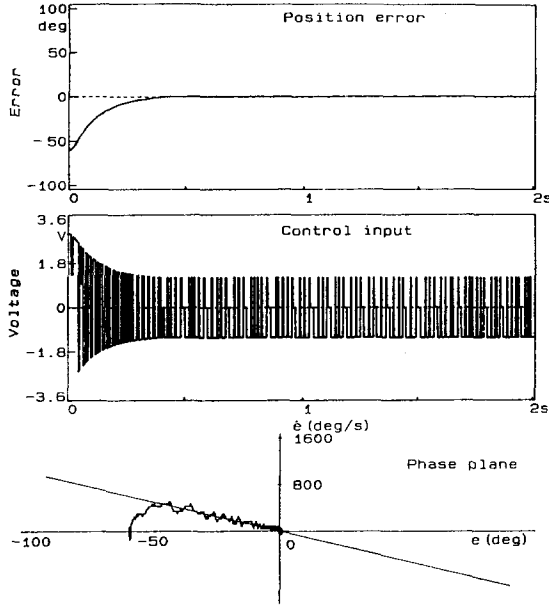


Fig.6 Experiment results ( $M_{1L}=M_{1S}=-500$ ,  $M_2=-500$ )

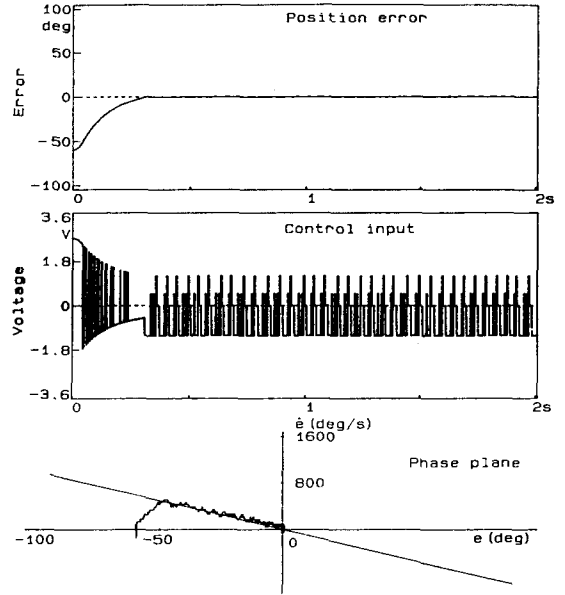


Fig.8 Experiment results ( $M_{1L}=500$ ,  $M_{1S}=-200$ ,  $M_2=-200$ )

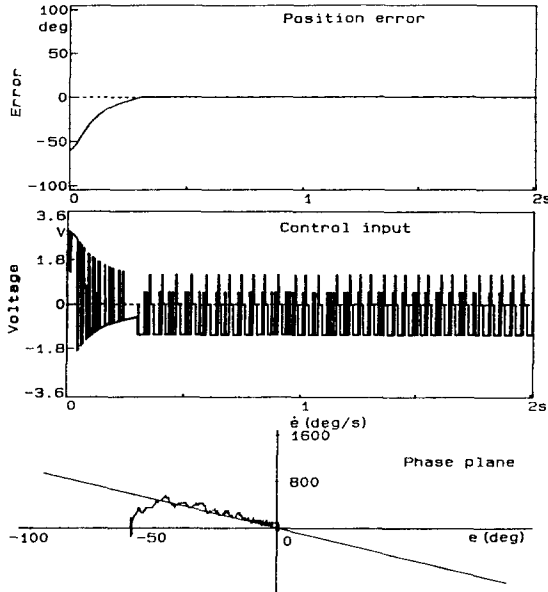


Fig.7 Experiment results ( $M_{1L}=-500$ ,  $M_{1S}=-200$ ,  $M_2=-500$ )

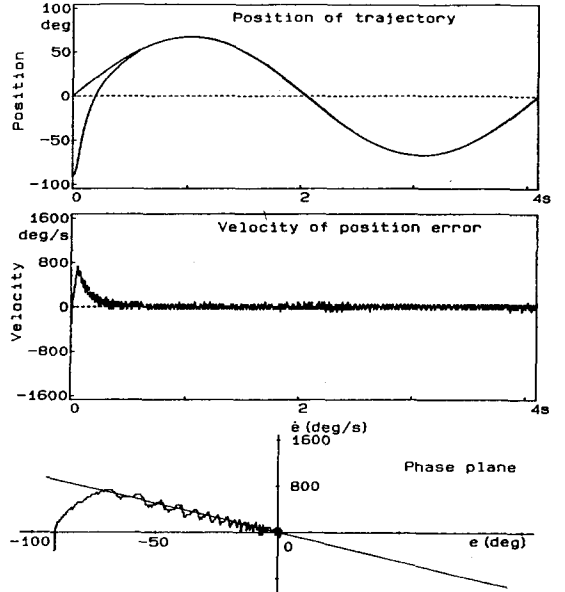


Fig.9 Experiment results ( $M_{1L}=M_{1S}=-500$ ,  $M_2=-500$ )

# 비선형 성분을 외란으로 간주했을때의 매니퓰레이터의 슬라이딩 모드제어

이 민 철

齊島 伸治

부산대학교 공과대학 기계공학과

즈쿠바대학교 물리공학과

## Sliding Mode Control of Manipulator Whose Nonlinear Components are Regarded as External Disturbance

Min-Cheol Lee

Nobuharu Aoshima

Dept. of Mechanical Eng.  
Pusan National University

Institute of Applied Physics  
University of Tsukuba

### ABSTRACT

This paper discusses sliding mode control of robot manipulators assuming that nonlinear terms, which are inertia term, Coriolis force term and centrifugal term, are external disturbances. We obtained the unknown parameter of its linear terms by Signal Compression Method. We propose a new control input algorithm to decrease chattering in the application of sliding mode control of manipulator whose nonlinear components are regarded as disturbances. In this experiments, we used DSP(Digital Signal Processor) controller to suppress chattering by obtaining a quick switching speed.

