

# 鋼板磁気浮上系のロバスト制御に関する考察

滑川 徹 水谷 大輔\* (長岡技術科学大学)

Robust Control of Magnetically Levitated Steel Plates

Toru Namerikawa, Daisuke Mizutani (Nagaoka University of Technology)

## Abstract

This paper deals with an application of  $H_\infty$ DIA control to the Magnetically Levitated Steel Plates. The magnetically levitated steel plate technology is expected to prevent a surface quality of steel plate from deteriorating in a manufacturing process. In order to make this technology fit for practical use, a feedback controller should be able to suspend multiple steel plates. In this paper, our goal is to suspend two thin steel plates stably by using four electromagnets without any physical contacts. We apply the robust  $H_\infty$ DIA control approach to the magnetically levitated steel plates. The experimental results show an effectiveness of our proposed methods.

キーワード：鋼板, 磁気浮上システム, モデル変動,  $H_\infty$ DIA 制御, ロバスト性  
(Steel Plate, Magnetic Suspension Systems, Model perturbation,  $H_\infty$ DIA Control, Robustness)

## 1. はじめに

鋼板の製作段階において、現在、ローラによる接触型の搬送が行われているが、このような搬送方式では鋼板表面に傷を付けるなど、商品価値に影響を与えることも少なくない。そこで非接触による搬送方式として、磁気浮上技術を用いて鋼板を安定浮上させる方式が考えられる。鋼板を安定に磁気浮上させるには、複数の電磁石により多点支持を行うために多入出力制御系<sup>(1)</sup>を構築すること、鋼板の弾性振動を抑制する制御系を構築することが必要であり、複雑な制御系を設計することとなる。

鋼板を磁気浮上により搬送する研究には、 $H_\infty$ 制御を使用した鋼板の横滑りを防止する研究<sup>(2)</sup>、最適制御による搬送中の薄鋼板の振動の抑制を対象とした研究<sup>(3)</sup>、ゼロパワー制御で浮上させた鋼板を搬送装置を傾斜させて搬送する研究<sup>(4)</sup>、などがあり、各方面で取り組まれている。

しかし、これまでに制御対象である鋼板を変更した場合にもロバスト性を維持する研究についてはあまり研究が進んでいない。

そこで本研究では  $H_\infty$ DIA 制御<sup>(5)</sup>を鋼板磁気浮上系に適用し、モデル変動に対するロバスト性を考慮した鋼板磁気浮上系を構成することを目的とする。なお、この際鋼板の搬送は考慮せず、その前段階として静止浮上した鋼板磁気浮上系を対象とする。まず、SISO系として鋼板磁気浮上系の数学モデルを作成し、次に得られたモデルを用いて

制御系設計を行い、制御実験により定常状態における鋼板の振動、目標値追従特性の評価を行う。最後に重量の異なる鋼板を使用して同様の実験を行い、モデル変動に対するロバスト性について評価検討を行う。

## 2. 問題設定

2.1 問題設定 時間区間  $[0, \infty)$  で定義される以下の線形時不変システムを考える。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1w + B_2u, & x(0) &= x_0 \\ z &= C_1x + D_{12}u \\ y &= C_2x + D_{21}w \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここで  $x \in R^n$  は状態、 $x_0 = x(0)$  は初期状態、 $u \in R^r$  は制御入力、 $y \in R^m$  は観測出力、 $z \in R^q$  は被制御量、 $w \in R^p$  は外乱であり、 $w(t)$  は区間  $[0, \infty)$  において 2 乗積分関数 ( $w \in L^2[0, \infty)$ ) とする。

$A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{12}, D_{21}$  は適当な次元を有する定数行列であり、以下の条件を満たすものとする。

- $(A, B_1)$ : 可制御       $(A, C_1)$ : 可観測
- $(A, B_2)$ : 可制御       $(A, C_2)$ : 可観測
- $D_{12}^T D_{12} \in R^{r \times r}$ : 正則
- $D_{21} D_{21}^T \in R^{m \times m}$ : 正則

