

## ロバスト超平面を有するスライディングモード制御の 柔軟構造物への適用\*

伊藤 貴之<sup>\*1</sup>, 野波 健蔵<sup>\*2</sup>

### Application of Sliding Mode Control with Robust Hyperplane to Flexible Structure

Takayuki ITO and Kenzo NONAMI

Sliding mode control theory is nonlinear robust control theory and one of variable structure control. This theory has good performance against uncertainty satisfied matching condition. But the conventional sliding mode control system often becomes unstabled due to high frequency vibration caused by unmodelled dynamics. In this paper, we consider application of Frequency-Shaped Sliding Mode Control (FSSMC) to flexible structure. Flexible structure has uncertainty on the control input side, e. g. time delay, friction, and so on. It is difficult for control of flexible structure because of these uncertainty, when we applied a linear control. Applying sliding mode control, we can design a eternal system against these uncertainty and dynamics for sake of mating condition satisfied. Moreover, closed loop system does not become unstabled due to unmodelled dynamics for sake of robust hyperplane designed using  $H_\infty$  theory. For example of application, we have just applied to the flexible truss structure with control momentam gyro (CMG). We have verified from simulation and experiment that this method has good performance.

**Key Words:** Sliding Mode Control,  $H_\infty$  theory, Matching Condition, Robust Hyperplane, Flexible Structure, Simulation, Experiment.

#### 1. 緒言

スライディングモード制御理論は、切り換え入力を用いることによりシステム構造を変化させるため可変構造制御理論の一つとして捉えられる。大きな特徴として、入力部に印加する非線形要素および外乱いわゆるマッチング条件を満たす不確かさに対してシステムが不変となる性質を有していることから優れたロバスト性を有する制御理論である。このため、ロボットアームに代表される非線形性を有する系への制御に有効な手法として認識されている。しかし動作の高速化や材料の軽量化などにより制御対象自体を剛体とみなすことが出来ない系に対して設計を行った場合従来の設計手法では無視したダイナミクスを補償する制御器を求めることは難しい。そこで周波数成形理論を用いることにより等価制御系に任意の周波数特性を持たせることによりスピルオーバを抑制するスライディングモード制御として周波数成形型スライディングモード制御理論が提案されている<sup>(1)(2)(3)</sup>。

周波数成形型スライディングモード制御理論は、元の状態空間モデルを拡大することにより、超平面自身に

動特性をもたせる手法で、この動特性を周波数成形理論を用いて設計する。これにより対象にモデル化されない寄生要素がある場合、その周波数領域でのゲインを下げ不安定化を防ぐことができる。しかしこの切換面の設計は、最適化手法の延長であり、等価制御系のロバスト性を十分に補償するものではない。そこで野波らは、周波数成形理論としてロバスト制御理論を適用することにより等価制御系の不確かさに対してロバストな超平面を設計する方法を提案し<sup>(4)</sup>、柔軟構造物に対して適用、実験を行っている。本手法は伊藤ら<sup>(4)</sup>によってその有効性が検証されているがノミナル性能において満足のいく結果が得られなかった。北村ら<sup>(5)</sup>はマッチング条件をみたす非線形摩擦に対して有効であることを示したがパラメータ変動に対して問題を残している。もともと物理的な意味を待たないサブシステムに対してその不確かさを考えることは難しい。

一方、柔軟構造物に対する制御系の設計は  $H_\infty$  制御理論を代表とする線形ロバスト制御理論が非常に有効であることが知られている。線形ロバスト制御理論は、閉ループ周波数特性を任意に成形することができるため、スピルオーバ抑制のみならずパラメータ変動などの不確かさに対して非常に有効かつ良好な制御性能が得られることが多くの研究により明らかとされている。

\* 原稿受付 1998年3月23日。

\*<sup>1</sup> 正員, 千葉大学大学院(☎ 263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)。

\*<sup>2</sup> 正員, 千葉大学工学部。

E-mail: taka@mec2.tin.chiba-u.ac.jp

しかし、実システムにおいて構造部は多くの場合において線形とみなせるが、制御装置部は制御力の伝達に関する1次遅れや摩擦、ガタなどの非線形要素などの不確かさが含まれることが多く、これらに起因して制御性能が著しく劣化してしまう。そこで実システムに対して線形な制御手法を適用する際に、これらに対して何らかの補償を行わなければならない場合がある。これらの補償は本来の制御とは無関係であり、また閉ループ系の安定性を補償しない。こういったダイナミクスや不確かさは、マッチング条件を満たしているためスライディングモード制御ではすばやく超平面に拘束することにより不変なシステムを構築できると考えられる。

