

## 比例弁・油圧シリンダ系の位置制御

(外乱推定補償を用いたスライディングモード制御系の適用)

Positioning Control of Proportional Control Valve-Oil Hydraulic Cylinder System  
(Using Sliding Mood Control with Disturbance Observer Compensation)

○中村 太郎\*, 佐々木 芳宏\*, 高橋 義雄\*

○Taro Nakamura\*, Yoshihiro Sasaki\*, Yoshio Takahashi\*

\*秋田大学

\*Akita University

キーワード：位置制御(Positioning Control), スライディングモード制御(Sliding Mood Control),  
外乱オブザーバ(Disturbance Observer), 比例弁(Proportional Control Valve)

連絡先：〒010 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 鉱山学部 機械工学科 高橋研究室  
高橋 義雄, Tel.:(0188)89-2732, E-mail:takahasi@ipc.akita-u.ac.jp

### 1. 緒言：

近年、未知外乱や非線型性を有する油空圧制御系の分野において、高精度かつ、ロバスト性を備えた制御アルゴリズムが必要とされてきている。これらの性能を備える制御則として、スライディングモード制御則(以下 SMC とする)がある。しかし、SMC を油圧システムに用いた場合、切換の遅れなどによってチャタリングが生じ、高圧下における油圧システムにおいて機器の破損などを引き起こしかねない。そこで油圧システムに馴染みやすい低ゲインなチャタリング抑制方法として、自由階層制御法による研究がなされており、とくに加速率到達則によるチャタリングの抑制方法が有効であると報告<sup>1)</sup>されている。しかし加速率到達則は、切換超平面近傍における拘束力が弱まり、突発的な外乱に対して定常偏差を生じてしまう。

そこで本研究では、外乱オブザーバを用いることで、これら油圧システムに対する未知外乱の一部を補償し、その上で SMC を適用することを試みた。その結果、シミュレーション・実験において優れた外乱抑制作用が確認でき、低ゲインなシステム構成が可能となった。

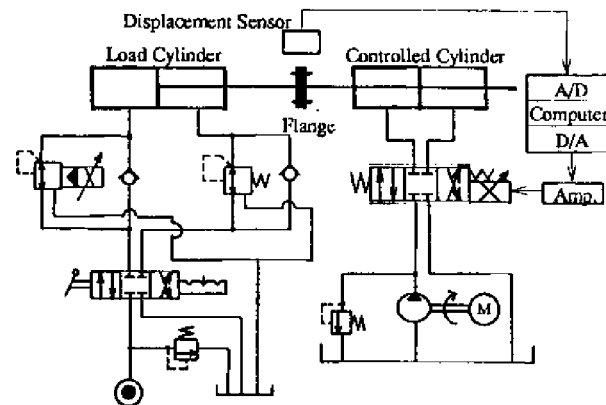


Fig.1 Schematic diagram of the experimental hydraulic system

### 2. 実験装置：

本研究に用いた実験装置の概略図を Fig.1 に示す。油圧シリンダは、制御側に両ロッドシリンダ、負荷側に片ロッドシリンダ(内径 40mm、ロッド径 22.4mm、ストローク 600mm)を用いて、双方をフランジ継手を介して対抗させた。なおシリンダ変位をレーザー変位計により計測し、その信号を AD 変換器を介して 32bit のパーソナルコンピュータに取り込み、流量制御弁への制御入力を計算する。ここで流量制御弁には、構造が簡単でメンテナンスが容易な油圧式比例電磁弁(不二越製 ESH-G01-H504A-10)を用いた。

### 3. 制御系設計 :

#### 3.1 油圧システムの同定

本研究では、油圧システムのオフライン同定を行うに際して、本来ならシステムの入出力信号を直接用いて同定するのが望ましいが、ピストンの偏りをなくし、線形モデルでの同定を容易にするため、直結フィードバックによる閉ループシステムで同定を行った。また本来油圧システムは、非線形要素を含む複雑な系であるが、ここでは制御性能の効果を明らかにするため、このシステムを2次系で近似した。以下にその数学モデルを示す。

$$G(s) = \frac{209.4}{s^2 + 121.2s + 215.4} \quad (1)$$

#### 3.2 スライディングモード制御系の設計<sup>2)</sup>

式(1)の数学モデルを状態空間表現した時の線形時不変系を考える。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ \sigma &= Sx \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし $\sigma$ は切換関数であり、 $S$ は切換超平面マトリックスである。