### 1. 서 론

로봇 매니퓰레이터의 운동방정식은 비선형이며, 마찰력의 영향 및 작업중에 있어서의 부하변동과 같은 외란의 영향이 있어 정확히 목표 궤도를 제어 하는 것은 일반적으로 어렵다. 최근 마이크로프로세서의 발달에 의해 매니퓰레이터의 비선형보상 제어에 DSP (Digital Signal Processor) 를 컨트롤러로 이용한 연구가 보고되고 있다.<sup>[1]</sup> 그러나, 일반적으로 매니퓰레이터의 자유도가 높으면 원심력과 코리올리(Coriolis) 힘의 항, 관성력의 항의 계산은 복잡하게 되며, 또한 파라미터의 추정오차, 측정 및 계산오차, 기계적 백래쉬(backlash) 등에 의해 보상토크의 계산자책도 반드시 정확히 행해진다고 보기는 어렵다.<sup>[2]</sup>

VSS(Variable Structure System) 이론에 기초를 둔 슬라이딩 모드 제어는 최근 중요시 되어지고 있는 강인성(Robust)을 갖춘 제어 이론으로서 마이크로프로세서의 발달과 함께 실현 가능하게 되어 다시 주목을 모으고 있다. 특히 슬라이딩 모드에 들어간 제어대상은 초평면에 구속 되므로 파라미터 변동·비선형성·노이즈 등에 대해 강인한 시스템을 실현할 수 있기 때문에 로봇 매니퓰레이터에 실제로 적용한 예가 있으나<sup>[4,5]</sup> 이 경우 매니퓰레이터의 자유도가 높으면 비선

형 요소가 복잡해지므로 슬라이딩 모드의 존재 조건을 만족하는 제어 입력과 절환 파라미터를 구하는 것이 용이하지는 않다.

매니퓰레이터와 서보계의 다이내믹스를 나타내는 미분방정식은 선형요소와 비선형요소의 합으로서 생각 할 수 있으므로, 본 연구에서는 매니퓰레이터의 비선형 요소를 외란으로 간주해 슬라이딩 모드를 적용하므로 매니퓰레이터의 자유도가 높아도 비교적 간단히 슬라이딩 모드의 존재 조건식으로부터 절환 파라미터가 구해지며, 실 시스템에 적용하기 쉬운 새로운 알고리즘을 제안한다. 이때 필요로 하게되는 선형부의 미지 파라미터는 신호 압축법(Signal Compression Method)에 의해 구해진다. 이 방법에 의하면 선형 요소와 비선형 요소를 분리 할 수가 있기 때문에 선형부의 미지 파라미터를 근사적으로 구할 수가 있다.<sup>[6]</sup>

외란을 억제하기 위하여 절환 제어 입력량을 종래의 방식대로 줄 경우 채터링(chattering) 현상이 크게 나타난다. 본 연구에서는 채터링 현상을 억제하기 위한 절환 제어 입력량을 구하는 새로운 알고리즘을 제안해 검토 한다. 슬라이딩 모드 제어에서는 가능한한 빠른 절환 주파수를 공급하므로써 채터링을 적게 할 수가 있다. 따라서 컨트롤러로서는 고속 연산처리가 가능한 DSP 를 사용해 제어 시스템을 구성한 후 실험적으로 검토 했다.

### 2. 슬라이딩 모드 제어

로봇 매니퓰레이터에 슬라이딩 모드 제어를 적용하기 위해서는 매니퓰레이터의 운동방정식이 필요로 하게된다.<sup>[7,8]</sup> 그러나, 이 운동방정식은 비선형 요소가 있어 복잡하며<sup>[2,3]</sup> 슬라이딩 모드에 들어가기 위한 절환 제어 입력의 절환 파라미터를 구하는 것은 용이하지 않다. 슬라이딩 모드에 들어 있는 제어 대상은 파라미터 변동, 비선형성, 외란 등에 대해 강인한 것을 이용해, 이하에서는 비선형 성분을 외란으로서 간주함으로써 슬라이딩 모드에 들어가기 위한 절환 제어 입력이 비교적 간단히 구해짐을 보이며 채터링을 줄이기 위한 새로운

알고리즘을 제안한다.

## 2.1 운동방정식의 간단화

로봇 매니플레이터의 운동방정식을

$$\Phi(\theta)\ddot{\theta} + c(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) = T \quad (1)$$

로 둔다.<sup>[2]</sup> 여기서, 매니플레이터의 자유도를  $n$  으로 두면  $\Phi(\theta)$  는 각 관절축의 등가 관성모멘트를 나타내는  $(n, n)$  행렬,  $c(\theta, \dot{\theta})$  는 원심력과 코리올리힘을 나타내는  $(n, n)$  행렬,  $g(\theta)$  는 중력에 의한  $n$  차원 벡터,  $T$  는 매니플레이터의 각 관절각에 공급하는 구동 토크를 나타내는  $n$  차원 벡터이다. 여기서 관성 모멘트 행렬의 대각 성분은 선형 성분과 비선형 성분의 합으로 볼 수 있다. 그 중 각 관절축을 회전축으로서 회전할 때 생기는 선형 성분의 관성 모멘트를  $\Phi_L$  , 그 외의 비선형 성분을  $\Phi_{NL}(\theta)$  로 두면 식(1)은

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

로 표현된다.