そこで本論文では、入力端に存在するダイナミクスを陽に考慮したモデルを与え、このモデルに対して周波数成形型スライディングモード制御を適用することについて示す。これにより、システムの不確かさがサブシステムについて存在する系となりロバスト制御問題の解として切り換え面を設計することが出来る。また適用例として実対象に対する実験も行った。対象は宇宙構造物などに多く利用されるトラス構造物を用い、制御装置はコントロールモーメントジャイロ (CMG) を用いた。

## 2. 周波数成形型スライディングモード制御

**2.1 周波数成形型切換面の設計** 周波数成形型切換面の設計について述べる。周波数成形型切換面は、もとの状態空間モデルを拡大して超平面の設計を行う。いま次式に示す正準系のシステムを考える。

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

ここで、 $B_2$ は、正方でフルランクである。

超平面に状態が拘束されるとすると人力の次数だけシステムが低次元化される。このシステムを等価制御系と呼び次式のように与えられる。

$$\dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 \quad (2)$$

式(2)に対して、 $x_2$ を仮の入力とみなし次式の評価関数を最小とするように切り換え面を設計することができる<sup>(6)</sup>。

$$J = \int_{t_s}^{\infty} (x_1^T Q_{11} x_1 + 2x_1^T Q_{12} x_2 + x_2^T Q_{22} x_2) dt \quad (3)$$

ここで、 $t_s$ はスライディングモードの発生した時刻である。周波数成形型切り換え面は、この重みを周波数依存にすることにより  $\mathcal{H}_2$ 最適化問題の解として与えられる。また、評価関数を  $\mathcal{H}_\infty$ ノルムに置き換えた  $\mathcal{H}_\infty$ 最適化問題としても切り換え面を設計することが出来る。得られる切り換え面は新しく次式のようになる。

$$\begin{aligned} \psi &= Hz + Lx_1 + x_2 \\ \dot{z} &= Fz + Gx_1 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)からわかるように切り換え面自体にある動特性を持っている。

式(1)(4)より拡大システムは、

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & G & \emptyset \\ \emptyset & A_{11} & A_{12} \\ \emptyset & A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \emptyset \\ \emptyset \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (5)$$

$$\psi = \begin{bmatrix} H & L & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

となる。

これより切り換え面に動特性を持たせることは、もとのシステムの部分空間であるサブシステムに対して任意の動特性を有するフィルタを用いて閉ループを構成することによる、状態空間の拡張であると考えられる。

## 2.2 柔軟構造物への適用

柔軟構造物の実システムに対して制御系を設計したとき、制御入力側には何らかのダイナミクスを有することがある。設計時には、こういったダイナミクスは理想的であると無視できるものとして扱うが、適用の際このダイナミクスのために制御性能の劣化、最悪の場合制御不能となることがある。とくに非線形な要素が存在するとき、線形制御ではそれを補償することは難しい。そこで、こう言った特性を陽に考慮したモデルを与え、このモデルに対して周波数成形型スライディングモード制御を適用することを考える。

いま、構造物の状態方程式を次式のように与える。

$$\dot{x}_p = (A_p + \Delta A_p)x_p + (B_p + \Delta B_p)u + \Delta f_p \quad (6)$$

ここで、 $\Delta A_p, \Delta B_p$ はパラメータ変動などの構造的な不確かさであり、 $\Delta f_p$ はモデル化されない動特性などの不確かさである。

また、実システムでは制御指令 $\bar{u}$ とすると実際に印加される制御入力 $u$ まで1次遅れおよび、非線形要素が存在するとする。この動特性を次式に示す。この動特性は、駆動モータの電氣的な時定数および機械的な時定数、非線形要素はガタや摩擦などによる。

$$\dot{u} = A_a u + B_a \bar{u} + f \quad (7)$$

ここで、 $f$ はパラメータの変動などの不確かさと摩擦やガタなどの非線形性を含む関数である。式(6)(7)から構造物の状態方程式は次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p + \Delta A_p & B_p + \Delta B_p \\ \emptyset & A_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_a \end{bmatrix} (\bar{u} + d) + \begin{bmatrix} f \\ \emptyset \end{bmatrix} (\Delta f_p) \quad (8)$$

ここで,  $d = B_a^{-1}f$ である.

