

〈論 文〉

# 슬라이딩 모드를 이용한 로봇 매니플레이터의 실시간 제어에 관한 연구

이민철\* · 靑島伸治\*\*

(1992년 3월 3일 접수)

## Study on Real Time Control of Robot Manipulator Using Sliding Mode

Min Cheol Lee and Nobuharu Aoshima

**Key Words :** Real Time Control(실시간 제어), Nonlinear Term(비선형요소), External Disturbance(외란), Sliding Mode(슬라이딩 모드), Robust Control(강인한 제어), Robot Manipulator(로봇 매니플레이터), Signal Compression Method(신호압축법), Digital Signal Processor(디지털 신호처리기)

### Abstract

This paper discusses about real time control applying sliding mode to robot manipulators whose nonlinear terms, which are inertia term, Coriolis force term and centrifugal force mterm, 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 are external disturbance. By simplifying that equation, we could easily obtain a control input which satisfy sliding mode. We proposed a new control input algorithm to decrease chattering in the application of sliding mode control of manipulator whose nonlinear elements are regarded as disturbances. We could take impulse response of linear elements of dynamic equations of a robot manipulator and servo system by Signal Compression Method. So then, we could obtain the unknown parametes of its linear lements, which are used to obtain switching parameter satisfying sliding mode, by Signal Compression Method. In this experiments, we used DSP(Digital Signal Processor) controller to suppress chattering by obtaining a quick switching speed and to carry out real time control.

### 1. 서 론

로봇 매니플레이터의 운동방정식은 비선형이며, 마찰력의 영향 및 작업중에 있어서의 부하변동 등에 의한 외란의 영향이 있어 정확히 목표궤도를 제어하는 것은 일반적으로 어렵다. 최근 마이크로

프로세서의 발달에 의해 매니플레이터의 비선형 보상 제어에 DSP(digital signal processor)를 콘트롤러로 이용해 실시간으로 제어한 연구가 보고되고 있다<sup>(1)</sup>. 그러나, 일반적으로 매니플레이터의 자유도가 높으면 원심력과 코리올리(coriolis)힘의 항, 관성력의 항의 계산은 복잡하게 되며, 또한 파라미터의 추정오차, 측정 및 계산오차, 기계적 백래쉬(backlash) 등에 의해 보상토크의 계산자세도 반드시 정확히 행해진다고 보기는 어렵다.<sup>(2)</sup>

\*정회원, 부산대학교 기계공학과

\*\*일본 쓰꾸바대학교 공학연구과 물리공학과

VSS(variable structure system) 이론에 기초를 둔 슬라이딩 모드 제어는 최근 중요시 되어지고 있는 강인성(robustness)을 갖춘 제어 이론으로서 마이크로프로세서의 발달과 함께 실현 가능하게 되어 다시 주목을 모으고 있다. 특히 슬라이딩 모드에 들어간 제어대상은 초평면에 구속되므로 파라미터 변동·비선형성·노이즈 등에 대해 강인한 시스템을 실현할 수 있기 때문에 동특성이 비선형인 로봇 매니플레이터에 실제로 적용한 예<sup>(4,5)</sup>가 있으나 이 경우 매니플레이터의 자유도가 높으면 비선형요소가 복잡해지므로 슬라이딩 모드의 존재 조건을 만족하는 제어 입력과 절환 파라미터를 구하는 것이 용이하지는 않다. 그런데 산업계에서는 로봇의 제어기로서 적용하기 쉬운면서도 외란, 파라미터 변동 등에 강인하며 추종오차가 작아 신뢰도가 높은 제어 알고리즘을 필요로 한다.

본 연구에서는 실용성을 중시하는 산업계의 요구에 부응하여 해석이 용이하면서도 강인성을 갖춘 제어 알고리즘을 제안하여 실시간 제어가 가능한 시스템을 구축해 실험적으로 검토하였다. 매니플레이터와 서보계의 다이내믹스를 나타내는 미분방정식은 선형요소와 비선형요소의 합으로 생각할 수 있다. 여기서 매니플레이터의 비선형요소를 외란으로 간주해 슬라이딩 모드를 적용하므로 매니플레이터의 자유도가 높아도 비교적 간단히 슬라이딩 모드의 존재 조건식으로 부터 절환 파라미터가 구해져 슬라이딩 모드를 발생시킬 수 있는 알고리즘을 도출할 수가 있음을 보였다. 비선형요소를 외란으로 간주하였을때 로봇 매니플레이터가 슬라이딩 모드에 들어갈 수 있도록 외란에 대응하는 절환 제어입력을 종래의 방식대로 부가하면 이 제어입력으로 인해 채터링(chattering)이 증가하게 됨이 확인되었으며,<sup>(11)</sup> 이러한 채터링을 줄일 수 있도록 새로운 절환 제어입력의 알고리즘을 도출하여 검토하였다.

슬라이딩 모드에 들어가기 위한 제어입력의 절환 파라미터의 경계치를 구하기 위해서는 선형요소의 미지 파라미터인 관성모멘트, 점성계수 등의 근사값을 동정해야 한다. 최소자승법(least square method)이나 적응디지털필터(adaptive digital filter)에 의한 파라미터의 동정은 선형시스템에서는 좋은 결과가 얻어지나, 로봇 매니플레이터와 같이 비선형요소가 포함되면 추정된 파라미터의 오차가 커서 일반적으로 미지 파라미터의 추정값으로

사용하기에는 곤란하다. 그런데, 시스템의 동특성을 얻기 위해 사용되어지는 신호압축법(signal compression method)을 이용하면 선형요소와 비선형요소의 응답을 분리할 수 있어 선형요소의 임펄스응답만을 얻을 수 있고, 구한 임펄스응답을 이용해 미지 파라미터를 근사적으로 구할 수 있다.<sup>(6)</sup> 본 연구에서는 슬라이딩 모드에 들어가기 위한 절환 파라미터의 경계치를 구하는데 필요한 선형요소의 미지 파라미터를 신호압축법에 의해 구한 후 슬라이딩 모드 제어에 적용하였다.