システム (1) に対して、すべての許容制御則  $u$  が以下の線形時不変システム (2) で与えられ、(1) と (2) によって構成される閉ループ系が内部安定となるものとする。

$$u = Jz + Ky$$

$$\dot{\zeta} = G\zeta + Hy, \quad \zeta(0) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで  $\zeta(t)$  はコントローラの状態である。また  $J, K, G, H$  は適切な次元を持つ定数行列である。

与えられたシステムに対して、以下の外乱と初期状態の不確かさの混合減衰  $H_\infty$  制御問題 ( $H_\infty$  DIA 制御問題) を考える。

2.2  $H_\infty$  DIA 制御問題<sup>(5)</sup>  $N > 0$  が与えられたときに、すべての  $w \in L^2[0, \infty)$  とすべての  $x_0 \in R^n$  (ただし  $(w, x_0) \neq 0$ ) に対して  $z$  が以下を満たすような外乱と初期状態の不確かさを混合減衰させる許容制御則を見つ

$$\|z\|_2^2 < \|w\|_2^2 + x_0^T N^{-1} x_0 \dots\dots\dots (3)$$

上記の条件を満たす許容制御則を  $H_\infty$  DIA 制御 (または単に DIA 制御) (Disturbance and Initial state uncertainty Attenuation (DIA) control) と呼ぶ。

初期状態  $x_0$  に対する重み行列  $N$  は初期状態の不確かさの減衰の外乱減衰に対する相対的な重要性を表す。行列不等式の意味でより大きな  $N$  を選ぶことは、初期状態の不確かさをより減衰させる許容制御則を選ぶことを意味する。

この条件により、システムの過渡応答特性の改善が期待される。

2.3  $H_\infty$  DIA コントローラ DIA 制御は初期状態が既知である場合にはある  $H_\infty$  制御になる。このことにより DIA 制御もそれに類似した制御則の構造を持つ。問題を解くために以下の条件を考える。

(A1) 以下の Riccati 方程式が可解で、解  $M > 0$  が存在する。

$$\begin{aligned} & M(A - B_2(D_{12}^T D_{12})^{-1} D_{12}^T C_1) \\ & + (A - B_2(D_{12}^T D_{12})^{-1} D_{12}^T C_1)^T M \\ & - M(B_2(D_{12}^T D_{12})^{-1} B_2^T - B_1 B_1^T) M \\ & + C_1^T C_1 - C_1^T D_{12} (D_{12}^T D_{12})^{-1} D_{12}^T C_1 = 0 \dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで以下の行列は安定である。

$$\begin{aligned} & A - B_2(D_{12}^T D_{12})^{-1} D_{12}^T C_1 \\ & - B_2(D_{12}^T D_{12})^{-1} B_2^T M + B_1 B_1^T M \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

(A2) 以下の Riccati 方程式が可解で、解  $P > 0$  が存在する。

$$\begin{aligned} & (A - B_1 D_{21}^T (D_{21} D_{21}^T)^{-1} C_2) P \\ & + P(A - B_1 D_{21}^T (D_{21} D_{21}^T)^{-1} C_2)^T \\ & - P(C_2^T (D_{21} D_{21}^T)^{-1} C_2 - C_1^T C_1) P \\ & + B_1 B_1^T - B_1 D_{21}^T (D_{21} D_{21}^T)^{-1} D_{21} B_1^T = 0 \dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで以下の行列は安定である。

$$\begin{aligned} & A - B_1 D_{21}^T (D_{21} D_{21}^T)^{-1} C_2 \\ & - P C_2^T (D_{21} D_{21}^T)^{-1} C_2 + P C_1^T C_1 \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

(A3)  $\rho(PM) < 1$

ここで  $\rho(X)$  は行列  $X$  のスペクトル半径を表し、 $\rho(X) = \max |\lambda_i(X)|$  である。

上記の仮定のもとで以下の結果が得られる。

定理 1<sup>(5)</sup>

システム (1) に対して、仮定 (A1), (A2), (A3) が成り立つものとする。このとき  $H_\infty$  セントラルコントローラが以下で与えられ、

$$\begin{aligned} u &= -(D_{12}^T D_{12})^{-1} (B_2^T M + D_{12}^T C_1) (I - PM)^{-1} \zeta \\ \dot{\zeta} &= A\zeta + B_2 u + P C_1^T (C_1 \zeta + D_{12} u) \\ & \quad + (P C_2^T + B_1 D_{21}^T) (D_{21} D_{21}^T)^{-1} (y - C_2 \zeta) \\ \zeta(0) &= 0 \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