式(8)に対して周波数成形型スライディングモード制御を適用する. 式(1)(8)を比較すると, 式(2)に示す等価制御系が式(6)に示される構造物の動特性となっていることがわかる. 一般に等価制御系であるサブシステムの物理的意味あい不明瞭になることが多いが, 本手法で示すように柔軟構造物に対しては, 超平面に拘束したとき低次元化される動特性は制御装置に存在するものであり, 構造物の動特性自体はサブシステムの中に残る. したがって, 式(8)に対する周波数成形切り換え超平面は式(6)の構造物を安定化する制御器そのものとなる. ゆえに,  $\Delta A_p, \Delta B_p$ などの構造的な変動に対しては $\mu$ 設計,  $\Delta f_p$ などの非構造的な変動には $\mathcal{H}_\infty$ などを適用して設計を行う. つまり切り換え面は, 様々な不確かさを有する構造物の線形ロバスト制御問題の解として求められ, ロバストな超平面となる. このことは等価制御系を見ても明らかである. スライディングモードが生じている間はシステムは次式に示す動特性となる.

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{x}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & G \\ -HB_p & A_p - L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ x_p \end{bmatrix} \quad (9)$$

この動特性は,  $\mathcal{H}_\infty$ 制御器などの線形ロバスト制御理論により得られる制御器とプラントとの閉ループ系である. したがって得られる超平面は, モデル化されない動特性などの不確かさを補償するロバストな超平面であることがわかる.

式(4)の切り換え面から拡大系は次式のようになる.

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{x}_p \\ \dot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & G & \emptyset \\ \emptyset & A_p & B_p \\ \emptyset & \emptyset & A_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ x_p \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \emptyset \\ \emptyset \\ B_a \end{bmatrix} (\tilde{u} + d) \quad (10)$$

$$\psi = \begin{bmatrix} H & L & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ x_p \\ u_p \end{bmatrix}$$

制御に悪影響を及ぼす入力側の外乱  $d$  はマッチング条件を満たしている. スライディングモード制御ではこう言った外乱や不確かさに対してシステムは不変である<sup>(7)</sup>. 以上の点からスライディングモードを生じている限り入力に存在する外乱の影響はなくなり, その動特性自身が存在しないロバストな超平面に拘束される. そして, 超平面上では, システムは線形ロバスト制御理論で制御されていることとなる.

**2.3 到達条件** スライディングモード制御の制御構造は, 定常モードとスライディングモードと到達モードの三つのモードがあることが知られている. 式(4)か

らわかるように切換面は新たに付加した状態量  $z$  を含んでおり, この状態量  $z$  の初期状態は任意に設定することが出来る. このため, 本制御法では等価制御入力を与えたとき, 任意の初期状態を選定することによって常に  $Hx = x_2$  を満たす制御系となる. しかし, 閉ループ系を安定にするためには線形入力である等価制御入力以外に補助フィードバックで等価制御系の原点極を安定化する必要がある. そこでスライディングモード制御では補助フィードバックとして切り換え制御入力を用いている. 切り換え制御入力はリアプノフ関数  $V = \frac{1}{2}\psi^2$  の時間微分が負定となるように決める.

**2.4 出力フィードバック** 従来のスライディングモード制御は, 状態フィードバックの構成から観測量に対して何らかの推定器を用いて状態量を推定しなければならなかった. そこで近年では出力フィードバック型スライディングモード制御の研究も行なわれている.

周波数成形理論では出力フィードバックによる補償器の導出ができるので, 本手法においてもこれを利用する. そこで式(8)の構造物は次式に示す出力方程式が存在する.

$$y = Cx_p \quad (11)$$

式(8)(11)を用いて観測量を用いた切り換え関数を設計する. このとき一般に得られる補償器は厳密にプロパーになる. また厳密にプロパーとなる補償器を任意に求めることもできるため, 本手法では得られる線形オペレータは厳密にプロパーとする. したがって式(4)の切り換え関数は次式のようになる.

$$\begin{aligned} \psi &= Hz + x_2 \\ \dot{z} &= Fz + Gy \end{aligned} \quad (12)$$

ここで, 式(1)において  $A_{21} = \emptyset$  という仮定をおくと, 等価制御入力は次式のようになる.

$$u_{eq} = -B_2^{-1}H(Fz + Gy) + x_2 \quad (13)$$

式(12)(13)から制御入力の計算に  $x_1$  を必要としない構成になっている. ゆえに式(8)で示される対象に対して制御系を設計すると  $x_2$  が観測可能であれば本手法は出力フィードバックの形式になっている.