ここでSMCの存在条件は、次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\sigma} > 0 & \quad \text{if } \sigma < 0 \\ \dot{\sigma} < 0 & \quad \text{if } \sigma > 0 \end{aligned} \right\} \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (3)$$

この条件を満足するように、次の到達則(加速率到達則)を定義する。

$$\dot{\sigma} = -k_i |\sigma_i|^\alpha \operatorname{sgn}(\sigma_i) \quad 0 < \alpha < 1 \quad (4)$$

この到達則の特性は、状態から超平面までの距離が遠いとき状態変数の収束速度が速くなる一方、その近傍では収束速度が減少する上、上式の右辺に $-Q \operatorname{sgn}(\sigma)$ の項がないのでチャタリングを抑制することができる。結果として高速収束と低チャタリングの到達則となる。

ここで、式(2)の $\sigma$ を微分すると、

$$\dot{\sigma} = SAx + SBu \quad (5)$$

となり、式(5)を式(4)に代入すると、制御入力 $u$ は次式のようにになる。

$$u_i = -(SB)^{-1} \{SAx + k_i |\sigma_i|^\alpha \operatorname{sgn}(\sigma_i)\} \quad (6)$$

これより超平面 $\sigma_i$ の交線にもスライディングモードが存在し、その交線への収束条件も含めた制御則の構成が必要となる。このため、式(4)に関するリアプノフ関数の候補として次の正定関数を与える。

$$V = \frac{1}{2} \sigma^T \sigma \quad (7)$$

この関数の微分を考えると、

$$\dot{V} = \sigma^T \dot{\sigma} = -\sum [q_i |\sigma_i| + \sigma_i k_i f_i(\sigma)] < 0 \quad (8)$$

となり、 $\dot{V}$ は $\sigma$ の負定関数であることが示される。

#### 3.3 外乱オブザーバの設計<sup>3)</sup>

本研究では、まずシステムに発生する外乱の一部を外乱オブザーバにより補償することを考えた。すなわち油圧システムに外乱オブザーバを適用し、外乱補償された後のシステムに加速率到達則によるSMCを適用する。

##### ・拡大系の構成

式(1)に基づき、外乱 $d$ を含んだ線形時不変系を以下のように表わす。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + b(u + d) \\ y &= Cx \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここで状態ベクトル $x$ を

$$\tilde{x} = [X \quad \dot{X} \quad d]^T \quad (10)$$

とするとシステムは、

$$\left. \begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= \tilde{A}\tilde{x} + \tilde{b}u \\ y &= \tilde{C}\tilde{x} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & 1 \\ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{b} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{C} = [C \quad 0] \quad (12)$$

という拡大系で表わされる。よって、この

拡大系に対してオブザーバを構成すれば測定不可能な未知外乱と速度が推定できる。

・最小次元オブザーバの構成

次に上述の拡大系を離散化し、Gopinathの方法を用いて、最小次元オブザーバによる外乱オブザーバを構成する。まず座標変換マトリックスを

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ & & C \end{bmatrix} \quad (13)$$

とし、 $x(k)$ を次のように座標変換する。

$$\bar{x}(k) = Gx(k) = [\hat{x}(k) \quad d(k) \quad x(k)]^T \quad (14)$$

$$\bar{A} = GAG^{-1} \quad \bar{b} = Gb \quad \bar{C} = CG^{-1} \quad (15)$$

ここで $\bar{A}$ 、 $\bar{b}$ の要素を $\bar{a}_{ij}$ 、 $\bar{b}_j$ とし、

$$\begin{aligned} A_{11} &= \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} \end{bmatrix} & A_{12} &= \begin{bmatrix} \bar{a}_{13} \\ \bar{a}_{23} \end{bmatrix} \\ A_{21} &= [\bar{a}_{31} \quad \bar{a}_{32}] & A_{22} &= \bar{a}_{33} \\ B_1 &= \begin{bmatrix} \bar{b}_{11} \\ \bar{b}_{21} \end{bmatrix} & B_2 &= \bar{b}_{31} \end{aligned} \quad (16)$$

