

スピルオーバを抑制する周波数成型型スライディングモード制御*

伊藤 貴之*¹, 野波 健蔵*²

Sliding Mode Control with Frequency Shaping to Suppress Spillover

Takayuki ITO and Kenzo NONAMI

This paper deals with a new design method for sliding mode control with frequency shaping. The concept is suppression of spillover phenomena for a flexible system. A conventional hyperplane consists of a desired reference model without dynamics. Therefore, the sliding mode control system often becomes unstable due to chattering and spillover phenomena in the high-frequency region. This method aims to suppress a control input in a high-frequency region by filtering control input or measured output using a low-pass filter. The new sliding mode control system is designed as an augmented system which consists of a reduced-order model and a low-pass filter. We have applied this method to a four-story flexible structure. We have verified from simulations and experiments that this method has good performance and is very useful for suppressing spillover phenomena.

Key Words: Sliding Mode Control, Frequency Shaping, Filtering, Spillover Suppression, Chattering, Flexible System, Simulation, Experiment.

1. 緒論

スライディングモード制御理論は、可変構造制御理論の中で最も有力かつ理論の体系化が進んだ非線形ロバスト制御理論である。線形系はもちろん非線形系、パラメータ変動系、時変系、未知パラメータや未知外乱を有する系などに容易に適用でき、希望の特性を切り換え面として設計すれば、システムは等価的に希望の特性に拘束され適応する。大きな特徴として、高速スイッチングによって状態を超平面上に拘束することにより制御対象の次数を下げ、非線形なハイゲイン切り換え入力構造によって不確かさを含む系に対する優れたロバスト性や外乱抑制効果などを有していることがあげられる。これらの点および、設計の簡便性とあいまって多くの応用研究が報告されている。

近年の建築物の高層化、マニピュレータの軽量化に伴う弾性化など様々なものが柔軟構造物化しているなか、スライディングモード制御理論においてもこのような柔軟構造物に対する制御系の設計は非常に重要な問題となる。しかし、従来のスライディングモード制御では、数学モデル導出の際に無視した高次振動モードについての考慮はされておらず、そのハイゲインでの切り換えのために実システムに適用するとスピルオーバ現象を引き起こしてしまうことが確認されている。

そこで、これらのスピルオーバ現象を抑制するため、現在、周波数成型を用いてスピルオーバを回避する方

法が周波数成型型スライディングモード制御として提案されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。周波数成型型スライディングモード制御は、切り換え関数に線形オペレータを導入することにより、超平面自身に動特性をもたせ、これにより制御帯域を限定するスピルオーバ抑制の超平面を設計できる事の特徴としている。現在、この線形オペレータは、 H_2 制御理論、 H_∞ 制御理論および、 μ 設計理論などの周波数成型理論を適用して設計する方法が一般的に行われている。これらは、非線形ロバスト制御理論と線形ロバスト制御理論の融合をはかった非常に革新的な理論といえ、超平面を周波数成型するだけでなく、それぞれの制御理論の特徴をもたせることができる。しかし、重み関数の選定の難しさや線形オペレータの高次数化等の問題などがある。

そこで本研究では、実システムに対する設計も簡便でありかつ、スピルオーバ抑制に関して非常に有力である古典的なフィルタリングに基づいた周波数成型型スライディングモード制御法の設計法について述べる。

これは、直接超平面を周波数成型する従来型と異なり、拡大系としてフィルタをモデルに内包させるだけで、超平面自身はその拡大モデルに対して従来のスライディングモード制御と同様に設計を行うため簡便でありかつ高次数化しない。またフィルタリングを、制御入力もしくは観測量に対して行うということは、カットオフ周波数以上の周波数成分やノイズ成分などを無視することができるため、モデリングの際に無視した高次振動モードの影響を制御対象もしくは制御器に対して低減させるもので、古典的な手法でありながら、

* 原稿受付 1996年7月19日。

¹ 学生員, 千葉大学大学院 (〒263 千葉市稲毛区弥生町1-33)。² 正員, 千葉大学工学部。

スピルオーバの抑制に対して非常に有効である。

また周波数成形は、設計モデルの入力端もしくは出力端および入出力端のいずれかで行われるが、これらを本論文では入力端成形型、出力端成形型、入出力端成形型と呼ぶことにする。従来の周波数成形理論を用いて超平面を設計する方法では、一般的に入出力端成形型で周波数成形される。本設計のフィルタを有する拡大系に対して超平面を設計する方法は、入力端もしくは出力端のどちらかを行えばスピルオーバ抑制に対して十分であるので、これら二つの方法について考える。