### 3. 柔軟トラス構造物の振動制御

前節で述べた手法を実際の柔軟構造物に対して適用しその性能を検証する. 柔軟構造物としてトラス構造物を用い, 制振装置としてはコントロールモーメントムジャイロ (CMG) を用いている. 本システムは, 制振装置の駆動モータの制御は専用の速度制御アンプを用いているため実制御とは無関係なローカルなフィードバックが存在している. このローカルフィードバックを1次遅れ系とみなしてモデリングを行った.

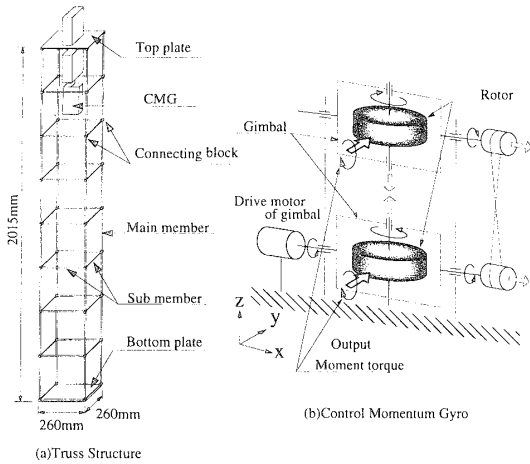


Fig.1 Schematic overview of truss structure and CMG

**3.1 柔軟トラス構造物のモデリング** 図 1(a) に本研究で用いたトラス構造物を示す。本構造物は、基本モジュールが正 6 面体となっている。頂部板には、制振装置として CMG がとりつけられている。CMG は、モーメントトルクを発生するため、ねじり方向のアクチュエータは頂部板上側に直にとりつけられている。また並進 2 方向用は、ステンレス板を介して頂部板につり下げられている。

トラス構造物は開断面を有することからその振動は複雑なものとなる。ここでは構造物を非減衰系とし、振動解析ソフト ANSYS を用いて有限要素法により運動方程式を導出した。実測データをもとにして得られる減衰比を付加した運動方程式に対して固有値解析を行なった。並進 2 方向・ねじりそれぞれに対して連成がないとして状態方程式および出力方程式を導出した。本研究では、CMG が最も効果的にトルクを与えることが出来るねじり振動に着目した。このとき、頂部板の振動制御を目的とするため、最も支配的と思われる弾性 1 次および 2 次モードまで考慮したモデルを設計モデルとする。

**3.2 CMG のモデリング** コントロールモーメントジャイロ (CMG) は、ジャイロ効果を利用することにより能動的にモーメントトルクを発生する装置である。大きな特徴としてねじり振動に対して、直接トルクを与えることができる点があげられる。また問題点としては、ジンバルが回転することによるトルクの向きが変化があげられる。このため、ジンバルの作動範囲に制約が生じる。図 1(b) は本研究で用いる CMG の機構を示したものである。図からも分かるように本研究で用いた CMG は、トルクの向きの変化による無効トルクの影響を抑えるために CMG を鏡面対称に組み合わせた双子型の形態をとっている。ロータの慣性モーメントは  $J = 0.9 \times 10^{-4}$  である。ロータは小型の

直流モータにより駆動され、 $\Omega = 6000[rpm]$  で回転する。このロータはジンバルに組み込まれており、ハーモニックドライブモータによりジンバル軸周りに回転する。このとき回転角  $\theta_g$  はロータリーエンコーダにより検出される。発生トルクは次式のように表される。

$$T_y = J\Omega\dot{\theta}_g \cos\theta_g \quad (14)$$

式 (14) から、 $-\theta_{max} < \theta < \theta_{max}$  という制約が考えられる。いま、 $\cos\theta_g > 0.8$  という条件を与えた。このため  $\theta_{max} = 0.6[rad]$  とした。

