一軸吸引形磁気浮上装置の スライディングモード制御

正員 大口 國 臣 (茨城大)

非会員 富 樫 仁 夫 (茨城大)

Sliding Mode Control for Single-Axis Magnetic Suspension Devices

Kuniomi Oguchi, Member, Yoshio Tomigashi, Non-member (Ibaraki University)

A magnetic suspension system is required to keep a stable state even if the system parameters vary. In this study, a sliding mode control is applied in order to enhance the robustness to the parameter variations. First, the sliding mode control is applied to the system whose manipulated variable is pulse width of a DC chopper replacing a conventional linear amplifier for current control of the magnetic coil. We refer the system to as a voltage control type. In this case, the control system becomes equivalent to that of which manipulated variable is the current of the magnetic coil because sliding mode operation reduces the system order by one. However, the manipulated variable can be current without using the sliding mode control when hardware of control device is changed and a current-source controller is used. Next, hence, the sliding mode control is applied to the system referred to as a current control type.

As a result, the control system achieves enhancement of the robustness to practically important parameter variations such as a mass of a suspended body, and an equilibrium point. Besides, it is found that the sliding mode control system is more robust to step disturbance input than an optimal control system.

キーワード：スライディングモード制御，磁気浮上，ロバスト性，パラメータ変動

1. ま え が き

本来不安定である吸引形磁気浮上系には，負荷の変化などにより実際の制御対象と設計に用いた制御対象のモデルとの間に差が生じた場合でも，システムは安定であることが強く要求される。このように制御対象のモデルに含まれる不確かさを許容することをロバスト性という。しかし，実用されている装置ではロバスト性を十分には満足していない。例えば，吸引形磁気浮上の応用例の一つである磁気軸受では，装置を構成する部品のパラメータ変動によりシステムが不安定になることがあるため，主要部品に対しては厳しい品質管理が要求されている⁽¹⁾。

ロバスト性を備えた制御方法にスライディングモー

ド制御がある⁽²⁾⁽³⁾。スライディングモード制御は20年以上前からソ連を中心に理論的研究が進められてきているが，その実用化は，高速スイッチングを実現する手段の制約から一部に限られていた。しかし，最近の電力用高速スイッチング素子の発達と高速演算能力をもつマイクロプロセッサの出現により，スライディングモードの高速スイッチングが可能になった。現在では，その応用範囲は電動機の制御^{(4)~(7)}，ロボットアームの制御^{(8)~(10)}と広がりつつある。スライディングモード制御はロバスト性を備えた制御としては適応制御などと比較して制御アルゴリズムが簡単で演算時間が短くて済む利点があり，高速制御が要求される磁気浮上系に適していると考えられるが，しかし，磁気浮上系に適用した報告は他に見あたらない。

本研究では、そのスライディングモード制御を吸引形磁気浮上系に適用して制御系のロバスト化を図る⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。電流制御装置として電圧形を使用した場合と電流形を使用した場合の二通りにスライディングモード制御を適用し、両者の相違を明らかにする。すなわち、電圧形の場合には電気系のパラメータ変動にロバストになり、そのことがハードウェア的に実現される電流形では、機械系のパラメータ変動にロバストになることを理論と実験により示す。更に、ロバスト性について最適制御と比較検討した結果についても述べる。

2. 電圧形システムに対するスライディングモード制御の適用

本論文では、コイルの電流制御装置に電圧形を使用したスライディングモード制御システムを電圧形スライディングモード制御と略称し、電流形を使用したものを電流形スライディングモード制御と呼ぶことにする。

〈2・1〉 電圧形制御システムの構成およびモデリング
電圧形制御システムの構成を図1に示す。鉄製のボール（19 mmφ、28 g）を電磁石の吸引力でつり下げる（ギャップの長さ5 mm）一軸制御の吸引形磁気浮上装置である。低損失・大電流制御を可能にするために従来のリニアアンプの代わりに直流チョップパを用いて電磁石の電流を制御している。センサからの信号（位置・電流信号を検出し、速度は位置の差分で求める）をA/D変換し、コントローラで制御のアルゴリズムに基づいて直流チョップパの通流率を計算し、それによってFETの通流率制御を行う。