本論文では、以上に示した手法の提案および設計法を示し、さらに、その有効性および性能の検証として、4層の塔状構造物モデルに適用し、シミュレーションおよび実験を行った。この結果、本設計法は、スピルオーバ抑制に関して非常に有効であり、ノミナル性能、ロバスト性能に関して良好な結果が得られたことを報告する。

2. 周波数成形型スライディングモード制御

周波数成形型スライディングモード制御は、従来のスライディングモード制御と異なり、切り換え関数に動特性をもたせることを特徴としている。この動特性に任意の性質をもたせることにより制御帯域を限定しスピルオーバを抑制する超平面の設計が行える。

次の正準系のシステムのプラントモデルを考える。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

ここで、 $x_1 \in \mathcal{R}^{n-m}, x_2, u \in \mathcal{R}^m, B_2$ はフルランクとする。このとき切り換え関数は、従来と異なり新しく次式のように定義される。

$$\psi = S(x_1) + x_2 \quad (2)$$

ここで $S(\cdot)$ は、次式に示すような線形オペレータである。

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Fz + Gx \\ S(x) &= Hz + Lx \end{aligned} \quad (3)$$

この z は線形オペレータの状態変数である。

現在 $\{F, G, H, L\}$ を、周波数成形理論により直接求める方法が提案されているが、本論文では、古典的なフィルタリングに基づく方法について述べる。この手法は、モデルにフィルタを含む拡大系を作成し、その拡大系に対して超平面の設計を行い、スライディングモード制御系を設計する。このため、切り換え関数にモデルの状態量だけでなくフィルタの状態量も考慮される。これは、切り換え関数に動特性をもたせていると考えられる。このことから本設計法は、従来の周波数成形理論を用いて超平面を設計する方法の中の特殊な方法であると考えられる。

またフィルタリングには、入力端を成形する方法、出力端を成形する方法、入出力端を成形する方法があ

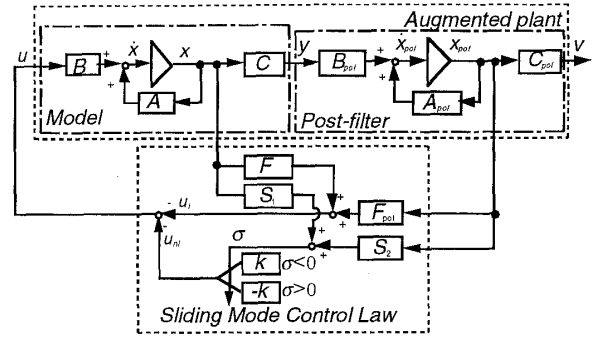


Fig.1 Block diagram of sliding mode control with post-filter

るが、スピルオーバを抑制するためには、入力端もしくは出力端のどちらかについて行うことで十分に有効であるので、本論ではこの二つの方法について述べる。

2.1 出力端周波数成形のための拡大系 スピルオーバ現象は、観測スピルオーバを抑制すれば発生しないことが理論的に解明されている。これより、まずはじめに観測スピルオーバを抑制するために、出力端成形を行う。

切り換え関数を $\sigma = Sx$ のように全状態を用いて等価制御系を設計する場合は、フィルタの次数に対してある制約が生じる。図1から分かるように、フィルタの観測量はスライディングモード制御系の設計において直接評価することができない。このとき $C_{pof} = I$ という条件を与えると、 $v = x_{pof}$ となりフィルタの観測量を陽に評価することができる。しかし、SISOのフィルタを考える場合この条件を満たすものは1次のフィルタのみである。したがって、本設計は1次のフィルタに限定して考える。もし切り換え関数を $\sigma = Sy$ のように観測出力のみを用いて等価制御系を設計する場合はフィルタに制約は生じない。今、次式に示すモデルを考える。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (4)$$

このモデルの観測量に対して次式に示す低域フィルタを用いてフィルタリングを行うと仮定する。

$$\begin{aligned} \dot{x}_{pof} &= A_{pof}x_{pof} + B_{pof}y \\ v &= C_{pof}x_{pof} \end{aligned} \quad (5)$$

このとき観測量全てに対してフィルタリングを行うため、式(5)に示す各マトリクスは、それぞれの観測量にかける1次の低域フィルタが対角に並んだものである。このため A_{pof} の次数は観測量の次数と等しくなる。式(5)より拡大システムのブロック線図は図1の上半分で与えられ、状態方程式は次式のように得られる。

$$\dot{x}_{aug} = A_{aug}x_{aug} + B_{aug}u \quad (6)$$

ここで

$$x_{aug} = \begin{bmatrix} x_{pof} \\ x \end{bmatrix}, \quad A_{aug} = \begin{bmatrix} A_{pof} & B_{pof}C \\ 0 & A \end{bmatrix}, \quad B_{aug} = \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix}$$

この拡大系の状態方程式を用いて超平面を設計する。

超平面は次式のように与える.

$$\sigma = Sx_{aug} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{prf} \end{bmatrix} \quad (7)$$

S は, 任意の設計法により設計を行う. またシステムの状態が超平面に拘束されていると, $\sigma = \dot{\sigma} = 0$ である. これより等価制御入力に次式のように与えられる.

$$u_l = -(SB_{aug})^{-1}SA_{aug}x_{aug} = - \begin{bmatrix} F & F_{prf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{prf} \end{bmatrix} \quad (8)$$

このとき出力端周波数成形型スライディングモード制御系のブロック線図を図1に示す.