ジンバルを回転させるアクチュエータには、ハーモニックドライブを用いており、モータの駆動は速度制御専用のアンプを用いる。このため入力端には制御と無関係なローカルフィードバックが存在する。このローカルフィードバックを、指令角速度  $\tilde{\omega}_g$ 、実際の角速度  $\omega_g$  としたとき、次式に示す 1 次遅れと仮定した。

$$\omega_g = \frac{1}{Ts + 1} \tilde{\omega}_g \quad (15)$$

ここで実測により  $T = 0.02$  とした。

**3.3 設計モデル** 前節で得られた低次元化モデルに、制振装置の安定化のためモータの角度および式 (15) に示す入力端に存在する 1 次遅れを付加したモデルを制御系設計モデルとし、次式に示す。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{\theta}_g \\ \dot{x}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_r & \emptyset & B_r T_c C_a \\ \emptyset & 0 & C_a \\ \emptyset & 0 & A_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ \theta_g \\ x_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \emptyset \\ \emptyset \\ B_a \end{bmatrix} u \quad (16)$$

$$y = \begin{bmatrix} C_r & 0 & 0 \\ \emptyset & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ \theta \\ x_a \end{bmatrix}$$

ここで、 $x$  はモード座標系で表されており、制御入力  $u$  はジンバルの角速度、観測量  $y$  は頂部板のねじれ角とジンバルの角度である。また  $x_a$  は式 (15) の状態量である。ここで、 $C_a = 1$  とすると  $x_a = \theta_g$  となる。本制御対象は、頂部板の変位を PSD カメラ、ジンバルの角度を光学式ロータリーエンコーダによって検出される。

式 (16) は、式 (1) に示す正準系の構造となっている。したがって、超平面上に状態を拘束すると、1 次遅れの動特性は低次元化され、打ち消すことができると考えられる。

**3.4 制御系設計** 4 ブロック混合感度法を用いてロバスト超平面を設計する。ここで入力側の重みは定数を用い、出力側の重みは周波数依存の重み関数を用いた。設計に用いた周波数重み関数と等価制御系の不確

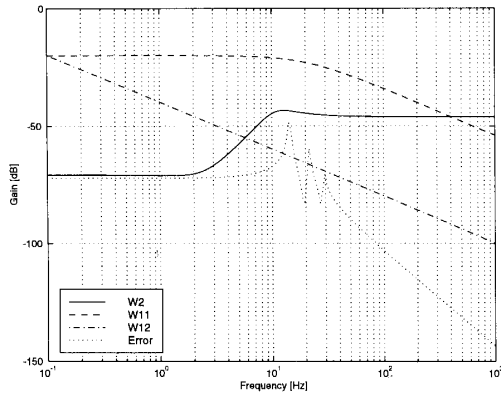
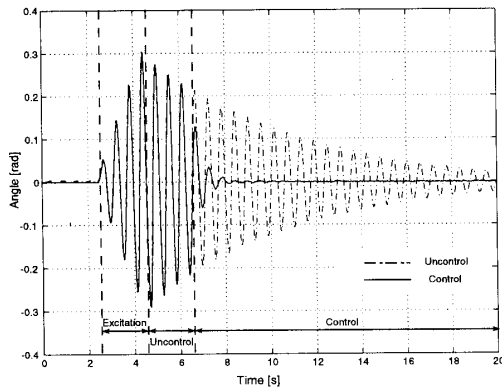
Fig.2 Weighting function and error( $\Delta_{11}$ )

Fig.3 Nominal Performance

かさを図2に示す。このとき、モデルの状態変数はモード座標での記述となっているため実測データからの推定は容易ではない。このため2.4節で述べた観測量を用いた切り換え面を設計する。

**3.5 ノミナル性能** 前述のCMGおよびトラス構造物を用いて制振実験を行った。頂部板の変位はPSDカメラにより検出され、A/D変換器に取り込まれ、ジンバル角はカウンターボードから計算機にデジタル値で取り込まれる。計算機では制御器の演算がされ、得られた制御入力、D/A変換器から速度制御アンプを介してアクチュエータに与えられる。実験は、制振装置に弾性1次の固有振動数約 $1.75[Hz]$ の正弦波を与えることにより構造物を2秒間、加振する。そして約2秒の自然振動させたあと制御入力を印加する。制振性能を制御時と非制御時において比較を行った。図3にその頂部板のねじれ角の時刻歴応答を示す。破線は非制御の時刻歴応答である。良好な制振が行われていることがわかる。

**3.6 ロバスト性能** ロバスト性能の検証のため、パラメータ変動を与えたシステムに対する時刻歴応答を見る。変動は、構造物の長さを変化させることにより固有振動数を変動させた。具体的には構造物の基盤部から2層目までを固定することにより構造物の長さを

