

スライディングモード制御を併用した油圧サーボ系の 2 自由度最適制御

2DOF-Optimal Control with Sliding Mode Control of Hydraulic Servo System

○ 佐々木芳宏*, 松崎良則*, 高橋義雄**

○ Yoshihiro Sasaki, Yoshinori Matsuzaki, Yoshio Takahashi

*秋田大学, **秋田県立大学

*Akita University, ** Akita Prefectural University

キーワード : 油圧サーボ系(Hydraulic Servo System), ロバスト制御(Robust Control), 2 自由度制御(Two Degrees of Freedom Control), 最適サーボシステム(Optimal Servo System), スライディングモード制御(Sliding Mode Control)

連絡先 : 〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学工学資源学部機械工学科

佐々木芳宏, Tel.:(018)889-2732,Fax.:(018)837-0405,E-mail:sasaki1@ipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

油圧サーボ系は産業界のあらゆる分野での応用が期待されているものの負荷変動やシステムパラメータの変動にともないその動特性が変化するため最適レギュレータ理論を応用した最適サーボ系の場合, 制御対象のモデル化誤差や定値外乱に対処するため積分補償が必要となる. しかし, 追従誤差と操作入力¹⁾の 2 次形式として与えられる評価関数に積分器に関する項を含まなければならず必ずしも追従誤差に対する最適サーボ系とは呼べない. このような視点から 2 自由度積分型最適サーボ系が藤崎, 池田²⁾により提案されている. 本研究では, 油圧サーボシステムにロバスト性が優れているスライディングモード制御則を適用することで, その出力応答を, 積分器を含まない最適サーボ系の応答に追従するような

制御系を構成し, 外乱に対するロバスト性の向上について実験的に検討した. さらに, 2 自由度積分型最適サーボ系との制御性能の違いについて H_2 ノルムによる評価を行い検討した.

2. 制御系設計

2 自由度制御系において, 参照入力に対する追従特性と制御対象のモデル化誤差や定値外乱に対する制御特性は, 独立に設計すべきものであり, 積分補償の効果は制御対象のモデル化誤差や定値外乱が存在する場合のみ現れればよいという視点から藤崎, 池田²⁾は参照入力に対する応答について積分補償の効果³⁾が打ち消されるような状態フィードバックを付加し, その積分補償の効果⁴⁾を調整するゲインを適当に選ぶことで積分補償を含む意味での最適サーボ系を構成している.

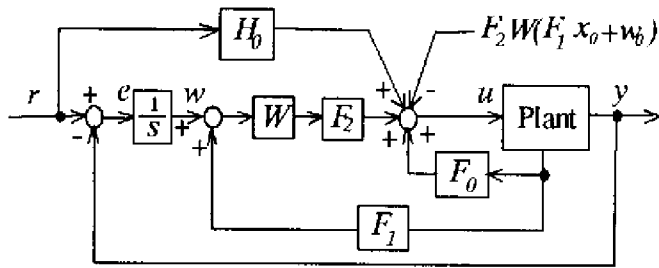


Fig.1 Block diagram of two-degree-of-freedom optimal servo system

2.1 2自由度積分型最適サーボ系

Fig.1 に本研究で適用した 2 自由度積分型最適サーボ系のブロック線図を示す。この構成法は、参照入力に対する応答については積分補償の効果が打ち消されるような状態フィードバックを付加しており、制御対象のモデルが正確で外乱もない場合には、操作入力が積分補償のない場合に一致するようになっている。

対象とするシステムは、状態方程式

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

で表されているとする。追従誤差 e に対して内部モデル原理により積分補償は

$$\omega = \int_0^t e dt + \omega_0 \quad (2)$$

の形で与えられる。ここに、 ω_0 は積分器の状態 ω の初期時刻 $t=0$ における値である。対象システムに積分補償を加えた拡大系を構成し、Fig.1 の制御系における操作入力を次式で与える。

$$u = F_0 x + H_0 r + F_2 W (\omega + F_1 x - F_1 x_0 - \omega_0) \quad (3)$$

F_0 、 H_0 は積分補償を含まない最適サーボ系を実現するゲインであり、 F_1 、 F_2 は制御対象のモ

デル化誤差や外乱に対して積分型サーボ系として働くためにある評価関数に対して最適レギュレータ系となるように決められる。ここで、 W は任意の正定行列であり、追従誤差が存在した時の応答特性は、この W の自由度により、参照入力に対する応答特性とは独立に調整できることになる。