このとき本設計法において設計されるスライディングモード制御系は, $Range(B_{aug})$ に不確かさや外乱が存在したとしても, 制御対象はそれらに不感となっている. これはいわゆるマッチング条件と呼ばれるもので, フィルタの動特性とは独立にこの条件は成立する.

しかし出力端成形型は, 全観測量にフィルタリングを施さなければならないため, 制御システムの高次数化が問題となる. 特に多くの観測量を有する高次のシステムに適用する場合にこれは実現上大きな問題となる.

2.2 入力端周波数成形のための拡大系 入力端成形型は, 制御対象へ直接影響をおよぼす制御スピルオーバを抑制することができるので, 出力端成形と同様にスピルオーバ現象を抑制することができる. さらに入力端成形型は, 従来のスライディングモード制御の大きな問題であるチャタリングを, 同時に抑制することができる. この設計法について述べる.

まず, 制御対象の状態方程式を次式に示す.

$$\dot{x} = Ax + Bv \quad (9)$$

この制御対象に対して, 次式に示す低域フィルタを挿入する.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{prf} &= A_{prf}x_{prf} + B_{prf}u \\ v &= C_{prf}x_{prf} + D_{prf}u \end{aligned} \quad (10)$$

式(9)に式(10)を代入すると

$$\dot{x} = Ax + B(C_{prf}x_{prf} + D_{prf}u) \quad (11)$$

となる. したがって拡大システムの状態方程式は, 次式のように与えられる.

$$\dot{x}_{aug} = A_{aug}x_{aug} + B_{aug}u \quad (12)$$

ここで

$$x_{aug} = \begin{bmatrix} x \\ x_{prf} \end{bmatrix}, \quad A_{aug} = \begin{bmatrix} A & BC_{prf} \\ 0 & A_{prf} \end{bmatrix}, \quad B_{aug} = \begin{bmatrix} BD_{prf} \\ B_{prf} \end{bmatrix}$$

となる. この式(12)を用いて超平面を設計する. 超平面は次式のように与える.

$$\sigma = Sx_{aug} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{prf} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)の S は, 任意の設計法により設計を行う. 得られた超平面から, リアプノフ関数を負定とするような制御入力は次式のように与えられる.

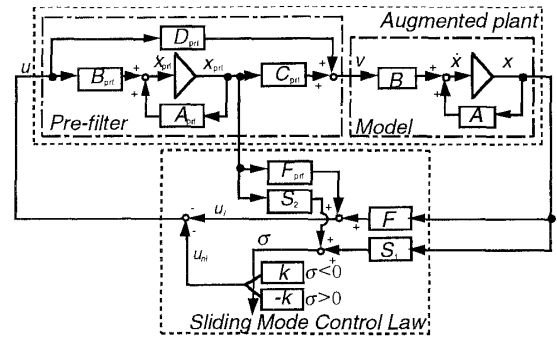


Fig.2 Block diagram of sliding mode control with pre-filter

$$u = u_l + u_{nl} = -(SB_{aug})^{-1}SA_{aug}x_{aug} - k \operatorname{sgn}(\sigma) = - \begin{bmatrix} F & F_{prf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{prf} \end{bmatrix} - k \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (14)$$

チャタリングを含む高周波振動成分は, 低域フィルタにより同時に低減されるため, 本手法では, 非線形入力項に対して, 従来のチャタリング抑制法を用いずに, 符号関数で切り換える.

本設計法は, 超平面に拘束する速さをフィルタリングにより緩やかにすることができる. このことからハイゲインでの切り換えの影響を制御対象に与えないため, スピルオーバ抑制には非常に効果的であると考えられる.

また, $Range(B_{aug})$ のレンジスペースに不確かさや外乱が存在したとしても, スライディングモードが生じている限り不感とすることができる. 本設計法は, フィルタの D_{prf} マトリクスに依存してマッチング条件の成否が決まる. このときの制御系のブロック線図を図2に示す.