平衡点からの変化分に対して以下の状態方程式を得る⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_c x + b_c v_1 \\ x &= [x_1 \quad \dot{x}_1 \quad i_1]^T \\ A_c &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ k_1 & 0 & -k_2 \\ 0 & 0 & -R/L \end{bmatrix} \\ b_c &= [0 \quad 0 \quad 1/L]^T \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 x_1 ：ギャップの長さの変化分、 i_1 ：電流の変化分、 v_1 ：コイル印加電圧の変化分、 k_1, k_2 ：浮上物体の質量と電磁石の構造によって決まる定数で詳細は文献(13), (14)参照、 L ：平衡点付近でのコイルのインダクタンス、 R ：コイルの抵抗

直流チョップパの動作周波数が十分に高い場合には、チョップパは出力電圧が次式で与えられるリニアアンプと同様に取扱える。

$$v = V_d T_{on} / (T_{on} + T_{off}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 V_d ：直流電源電圧、 T_{on} ：チョップパのオン時間、 T_{off} ：チョップパのオフ時間

磁気軸受や磁気浮上搬送装置では浮上物体がその周辺の物体に接触することが最も危険視されている。そのため、定常的な外乱が加わった場合でも正確に位置を保つ必要がある。このために、位置の偏差の積分値 x_e をフィードバックする制御系を構成することにする。

x_e を状態ベクトルに含めると(1)式の状態方程式は次のようになる。

図1 磁気浮上装置の電圧形制御システム
Fig.1. A magnetic suspension system using a voltage-source controller.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_e \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 & -k_2 \\ 0 & 0 & 0 & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/L \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} x_{ref} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $x_e = \int (x_{ref} - x_1) dt$, x_{ref} : ギャップの長さのステップ入力, $x_2 = \dot{x}_1$, $x_3 = i_1$

〈2・2〉 電圧形スライディングモード制御の設計

(3)式において、理想的なスライディングモード制御が実現されて

$$\sigma(x) = c_e x_e + c_1 x_1 + c_2 x_2 + x_3 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

となると、次式のようにシステムの次元は三次元になる。ただし、 c_e, c_1, c_2 は超平面を与える定数である。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_e \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ c_e k_2 & c_1 k_2 + k_1 & c_2 k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{ref} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

いま、(5)式の係数行列の固有値 λ が、一つの実根と共役複素根になるように設定し、それらを正の実数 α と、角周波数 ω_n と減衰係数 $\zeta(<1)$ を用いて表すと、

$$\lambda = -\alpha, -\zeta\omega_n \pm (\zeta^2 - 1)^{1/2} \omega_n \dots\dots\dots (6)$$

超平面を与える定数 c_e, c_1, c_2 と固有値を与える定数の間には次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} c_e &= \alpha\omega_n^2/k_2 \\ c_1 &= -(2\alpha\zeta\omega_n + \omega_n^2 + k_1)/k_2 \\ c_2 &= -(\alpha + 2\zeta\omega_n)/k_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

この関係を用いることにより、望ましい超平面を固有値 λ から容易に設定できる。

〈2・3〉 電圧形スライディングモード制御のロバスト性についての考察 電圧形制御ではスライディングモードを発生させることにより(5)式のようにシステムの次元を下げ、(3)式における電気回路の方程式

$$\dot{x}_3 = -(R/L)x_3 + (1/L)v_1 \dots\dots\dots (8)$$

のパラメータ $R/L, 1/L$ に無関係な制御系を実現できる。しかし、 k_1, k_2 の変化に対してはロバストでない。この制御系は、

$$x_3 = -[c_e \ c_1 \ c_2][x_e \ x_1 \ x_2]^T \dots\dots\dots (9)$$

のフィードバックを行った電流を操作量とする電流形制御と等価である。つまり、操作量が電圧で電流形制御と同じ制御を行っている。電圧形制御では市販されているPWM ICを容易に適用できるので、D/Aコンバータが不要になるという利点はあるが、スライディングモード制御を適用しても電気回路のパラメータ $R/L, 1/L$ に対してのみロバストで機械系のパラメータ k_1, k_2 にはロバストではない。電気回路のパラメータ変動に対するロバスト性は、制御回路のハードウェアを変更して操作量を電流にした電流形制御装置にすることでスライディングモード制御を用いなくても実現できる。

3. 電流形システムに対するスライディングモード制御の適用

前章では電圧形システムにスライディングモード制御を適用することによりシステムの次元を下げるこ

図 2 電流形制御システム

Fig. 2. A magnetic suspension system using a current-source controller.