と分割する。オブザーバゲイン $K$ を

$$K = [k_1 \quad k_2]^T \quad (17)$$

とすると、最小次元オブザーバの構成条件から、

$$\begin{aligned} E &= A_{11} + KA_{21} & F &= A_{12} + KA_{22} - EK \\ J &= B_1 + KB_2 \end{aligned} \quad (18)$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} -k_1 \\ -k_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

とし、式(14)の $x(k)$ に対する推定ベクトルを

$$\hat{x}(k) = [\hat{x}(k) \quad X(k) \quad \hat{d}(k)]^T \quad (19)$$

とすれば、最小次元オブザーバは、

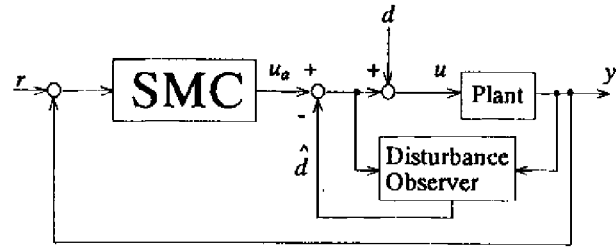


Fig.2 Block diagram of SMC with disturbance observer compensation

$$\begin{aligned} z(k+1) &= Ez(k) + Fy(k) + Ju(k) \\ \hat{x} &= G^{-1}\{Pz(k) + Vy(k)\} \end{aligned} \quad (20)$$

となる。Fig.2に示すように、式(19)の外乱推定値をシステムにフィードバックすることで制御入力を、

$$u = u_a - \hat{d} \quad (21)$$

とすると、プラントへの入力は、

$$u = u_a - \hat{d} + d \quad (22)$$

となり、入力に重畳した未知入力外乱 $d$ が相殺される。

4. シミュレーション：

4.1 シミュレーション条件の設定

まず本制御則のシミュレーションを実現するにあたり、以下の係数およびゲインを設定する。SMCは、切換超平面マトリックスを $S = [215 \quad 0.47]$ とし、加速率到達則の各係数を $\alpha = 0.7, K = 60$ とした。一方、外乱オブザーバのオブザーバゲインは、その固有値を $0.80$  ( $k_1 = 12823, k_2 = -88273$ )と設定した。

ここでステップ応答のシミュレーション条件として初期状態を $x_1 = -2.0$ 、目標状態を $x_1 = 0.0$ とする。また外乱は、入力の10%のステップ状外乱とする。

4.2 ディザによる補償

SMCの制御入力に次式のようなディザによる補償を行った場合のシステム応答をFig.3に示す。ここで、 $H_{max} = 0.35$ とし、 $\delta = 0.018$ とした。

$$u_{ad} = u_a - H_{max} \cdot \frac{\sigma}{|\sigma| + \delta} \quad \begin{matrix} H_{max} > |d| \\ \delta > 0 \end{matrix} \quad (23)$$

Fig.3(a)において制御開始から 2 秒後に外乱を加えると、通常の加速率到達則の場合、切換線近傍での拘束力が弱まるため、設計された切換線から状態がわずかにシフトし、約 5 % の定常偏差が生じる。ここで 3 秒後にディザ補償を適用すると、外乱の影響が打ち消され、再びスライディングモードが実現する。しかし、外乱がディザより大きくなると安定性が補償されないので、ディザを十分大きく設定した場合、Fig.3(b)に示されるように、制御入力における外乱抑制作用が増大し、チャタリングが生じる。これは、高圧下で使用される油圧システムにとって悪影響を及ぼしかねない。