3. シミュレーション

前章で述べたそれぞれの設計法を4層の柔軟構造物モデルに対して適用したときのシミュレーションについて述べる. 柔軟構造物として図3に示す塔状構造物を用いる. この塔状構造物は, 4層の構造となっており, 最上部の m_4 部分にハイブリッド動吸振器を有している. 本装置は, 並進1方向のみに振動する. 観測量は, m_1, m_4 部とアクチュエータの変位である. モデルおよびハイブリッド動吸振器の諸元を表1に示す. この制御対象の状態空間モデルは, 有限次元モデルとして弾性4次モードまで考慮したモデル化の後, モード変換を行い次式の様に導出される.

$$\dot{x}_f = A_f x_f + B_f u \quad (15)$$

ここで,

$$x_f = [\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3 \ \xi_4 \ x_a \ \dot{\xi}_1 \ \dot{\xi}_2 \ \dot{\xi}_3 \ \dot{\xi}_4 \ \dot{x}_a]^T$$

$$A_f = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Omega_f^2 & -\Lambda_f \end{bmatrix}, \quad B_f = \begin{bmatrix} 0 \\ f_f \end{bmatrix}$$

$\xi_i (i=1,2,3,4)$ はモード座標系での各モード変位, u は

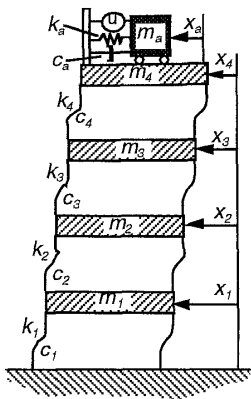


Fig.3 Model of four-degree-of-freedom tower structure

Table1 Specification of primary structure and hybrid DVA

Primary structure	Hybrid DVA
$m_1=1.62[\text{kg}], m_2=1.48[\text{kg}]$	$m_a=0.135[\text{kg}]$
$m_3=1.48[\text{kg}], m_4=2.20[\text{kg}]$	$k_a=21.97[\text{N/m}]$
$k_i=2600[\text{N/m}] (i=1,2,3,4)$	$c_a=0.368[\text{Ns/m}]$
$c_i=0.08[\text{Ns/m}] (i=1,2,3,4)$	$K_f=2.0[\text{N/A}], K_r=2.0[\text{V}]$
	$R=2.6[\Omega], L=0.72[\text{mH}]$

制御トルク, Ω_f^2, Λ_f はモード変換後の剛性行列と減衰行列を示す。このフルオーダーモデルの m_4 部に作用する外乱から m_4 部の変位までの伝達関数のゲインを図4の実線で示す。これより、弾性振動モードはそれぞれ約 2, 6, 10, 12 [Hz] である。

設計に用いるモデルは、式(15)の有限次元モデルを弾性2次モードまで低次元化したものであり、次式のように表される。

$$\dot{x}_r = A_r x_r + B_r u \tag{16}$$

ここで、

$$x_r = [\xi_1 \ \xi_2 \ x_a \ \xi_1 \ \xi_2 \ \dot{x}_a]^T$$

$$A_r = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Omega_f^2 & -\Lambda_f \end{bmatrix} \quad B_r = \begin{bmatrix} 0 \\ f_r \end{bmatrix}$$

Ω_f^2, Λ_f は、 Ω_f^2, Λ_f から弾性1,2次モード成分と動吸振器に関する項を取り出した行列である。

式(16)に示す低次元化モデルを用いて制御系の設計を行う。シミュレーションは、低次元化モデルに対して設計した制御系を用いて、式(15)のフルオーダーモデルに対して行う。このときモデルの m_4 部分に初期速度 0.02 [m/s] をもつとし、これをインパルス外乱とみなしてその時刻歴応答をみる。さらに、 m_4 部に40%質量増の変動を与えたモデルに対して同様のシミュレーションを行いそのロバスト性について検証する。このとき、ハイブリッド動吸振器の特徴を生かして、アクチュエータのストロークの制約から、制御入力の数値に制限を与え制御を行う。もちろん、スライディングモード