슬라이딩 모드 제어에서는 빠른 절환 주파수를 공급하므로써 연산 지연에 의한 채터링을 감소시킬 수 있다. 따라서 실험에서는 제어기로서 고속연산처리가 가능한 T.I.사의 DSP를 사용해 제어 시스템을 구성하여 실시간 제어가 가능하게 하였고, 절환 주파수를 높여줌으로 연산 지연에 의한 채터링을 감소시킬 수 있도록 하였다.

## 2. 슬라이딩 모드 제어

로봇 매니플레이터에 슬라이딩 모드 제어를 적용하기 위해서는 매니플레이터의 운동방정식을 필요로 한다.<sup>(7,8)</sup> 그러나, 이 운동방정식은 비선형요소가 있어 복잡하여<sup>(2,3)</sup> 슬라이딩 모드에 들어가기 위한 제어 입력의 절환 파라미터를 구하는 것은 용이하지 않다. 슬라이딩 모드에 들어있는 제어 대상은 파라미터 변동, 비선형성, 외란 등에 대해 강인한 것을 이용해, 이하에서는 비선형요소를 외란으로 간주하므로 슬라이딩 모드에 들어가기 위한 절환 제어 입력이 비교적 간단히 구해짐을 보이며, 비선형요소를 외란으로 간주하여도 채터링을 줄일 수 있는 알고리즘을 제안한다.

### 2.1 운동방정식의 간단화

회전하는 관절축으로 구성된 로봇 매니플레이터의 동특성을 나타내는 운동방정식은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.<sup>(2)</sup>

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

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  $(n, n)$  행렬이다.  $g(\theta)$ 는 중력에 의한  $n$ 차원 벡터,  $T$ 는 매니플레이터의 각 관절각에 공급하는

구동 토크를 나타내는  $n$ 차원 벡터이다. 관성 모멘트 행렬의 대각선 요소는 선형요소와 비선형요소의 합으로 볼 수 있다. 그 중 각 관절축을 회전축으로 하여 회전할 때 생기는 선형요소의 관성 모멘트를  $\Phi_L$ , 그 외의 비선형 성분을  $\Phi_{NL}(\theta)$ 로 두면 식(1)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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

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

여기서  $J_M$ 은 모터의 축과 감속기로부터 이루어진 관성 모멘트의  $(n, n)$  대각선행렬,  $B$ 는 모터축과 감속기 및 부하축의 등가 점성 마찰계수인  $(n, n)$  대각선행렬,  $k$ 는 모터 토크계수, 감속기의 감속비, 전기자 저항 등에 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 로봇트 매니플레이터와 서보제를 합한 다이내믹스를 나타내는 미분방정식을 구하면 다음과 같다.

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

해석을 간단화하기 위하여 식(4)에서 관성 모멘트의 비선형요소, 원심력과 코리올리힘, 중력 등을 전부 외란으로 간주하여  $F$ 로 두면 식(4)를 다음과 같이 간단화시킬 수 있다.

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

여기서  $J$ 는  $J_M$ 과  $\Phi_L$ 의 합으로 된  $(n, n)$  대각선행렬이다. 식(5)는 선형요소외에 의한  $F$ 가 가해진 것으로 생각할 수 있다.

### 2.2 슬라이딩 모드 제어

제어대상이 슬라이딩 모드에 들어가기 위해서는 슬라이딩 모드의 존재조건을 만족시키면 된다.<sup>(7,8,9)</sup> 식(5)는 외란이 가해진 형태로, 외란을 억제하기 위해서 제어입력에 상태변수로써 외란  $F$ 를 가하는 방법이 알려져 있다. 이 방법에 의하면 외란에 의해 생기는 정상오차를 제거할 수 있다.<sup>(7,9)</sup> 실제의 제어계에서는 외란  $F$ 의 절대값의 최대값을 알면

제어 입력에 부가시키는 항으로써 슬라이딩 모드를 만족시키는 일정한 값  $M$ 을 줌으로써 제어가 행해지지만,  $M$ 의 값에 따라 채터링의 크기가 달라지며 외란을 억제하는 입력으로  $M$ 의 값 만으로서는 채터링을 줄일 수가 없음이 확인되었다.<sup>(11)</sup>

여기서는 매니플레이터의 비선형요소를 외란으로 간주함으로써 슬라이딩 모드 제어를 쉽게 적용할 수 있음을 보이고, 또한 외란을 억제하기 위하여 부가하는 제어 입력으로 일정한 값  $M$  대신 외란에 대응하면서도 채터링을 줄일 수 있는 새로운 알고리즘을 제시한다. 매니플레이터의 제  $i$ 번째 관절의 목표각도, 각속도, 각각속도를 각각  $\theta_{di}$ ,  $\dot{\theta}_{di}$ ,  $\ddot{\theta}_{di}$ 로 두고, 측정된 각도를  $\theta_i$ 로 두면 추종오차  $e_i$ , 오차의 속도  $\dot{e}_i$ , 오차의 가속도  $\ddot{e}_i$ 는 다음과 같다.