각 관절에 대한 모터의 생성 토크는 모터의 축 및 감속기에 관한 토크와 매니플레이터의 각 관절에 관한 구동 토크  $T$  의 합과 같기 때문에

$$J_M\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + T = k u \quad (3)$$

로 표현 될 수 있다. 여기서  $J_M$  는 모터의 축과 감속기로부터 이루어진 관성 모멘트의  $(n, n)$  대각선행렬,  $B$  는 모터 축과 감속기 및 부하축의 등가 점성 마찰계수인  $(n, n)$  대각선행렬,  $k$  는 모터 토크계수, 감속기의 감속비, 전기자 저항등에 의한  $(n, n)$  대각선행렬,  $u$  는 모터에 가하는 전압의  $n$  차원 벡터이다.  $T$  는 식(2)와 같은 구동 토크이다. 따라서 식(2)와 식(3)으로부터 로봇 매니플레이터와 서보계를 합친 다이나믹스를 나타내는 미분방정식을 구하면

$$\{(J_M + \Phi_L) + \Phi_{NL}(\theta)\}\ddot{\theta} + \{B + c(\theta, \dot{\theta})\}\dot{\theta} + g(\theta) = k u \quad (4)$$

으로 된다. 여기서 관성 모멘트의 비선형 요소, 원심력과 코리올리힘, 중력 등을 전부 외란으로 보고서 이것을  $F$  로 두면 식(4)는

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

로 간단화 할 수 있다. 여기서  $J$  는  $J_M$  과  $\Phi_L$  의 합으로 된  $(n, n)$  대각선 행렬이다. 식(5)는 선형요소 외란  $F$  가 가해진 것으로 생각 할 수 있다.

## 2.2 슬라이딩 모드 제어

슬라이딩 모드에 들어 가기 위해서는 슬라이딩 모드의 존재 조건을 만족 시키면 된다.<sup>[7,8,9]</sup> 식(5)는 외란이 가해진 형태로, 외란을 억제하기 위해서 제어 입력에 상태변수로서 외란  $F$  를 가하는 방법이 알려져 있다. 그 것에 의하면 외란에 의해 생기는 정상오차를 제거할 수 가 있다.<sup>[7,9]</sup> 실제의 제어계에서는 외란  $F$  의 절대치의 최대치를 알면 제어 입력에 부가 시키는 항으로서 일정한 값  $M$  을 줌으로서 제어가 행해지지만,  $M$  의 값에 따라 채터링의 크기가 달라지며  $M$  의 값

만으로서의 채터링을 줄일 수 가 없음이 확인 되었다.<sup>[11]</sup>

여기서는 매니플레이터의 비선형 성분을 외란으로서 취급함으로써 슬라이딩 모드 제어를 쉽게 적용할 수 있음을 보이고, 또한 외란을 억제하기 위한 값으로  $M$  대신 채터링을 줄이기 위한 새로운 알고리즘을 제시한다.

매니플레이터의 각 관절의 목표각도, 각속도, 각가속도를 각각  $\theta_{d1}$ ,  $\dot{\theta}_{d1}$ ,  $\ddot{\theta}_{d1}$ , 측정된 각도를  $\theta_1$  로 두어 그 추종 오차를

$$e_1 = \theta_1 - \theta_{d1}, \quad \dot{e}_1 = \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{d1} \quad (6)$$

로 두고, 슬라이딩 모드가 생기는 결환선을

$$s_1 = c_1 e_1 + \dot{e}_1 \quad (7)$$

로 둔다. 궤도제어를 행할때, 외란을 억제하기 위해서 다음과 같은 제어 입력

$$u_1 = \psi_{\alpha 1} e_1 + \psi_{\beta 1} \dot{e}_1 + \psi_{\gamma 1} \ddot{\theta}_{d1} \quad (8)$$

단,

$$\psi_{\alpha 1} = \begin{cases} \alpha_1 & \text{if } s_1 e_1 > 0 \\ -\alpha_1 & \text{if } s_1 e_1 < 0 \end{cases}$$

$$\psi_{\beta 1} = \begin{cases} u_{r1}^- = M_{11} + M_{21} \times f(e) & \text{if } s_1 > 0 \\ u_{r1}^+ = -M_{11} - M_{21} \times f(e) & \text{if } s_1 < 0 \end{cases}$$

$$f(e) = |e_1| + \frac{N}{|e_1| + \delta}$$

$$\psi_{\beta 1} = \begin{cases} \beta_1 & \text{if } s_1 \dot{\theta}_{d1} > 0 \\ -\beta_1 & \text{if } s_1 \dot{\theta}_{d1} < 0 \end{cases}$$

$$\psi_{\gamma 1} = \begin{cases} \gamma_1 & \text{if } s_1 \ddot{\theta}_{d1} > 0 \\ -\gamma_1 & \text{if } s_1 \ddot{\theta}_{d1} < 0 \end{cases}$$

을 제안한다. 여기서  $\psi_{\beta 1}$  와  $\psi_{\gamma 1}$  는 궤도제어를 행할때  $\dot{\theta}_{d1}$ ,  $\ddot{\theta}_{d1}$  에의한 영향으로 슬라이딩 모드의 존재조건으로부터 벗어나는 것을 제거하기 위한 입력이다. 슬라이딩 모드의 존재조건과 식(5), 식(7) 로 부터

$$\begin{aligned} s_1 \dot{s}_1 &= s_1(c_1 \dot{e}_1 + \ddot{e}_1) \\ &= s_1 \{c_1(s_1 - c_1 e_1) + \frac{1}{J_1} \{k_1 u_1 - B_1(\dot{e}_1 + \dot{\theta}_{d1}) - F_1\} - \ddot{\theta}_{d1}\} \\ &= s_1^2(c_1 - \frac{B_1}{J_1}) + s_1 e_1 (\frac{B_1}{J_1} c_1 + \frac{k_1}{J_1} \psi_{\alpha 1} - c_1^2) \\ &\quad + (\frac{k_1}{J_1} \psi_{\beta 1} - \frac{F_1}{J_1}) s_1 + (\frac{k_1}{J_1} \psi_{\beta 1} - \frac{B_1}{J_1}) s_1 \dot{\theta}_{d1} \\ &\quad + (\frac{k_1}{J_1} \psi_{\gamma 1} - 1) s_1 \ddot{\theta}_{d1} < 0 \end{aligned} \quad (9)$$