この  $H_\infty$  セントラルコントローラ (8) が DIA 制御であるための必要十分条件は以下の条件 (A4) を満たすことである。

(A4)  $Q + N^{-1} - P^{-1} > 0$ ,

ここで  $Q$  は以下の Riccati 方程式の最大解である。

$$\begin{aligned} & Q(A - B_1 D_{21}^T (D_{21} D_{21}^T)^{-1} C_2 \\ & \quad + (B_1 B_1^T - B_1 D_{21}^T (D_{21} D_{21}^T)^{-1} D_{21} B_1^T) P^{-1}) \\ & + (A - B_1 D_{21}^T (D_{21} D_{21}^T)^{-1} C_2 \\ & \quad + (B_1 B_1^T - B_1 D_{21}^T (D_{21} D_{21}^T)^{-1} D_{21} B_1^T) P^{-1})^T Q \\ & - Q(B_1^T - D_{21}^T (D_{21} D_{21}^T)^{-1} (C_2 P + D_{21} B_1^T) L)^T \\ & \quad \times (B_1^T - D_{21}^T (D_{21} D_{21}^T)^{-1} (C_2 P + D_{21} B_1^T) L) Q \\ & = 0 \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここで  $L := (I - PM)^{-1}$ 。

### 3. システム構成と数学モデル

3.1 システム構成 実験装置である銅板磁気浮上システムを図 1 に示す。本装置は図 2 および表 1 に示す構成をしており、アルミフレーム製装置の天井 5 箇所に電磁石を取り付けている。また、図 3 のように銅板を挟んで各電磁石と反対側の装置下方に光学式反射型ギャップセンサを配