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

매니플레이터의 제  $i$ 번째 제어 입력  $u_i$ 와 절환선  $s_i$ 를

$$u_i = \begin{cases} u_i^+ & \text{if } s_i > 0 \\ u_i^- & \text{if } s_i < 0 \end{cases}, \quad s_i = c_i e_i + \dot{e}_i \quad (7)$$

로 두면 슬라이딩 모드의 존재조건과 식(5), 식(7)로부터

$$\begin{aligned} s_i \dot{s}_i &= s_i (c_i \dot{e}_i + \ddot{e}_i) \\ &= s_i (c_i (s_i - c_i e_i) + \frac{1}{J_i} (k_i u_i - B_i (\dot{e}_i + \dot{\theta}_{di}) - F_i - \ddot{\theta}_{di})) \\ &= s_i^2 (c_i - \frac{B_i}{J_i}) + s_i (- (c_i - \frac{B_i}{J_i}) c_i e_i \\ &\quad + \frac{k_i u_i}{J_i} - \frac{B_i}{J_i} \dot{\theta}_{di} - \frac{F_i}{J_i} - \ddot{\theta}_{di}) < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

의 관계가 얻어진다. 식(8)을 만족하기 위해서는  $c_i < B_i/J_i$  일때

$$\frac{k_i u_i^+}{J_i} < (c_i - \frac{B_i}{J_i}) c_i e_i + \frac{F_i}{J_i} + \frac{B_i}{J_i} \dot{\theta}_{di} + \ddot{\theta}_{di} \quad \text{if } s_i > 0 \quad (9a)$$

$$\frac{k_i u_i^-}{J_i} > (c_i - \frac{B_i}{J_i}) c_i e_i + \frac{F_i}{J_i} + \frac{B_i}{J_i} \dot{\theta}_{di} + \ddot{\theta}_{di} \quad \text{if } s_i < 0 \quad (9b)$$

로 주면 되고, 이 때 식(8)은 항상 음의 값이 되어 슬라이딩 모드가 존재하게 된다. 여기서 식(9)를 만족시키는 제어입력을 다음과 같이 제안한다.

$$u_i = \phi_{ai} e_i + \phi_{fi} + \phi_{\dot{\theta}_{di}} \dot{\theta}_{di} + \phi_{\ddot{\theta}_{di}} \ddot{\theta}_{di}$$

$$\begin{aligned} \text{단, } \psi_{ai} &= \begin{cases} \alpha_i & \text{if } s_i e_i > 0 \\ -\alpha_i & \text{if } s_i e_i < 0 \end{cases} \\ \psi_{fi} &= \begin{cases} u_{fi}^- & \text{if } s_i > 0 \\ u_{fi}^+ & \text{if } s_i < 0 \end{cases} \\ \psi_{\theta i} &= \begin{cases} \beta_i & \text{if } s_i \dot{\theta}_{di} > 0 \\ -\beta_i & \text{if } s_i \dot{\theta}_{di} < 0 \end{cases} \\ \psi_{\gamma i} &= \begin{cases} \gamma_i & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} > 0 \\ -\gamma_i & \text{if } s_i \ddot{\theta}_{di} < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)은 모델의 간단화에 의해 식(9)로부터 비교적 용이하게 도출됨을 알 수 있다. 여기서  $\psi_{\beta i}$ 와  $\psi_{\gamma i}$ 는 케도제어를 행할때  $\dot{\theta}_{di}$ ,  $\ddot{\theta}_{di}$ 에 의한 영향으로 슬라이딩 모드의 존재조건으로부터 벗어나는 것을 제거하기 위한 입력이다. 외란  $F_i$ 에 대응하기 위하여 부가하는 조작량  $\psi_{fi}$ 를 일정한 값  $M$ 으로 주면 채터링이  $M$ 의 크기에 좌우되나, 외란의 크기에 대응하여  $\psi_{fi}$ 를 자동적으로 조절할 수 있다면 채터링을 줄일 수가 있다. 이러한 채터링을 줄이기 위한 알고리즘을 다음과 같이 제안한다.

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

$$\text{단, } (f(e_i)) = |e_i| + \frac{N}{|e_i| + \delta} \quad (11)$$

식(11)에서 초기오차가 클 경우  $M_{2i} \times f(e_i)$ 가 커지므로  $M_{1i}$ 는 상대적으로 작게 주어도 외란에 대응된다. 제어대상이 목표값에 수렴함에 따라 오차가 작아지는 것은 외란으로 간주한 비선형요소의 크기도 줄어든다고 볼 수 있으므로,  $M_{2i} \times f(e_i)$ 의 값에 의해  $\psi_{fi}$ 의 절대값을 작게 주어도 외란에 대응함과 동시에 채터링도 줄일 수 있다. 제어대상이 목표값에 거의 수렴한 후 오차가 증가하는 것은 외란요소가 증대하는 것으로 생각할 수 있으므로, 오차가 작을 때( $\epsilon \approx 0$ )에는  $f(\epsilon) \approx N/\delta$ 이 되도록  $f(e_i)$ 를 설정하여 외란에 의한 정상오차를 줄일 수 있다. 즉 제안한 알고리즘은 오차의 크기에 따라 절한 제어입력량을 가감해 줌으로 외란에 대응하면서도 채터링을 줄일 수 있도록 해 준다. 채터링이 발생하는 원인 중의 하나로 절한선을 경계로 바뀌게 되는 속도의 급격한 변화(가속에서 감속 또는 감속에서 가속)를 들 수 있다. 이러한 속도의 급격한 변화를 완화하기 위해 식(11)에서의  $M_{1i}$ 를 수렴하는 방향과 같은 방향의 값일 경우는 큰값을, 수렴하는 방향과 반대방향일 경우는 작은 값을 주도록