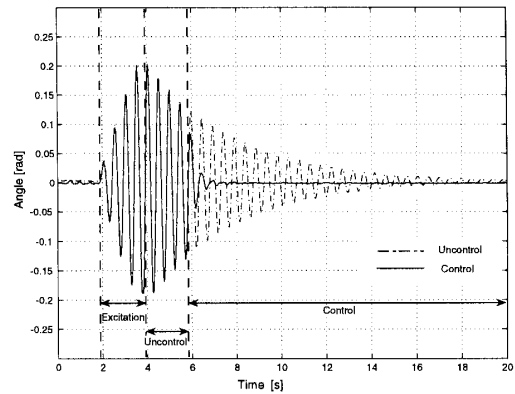


Fig.4 Robust Performance

Table 1 Model used for design and simulation

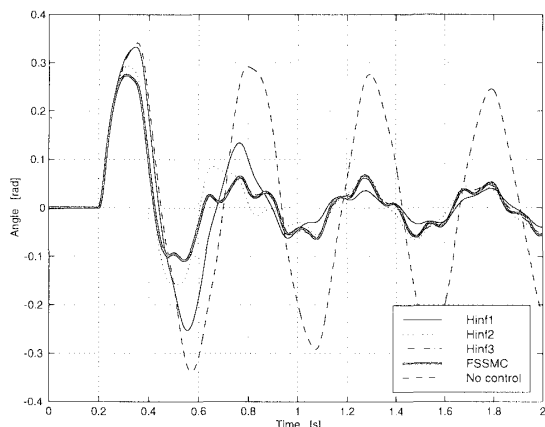
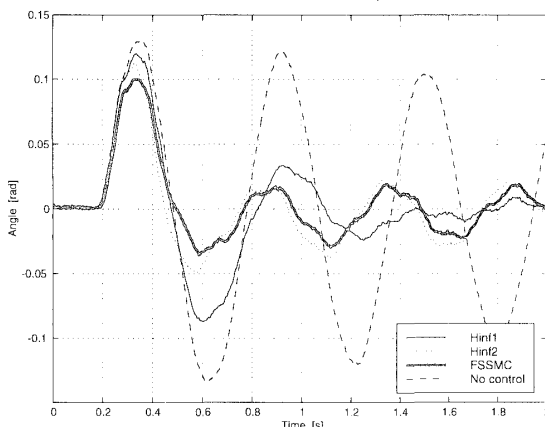
Controller	FSSMC	$\mathcal{H}_{\infty-1}$	$\mathcal{H}_{\infty-2}$	$\mathcal{H}_{\infty-3}$
Design	model1	model1	model2	model2
Simulation	model3	model3	model3	model4

3/4にした。このため弾性1次モードは $1.75[Hz]$ から $2.05[Hz]$ に変化している。ノミナル時と同様に構造物を加振するため変動後の固有振動数の正弦波を与えた。スプilloーバを起こさずに良好な制振が行われていることがわかる。このことから超平面自身がロバストになっており閉ループのロバスト安定性およびロバスト制御性能を有していると考えられる。

**3.7  $\mathcal{H}_{\infty}$ 制御理論との比較** 2.2節で述べたように本設計法で用いている切り換え面は、ローカルなフィードバックの特性を考慮しないプラントに対して設計された $\mathcal{H}_{\infty}$ 制御器そのものである。そこで、この制御器をプラントに対して適用したとき応答と周波数成形型スライディングモード制御で設計された制御器と頂部板にインパルス外乱を与えたときの応答の比較を行ない、等価制御系における物理的な意味を考える。シミュレーションは1次遅れを考慮したものとそうでないもので行った。また、式(16)に対する $\mathcal{H}_{\infty}$ 制御器も設計しそのシミュレーションも行った。それぞれ設計モデルおよびシミュレーションモデルの組合せを表1に示す。表に示す各モデルを以下に示す。

- model1* — 制御系設計モデル。式(16)に示すモデル
- model2* — 理想設計モデル。式(15)の1次遅れを考慮しないモデル、等価制御系のモデル
- model3* — 実プラントモデル。構造物の厳密モデルにアクチュエータの特性を考慮したモデル
- model4* — 理想プラントモデル。アンプの特性を考慮しない実プラントモデル