#### 4.3 外乱推定による補償

Fig.4 に、外乱推定補償を用いた場合の

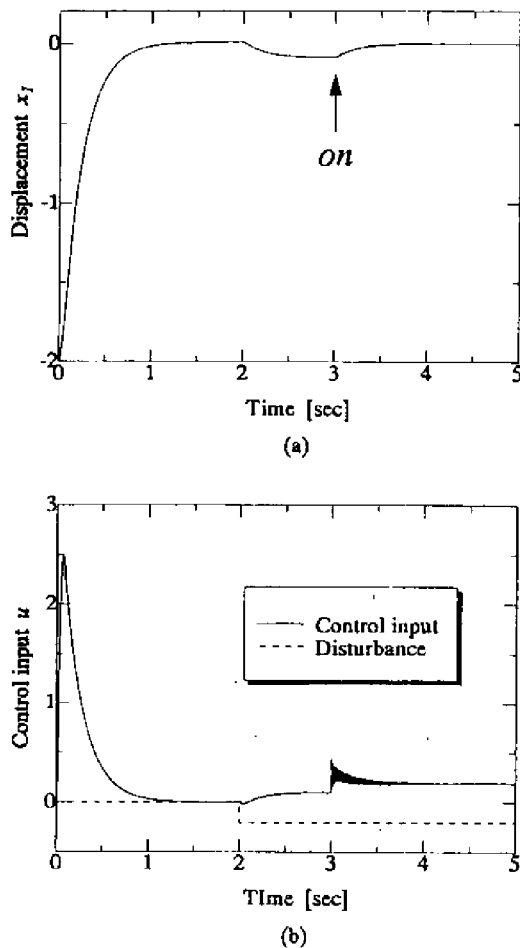


Fig.3 Simulation of step response under step disturbance in SMC with dizer compensation.

ステップ応答を示す。ここで、Fig.4(b)の制御入力において、外乱が混入した際、外乱オブザーバの働きにより、外乱を最低限かつ的確に抑制することが可能である。そのため、ディザ補償で見られた高ゲイン化によるチャタリングを押さえ、また未知外乱に対する大きさにも対応し得るため、より高い安定性を確保できると考えられる。

#### 5. 実験 :

##### 5.1 実験条件

本研究の実験による検証を実現するにあたり、以下の条件を設定する。まず油圧システムにおける供給圧力を 4.0MPa、油温は 40℃一定とし、初期状態を  $x_1 = -500$  [mm]、目標値を  $x_1 = 0.0$  [mm] とする。なお SMC の各係数は、シミュレーションと同様とし、外乱オブザーバのオブザーバゲイン  $K$  は、

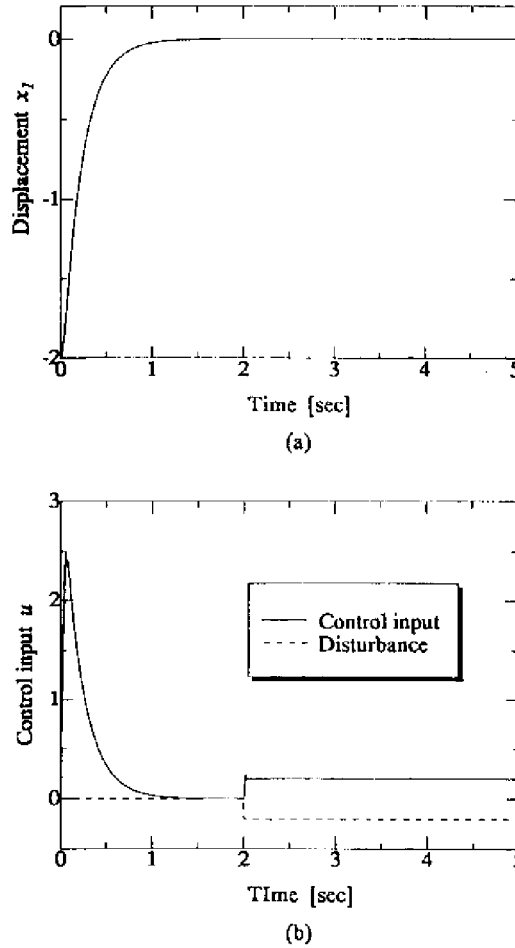


Fig.4 Simulation of step response under step disturbance in SMC with disturbance observer compensation.