ができることを示した。しかし、これは操作量が電圧のままで電流形制御系を実現したにすぎない。そこで、本章では制御回路のハードウェアにより操作量を電流にしてシステムの次元を下げた系に、更にスライディングモード制御を適用して、パラメータ k_1, k_2 の変化に対してもロバストな制御系を実現する。 k_1, k_2 は浮上物体の質量や平衡点によって決まる定数^{(13)~(15)}なので、実用上重要な機械系のパラメータ変動に対するロバスト性の向上が達成される。

〈3・1〉 電流形制御システムの構成 電流形制御システムの構成図を図2に示す。後述のスライディングモード制御のアルゴリズムに基づいて計算した操作量(電流指令)とコイルの電流を比較してFETをオン・オフし、コイルの電流を電流指令に追従させて吸引力を制御する。操作量を電流指令にすることによりシステムの次元が下がる。

〈3・2〉 電流形最適制御の設計 外乱による定常偏差をなくすために積分要素の出力 x_e を状態ベクトルに含めた電流形の状態方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_c \mathbf{x} + \mathbf{b}_c \dot{\mathbf{i}}_1 + \mathbf{D} \\ \mathbf{x} &= [x_e \quad x_1 \quad x_2]^T, \mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & k_1 & 0 \end{bmatrix} \dots (10) \\ \mathbf{b}_c &= [0 \quad 0 \quad -k_2]^T \\ \mathbf{D} &= [x_{\text{ref}} \quad 0 \quad 0]^T \end{aligned}$$

フィードバック係数 $\mathbf{f}_n = [c_e \quad c_1 \quad c_2]$ の制御を行うと電圧形スライディングモード制御と同じ制御であることがわかる。

(10)式をサンプリング周期 T で離散化すると、離散時間系の状態方程式は次式のように求まる。

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(n) + \mathbf{b} \mathbf{i}_1(n) \dots (11)$$

ここで、

$$\mathbf{A} = e^{\mathbf{A}_c T}, \mathbf{b} = \int_0^T e^{\mathbf{A}_c t} dt \cdot \mathbf{b}_c$$

フィードバック係数 $\mathbf{f}_n$ は最適制御理論に基づいて次式の評価関数 J_n を最小にするように決める。

$$J_n = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \{ \mathbf{x}(n)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}(n) + r \cdot \mathbf{i}_1(n)^2 \} \dots (12)$$

ここで、 $\mathbf{Q}, r$: 重み係数

〈3・3〉 電流形スライディングモード制御の設計

電流形制御において理想的なスライディングモードが実現されると、

$$\sigma(\mathbf{x}) = c_e x_e + c_1 x_1 + x_2 = 0 \dots (13)$$

となり、システムの次元は三次元から二次元になる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_e \\ x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -c_e & -c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{\text{ref}} \\ 0 \end{bmatrix} \dots (14)$$

そして、超平面 σ にのみ支配され、機械系のパラメータ k_1, k_2 には依存しない制御系になる。 k_1, k_2 は浮上物体の質量や平衡点によって決まる定数なので、このシステムは実用上有益な制御系である。

超平面の設定は電圧形同様、

$$\left. \begin{aligned} c_e &= -\omega_n^2 \\ c_1 &= 2\zeta\omega_n \end{aligned} \right\} \dots (15)$$