이 구해진다. 이 조건식을 만족하기 위해서는

$$c_1 - B_1/J_1 < 0 \quad (10a)$$

$$\begin{cases} k_1 \alpha_1 + B_1 c_1 - J_1 c_1^2 < 0 & , \quad s_1 e_1 > 0 \\ -k_1 \alpha_1 + B_1 c_1 - J_1 c_1^2 > 0 & , \quad s_1 e_1 < 0 \end{cases} \quad (10b)$$

$$\begin{cases} u_{r1}^- = M_{11} + M_{21} \times f(e) < F_1/k_1 & , \quad s_1 > 0 \\ u_{r1}^+ = -M_{11} - M_{21} \times f(e) > F_1/k_1 & , \quad s_1 < 0 \end{cases} \quad (10c)$$

$$\begin{cases} k_i \beta_i - B_i < 0, & s_i \dot{\theta}_{di} > 0 \\ -k_i \beta_i - B_i > 0, & s_i \dot{\theta}_{di} < 0 \end{cases} \quad (10d)$$

$$\begin{cases} k_i \gamma_i - J_i < 0, & s_i \ddot{\theta}_{di} > 0 \\ -k_i \gamma_i - J_i > 0, & s_i \ddot{\theta}_{di} < 0 \end{cases} \quad (10e)$$

로 주면 되므로 쉽게 구해짐을 알 수가 있다. 여기서 미지 파라미터인  $B_i, J_i$ 의 값을 알면 식 (10a, 10b, 10d, 10e)로부터  $c_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 의 값을 얻을 수 있다. 또한  $F_i$ 의 절댓값의 최대값을 알면 조건식 (10c)를 만족하는  $M_{1i}, M_{2i}$ 를 구할 수가 있다. 여기서  $M_{1i}$ 는

$$M_{1i} = \begin{cases} M_{1ei}, & s_{ie} < 0 \\ M_{1Li}, & s_{ie} > 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$|M_{1Li}| > |M_{1ei}| > \frac{1}{3} |M_{1Li}|$$

로 준다. 즉 Fig.1에 보이는 것 같이  $e_i$ 가 음의 값일 경우는  $s_i < 0$ 의 영역에서는  $u_{fi}^+$ 의 절댓값을 크게 ( $|u_{fi}^+|$ ) 주고,  $s_i > 0$ 의 영역에서는  $u_{fi}^-$ 의 절댓값을 작게 ( $|u_{fi}^-|$ ) 준다. 이 것에 의해 Fig.1의 양의 제어입력량 ( $u_{fi}^+$ )에서 음의 제어입력량 ( $u_{fi}^-$ )으로 변하는 시점에서 생기는 급격한 속도의 변화(가속에서 감속으로 변화)를 줄일 수 있으며, 그만큼 채터링의 영향을 줄일 수가 있다. 마찬가지로  $e_i$ 가 양의 값일 경우에도  $s_i > 0$ 의 영역에서는 음의 제어입력량  $u_{fi}^-$ 의 절댓값을 크게 ( $|u_{fi}^-|$ ),  $s_i < 0$ 의 영역에서는 양의 제어입력량  $u_{fi}^+$ 의 절댓값을 작게 ( $|u_{fi}^+|$ ) 줌으로 채터링을 줄일 수가 있다. 초기오차가 클 경우  $M_{2i} \times f(e)$ 가 크지므로  $M_{1i}$ 는 상대적으로 작게 주어도 되며 오차가 수축하게 됨에 따라  $M_{2i} \times f(e)$ 의 값도 작게 되므로 채터링도 줄이는 역할을 한다. 또한 목표값에 거의 수축한 후 오차가 증가하는 것은 외란요소가 증대하는 것으로 생각할 수 있으므로 오차가 적을 때( $\epsilon \approx 0$ )에는  $f(\epsilon) \approx N/\delta$ 이므로 외란에 의한 정상 오차를 줄일 수가 있다. 즉 오차의 크기에 따라 적절한 제어입력량을 가감해줌으로 채터링을 줄이고 수축 속도도 빨리 해 줄 수 있다.

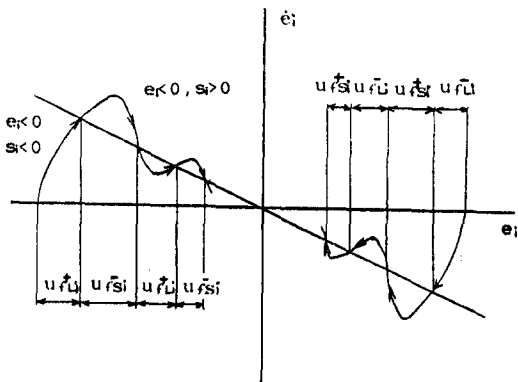


Fig.1 Sliding mode control in phase plane

### 3. 로보트 매니퓰레이터의 제어계와 파라미터의 추정

#### 3.1 제어계

절환 주파수를 무한대로 줄 경우 이상적인 슬라이딩 모드 제어기가 가능하지만 현실적인 제어계는 디지털 시스템 이므로 연산지연에 의한 채터링이 문제가 된다. 최근에는 이러한 문제점을 개선 하기위해 빠른 프로세서를 이용하여 대처하기 시작하고 있다.<sup>[10]</sup> 본 실험에서는 T.I 사의 TMS 32020을 사용한 DSP 보드를 제작해 제어기로서 사용하므로 절환 주파수를 높여, 채터링의 감소를 꾀했다. 실험에서는 3자유도를 가진 일본의 다이킨공업(주)의 미니로보트를 이용했다. 제어계의 구성을 Fig.2에 보인다. 미니로보트의 각관절의 각도는 포텐서미터로부터 전압으로 얻어지며 각속도는 차분방정식을 이용해 제어기(DSP) 내에서 계산한다. 이때 샘플링 주기는 최대 0.5 ms 까지 줄 수 있도록 했다.