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

단,

$$|M_{1i}| \geq |M_{1i} s_i| > \frac{1}{3} |M_{1i}| \quad (12)$$

와 같이 함으로 채터링을 더욱 줄일 수 있다. 즉 Fig. 1에 보이는 것 같이  $e_i$ 가 음의 값일 경우는  $s_i < 0$ 의 영역에서는  $u_{fi}^+$ 의 절대값을 크게 ( $|u_{fi}^+|$ ) 주고,  $s_i > 0$ 의 영역에서는  $u_{fi}^-$ 의 절대값을 작게 ( $|u_{fi}^-|$ ) 준다. 이것에 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 영향도 줄일 수 있다. 마찬가지로  $e_i$ 가 양의 값일 경우에도  $s_i > 0$ 의 영역에서는 음의 제어입력량  $u_{fi}^-$ 의 절대값을 크게 ( $|u_{fi}^-|$ ),  $s_i < 0$ 의 영역에서는 양의 제어입력량  $u_{fi}^+$ 의 절대값을 작게 ( $|u_{fi}^+|$ ) 줌으로 채터링을 줄일 수가 있다.

슬라이딩 모드에 들어가기 위한 절한 파라미터의 경계값을 구하기 위해서 식(8)에 식(10)을 대입하면

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

의 관계가 얻어진다. 식(13)을 만족하기 위해서는

$$c_i - B_i/J_i < 0 \quad (14a)$$

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

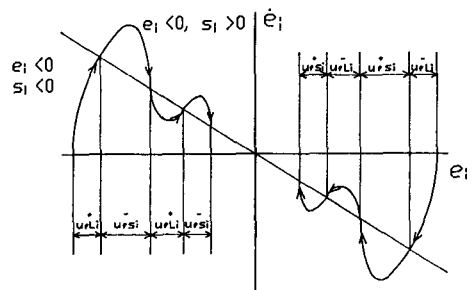


Fig. 1 Sliding mode control in phase plane

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

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

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

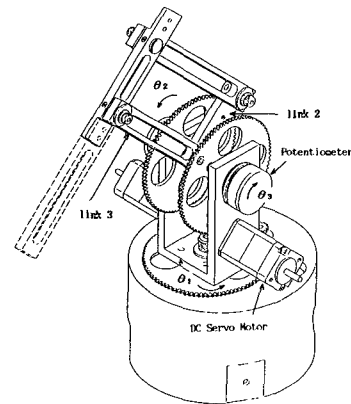
로 주면되며, 매니플레이터의 자유도와는 관계 없이 각 링크의 절환 파라미터를 제안한 동특성의 간단화에 의해 식(14)에 의해 용이하게 구할 수 있음을 알 수가 있다.

여기서 선형요소의 미지 파라미터인  $B_i, J_i$ 의 값을 알면 식(14a, 14b, 14d, 14e)로부터  $c_i, a_i, \beta_i, \gamma_i$ 의 값을 얻을 수 있다. 또한  $F_i$ 의 절대값의 최대값을 알면 조건식(14c)를 만족하는  $M_{1i}, M_{2i}$ 를 구할 수 있다.

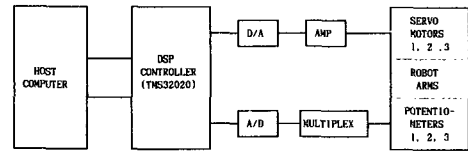
### 3. 로봇트 매니플레이터의 제어계와 파라미터의 추정

#### 3.1 제어계

절환 주파수를 무한대로 줄 경우 이상적인 슬라이딩 모드 제어가 가능하지만 현실적인 제어계는 디지털 시스템이므로 연산 지연에 의한 채터링이 문제가 된다. 최근에는 이러한 문제점을 개선하기 위해 고속연산 처리가 가능한 프로세서를 이용하여 대처하기 시작하고 있다.<sup>(10)</sup> 본 실험에서는 절환 주파수를 높여 채터링을 줄일 수 있도록 고속연산 처리기인 T.I.사의 TMS32020을 사용한 DSP보드를 제작해 제어기로써 사용하였다. 실험에서는 3자유도를 가지면서 관절 구동용 액추에이터로써 출력이 11W인 DC 서보 모터를 사용하여 최대 가반중량이 200g이 되는 일본의 다이킨공업(주)의 미니로봇트를 이용하였다. 실험에 사용한 로봇트는 Fig.2(a)에, 제어계의 구성은 Fig. 2(b)에 나타내고 있다. 미니로봇트의 각관절의 회전각도는 포텐서미터로부터 전압으로 얻어지며 각속도는 차분방정식을 이용해 제어기(DSP) 내에서 계산한다. 이때 샘플링 주기는 최대 0.5ms까지 줄 수 있도록 하였다. 각관절의 각도를 포텐서미터에 의해 측정할 경우는 잡음이 부가되므로, 그 속도를 차분방정식에 의해 구할 경우는 잡음의 영향으로 오차가 커



(a) Robot manipulator



(b) Block diagram of control system

Fig. 2 Control system of robot manipulator

져 슬라이딩 모드를 적용할 때 채터링도 많아진다. 따라서 본 실험에서는 잡음에 의한 영향을 없애기 위해서 시간평균이동에 의한 디지털 필터를 이용하여 실시간으로 처리하였다.