実機におけるオブザーバの微分作用を考慮して、 $0.85(k_1=0.0829, k_2=-20819)$  と設定した。

### 5.2 入力性外乱

本制御則にステップ状の入力性外乱  $d$  を加えることで、外乱推定補償の有効性を検証する。Fig. 5 に、制御開始 2.5 秒後から  $d=-0.2[V]$  を加えた時のステップ応答を示す。この図からシミュレーションと同様に、Fig. 5(a)の応答は定常偏差を生じることなく目標値に整定し、Fig. 5(b)の制御信号もまた、適切な外乱推定により、高ゲイン化を引き起こすことなくチャタリングを押さえ、すばやい外乱抑制作用を示した。

### 5.3 一定負荷外乱

油圧システムに一定負荷外乱が作用した時、SMCにおける外乱補償を用いなかった

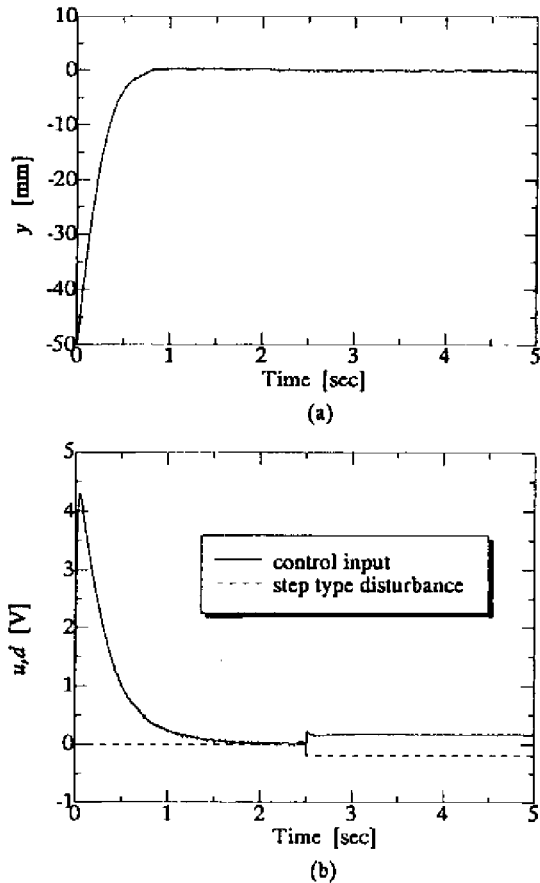


Fig.5 Response under step type disturbance in SMC with disturbance observer compensation.

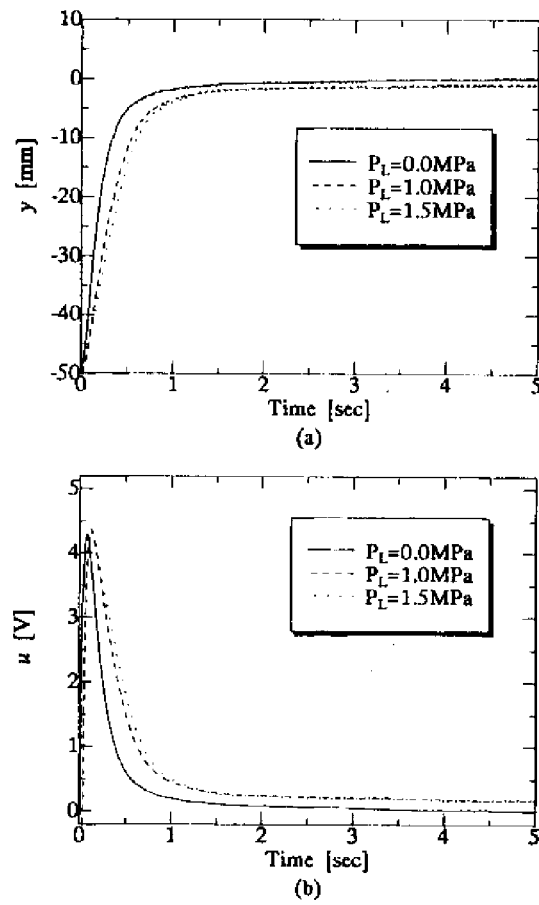


Fig.6 Response under load disturbance in SMC without disturbance compensation.