2.2 スライディングモード制御の適用

2 自由度積分型最適サーボ系では、制御対象のモデル化誤差や外乱に対して状態フィードバックを付加することで追従誤差に関する最適サーボ系を構成したが、ここではさらにそれらの追従誤差に対してよりロバスト性に優れているスライディングモード制御則²⁾を適用し、これらを補償することを考える。

スライディングモード制御(SMC)をサーボ系に適用するため、式(1)における追従誤差 e の積分値 z を付加した拡大系を用いて次式のような 1 型のサーボ系を構成する。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -C & 0 \\ 0 & A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_2 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} y_n \quad (4)$$

これより状態方程式は次式となる。

$$\dot{x} = A_e x_e + B_e u + E y_n \quad (5)$$

ただし、 y_n は積分補償のない最適サーボ系の出力である。この拡大系に基づき、積分補償を含まない最適サーボ系と同等の動特性が得られる超平面を設計する。なお本研究における設計方法として、システムの零点を利用し安定余裕を指定す

る設計法³⁾を用いた。また、SMCにおける到達側として、加速率到達側を適用することでチャタリングの低減をはかった。

Fig.2にSMCを併用した2自由度最適サーボ系(SMC併用タイプ)のブロック線図を示す。本制御系は、モデル化誤差や外乱に対する追従誤差をSMCで補償することで積分補償のない最適サーボ系の応答に追従するような構成となっており、状態フィードバックによる補償を用いた2自由度積分型最適サーボ系に比べ、高いロバスト性が期待される。

SMC併用タイプの操作入力を次式に示す。

$$u = (SB_c)^{-1} \{SA_c x_e + SEy_n - \kappa |\sigma|^\alpha \text{sgn}(\sigma)\} \quad (6)$$

ただし、 S は超平面マトリックス、 σ は切換え関数、 κ 、 α は加速率到達側における設計ゲインである。

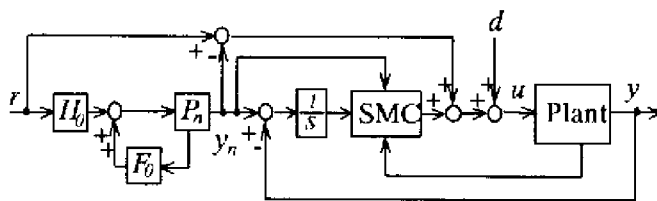


Fig.2 Block diagram of two-degree-of-freedom optimal servo system with SMC

2.3 設計仕様

各制御系の追従性能およびロバスト性を比較検討するにあたり、その設計仕様を定義する。まず、目標応答として、本油圧システムの応答性を考慮しステップ応答における遅れ時間、立ち上がり時間、および整定時間をそれぞれ $T_d=0.19s$ 、 $T_r=0.41s$ 、 $T_s=0.58s$ に追従するように設定し、各

制御系における目標値との H_2 誤差ノルムを 2×10^{-2} 以下になるように各コントローラのループゲインを設定した。

ここで、 H_2 誤差ノルムは次式で与えられる。

$$\|z\|_2 = \left\{ \int_0^\infty z^T(t) \cdot z(t) dt \right\}^{1/2} \quad (7)$$

ただし、 $z = y_n - y$ 、 $\|z\|_2$ は z に関する H_2 ノルムである。

3. 実験結果および考察

3.1 実験装置および実験方法

本実験装置はFig.3に示すように、比例電磁弁により駆動し、制御側および負荷側シリンダをフランジ継手により対向させたシステムから成り立っている。実験条件は、制御側の供給圧力を3.8MPa、油温を40°Cに設定し、各制御系に対して負荷印加時でのステップ応答試験、ステップ外乱抑圧応答試験を行った。