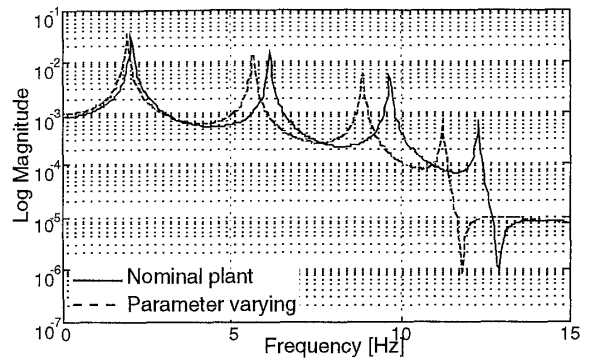


Fig.4 Characteristics of plant

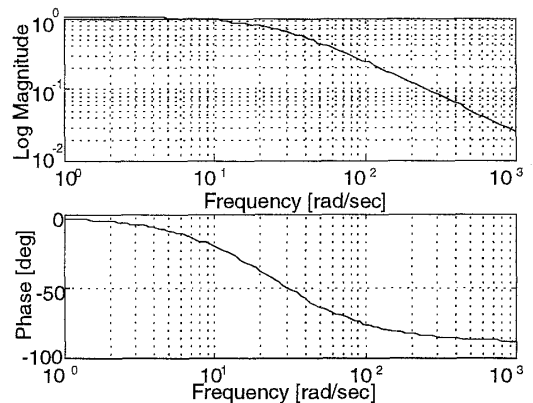


Fig.5 Frequency response of low-pass filter

制御はこういった非線形要素があっても性能を劣化させることなく制御することができる。

3.1 出力端周波数成形法 2.1節に示した設計法を用いて、出力端成形型スライディングモード制御系を設計する。設計に用いた低域フィルタの周波数応答を図5に示す。低域フィルタの次数は1次で、時定数は $T=0.04[\text{sec}]$ である。この時定数は、折れ点周波数が弾性2次モードの近傍となるように選定した。超平面の設計は安定余裕を指定する方法を用い⁽⁴⁾、等価制御系の極の実部が-8よりも小さくなるように設計する。このとき等価制御系の極には制御入力の数だけ零点が存在する。また制御入力、最終スライディングモード制御法を用いて次式のようなになる。

$$u = u_l + u_{nl} = -(SB_{aug})^{-1} SA_{aug} x_{aug} - k \cdot \frac{\sigma}{\|\sigma\| + \eta} \tag{17}$$

この時、非線形入力項にはチャタリング対策として飽和関数を用いて抑制する方法を用いる。切り換え幅 $k=0.2$, 飽和関数 $\eta=0.01$ としてシミュレーションを行った。シミュレーションを行ったときの制御入力、 m_4 の変位、切り換え関数の時刻歴応答を図6(a)(b)(c)に実線で示す。図6(c)よりすばやく超平面に状態を拘束していることが分かる。さらに図6(b)に示す m_4 の変位からスピルオーバを起こさずにすばやく制振していることが分かる。これより良好な制御性能を示している

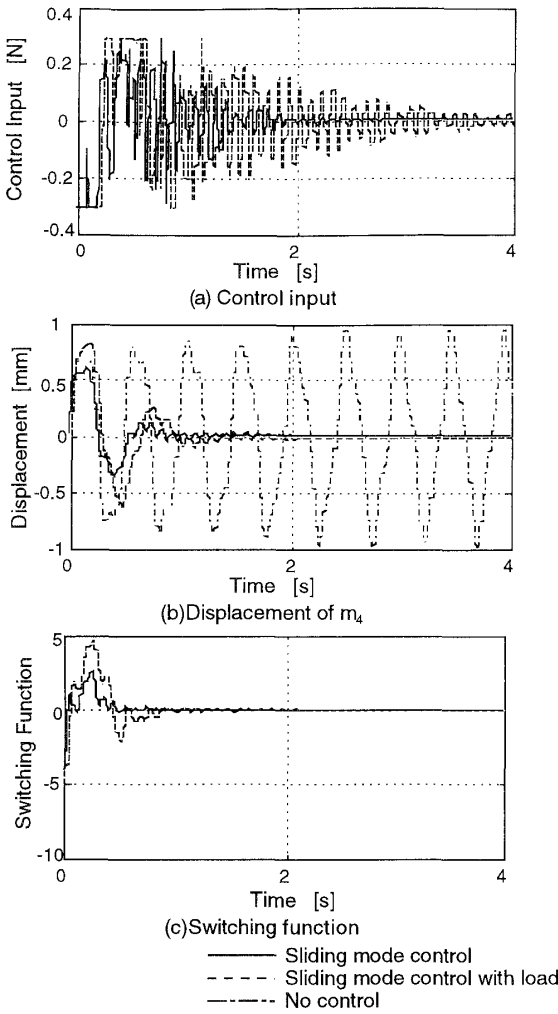


Fig.6 Simulation of Sliding Mode Control with post-filter

といえる。このとき制御入力、モデルに入る直前のもので、図6(a)から制御入力の絶対値に制限が与えられていることが分かる。

3.2 入力端周波数成形法 つづいて、入力端周波数成形法によるスライディングモード制御系のシミュレーションを示す。この時に用いた2次の低域フィルタの周波数応答を図7に示す。この折れ点周波数は、弾性2次モードの近傍となるように選定した。また、超平面の設計は、出力端と同様に安定余裕を指定する方法を用いた。