#### 3.2 신호압축법에 의한 파라미터의 추정

슬라이딩 모드를 적용할 경우, 미지 파라미터의 값은 정확히 몰라도 근사값 또는 그 변동범위만 알면 된다.<sup>(7)</sup> 신호압축법에 의하면 임펄스신호를 시간적으로 늘려 입력 신호의 진폭은 작게, 시간은 길게하여 실제의 제어 대상에 입력할 수 있는 시험신호를 만들어 그것을 계에 입력해, 출력응답을 측정후, 그 응답을 압축필터에 통과시킴으로 임펄스응답을 얻을 수 있다. 계에 비선형요소가 있는 경우 압축필터에 의해 선형요소는 압축되어 임펄스응답으로 나타나지만 비선형요소는 압축되지 않고 전체의 시간영역에 걸쳐서 나타나기 때문에 선형요소의 임펄스응답만을 취할 수 있다. 이와 같이 구한 임펄스응답의 Bode 선도와 가정한 선형요소의 Bode 선도와와의 비교에 의해 선형부의 미지 파라미터를 근사적으로 구할 수가 있다.<sup>(6)</sup>

여기서는 매니플레이터를 식(5)와 같이 2차의 선형계에 외란  $F$ 가 더해진 것으로 가정해, 비선형요

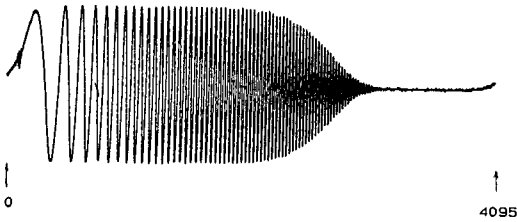
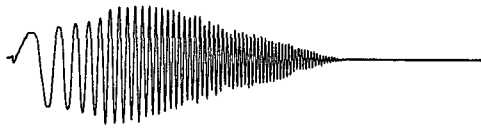
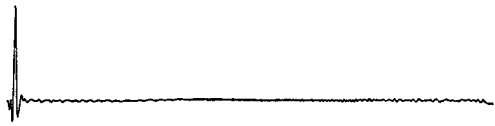


Fig. 3 The test signal of the signal compression method



(a) Response signal from the manipulator  $\theta_1$  by the test signal



(b) The compressed signal of Fig. 4(a)



(c) The nonlinear components are eliminated from Fig. 4(b)

Fig. 4 Experiment results by signal compression method

소를 분리한 선형요소의 제  $i$ 관절의 미지 파라미터인  $J_i$ 와  $B_i$ 를 구한다. 매니플레이터에 입력하는 시험신호를 Fig. 3에 보인다. 이 시험신호를 증폭해서 서보모터에 가해 측정할 경우, 매니플레이터 자체의 복원력이 없는 관계로 계가 불안정하게 되어 발산하거나 포화상태로 되므로, 실험에서는 비례제

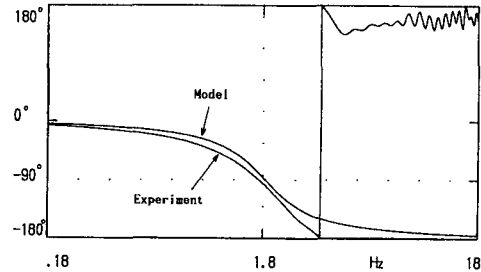
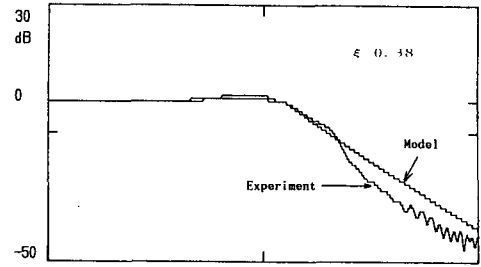


Fig. 5 Comparison of bode diagrams between model and experiment

어루프를 이용해 측정하였다. 이 때 선형계의 입출력 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{\Theta_i(s)}{\Theta_{di}(s)} = \frac{k_i k_{pi}}{s(J_i s + B_i) + k_i k_{pi}} = \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\xi_i \omega_{ni} s + \omega_n^2} \quad (15)$$

단,  $\omega_{ni} = \sqrt{k_i k_{pi} / J_i}$ ,  $k_{pi}$ ;  $i$  관절에 대한 비례 계인  $\xi_i = B_i / 2\sqrt{k_i k_{pi} J_i}$ ,  $k_i$ ; 식 (5)의  $k$ 의 ( $i, i$ ) 요소

단, 여기서의  $s$ 는 라플라스 변환의  $s$ 이다.

실험결과로서 측정된 출력파형, 압축필터에 의한 압축파형, 비선형요소를 제거한 파형을 Fig. 4에 보인다. Fig. 4(c)로부터 구한 Bode 선도과 모델식 (15)에 적당한 파라미터를 주었을 때의 Bode 선도과 비교해 가장 일치했을 때의 파라미터가 구하려고 하는 미지 파라미터의 근사값이다. 그 Bode 선도의 비교를 Fig. 5에 보인다. 각관절마다 구한 미지 파라미터의 근사치를 Table 1에 보인다.

Table 1 Estimated parameters

Mani pulator \ Para meter	$\omega_{ni}$ [rad/s]	$\xi_i$	$J_i$ [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. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 목표값이 일정한 경우

목표값이 일정할 때  $\dot{\theta}_{di} = \ddot{\theta}_{di} = 0$  이므로 식(10)은

$$u_i = \phi_{ai}e_i + \phi_{fi} \tag{10}'$$

로 된다. 슬라이딩 모드를 만족하기 위해 필요한 절환 파라미터  $c_i, \alpha_i$ 의 한계값이 Table 1과 식(14a), 식(14b)로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} 0 < c_1 < \frac{B_1}{J_1} = 8.6, \quad \alpha_1 < -5.57 \times 10^{-3} \quad \text{if } c_1 = 8 \\ 0 < c_2 < \frac{B_2}{J_2} = 30.1, \quad \alpha_2 < -0.166 \quad \text{if } c_2 = 16 \\ 0 < c_3 < \frac{B_3}{J_3} = 11.3, \quad \alpha_3 < -0.013 \quad \text{if } c_3 = 10 \end{aligned} \tag{16}$$