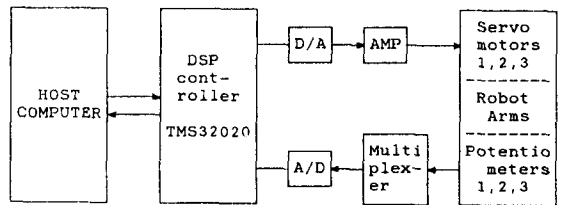


Fig.2 Control systems of robot manipulator

#### 3.2 신호압축법에 의한 파라미터의 추정

슬라이딩 모드를 적용할 경우, 미지파라미터의 값은 정확히 몰라도 근사치 또는 그 변동범위만 알면 된다.<sup>[7]</sup> 신호압축법에서는 임펄스 파형을 시간적으로 늘린 시험신호를 준비해 그것을 계에 입력해, 출력응답을 측정후, 그 응답을 압축필터에 통과 시킴으로 임펄스 응답이 얻어진다. 계에 비선형성분이 있는 경우에는 압축필터에 의해 선형성분은 압축되어 임펄스 응답으로 되지만 비선형 성분은 압축되지 않고 전체의 시간영역에 걸쳐서 나타나기 때문에 선형 성분의 임펄스 응답만을 취할 수 있다. 이와같이 구한 임펄스 응답의 보드선도와 가정한 선형 성분의 Bode 선도의 비교에 의해 선형부의 미지파라미터를 근사적으로 구할 수가 있다.<sup>[6]</sup>

여기서는 매니퓰레이터를 식(5)와 같이 2차의 선형계에 의한  $F$ 가 더해진 것으로 가정해, 선형부의 미지파라미터인  $J_i$ 와  $B_i$ 를 구한다. 매니퓰레이터에 입력하는 시험신호를 Fig.3에 보인다. 실험에서는 비례제어루프를 이용해 측정을 시도했다. 이때 선형계의 임출력 전달함수는

$$\frac{\Theta(s)}{\Theta_d(s)} = \frac{k_i k_{pi}}{s(J_i s + B_i) + k_i k_{pi}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (12)$$

단,  $\omega_n = \sqrt{k_i k_{pi} / J_i}$ ,  $k_{pi}$ :  $i$ 관절에 대한 비례 게인

$\xi = B_i / 2\sqrt{k_i k_{pi} J_i}$ ,  $k_i$ : 식(3)의  $k$ 의  $i$ 관절의 계수

로 주어진다. 여기서의  $s$  는 라플라스 변환의  $s$  이다.

실험 결과로서 측정된 출력파형, 압축필터에 의한 압축파형, 비선형성분을 제거한 파형을 Fig.4 에 보인다. Fig.4(c)

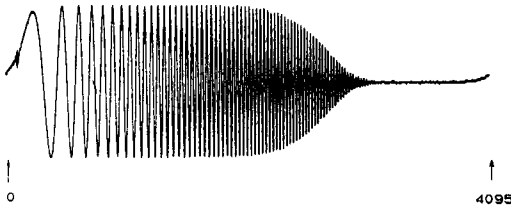


Fig.3 The test signal of the Signal Compression Method

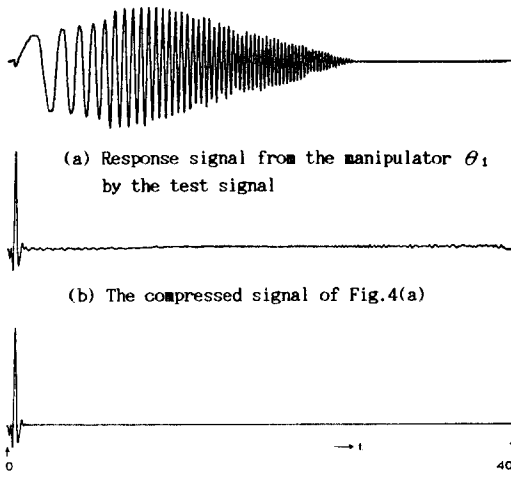


Fig.4 Experiment results by Signal Compression Method

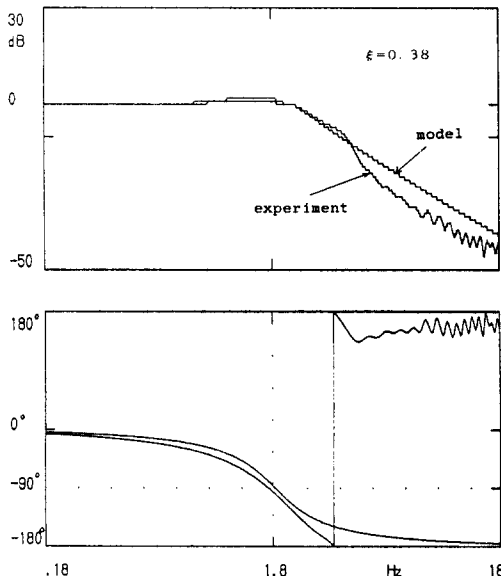


Fig.5 Comparison of Bode diagrams between model and experiment

로부터 구한 Bode 선도과 모델식(12) 에 적당한 파라미터를 주었을때의 Bode 선도과 비교해 가장 일치했을때의 파라미터가 구하려고 하는 미지파라미터의 근사치이다. 그 Bode 선도의 비교를 Fig.5 에 보인다. 각관절마다 구한 미지 파라미터의 근사치를 Table 1 에 보인다.