まず、挿入した低域フィルタの前後つまり図2での u と y の値の時刻歴応答およびそのFFT解析を図8(a)(b)に示す。図8(b)よりフィルタの前では制御スピルオーバーと思われる各固有振動モードが強く現れているが、低域フィルタにより高次振動モード成分が低減されていることがわかる。

つぎに、図9(a)(b)(c)に制限された制御入力、 m_4 部の変位、切り換え関数の時刻歴応答を実線を示す。図9(b)より、スピルオーバーを起こさずにすばやく制振し

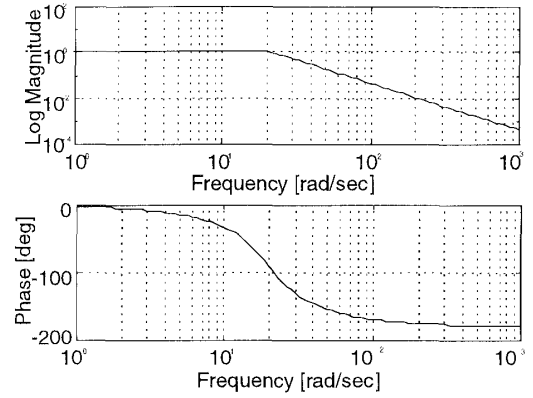
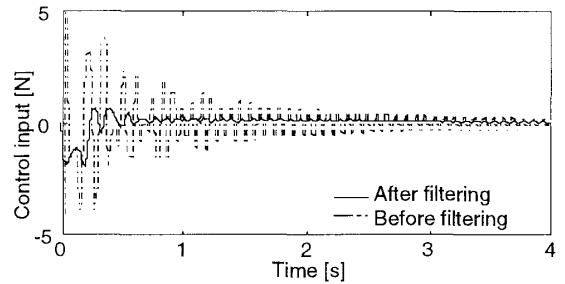
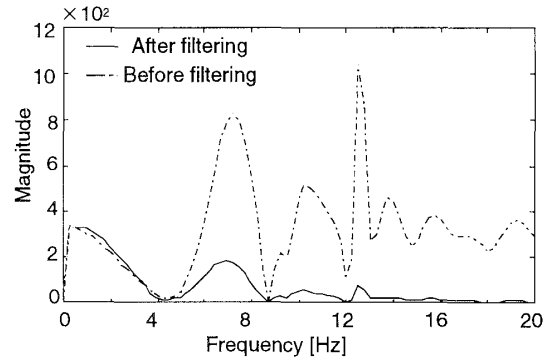


Fig.7 Frequency response of low-pass filter



(a) Time history response



(b) Frequency component

Fig.8 After and before filtering control input

ていることがわかる。図9(a)に示す制御入力は、モデルに入る直前のもので、図2の v に絶対値の制限を与えたものである。制御入力には、弾性4次モード成分と思われる細かい振動が残っているが制御に悪影響を及ぼしていないことがわかる。

以上から本設計法は、制御スピルオーバーおよびチャタリングやそれに類する高周波振動成分を同時に抑制するスライディングモード制御系であることが分かる。また本設計法の大きな特徴として、非線形入力項に従来のチャタリング抑制法を用いずに、安定な制御を行えることがあげられる。