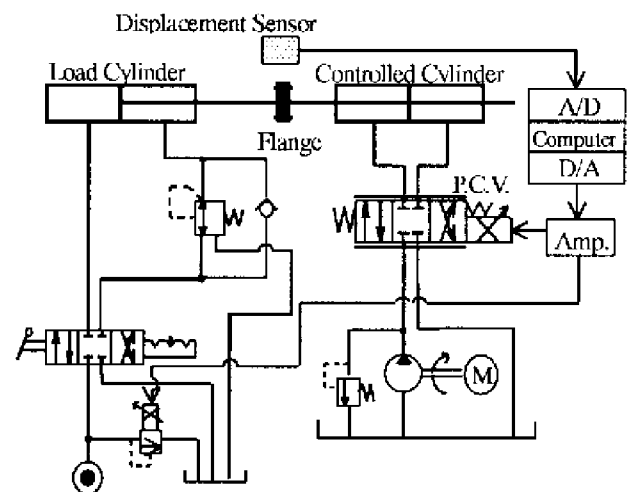


Fig.3 Schematic diagram of experimental system

3.2 制御対象の同定

本制御系において、目標値入力からピストン変

位までをプラントと考え、作動油の圧縮性を無視すればシステムの伝達関数は式(8)のように表される。

$$G(s) = \frac{K_n \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (8)$$

ここで、 K_n はゲイン、 ζ_n は減衰係数、 ω_n は固有角周波数である。

本研究では同定を行うに際し、実機によるシステムのステップ応答と、シミュレーションによるモデルのステップ応答を比較して決定する。ステップ応答試験を行った結果、式(8)の各パラメータの同定値はそれぞれ $K_n=0.94\text{digit/mm}$ 、 $\omega_n=14.7\text{rad/sec}$ 、 $\zeta_n=3.76$ となった。

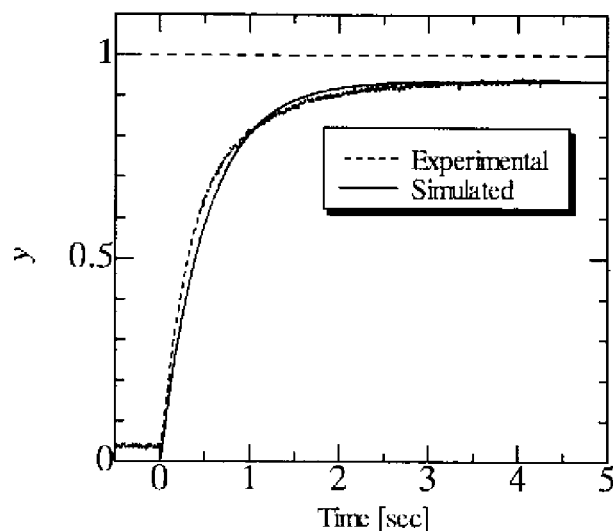


Fig.4 Identification result of controlled system

Fig.4 に実機におけるステップ応答実験の結果と、同定したモデルに基づくステップ応答のシミュレーション結果を示す。

一般に流量を入力、ピストン変位を出力とすればシリンダは積分要素となるため、閉ループ系に

は一定値入力に対する定常偏差は生じないが、実験結果には定常偏差が生じるのが確認される。これは油圧駆動方式ではシリンダによる直接駆動のため、油圧機器に内在する機械的摺動部の摩擦や比例弁のアンプのオフセット等による非線形要素の影響を直接受けてしまう結果と考えられる。

3.3 追従特性

Fig.5 に一例として、1.5MPa の負荷印加時における 2 自由度積分型最適サーボ系、SMC 併用タイプにおけるステップ応答を示す。両者とも負荷外乱が存在するにもかかわらず、偏差もなく目標値に整定するが、その追従特性に制御系の違いが確認される。