Table 1 Estimated parameters

Parameter	$\omega_n$ [rad/s]	$\xi$	$J_i$ [kg · m <sup>2</sup> ]	$B_i$ [N · s · m]
$\theta_1$	$3.6\pi$	0.38	$5.773 \times 10^{-5}$	$4.962 \times 10^{-4}$
$\theta_2$	$6\pi$	0.8	$2.099 \times 10^{-5}$	$6.332 \times 10^{-4}$
$\theta_3$	$4\pi$	0.45	$4.724 \times 10^{-5}$	$5.342 \times 10^{-4}$

#### 4. 실험결과및 고찰

##### 4.1 목표치가 일정한 경우의 슬라이딩 모드 제어

목표치가 일정할때  $\dot{\theta}_{d1} = \ddot{\theta}_{d1} = 0$  이므로 식(7) 은

$$u_1 = \psi_{q1} e_1 + \psi r_1 \quad (8)'$$

로 된다. Table 1 의 파라미터를 사용하므로 식(10a), 식(10b) 로 부터  $c_1, \alpha_1$  의 한계치가 얻어진다. 단, 식(3), 식(10) 의  $k_1$  는 미니 로봇의 사양으로부터  $0.05344$  [N·m/V] 로 얻어진다. 식(9c) 에서  $M_{11}, M_{21}$  의 한계치는 외란  $F_i$  의 절대값을 알면 구해지지만 본 실험에서는 경험적으로 주어  $M_{11}, M_{21}$  의 성질을 조사했다. 관성 모멘트의 값이 큰 링크 3 에 대해서  $M_{1L}$  과  $M_{1S}$  의 값을 같이 주었을때의 실험 결과를 Fig.6 에 보인다.  $M_{1S}$  보다  $M_{1L}$  의 값을 크게 주었을때의 실험 결과를 Fig.7 에 보인다. 여기서 샘플링 주기는 1 ms 로 주었다. 그결과를 보면  $M_{1S}$  보다  $M_{1L}$  의 값을 크게 줌으로 전환선에서의 급격한 속도 변화가 줄어들어 준 것을 알 수 있고, 또한 수속한 후에도 절한 제어 입력이 비선형 성분에 대해 자동적으로 보상되도록 주어짐을 알 수가 있다.  $M_2$  의 값을 변화시켰을 때의 실험결과를 Fig.8 에 보인다. 이 결과를 보면 오차가 큰영역에서는  $M_2$  의 값이 적을수록 채터링이 줄어들음을 알 수가 있다. 이것은 외란에 대응하기 위한  $u_{r1}$  의 값이 정상오차를 제거할 수 있을 정도의 크기만 주면 되며, 정상오차를 제거 하기 위해  $u_{r1}$  의 값을 크게 주면 채터링도 증가 함을 의미 한다. 따라서  $u_{r1}$  의 값을 일정하게 주는 것보다 외란의 크기에 따라 조절 하면 채터링을 줄일 수 있음을 알 수가 있다. 즉 제안한 알고리즘의  $M_{21} \times f(e)$  의 크기가 외란의 크기에 따라 가감되어 채터링을 줄이는 역할을 하고 있음을 알 수가 있다. 또한 수속한 지점에서 부하의 증가 등으로 인해 외란이 크게 되어 오차가 증가하게 되면  $M_{21} \times f(e)$  의 값이 크게 되어 자동적으로 오차를 줄이게 된다.

#### 4.2 궤도제어의 경우

목표치가 일정하지 않을 경우에는  $\dot{\theta}_{di}$ ,  $\ddot{\theta}_{di}$  가 0 이 아니므로 슬라이딩 모드의 존재조건을 만족시키기 위해서 식(8)을 사용해서 절한 제어입력량을 공급한다. 여기서 Table 1의 파라미터를 사용함으로 식(10d), (10e)로부터  $\beta$ ,  $\gamma$ 의 한계치가 얻어진다. 목표궤도를 정현파, 절한선의 기울기  $c=10$ ,  $\alpha=-0.8$ ,  $\beta=\gamma=-0.5$ ,  $M_{1L}=M_{1S}=-500$ ,  $M_2=-500$ ,  $T=1\text{ms}$ 로 준 실험결과를 Fig.9에 보인다. 다음에  $M_{1L}=-500$ ,  $M_{1S}=-200$ 으로 주고 나머지는 Fig.9의 조건과 같이

주어 실험을 한 결과를 Fig.10에 보인다. 이결과들의 위치 오차의 속도와 위상도(phase diagram)를 보면  $M_{1L}$ 을  $M_{1S}$ 와 같이 주는 것 보다  $M_{1L}$ 을  $M_{1S}$ 보다 크게 주는 것이 채터링을 작게하고, 수축한 후의 채터링도 줄이고 있음을 알 수가 있다.  $M_2$ 의 영향을 조사하기 위해서  $M_2=-200$ 으로 주고 나머지는 Fig.10과 같이 주어 실험을 행한 결과를 Fig.11에 보인다. 이것의 위상도를 보면  $M_2$ 가 적을 수록 오차가 큰 영역에서의 채터링이 줄어들고 있으나 수축 한 후에는 Fig.10과 크게 차이가 없음을 알 수가 있다.