$\mathcal{H}_{\infty-1}$ ,  $\mathcal{H}_{\infty-2}$ ,  $\mathcal{H}_{\infty-3}$ , FSSMCのシミュレーション結果を図5に示す。周波数成形型スライディングモード制御によるシミュレーション結果は実線で示す。この応答

Fig.5 Comparison with  $H_{\infty}$  control (Simulated results)Fig.6 Comparison with  $H_{\infty}$  control (Experimental results)

は、式(15)を考慮しないモデルに対して設計した  $H_{\infty-3}$  とほぼ同じ応答を示している。また  $H_{\infty-2}$  から、 $H_{\infty}$  制御理論は入力端の動特性を考慮しないで設計した場合、実プラントに対して適用すると性能が当然のことながら劣化していることがわかる。

さらにこれらの系では、この1次遅れ系の時定数が変動し設計値よりも長くなってしまったとき、閉ループ系はロバスト安定ではあるが振動的で収束も遅くなり制御性能を維持することは出来ないと考える。またこれらの特性を考慮して設計した場合においても制御器  $H_{\infty-3}$  においても同様で、この特性のため制御性能が劣化していることがわかる。これに対し、周波数成形型スライディングモード制御は、こういった変動はマッチング条件を満たす不確かさであるので切り換え入力を変化させることによりその不確かさに対して不変なシステムを構築でき、かつすばやく超平面に拘束することでこの動特性を打ち消す制御系が得られる。

つぎに、これらの制御器を用いて実験を行なった。頂部板にインパルス外乱を与えた時の時刻歴応答を見た。図6に頂部板ねじれ角の時刻歴応答を示す。シミュレーションと同様の結果が得られていることがわかる。

以上のことから周波数成形型スライディングモード制御は、素早く超平面に状態を拘束することで入力端

に存在するダイナミクスを完全に打ち消し且つ理想的な  $H_{\infty}$  制御を行なうことができることがわかる。

#### 4. 結論

CMG 搭載型トラス構造物に対して周波数成形型スライディングモード制御を適用した。数値シミュレーションおよび実験を行い良好な制振を行なうことができた。このことから以下の知見を明らかにした。

- (1) 周波数成形型スライディングモード制御の柔軟構造物に対する設計手法を示した。これにより柔軟構造部自身を等価制御系とすることでモデル化されない動特性の影響をおさえかつ、ロバスト性を有するロバスト超平面が設計できることを示した。
- (2)  $H_{\infty}$  制御理論により設計された制御系との比較により周波数成形型スライディングモード制御は、すばやく超平面に拘束することにより入力端に存在する動特性によらず、理想的な  $H_{\infty}$  制御理論を実現できることを示した。
- (3) 制御装置等に存在する入力端の不確かさに対して、スライディングモード制御の性質を利用することにより不変なシステムを構築できることを示した。さらにすばやく超平面に拘束することによりこれらの動特性を無視できる制御系が構成できることをシミュレーション、実験により明らかにした。
- (4) 観測量を用いた切り換え面の設計を示し、本設計対象において出力フィードバック型のスライディングモード制御が行えることを示した。

#### 文献

- (1) Young, K.D. and Ozuguner, U., *Frequency Shaping Compensator Design for Sliding Mode Control*, Int. J. Control, 57-5, 1005, 1993.
- (2) 今野雄介, 橋本秀紀, 原島文雄,  $H_{\infty}$ 最適化を用いたスライディングモードの設計, 第15回ダイナミカルシステムセオリアシンポジウム, pp133-136, 1992.
- (3) Nonami, K., Nishimura, H. and Tian, H.,  *$H_{\infty}/\mu$  Control Based Frequency Shaped Sliding Mode Control for Flexible Structures*, JSME Int. Journal(C), 39-3, pp.493-501, 1996.
- (4) 伊藤貴之, 野波健蔵, 岩本浩祐, 西村秀和,  $\mu$ 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(C), 62-602, pp113-119, 1996.
- (5) 北村康弘, 岩淵一徳, 野波健蔵, 西村秀和, 小林信之, 弾性アームの周波数成形型スライディングモード位置決め制御, 機論(C), 63-606, pp431-437, 1997.
- (6) Utkin, K.D. and Young, U., *Methods for Constructing Discontinuous Planes in Multidimensional Variable Structure Systems*, Automation and Remote Control, 31-10, pp1466-1470, 1977.
- (7) 野波健蔵, 田宏奇, スライディングモード制御, コロナ社, pp49, 1994.