により設定する。

スライディングモード制御の一つである単位ベクトルスライディングモード制御の制御入力は次のように二つの部分からなる⁽⁶⁾⁽¹⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{U}_L(\mathbf{x}) + \mathbf{U}_v(\mathbf{x}) \\ \mathbf{U}_L(\mathbf{x}) &= -\mathbf{f}_L \mathbf{x} \\ \mathbf{U}_v(\mathbf{x}) &= -\rho \frac{\mathbf{c} \mathbf{x}}{|\mathbf{c} \mathbf{x}| + \delta} \quad (\rho < 0) \end{aligned} \right\} \dots (16)$$

線形部分の $\mathbf{U}_L(\mathbf{x})$ は状態ベクトルを状態空間内の任意の初期状態から超平面 $\sigma(\mathbf{x})$ へ到達させる。非線形部分の $\mathbf{U}_v(\mathbf{x})$ は状態ベクトルを超平面 $\sigma(\mathbf{x})$ に拘束する。線形部分のフィードバック係数 $\mathbf{f}_L$ は文献(16)の設計法を適用すると、

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{B}_2^{-1} [\boldsymbol{\Theta} \quad \phi - \phi^*] \mathbf{T}_2 \dots (17)$$

ここで、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & k_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_2 = -k_2$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\Gamma} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Gamma} = [c_e \quad c_1]$$

$$\boldsymbol{\Theta} = \boldsymbol{\Gamma} \boldsymbol{\Sigma} - \mathbf{A}_{22} \boldsymbol{\Gamma} + \mathbf{A}_{21}$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12} \boldsymbol{\Gamma}$$

$$\phi = \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{A}_{12} + \mathbf{A}_{22}, \quad \phi^* : \text{負のスカラ}$$

のように求まる。非線形部分の δ はチャタリングをなくすためのスムージングファクタである。超平面の近傍あるいは定常時には非線形項は δ によって小さくなり、線形項が支配的になる。 ρ, δ の理論的な決定方法はまだないので、シミュレーションと実験によって適当な値を決める。

単位ベクトルスライディングモード制御のフィードバック係数 $\mathbf{f}_L$ を状態方程式のパラメータを代入して計算すると

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_L &= [c_e \phi^* / k_2 (-k_1 + c_e + c_1 \phi^*) / k_2 * \\ &\quad * (-c_1 + \phi^*) / k_2] \dots (18) \end{aligned}$$

を得る。

〈3・4〉 結果およびロバスト性の検討 実験に用いた位置検出法の制約から鉄球の質量を変えて実験を

行うことが困難なため、実際とは異なる質量で設計したフィードバック係数で制御を行いロバスト性を検討する。鉄球の質量は 28, 7, 112 g の三通りにて設計を行った。

実験では、チョップの周波数は十分に高い約 10 kHz に設定し、コントローラには 16 bit コンピュータ (NEC 製 PC-9801 VM) を使用して C 言語で作成した制御プログラムにより制御を行った。最適制御の場合の演算時間は 0.45 ms, スライディングモード制御の場合の演算時間は 1.55 ms であるが、比較を行うためにサンプリングしてから操作量の出力までの時間は両者同じにした。サンプリング周期 T は、コンピュータの演算時間と A/D, D/A 変換時間などから定まる限界値 2.5 ms に設定した。実験装置の詳細は文献 (13)~(15) 参照。

(1) 正しいモデル (28 g) では、 $k_1=2,227.46$, $k_2=11.9845$ である。フィードバック係数などを以下に示す。

最適制御の場合、

$$\begin{aligned} Q &= \text{diag}(10,000 \ 0 \ 0), \quad r=0.0002, \\ T &= 0.0025 \text{ s}, \\ f_n &= [6.0819 \times 10^3 \quad -5.5548 \times 10^2 \quad -9.3518] \end{aligned}$$

スライディングモード制御の場合、

$$\begin{aligned} \omega_n &= 40, \quad \zeta = 1, \quad \phi = -30, \quad \rho = -1, \quad \delta = 0.2 \\ c_e &= -1,600, \quad c_1 = 80, \quad c_2 = 1 \\ f_L &= [4.0052 \times 10^3 \quad -5.1963 \times 10^2 \quad -9.1785] \end{aligned}$$