단, 식(14)의  $k_i$ 는 미니로봇트의 사양으로부터 0.0534 [N·m/V]로 얻어진다. 식(14c)에서  $M_{1i}, M_{2i}$ 의 한계값은 외란  $F_i$ 의 절대값의 최대값을 알면 구해지지만 실제로는 실시간으로 구하기 어렵

다. 다행히도  $M_{1i}, M_{2i}$ 의 값을 음의 적당한 값으로 주면 식(14c)를 만족하므로, 본 실험에서는 경험적으로 적당한 음의 값  $M_{1i}, M_{2i}$ 를 주어 그 값들의 크기에 따른 성질을 조사하였다. 실험에 있어서는 비선형요소의 크기에 많이 영향을 미치는 관성 모멘트의 값이 큰 링크 3에 대해서 제안한 알고리즘을 적용하였다. 절환 파라미터로  $c_3=10, \alpha_3=-0.8, M_{1L3}=M_{1S3}=-500$ (D/A 변환기의 출력으로는 -1.2208 V),  $M_{23}=-500$ 으로 주고, 샘플링 시간  $T=1$  ms로 주었을 때의 실험결과인 오차의 수렴상태와 오차의 속도 및 제어입력을 Fig. 6에 보이며 슬라이딩 모드를 나타내는 위상면(phase plane)은 Fig.7(a)에 보인다.  $M_{1i}$ 의 값에 따른 채터링의 변화를 비교하기 위하여  $M_{1L3}=-500, M_{1S3}=-200$ 으로 주고 나머지 파라미터는 Fig. 7 (a)와 같이 주었을 때의 위상면을 Fig. 7(b)에 보인다. 또한  $M_{2i}$ 의 값에 따른 영향을 조사하기 위해서  $M_{23}=-200$ 으로 주고 그 이외에는 Fig. 7(a)의 실험 조건과 동일하게 주었을 때의 위상면을 Fig. 7(c)에 보인다.

이 결과들의 위상면을 보면  $M_{1S3}$  보다  $M_{1L3}$ 의 값을 크게 줌으로 절환선 윗 부분에서의 급격한 속도

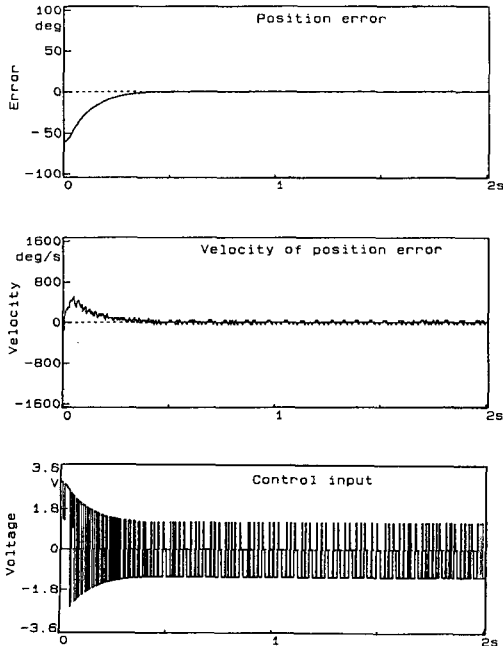
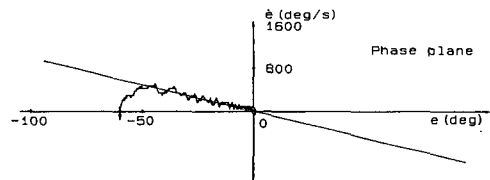
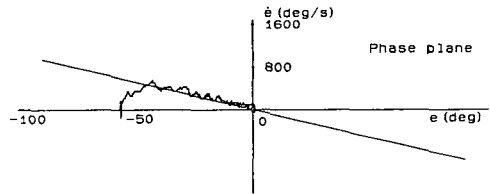


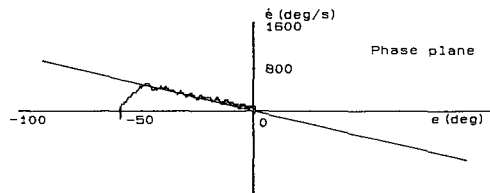
Fig. 6 Experiment results on set point regulation control ( $M_{1L3}=M_{1S3}=-500, M_{23}=-500$ )



(a) at  $M_{1L3}=M_{1S3}=-500, M_{23}=-500$



(b) at  $M_{1L3}=-500, M_{1S3}=-200, M_{23}=-500$



(c) at  $M_{1L3}=-500, M_{1S3}=-200, M_{23}=-200$

Fig. 7 Phase plane on set point regulation control

변화(가속에서 감속으로의 변화)가 줄어 든 것을 알 수 있으며, 이 속도 변화에 의해 생기는 채터링은  $M_{1S3}$  보다  $M_{1L3}$ 의 값을 크게 줌(Fig. 7(b))으로 어느 정도 줄일 수 있음을 알 수 있으나 연산 지연 등 그 외의 원인에 의한 채터링은 줄일 수가 없었다. 이에 대해  $M_{2i}$ 의 값을 작게 줌(Fig. 7(c))으로 오차가 큰 영역에서의 채터링이 줄어들음을 알 수 있다. 이것은 외란에 대응하기 위한  $u_{fi}$ 의 값이 정상 오차를 제거할 수 있을 정도의 크기만 주면 되나, 정상오차를 제거하기 위해  $u_{fi}$ 의 값을 일정하게 너무 크게 주면 채터링도 증가하게 됨을 의미한다. 따라서  $u_{fi}$ 의 값을 일정하게 주는 것보다 외란의 크기에 따라 조절하면 채터링을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 즉 제한한 알고리즘의  $M_{2i} \times f(e_i)$ 의 크기가 외란의 크기에 따라 가감되어 채터링을 줄이는 역할을 하고 있음이 실험에 의해서 판명되었다.