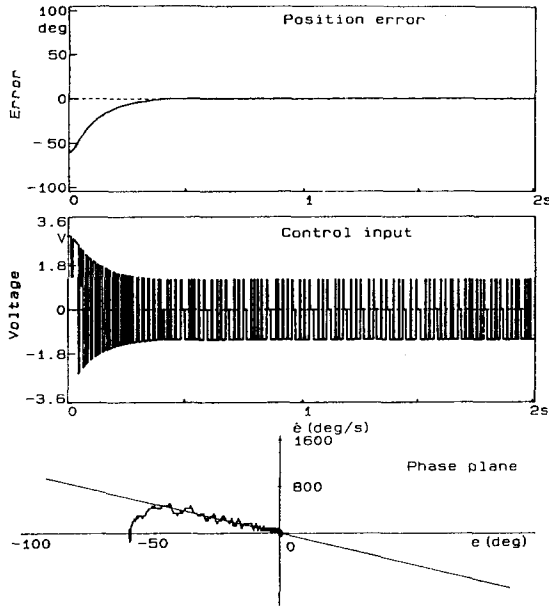


Fig.6 Experiment results ( $M_{1L}=M_{1S}=-500$ ,  $M_2=-500$ )

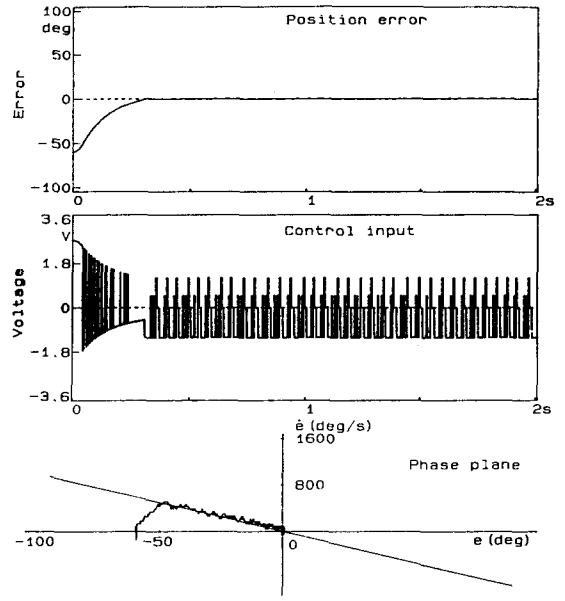


Fig.8 Experiment results ( $M_{1L}=500$ ,  $M_{1S}=-200$ ,  $M_2=-200$ )

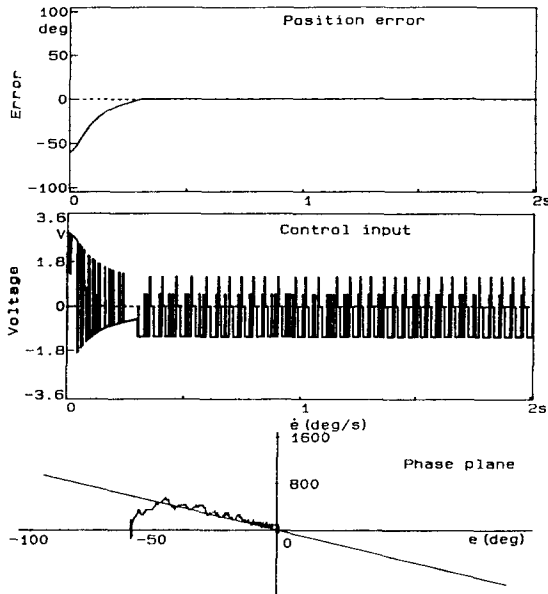


Fig.7 Experiment results ( $M_{1L}=-500$ ,  $M_{1S}=-200$ ,  $M_2=-500$ )

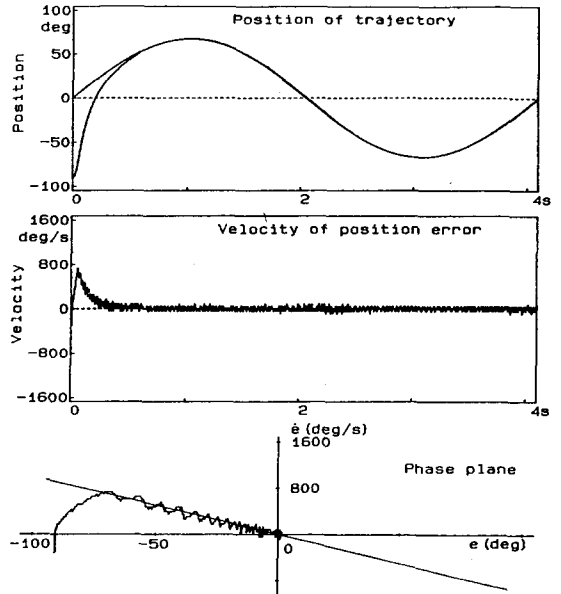


Fig.9 Experiment results ( $M_{1L}=M_{1S}=-500$ ,  $M_2=-500$ )

이상의 실험 결과를 정리하면 목표치가 일정하지 않고 임의의 궤도로 주어 질 경우에도  $M_1$  을  $M_{1L}(s_{ie1} > 0)$  과  $M_{1S}(s_{ie1} < 0)$  로 나누어 줌으로 수축성이 좋아져, 수축 속도도 빨라지면서 채터링도 줄일 수 있음이 확인 되었다.  $M_2$  의 값은 외란에 대응하기 위해서 크게 주면 되나 위치오차가 큰 곳에서는 채터링을 크게 하므로 수축성과 채터링을 동시에 고려하여 적절한 값을 줄 필요가 있다.