スライディングモード制御は連続系で設計しているため、離散系でのシミュレーションおよび実験を行うにはフィードバック係数を離散系に再設計する必要がある。しかし、制御理論によるとシステムの時定数より十分小さい周期で行うデジタル制御はアナログ制御とみなすことができる。実験装置の場合には、時定数は後述のシミュレーションと実験結果が示すように約 65 ms であるのに対し、サンプリング周期は 2.5 ms であるので、上記の条件は満足される。そこで、スライディングモード制御は連続系で設計した係数を使ってデジタルシミュレーションおよび実験を行うことにする。

正しいモデルで設計した場合の定常状態の実験結果を図 3 に示す。図 4 にステップ応答のシミュレーションを、図 5 にそれに対応する実験結果を示す。スライディングモード制御は定常状態において最適制御に劣らない良好な結果を与える。

(2) 質量を 7 g (実際の 1/4 倍) としたモデルでは、 $k_1=2,227.46$, $k_2=23.969$ である。(1) の場合と

図 3 定常状態の実験結果
(質量 28 g で設計し、28 g を浮上させた場合)
Fig. 3. Experimental steady state response when the controller is designed using the real value in mass, 28 g, of a suspended body.

図 4 ステップ応答のシミュレーション結果
(質量 28 g で設計し、28 g を浮上させた場合)
Fig. 4. Simulated step response when the controller is designed using the real value in mass, 28 g, of a suspended body.

同程度の応答になるように設計すると、最適制御では、

$$\begin{aligned} Q &= \text{diag}(10,000 \ 0 \ 0), \quad r=0.0008, \\ T &= 0.0025 \text{ s} \\ f_n &= [3.0410 \times 10^3 \quad -2.7774 \times 10^2 \quad -4.6759] \end{aligned}$$

スライディングモード制御では、

(a) 最適制御

(b) スライディングモード制御

図 5 ステップ応答の実験結果
(質量 28 g で設計し、28 g を浮上させた場合)
Fig. 5. Experimental step response when the controller is designed using the real value in mass, 28 g, of a suspended body.

(a) 最適制御

(b) スライディングモード制御

図 6 ステップ応答のシミュレーション結果
(設計どおりの物体を浮上させた場合; 7 g)
Fig. 6. Simulated step response when a body of 7 g in mass is suspended with the controller designed using the real value of 7 g.

(a) 最適制御

(b) スライディングモード制御

図 7 ステップ応答のシミュレーション結果
(設計値より重い物体を浮上させた場合;
7 g で設計し、28 g を浮上させた場合)
Fig. 7. Simulated step response when a body of 28 g in mass is suspended with the controller designed using the unreal value of 7 g.

(a) 最適制御

(b) スライディングモード制御

図 8 ステップ応答の実験結果
(設計値より重い物体を浮上させた場合;
7 g で設計し、28 g を浮上させた場合)

Fig. 8. Experimental step response when a body of 28 g in mass is suspended with the controller designed using the unreal value of 7 g.

$$\omega_n=40, \quad \zeta=1, \quad \phi=-40, \quad \rho=-1, \quad \delta=0.2$$

$$c_e=-1,600, \quad c_1=80, \quad c_2=1$$

$$f_L=[2.6701 \times 10^3 \quad -2.9319 \times 10^2 \quad -5.0065]$$

となる。

質量 7 g の鉄球を浮上させたときのステップ応答のシミュレーション結果を図 6 に示す。次に、質量 28 g の鉄球を浮上させたときのステップ応答のシミュレーション結果および実験結果をそれぞれ図 7, 図 8 に示す。最適制御では振動的な応答になっているのに対し、スライディングモード制御では質量変化に影響されていないことがわかる。