Fig.6 は負荷外乱を印加したときの最適サーボ系の出力に対する追従特性を表す H_2 誤差ノルムとその操作入力の H_2 ノルムである。2 自由度積分型最適サーボ系の場合、 W の調整による状態フィードバック補償では追従性能までは補償しきれず、負荷外乱の増大にともない誤差ノルムは大きくなる傾向を示す。一方、SMC 併用タイプでは、ほぼ一定の値を示し優れたロバスト性を

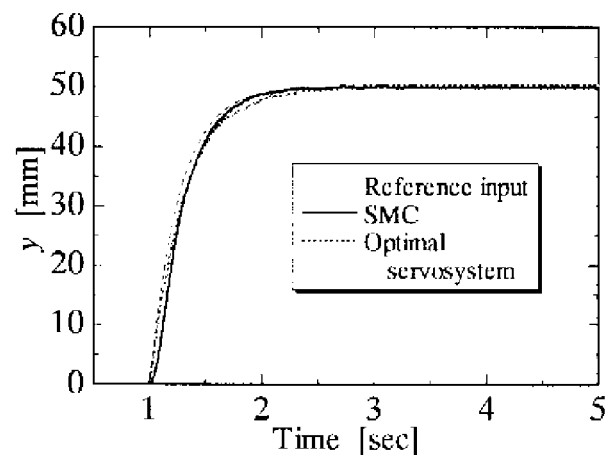
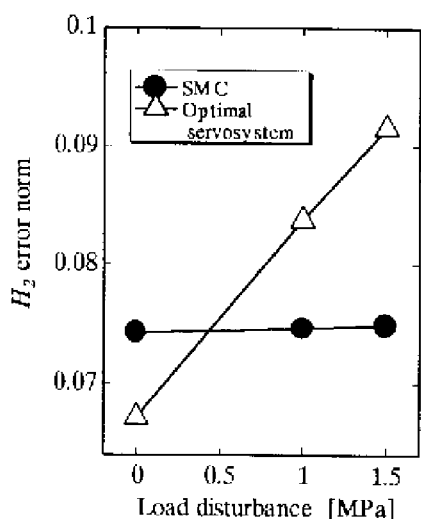
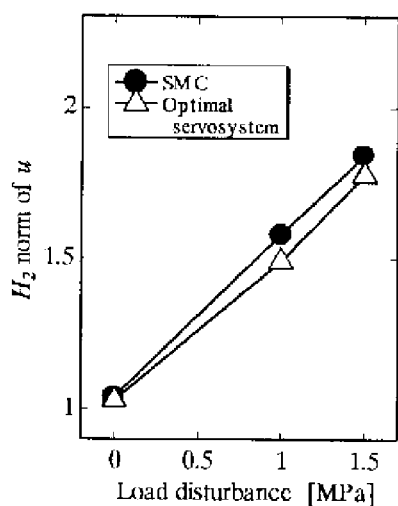


Fig.5 Experimental result of step response (with Load disturbance=1.5MPa)



(a) H_2 error norm for step reference response



(b) H_2 norm of control input

Fig.6 Estimate of H_2 error norm and H_2 norm

示す。操作入力の H_2 ノルムはSMC併用タイプが若干大きいですが、両者に大きな相違は認められない。

3.4 外乱抑圧特性

Fig.7はステップ状の外乱に対するロバスト性を検証したものであり、システムの前段に、0.75Vのステップ状の外乱入力を加えた時の外乱抑圧特性である。2自由度積分型最適サーボ系の場合、制御器の積分特性によりステップ状外乱を抑圧してはいるものの、完全に整定するまでに約2.0