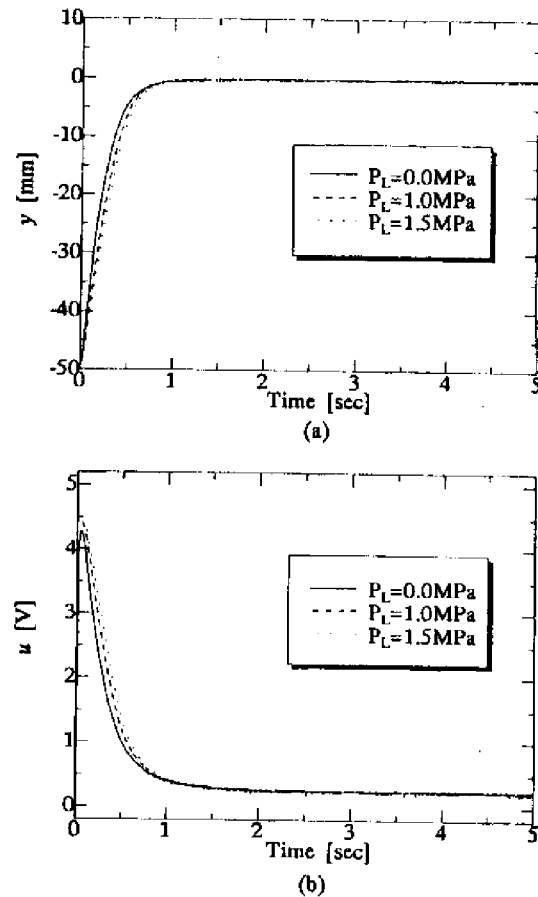


Fig.7 Response under load disturbance in SMC with disturbance observer compensation.

場合と外乱推定補償を用いた場合の応答を Fig.6、Fig.7 に示す。ここで負荷外乱をそれぞれ  $P_L = 0.0, 1.0, 1.5 \text{ MPa}$  とした。

まず、SMC に外乱補償を適用しなかった場合、一定負荷外乱が加わると、無負荷の状態に比べ 4% の定常偏差が生じ、立ち上がり時間も遅くなることがわかる。これはシミュレーションと同様、負荷外乱によりシステムの状態が切換線に拘束しきれなくなることが原因であると考えられる。

一方、SMC に外乱推定補償を適用した場合、負荷外乱による応答の遅れもなく、定常偏差も生じないことから、外乱推定補償による有効性が確認された。

## 6. 結言

本研究では、比例弁・油圧シリンダ系の位置制御に、外乱推定補償を用いたスライディングモード制御を適用し、シミュレーションと実験によりその有効性を検証した。以下に本研究で得られた結果を要約して述べる。

(1) シミュレーションと実験から、本制御則は、入力性のステップ状外乱に対して、ディザ補償のようなチャタリングを引き起こすことなく、優れた外乱抑制作用を示した。

(2) 実験により、本制御則は速応性、定常特性ともに、一定負荷外乱による影響を小さく押さえることができた。よって、油圧システムに対して有効な制御則であると考えられる。

## 文 献

(1) 佐々木, 高橋: 階層制御法による油圧シリンダの位置制御, 機械力学・計測制御講演論文集, Vol.B, pp.261/264(1996)

(2) 野波, 田: スライディングモード制御-非線型ロボスト制御の設計理論-, コロナ社(1994)

(3) 岩井, 井上, 川路: オブザーバ, コロナ社(1988)