(3) 質量を 112 g (実際の 4 倍) としたモデルでは、 $k_1=2,227.46$, $k_2=5.9923$ である。同様にして、最適制御では、

$$Q=\text{diag}(10,000 \quad 0 \quad 0), \quad r=0.00005,$$

$$T=0.0025 \text{ s}$$

$$f_n=[1.2164 \times 10^3 \quad -1.1110 \times 10^2 \\ -1.8703 \times 10]$$

スライディングモード制御では、

$$\omega_n=40, \quad \zeta=1, \quad \phi=-20, \quad \rho=-2, \quad \delta=0.2$$

$$c_e=-1,600, \quad c_1=80, \quad c_2=1$$

$$f_L=[5.3402 \times 10^3 \quad -9.0575 \times 10^2 \\ -1.6688 \times 10]$$

となる。

質量 112 g の鉄球を浮上させたときのステップ応答のシミュレーション結果を図 9 に示す。次に、質量

図 9 ステップ応答のシミュレーション結果 (設計通りの物体を浮上させた場合; 112 g)
Fig.9. Simulated step response when a body of 112 g in mass is suspended with the controller designed using the real value of 112 g.

図 10 ステップ応答のシミュレーション結果 (設計値より軽い物体を浮上させた場合; 112 g で設計し, 28 g を浮上させた場合)
Fig.10. Simulated step response when a body of 28 g in mass is suspended with the controller designed using the unreal value of 112 g.

図 11 ステップ応答の実験結果 (設計値より軽い物体を浮上させた場合; 112 g で設計し, 28 g を浮上させた場合)
Fig.11. Experimental step response when a body of 28 g in mass is suspended with the controller designed using the unreal value of 112 g.

28 gの鉄球を浮上させたときのステップ応答のシミュレーション結果および実験結果をそれぞれ図10, 図11に示す。どちらの制御でも、応答にあまり影響されていない。なお、図11に見られる逆応答については現段階では未解明である。

以上の結果から、設計時よりも重い物体を浮上させるとき、最適制御では振動的な応答になるが、スライディングモード制御では良好な制御が可能である。設計時よりも軽い物体を浮上させるときには、最適制御もあまり影響を受けない。従って、最適制御において振動的な応答を避けることは、質量を実際よりも大き

図12 ステップ外乱(0.1 Nの外乱)に対する過渡応答のシミュレーション結果
Fig.12. Simulated transient response for a step disturbance input.

図13 ステップ外乱(0.1 Nの外乱)に対する過渡応答の実験結果
Fig.13. Experimental transient response for a step disturbance input.

く設定して設計することで可能である。しかし、質量を大きくして設計するとフィードバック係数が大きくなるためフィードバック信号中の雑音の影響を受けやすくなり、好ましくない。

次に、外乱に対するロバスト性について検討した。外乱として浮上物体に働く外力 f_{dis} を考慮した状態方程式は、(10)式から次のように表せる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_e \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & k_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -k_2 \end{bmatrix} i_1 + \begin{bmatrix} x_{ref} \\ 0 \\ f_{dis}/m \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (19)$$

上式右辺の第2項と第3項の3行目からわかるように、電流を流す量を変えることにより等価的に外乱を与えることができる。0.1 Nのステップ外乱(今の場合、浮上物体の重力の1/3程度の外乱に相当)が加わった場合の過渡応答のシミュレーション結果を図12に、実験結果を図13に示す。ただし、(1)項で設計したコントローラを使用した場合の結果である。スライディングモード制御のほうが外乱に対しても強い制御であることがわかる。

今回検討しなかったが、ギャップの長さを大きく変化させるような浮上系では、電磁石の吸引力の非線形性によりパラメータ k_1, k_2 が変化する。このパラメータ変動に対しても電流形スライディングモード制御はロバストであると考えられる。

4. 結 論

本来不安定である吸引形磁気浮上系には、負荷の変化などによるパラメータ変動や外乱などに対してロバストな制御が必要とされる。そこで、ロバスト性を備えた制御であるスライディングモード制御を吸引形磁気浮上系に適用し、浮上物体の質量の変化によるパラメータ変動に対するロバスト性、更に外乱に対するロバスト性について検討した。その結果、以下のことがわかった。

(1) スライディングモード制御は、スライディングモードを発生させることによりシステムの次元を下げる。電圧形システムにスライディングモード制御を適用すると、操作量は電圧であっても電流形制御と同様な制御系を構成する。その結果、コイルの抵抗やインダクタンス変化にロバストなシステムが実現できる。