4.2 궤도제어의 경우

목표치가 일정하지 않을 경우에는  $\dot{\theta}_{di}$ ,  $\ddot{\theta}_{di}$ 가 0이 아니므로 슬라이딩 모드의 존재조건을 만족시키기 위해 식(10)을 사용해서 절환 제어입력량을 공급한다. 여기서 Table 1의 파라미터를 사용함으로 식(14d), (14e)로부터  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$ 의 한계값은 얻어진다. 목표궤도를 정현파, 절환선의 기울기  $c_3=10$ ,  $\alpha_3=-0.8$ ,  $\beta_3=\gamma_3=-0.5$ ,  $M_{1L3}=M_{1S3}=-500$ ,  $M_{23}=-500$ ,  $T=1\text{ms}$ 로 주었을 때의 실험결과인 오차의 수렴상태와 제어입력을 Fig. 8에 보이며, 속도 성분은 Fig. 9(a), 위상면은 Fig. 10(a)에 각각 나타난다.  $M_{1i}$ 의 값에 따른 채터링의 변화를 비교하

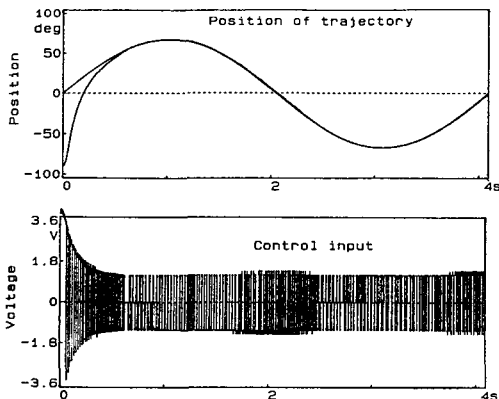
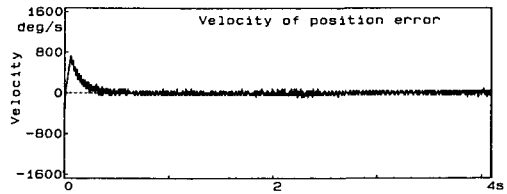


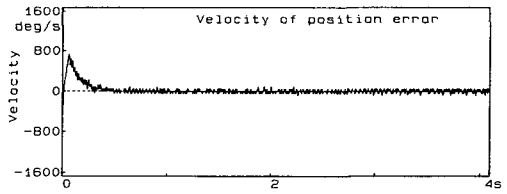
Fig. 8 Experiment results on trajectory control ( $M_{1L3}=M_{1S3}=-500$ ,  $M_{23}=-500$ )

기 위하여  $M_{1L3}=-500$ ,  $M_{1S3}=-200$ 으로 주고 나머지 파라미터는 Fig. 8과 같이 주었을 때의 속도 성분 및 위상면을 각각 Fig. 9(b), Fig. 10(b)에 나타낸다. 또한  $M_{2i}$ 의 값에 따른 영향을 조사하기 위해서  $M_{23}=-200$ 으로 바꾼 것 이외에는 Fig. 9(b), Fig. 10(b)의 실험조건과 동일하게 주었을 때의 실험결과인 속도성분 및 위상면을 각각 Fig. 9(c), Fig. 10(c)에 보인다.

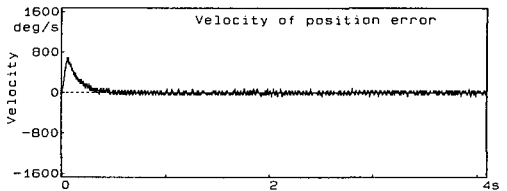
이 결과들의 위치오차의 속도를 보면  $M_{1Li}$ 를  $M_{1Si}$ 와 같이 주는 것(Fig. 9(a)) 보다  $M_{1Li}$ 를  $M_{1Si}$ 보다 크게 줌(Fig. 9(b))으로 속도변화가 줄어들고 있음을 알 수 있으며, 따라서 속도변화에 의한 채터링을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 또한  $M_{2i}$ 의 값을 작게 줌(Fig. 10(c))으로 오차가 큰 영역에서의 채터링도 줄일 수 있어 외란에 대응하는 입력을 일정하게 주는 것 보다는 제한한 방법에 의해  $M_{1i}$  및  $M_{2i}$ 의 값을 적절히 조절하므로 채터링을 어느 정도 줄일 수 있음이 판명되었다. 이것은 외란에 대응하기 위한  $u_{fi}$ 의 값은 정상오차를 제거할 수 있을 정도의 크기만 주면 되나, 외란의 크기를 실시간으로 측정하기가 어려운 관계로 종래와 같이 외란의 최대값에 대응할 수 있는 일정한  $u_{fi}$ 의 값



(a) at  $M_{1L3}=M_{1S3}=-500$ ,  $M_{23}=-500$



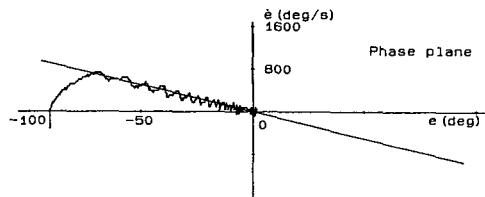
(b) at  $M_{1L3}=-500$ ,  $M_{1S3}=-200$ ,  $M_{23}=-500$



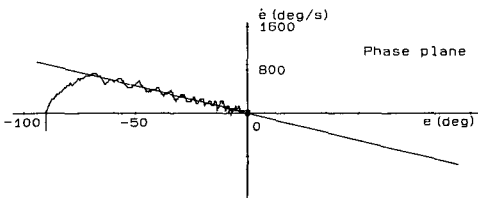
(c) at  $M_{1L3}=-500$ ,  $M_{1S3}=-200$ ,  $M_{23}=-200$