3.3 ロバスト性の検証 本設計法では制御入力や観測出力に対してフィルタリングを行うことによりスピルオーバーを抑制することができた。本節ではフィル

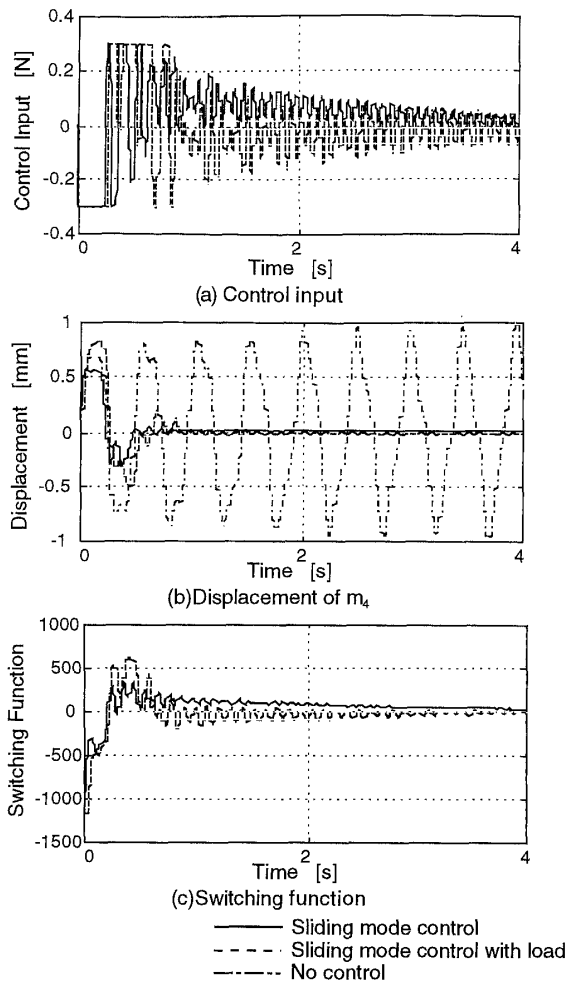


Fig.9 Simulation of sliding mode control with pre-filter

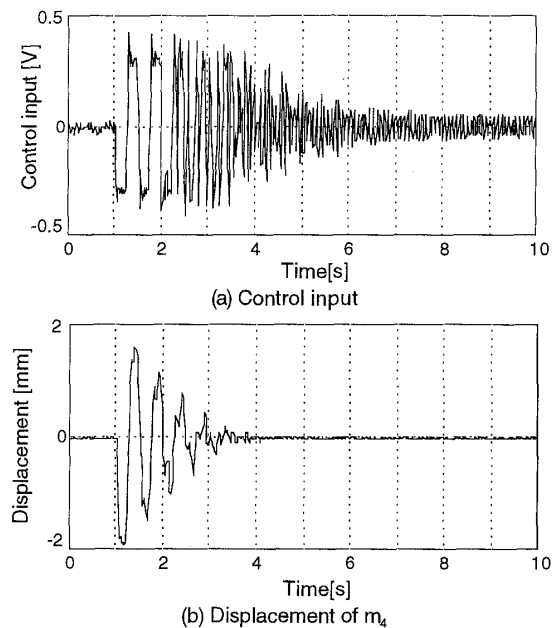
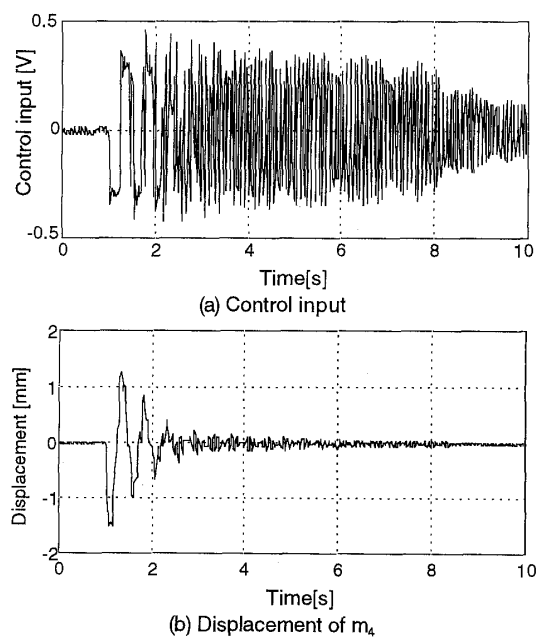
タを挿入することがスライディングモード制御理論の優れたロバスト性に与える影響について考察を行う。

m_4 部に40%質量増のパラメータ変動を与えたモデルに対して入力端成形型、出力端成形型のそれぞれに対してシミュレーションを行った。図4に変動を有するモデルの m_4 部に作用する外乱から m_4 部の変位までの伝達関数のゲインを点線で示す。質量増のため固有振動数が全体的に低くなっていることが分かる。シミュレーション結果をそれぞれ図6,9に点線で示す。40%の質量増に対しても安定であることから、優れたロバスト安定性を有していると考えられる。また、それぞれの m_4 部の変位の時刻歴応答より、ノミナルモデルの応答に対してややオーバーシュートしているもののすばやく制振をしている。このことから、ともに実用に耐えうるロバスト制御性能を有していると考えられる。

これらの点から数値的検証ではあるが、フィルタによって、優れたロバスト性能が劣化するという現象は見られない。

4. 実験

3章でシミュレーションを行った制御系を実システ

Fig.10 Time history response for impulse disturbance to m_4 Fig.11 Time history response for impulse disturbance to m_3

ムに対して適用する。このとき、出力端周波数成形型スライディングモード制御法は、制御システムの高次数化や、任意のフィルタを選ぶことができないなどの問題から一般的に実用が困難な手法であるので、実用の観点から一般的である、入力端成形型スライディングモード制御についてのみ実験を行った。実験装置は、図3に示すモデルの実システムで、文献(3)と同一のものである。