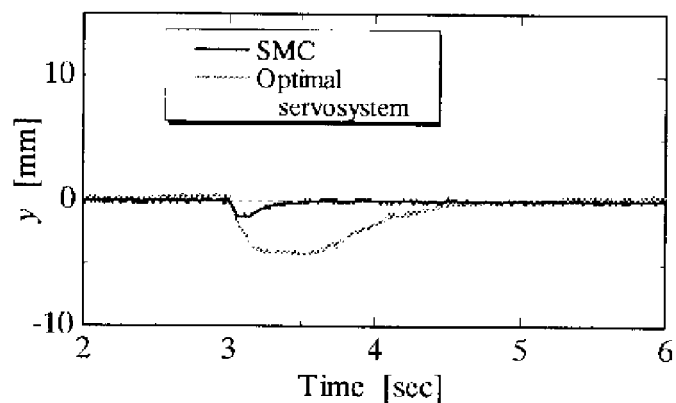
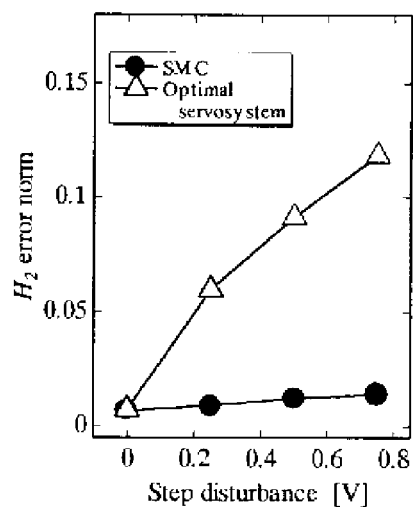
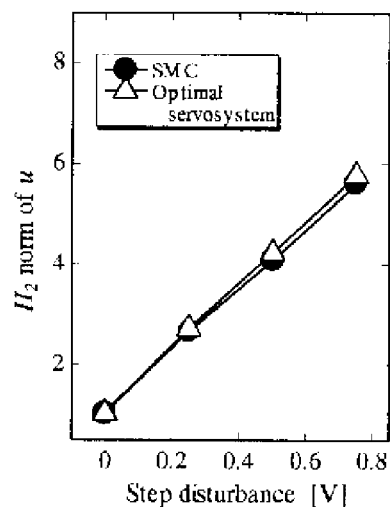


Fig.7 Response for the step disturbance

秒程度要している。これに対し、SMC併用タイプでは、外乱による変動も1.5mmと非常に小さく、整定時間も約0.5秒と良好な外乱抑圧特性を示す。



(a) H_2 error norm for step disturbance response



(b) H_2 norm of control input

Fig.8 Estimate of H_2 error norm and H_2 norm

Fig.8 はステップ外乱を加えた時の外乱抑圧特性を、 H_2 誤差ノルムとその操作入力の H_2 ノルムで評価したものである。外乱抑圧に要する操作入力には両者とも大差がないものの、2 自由度積分型最適サーボ系は加える外乱が大きくなるのにもない H_2 誤差ノルムの上昇勾配が著しく大きくなることが確認され、外乱抑圧に対するロバスト性は低いと考えられる。一方、SMC 併用タイプは、ステップ状の外乱に対しては完全に抑圧していることが確認でき、良好なロバスト性が期待できる。

4. 結 言

油圧サーボシステムの位置決め制御に、2 自由度積分型最適サーボ系とスライディングモード制御を併用した 2 自由度最適制御を適用した結果、

積分器を含まない最適サーボ系の応答に追従するような制御系が構成できることを示した。さらに、スライディングモード制御を併用した 2 自由度最適制御は、2 自由度積分型最適サーボ系に比べ、ステップ状の外乱を完全に抑圧することが実験で確認されたことから、良好なモデル追従性と外乱に対する高いロバスト性を有するといえる。

参考文献

- 1) 藤崎、池田：2 自由度積分型最適サーボ系の構成，計測自動制御学会論文集，Vol.27, No.8, 907/914 (1991)
- 2) 佐々木、高橋：油圧制御システムの加速率到達則の適用(比例弁・油圧シリンダ系の位置制御)，日本油空圧学会論文集，Vol.29, No.3, 59/65 (1998)
- 3) 野波、田：スライディングモード制御—非線形ロバスト制御の設計理論—，コロナ社(1994)