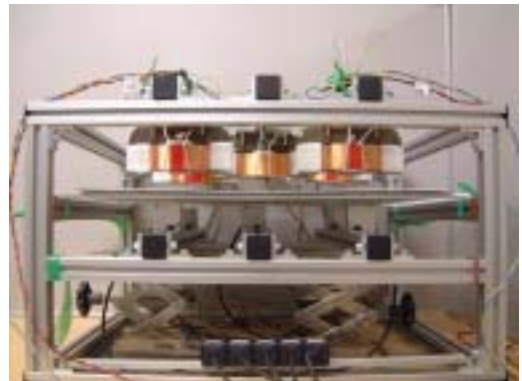


図 1 実験装置

Fig. 1. Experimental system

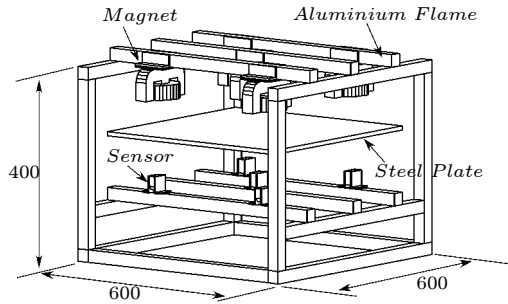


図 2 実験装置概略図  
Fig. 2. System structure

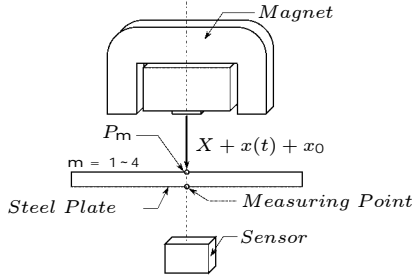


図 3 電磁石とセンサの位置関係

Fig. 3. Position relation between a electro magnet and a sensor

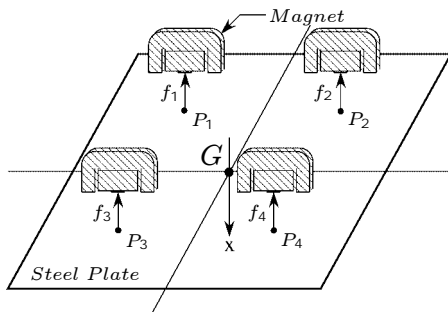


図 4 鋼板磁気浮上システム

Fig. 4. Magnetically Levitated Steel Plates

置している。ただし、今回は中央の電磁石およびセンサを使用せず、図 4 のように周囲の 4 組の電磁石とセンサを使用している。ここで浮上対象は表 2 に示す、Steel Plate1 と Steel Plate2 の、厚さと重量が異なる 2 枚の鋼板である。

表 1 実験装置諸元

Table 1. Specifications for the experimental system

Experimental System	
Wide	600[mm]
Depth	600[mm]
Height	400[mm]
Number of coil	5
Number of gap sensor	5

表 2 浮上対象諸元

Table 2. Specifications for the steel plates

	Steel Plate1	Steel Plate2
Wide	500[mm]	500[mm]
Depth	500[mm]	500[mm]
Thickness	0.3[mm]	0.5[mm]
Mass	0.537[kg]	0.937[kg]

3.2 システムの記述 ここでは、Steel Plate1 を公称 (ノミナル) 制御対象として制御系設計を行う。その際に、浮上体を個々に干渉しない、鋼板の 1/4 の重量を持つ 4 つの質点として扱い、SISO 系として制御する。

ここで、システムを記述する際に次の仮定を置く。

- 4 個の電磁石は特性が全て等しい

この仮定の下でこのシステムにおける浮上体の運動方程式、電磁力方程式は以下の式となる。

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = mg - f(t) + v_m(t) \dots \dots \dots (10)$$

$$f(t) = k \frac{\mu}{X + x(t) + x_0} I + i(t) \dots \dots \dots (11)$$

ここで各変数は、 $m$  : 浮上体の質量、 $X$  : 電磁石と浮上体との間の定常ギャップ、 $x(t)$  : 定常ギャップ  $X$  の微小変位、 $I$  : 定常電流、 $i(t)$  : 定常電流  $I$  からの微小変位、 $f(t)$  : 電磁石の電磁力、 $k, x_0$  : 同定実験によって決まる電磁力  $f(t)$  の係数、 $v_m(t)$  : 外乱、である。

(11) で表される電磁力  $f(t)$  は非線形であるので、定常動作点付近でテイラー展開し 1 次項までに近似すると以下の式が得られる。

$$f(t) = k \frac{\mu}{X + x_0} I \dots \dots \dots (12)$$

$$K_x = \frac{2kI^2}{(X + x_0)^3}, K_i = \frac{2kI}{(X + x_0)^2}$$

また、観測出力  $y_g(t)$  はギャップセンサによって得られる測定点の位置情報  $x(t)$  とし、以下の式が得られる。なお  $w_0(t)$  はセンサノイズやモデルの不確かさの影響を表す。

$$y_g(t) = x(t) + w_0(t) \dots \dots \dots (13)$$

3.3 システムの状態方程式 以上をまとめると以下の状態方程式が得られる。

$$\dot{x}_g = A_g x_g + B_g u_g + D_g v_0 \dots \dots \dots (14)$$

$$y_g = C_g x_g + w_0$$

$$x_g := [x \ \dot{x}]^T, u_g := i, v_0 := v_m \quad \# \quad \#$$

$$A_g = \begin{matrix} 0 & 1 \\ K_x/m & 0 \end{matrix}, B_g = \begin{matrix} 0 \\ -K_i/m \end{matrix}, D_g = \begin{matrix} 0 \\ 1/m \end{matrix}$$

$$C_g = \begin{matrix} 1 & 0 \end{matrix}$$

表 3 システムパラメータ

Table 3. System Parameter

Parameter	Symbol	Value
Mass of a quarter of Steel Plate	$m$	0.134 [kg]
Steady Gap	$X$	$5.0 \times 10^{-3}$ [m]
Coefficients of $f(t)$	$k$	$8.50 \times 10^{-4}$ [ $Nm^2/A^2$ ]
	$x_0$	$2.80 \times 10^{-3}$ [m]
Steady Current	$I$	0.309 [A]