Fig. 9 Velocity of position error on trajectory control

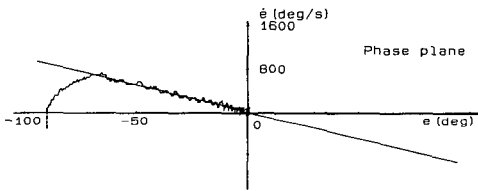




(a) at  $M_{1L3} = M_{1S3} = -500, M_{23} = -500$



(b) at  $M_{1L3} = -500, M_{1S3} = -200, M_{23} = -500$



(c) at  $M_{1L3} = -500, M_{1S3} = -200, M_{23} = -200$

**Fig. 10** Phase plane on trajectory control

을 줄 경우 채터링도 증가하게 됨을 의미한다. 따라서  $u_{fi}$ 의 값을 일정하게 주는 것보다 외란의 크기에 따라 조절하여 주게 되면 채터링을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

이상의 실험결과를 정리하면 목표치가 일정하지 않고 임의의 궤도로 주어질 경우에도  $M_{1i}$ 를  $M_{1Li}$  ( $s_i e_i > 0$ )와  $M_{1Si}$  ( $s_i e_i < 0$ )로 나누어 줌으로 수속성이 좋아지며, 채터링도 줄일 수 있음이 확인되었다.  $M_{2i}$ 의 값은 외란에 대응하기 위해서 크게 주면되거나 위치오차가 큰 곳에서는 채터링을 크게 하므로 수속성과 채터링을 동시에 고려하여 적절한 값을 줄 필요가 있다.

### 5. 결 론

슬라이딩 모드 제어는 파라미터의 변동, 외란 등에 강인한 것에 착목해, 본 연구에서는 로봇 매니플레이터의 비선형요소를 외란으로써 간주함으로써 매니플레이터의 동특성을 정확히 구하지 않아도 되며, 매니플레이터와 서보계의 전체의 다이내믹스를

나타내는 미분방정식을 간단화 시킬 수 있어 슬라이딩 모드 제어의 적용을 용이하게 함을 보였고, 실시간 제어가 가능한 알고리즘을 제안하였다. 즉 매니플레이터의 자유도가 증가해도 절환 제어입력량의 파라미터의 한계값이 비교적 간단하게 구해져 매니플레이터의 자유도와는 관계없이 용이하게 슬라이딩 모드가 실제의 로봇에 적용될 수 있음을 보였다.

제안한 방법에 의해 슬라이딩 모드 제어를 적용할 경우, 슬라이딩 모드의 존재조건을 만족시키기 위해 사용되는 미분방정식의 선형부의 미지 파라미터는 신호압축법에 의해 구해짐을 보였고, 이 파라미터를 이용해 슬라이딩 모드의 존재조건으로부터 제어입력의 절환 파라미터가 구해짐을 보였다

비선형요소를 외란으로써 간주함으로써 생기는 채터링, 오차 등을 줄이기 위해 새로운 제어입력의 알고리즘을 제안해, 궤도제어를 행할 경우에도 외란에 대응하기 위해 부가하는 값인  $M_{1i}, M_{2i}$ 를 적절히 줌으로서 속도변화에 의한 채터링을 감소시킬 수 있음이 실험에 의해 확인되었다. 외란  $F_i$ 의 절대값의 최대값을 알면  $M_{1i}, M_{2i}$ 의 한계값이 구해지지만 현실적으로는 실시간으로 구하는 것이 어려우므로 음의 값을 경험적으로 주므로 적용시킬 수 있음을 보였다.

실험결과에서 알 수 있듯이 제어기로서 DSP를 이용하여 실시간 제어를 가능하게 하였고, 연산 지연에 의한 채터링을 어느정도 줄일 수 있었으며, 제안한 알고리즘에 의해서 속도변화에 의한 채터링을 줄일 수는 있었으나, 완전히 채터링을 제거할 수는 없었다. 이것은 각도의 측정으로서로는 로터리 엔코드(rotary encode), 각속도로서는 타코제너레이터(tachogenerator) 등의 속도센서를 이용함으로써 개선 되어질 것으로 생각되어지며, 허용오차의 수렴한 영역에서는 불감대의 영역을 도입함으로써 채터링을 줄일 수 있으리라 본다. 이러한 채터링을 만족할 만큼 줄이는 것, 다축 동시 제어를 위해 계층 구조법<sup>(7)</sup>을 적용하는 것, 외란이 크게 변했을 때의  $M_{1i}$ 의 값을 자동으로 조절하는 방법에 관한 연구 등은 남은 과제로 다음 기회에 보고 하고자 한다.

### 참고문헌

(1) Nishimoto, K., 1988, "DSP and its Application

- to Robot Control," JRSJ, Vol. 6, No.4, pp.339~345.
- (2) 有本卓, 1985, "ロボット制御の基礎," コンピョートロール, No. 9, pp. 21~34.
- (3) Paul, R.P., 1981, "Robot Manipulators", MIT Press.
- (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) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Young, K.D., 1978, "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.
- (9) Itkis, U., 1976, "Control Systems of Variable Structure," John Wiley.
- (10) Hashimoto, H. and Harashima, F., 1989, "Digital Servo System Using VSS," JRSJ, Vol.7, No.3, pp.231~236.
- (11) Lee, M.C. and Aoshima, N., 1989, "Identification of Robot Manipulator by Signal Compression Method and Sliding Mode Control," Proc. SICE'89, pp. 751~752.
- (12) 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.