実験は、インパルス外乱に対する時刻歴応答により検

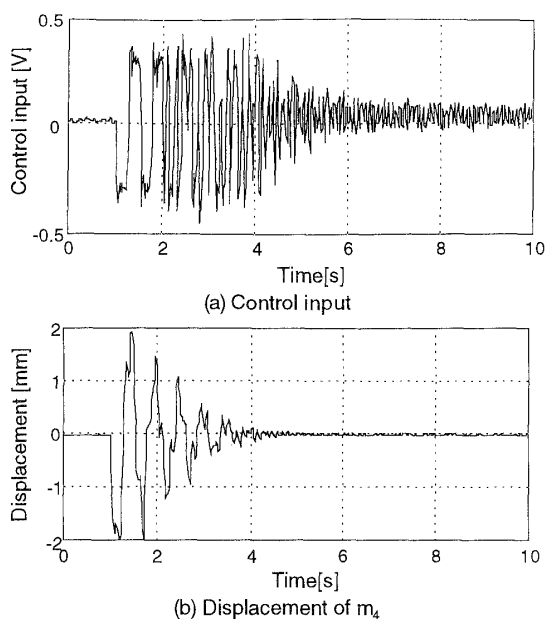


Fig.12 Time history response for impulse disturbance to m_4 with load to m_3

証を行う。図10に m_4 部にインパルス外乱を与えたときの時刻歴応答を示す。これより、スピルオーバを起こさずにすばやく制振していることがわかる。また、図10(a)よりシミュレーションと同様に制御入力に弾性4次モード成分が現れているが、制御に悪影響を及ぼさず、スピルオーバを励起していない。これらの点から無視した高次振動モード成分をフィルタにより抑制していることがわかる。

本制御対象は、弾性3次モードでスピルオーバ不安定となりやすいことが経験的にわかっている。このことから、弾性3次モード成分をより強く発生させることができる m_3 部分にインパルス外乱を与えたときの時刻歴応答について考察する。図11にその応答を示す。すばやく制振を行い、弾性3次振動モード成分を励起していない。このことよりスピルオーバ抑制に極めて効果的であることがわかる。

次に、ロバスト性の検証として m_3 部に40%増の質量変動を与えたときのインパルス応答を図12に示す。ノミナル応答に比べ制振がやや遅れているが、スピルオーバを起こさずにすばやく制振している。これより優れたロバスト安定性を有していると考えられる。また、40%の質量増に対して大きな応答の変化が見られないことから、実用に耐えうるロバスト性能であると考えられる。

これらの点から入力端成形型スライディングモード制御法は実システムに対しても、スピルオーバ抑制に関して非常に有効な手法であることがわかる。また、符号関数の切り換えに対しチャタリングも抑えている。

5. 結論

周波数成形型スライディングモード制御に関して、古典的なフィルタリングに基づく周波数成形型の設計法を示し、その設計法に基づいて制御系を設計した。得られた制御系によりシミュレーションを行いその有効性および性能を検証した。以下にそれぞれの手法に関する結論を示す。

(1)出力端周波数成形型スライディングモード制御法は、スピルオーバの根源である観測スピルオーバを抑制するため、スピルオーバ抑制の観点から非常に有効な手段であると考えられる。しかし、観測量全てにフィルタリングを行うため、制御システムの高次化が免れない。また、任意のフィルタを選ぶことができない。したがって、一般的には実現が困難な方法である。

(2)入力端周波数成形型スライディングモード制御は、制御入力内に存在する無視した高周波振動成分を低減することができることを示し、これにより制御スピルオーバ抑制に対して非常に有効な手法であると考えられる。またハイゲインでの切り換えを抑制し緩やかに超平面に拘束させるためチャタリングの抑制に対しても非常に有効であると考えられる。これらの点に関して実験を行い、優れたスピルオーバ抑制効果が得られたことを示した。

(3)出力端型、入力端型ともにパラメータ変動に対して良好なロバスト安定性を示しており、実用に耐えうるロバスト制御性能も有していると考えられる。入力端型においては、実証実験を行い優れたロバスト性を有していることを示した。以上のことからフィルタリングに基づく周波数成形型スライディングモード制御法は、スピルオーバの抑制に対して非常に有効である。さらに設計も従来のスライディングモード制御系の設計と同程度に簡便であるといえ、実システムに対して非常に有効な手法であると考えられる。

参考文献

- (1) Young, K.D., Ozuguner, U. :Frequency Shaping Compensator Design for Sliding Mode Control, Int. J. Control, 1005(1993), 57-5.
- (2) Nonami, K., Nishimura, H., Tian, H. : H_∞/μ Control-Based Frequency Shaped Sliding Mode Control for Flexible Structures, JSME Int.Journal, 39-3, C(1996), 493-501.
- (3) 伊藤貴之, 野波健蔵, 岩本浩祐, 西村秀和: μ 設計理論で周波数成形されたスライディングモード制御による柔軟構造物のアクティブ制御, 機論, 60-572, C(1996), 112-119.
- (4) 野波健蔵, 田宏奇:スライディングモード制御, (1994), 63-65, コロナ社.