#### 4. 制御系設計

4.1 一般化プラントの構成と問題設定 まず外乱  $v_0(t)$  と  $w_0(t)$  に関して考察する。 $v_0$  は入力外乱で、低周波帯域で影響を及ぼす。また  $w_0$  は出力外乱、およびモデルの不確かさを表す。そこで重み関数  $W_v$  および  $W_w$  を導入し  $v_0, w_0$  を (15), (16) のように表す。

$$v_0 = W_v(s) w_2 \dots\dots\dots (15)$$

$$W_v = \Phi \ C_v \ (sI - A_v)^{-1} B_v + D_v, \ \Phi = [1 \ 1]^T$$

$$w_0 = W_w w_1 \dots\dots\dots (16)$$

次に被制御変数について考察する。被制御量として定常ギャップ長からの微小変位  $x(t)$  とその微分値  $\dot{x}(t)$  に、レギュレーションのための行列  $\Theta$  で重み付けし、被制御量  $z_1$  を以下のように定義する。同様に制御入力のレギュレーションのために  $u_g$  に  $\rho$  で重み付けした被制御量  $z_2$  を定義する。

$$z_1 = \Theta x_g, \ \Theta = \text{diag} \begin{matrix} h & i \\ \theta_1 & \theta_2 \end{matrix} \dots\dots\dots (17)$$

$$z_2 = \rho u_g \dots\dots\dots (18)$$

最終的には制御対象と重み行列を求め、一般化プラントを (19) のように構成する。

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u$$

$$z = C_1 x + D_{12} u$$

$$y = C_2 x + D_{21} w \dots\dots\dots (19)$$

$$A = \begin{matrix} A_g & D_g C_v \\ \text{"} & \text{"} \end{matrix}, B_1 = \begin{matrix} 0 & D_g D_v \\ \text{"} & \text{"} \end{matrix}$$

$$B_2 = \begin{matrix} B_g \\ \text{h} & \text{i} \end{matrix}, C_1 = \begin{matrix} \Theta & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix}, D_{12} = \begin{matrix} 0 \\ \rho \end{matrix}$$

$$C_2 = \begin{matrix} C_g & 0 \\ \text{h} & \text{i} \end{matrix}, D_{21} = \begin{matrix} W_w & 0 \end{matrix}$$

ここで  $x := [x_g^T \ x_v^T]^T$  であり、 $x_v$  は  $W_v(s)$  の状態である。また  $w$  を  $w := [w_1^T \ w_2^T]^T$  とおく。

本制御系設計において制御問題は次のように与えられる。制御問題：一般化プラント (19) に対して DIA 条件 (3) を達成する許容コントローラ  $K(s)$  を見つけよ。

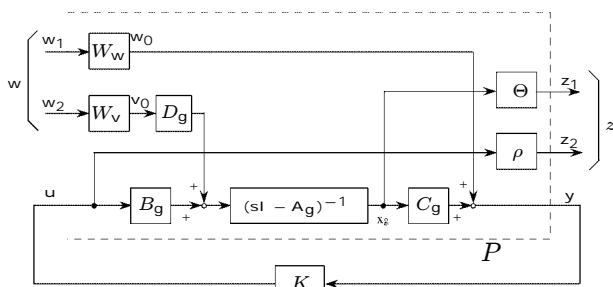


図5 一般化プラント  
Fig. 5. Generalized Plant

4.2  $H_\infty$  DIA コントローラ 上述した設計問題に対する解を得るため、Matlab 上で繰り返し計算を行い、以下の設計パラメータを選定した。

$$W_v(s) = \frac{5.0 \times 10^5}{s + 1.0 \times 10^{-2}}, \ W_w = 5.0 \times 10^{-1}$$

$$\Theta = \begin{matrix} \theta_1 & 0 \\ 0 & \theta_2 \end{matrix} = \begin{matrix} 1.0 \times 10^{-2} & 0 \\ 0 & 1.0 \times 10^{-4} \end{matrix}$$