### 5. 결 론

슬라이딩 모드 제어가 파라미터의 변동, 외란등에 강한 것

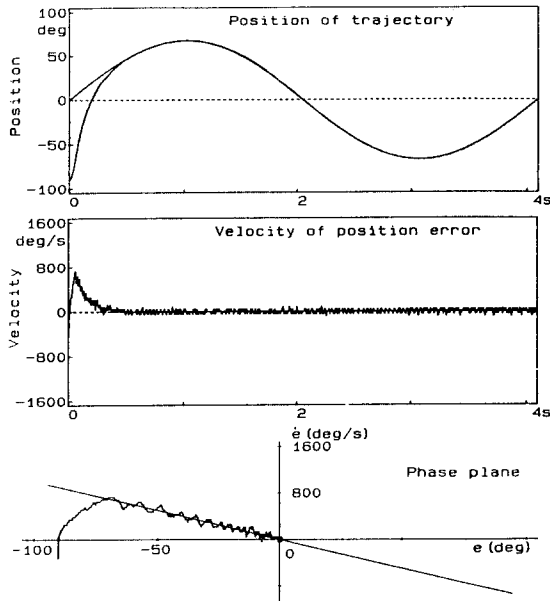


Fig.10 Experiment results ( $M_{1L}=-500$ ,  $M_{1S}=-200$ ,  $M_2=-500$ )

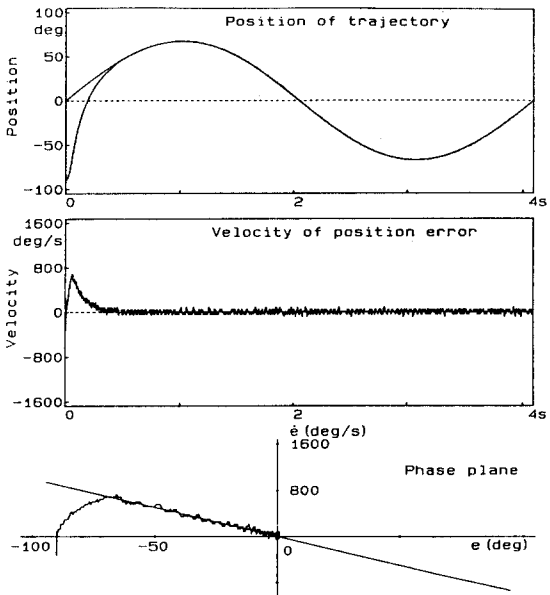


Fig.11 Experiment results ( $M_{1L}=-500$ ,  $M_{1S}=-200$ ,  $M_2=-200$ )

에 착목해, 로봇 매니퓰레이터의 비선형성분을 외란으로서 간주함으로써 매니퓰레이터의 다이내믹스를 나타내는 미분방정식을 간단화 할 수가 있으며, 슬라이딩 모드 제어를 행할 경우 매니퓰레이터의 자유도가 증가해도 절한 제어입력량의 파라미터의 한계치가 비교적 간단히 구해지는 것을 보였다. 가정한 미분방정식의 선형부의 미지 파라미터는 신호압축법에 의해 구해짐을 보였고, 슬라이딩 모드의 존재조건으로부터 제어 입력의 절한 파라미터가 구해진다. 비선형성분을 외란으로서 간주함으로써 생기는 채터링, 오차동을 감소하기 위해 새로운 알고리즘을 제안해, 궤도제어를 행할 경우에도  $M_1$ ,  $M_2$  를 적절히 줌으로써 채터링을 감소시킬 수 있었다. 외란  $F$  의 절대치의 최대치를 알면  $M_1$ ,  $M_2$  의 한계치가 구해지지만 현실적으로는 음의 값을 경험적으로 주어 적용할 수 있다.

실험에서는 어느정도 이상은 채터링이 줄지않았다. 이것은 각도의 측정으로서의 로터리 엔코더(rotary encode), 각 속도로서는 타코제너레이터(tachogenerator) 등의 속도센서를 이용함으로써 개선 되어질 것으로 생각 되며, 불감대의 영역을 도입함으로써 채터링을 줄이는 것과 다축 동시 제어에 관한 연구 및 외란이 크게 변했을 때의  $M_1$  의 값을 자동으로 조절하는 방법에 관한 연구는 남은 과제이다.

### 참 고 문 헌

- 1) K. Nishimoto, "DSP and Its Application to Robot Control", JRSJ, Vol. 7, No.3, pp. 339-345, 1985.
- 2) 有本 卓, "ロボ트制御の基礎", コンピュートロ-ル, No. 9, pp.21-34, 1985.
- 3) R.P.Paul, "Robot Manipulators", MIT Press, 1981.
- 4) F.Harashina and H.Hashimoto, K.Maruyama, "Sliding Mode Control of Manipulator with Time-Varying Switching Surfaces", Trans. of SICE, Vol.22, No.3, pp.335-342, 1986.
- 5) T.Noritsugu, T.Wada and N.Ishida, "Adaptive Variable Structure Control of Pneumatically Actuated Robot", Trans. of SICE, Vol.25, No.2, pp.200-207, 1989.
- 6) 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.
- 7) 原島, 橋本, "Sliding Mode とその應用 I, II", システムと制御, Vol.29, No.2, pp.94-103, 1985.
- 8) K.D.Young, "Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems", IEEE Trans. Systems, M. and C., Vol.SMC-8, No.2, pp.251-259, 1978.
- 9) U.Itkis, "Control Systems of Variable Structure", John Wiley, 1976.
- 10) H.Hashimoto and F.Harashina, "Digital Servo System Using VSS", JRSJ, Vol.7, No.3, pp.231-236, 1989.
- 11) M.C.Lee and N.Aoshima, "Identification of Robot Manipulator by Signal Compression Method and Sliding Mode Control", Proc. SICE'89, pp.751-752, 1989.