(2) 電流形制御はスライディングモード制御を用

いなくても、制御回路のハードウェアを変更することで実現できる。ハードウェアで電流形制御を実現したシステムにスライディングモード制御を適用して、次元を更に下げることにより、浮上物体の質量変化など実用的にも重要なパラメータ変動に対するロバスト性の向上を達成することができる。また、外乱に対しても最適制御よりロバストな制御系になる。

本論文は、一軸制御の磁気浮上系についての研究結果であるが、スライディングモード制御は多入力系への応用も可能なので、提案した電流形スライディングモード制御の磁気軸受などへの応用を引続き検討中である。

(平成2年3月14日受付, 同2年7月25日再受付)

文 献

- (1) 涌井:「システムのロバスト解析の一手法」, 電学論 D, 109, 763 (平元)
- (2) V. I. Utkin: "Variable Structure Systems with Sliding Mode", *IEEE Trans. Automatic Control*, AC-22, 212 (1977)
- (3) 原島・橋本:「Sliding Mode とその応用—I, II」, システムと制御, 29, 94: 242 (昭60-2: 4)
- (4) A. Sabanovic & D. B. Izosimov: "Application of Sliding Modes to Induction Motor Control", *IEEE Trans. Automatic Control*, IA-17, 41 (1981)
- (5) O. Kaynak, F. Harashima & H. Hashimoto: "Variable Structure Systems Theory Applied to Subtime Optimal Position Control with an Invariant Trajectory", *I. E. E. of Japan*, 104-E, 47 (1984)
- (6) J. Zhang & T. H. Barton: "Synthesis of Optimal Sliding Mode Control for Robust DC Drive", IEEE 1988 IAS Annual Meeting
- (7) J. Zhang & T. H. Barton: "Optimal Sliding Mode Control of Asynchronous Machine Speed with State Feedback", IEEE 1988 IAS Annual Meeting
- (8) K. D. Young: "Controller Design for a Manipulator using Theory of Variable Structure Systems", *IEEE Trans. Syst. Man Cybernetics*, SMC-8, 101 (1987)
- (9) 原島・橋本・丸山:「Sliding Modeによるマニピュレータの制御」, 第2回日本ロボット学会学術講演予稿集, No. 3109 207 (昭59)
- (10) 美多・陳:「スライディングモード制御とロボットアームの軌道制御」, システム/制御/情報, 34, 50 (平2-1)
- (11) 富樫・大口:「吸引形磁気浮上系の sliding mode 制御」, 平

元電気学会全大, No. 689

- (12) 富樫・大口:「sliding mode 制御吸引形磁気浮上系のロバスト性」, 平2 同上, No. 763
- (13) 富樫・大口:「直流チョップを用いた吸引形磁気浮上装置のデジタル制御」, 電気学会半導体電力変換研究, SPC-89-30 (平元)
- (14) 富樫・大口:「直流チョップを用いたデジタル制御一軸吸引形磁気浮上装置の安定性」, 電学論 D, 110, 377 (平2-4)
- (15) K. Oguchi & Y. Tomigashi: "Digital Control for a Magnetic Suspension System as an Undergraduate Project", *Int. J. Elect. Enging Education*, 27, No. 3 (1990-7)
- (16) C. M. Dorling & A. S. I. Zinober: "Two Approaches to Hyperplane Design in Multivariable Structure Control Systems", *Int. J. Control*, 44, 65 (1986)

大 口 國 臣 (正員)

昭和15年10月8日生。38年3月九州大学工学部電気工学科卒業。

38年4月富士電機製造(株)入社。

40年9月九州大学助手, 51年4月

茨城大学講師, 54年4月同助教授, 現在に至る。工学博士。最近は, 電力変換回路とその制御, 電動機制御 (デジタル制御, $1/f$ 揺らぎ制御), 磁気浮上装置の制御などの研究に従事。1983年 IEEE/IAS Committee Prize 論文賞受賞。計測自動制御学会, システム制御情報学会, パワーエレクトロニクス研究会, 照明学会, IEEE Senior Member。

富 樫 仁 夫 (非会員)

昭和40年8月29日生。平成2年3月茨城大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月三洋電機(株)入社。研究開発本部生産

技術研究所勤務。