$$\rho = 1.0 \times 10^{-6} \dots\dots\dots (20)$$

なお、このときの重み行列  $N$  は  $N = 1.013 \times 10^{-2} \times I_3$  である。これにより、 $H_\infty$  DIA コントローラが直接的に得られる。得られたコントローラを以下に示す。

$$K_{DIA}(s) = \frac{1.96 \times 10^6 (s + 7.48)(s + 49.3)}{(s + 6250)(s + 224)(s + 9.78 \times 10^{-3})} \dots\dots\dots (21)$$

このコントローラ  $K_{DIA}$  の周波数応答を図6に示す。なお、比較対象となる従来法として PID 制御コントローラの周波数応答を同時に掲載した。

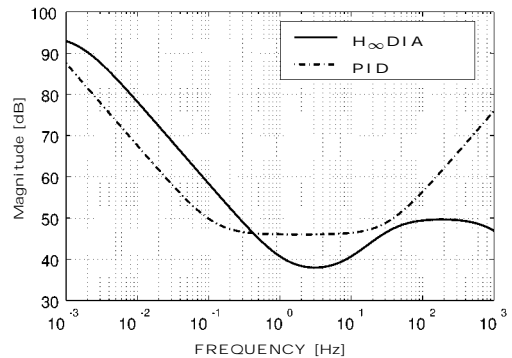


図6 コントローラの周波数応答  
Fig. 6. Frequency Responses of Two Controllers

#### 5. 制御実験による評価

前節で得られた  $H_\infty$  DIA コントローラを鋼板磁気浮上システムに適用し、Steel Plate1 による制御実験による検討を行う。その後鋼板を変更し、同一のコントローラにて Steel Plate2 による制御実験を行い、モデル変動に対するロバスト性について検討を行う。まずは比較対象となる従来法として PID 制御について述べる。

5.1 PID コントローラ PID コントローラの構造を図7に示す。選定したコントローラ  $K_{PID}(s)$  は次のとおりである。

$$K_{PID}(s) = \frac{s^2 + 200s + 150}{s} \dots\dots\dots (22)$$

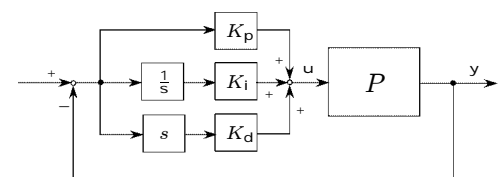


図7 PID コントローラ  
Fig. 7. PID Controller

## 5.2 検証結果

### 5.2.1 $H_\infty$ DIA 制御と PID 制御との比較

ノミナル制御対象 (*Steel Plate1*) を使用して各実験を行った。まず、定常状態における鋼板の振動を測定した。 $H_\infty$  DIA 制御の結果を図 8, PID 制御の結果を図 9 に示す。次に 1[mm] の大きさを持つステップ状の目標値信号を与え、目標値応答を測定した。この結果を図 10( $H_\infty$  DIA), 図 13(PID) に示す。鋼板の振動の様子について  $H_\infty$  DIA 制御と PID 制御とを比べると, PID 制御では振幅が大きく, 激しいものであるのに対して,  $H_\infty$  DIA 制御では振幅が小さく, 穏やかであることが分かる。次に目標値応答を見ると,  $H_\infty$  DIA 制御はオーバーシュートが大きいものの, PID 制御に見られる目標値へ到達した後の激しい振動が見られない。以上のことから  $H_\infty$  DIA 制御は PID 制御と比較して, 鋼板の振動抑制に優れる事が示された。

### 5.2.2 モデル変動に対するロバスト性の検証

制御対象を *Steel Plate2* に変更して実験を行い, 応答の変化を確認した。 $H_\infty$  DIA 制御の定常状態を図 11 に, 目標値応答を図 12 に示す。また, PID 制御の定常状態を図 14 に, 目標値応答を図 15 に示す。 $H_\infty$  DIA 制御と PID 制御の両者共に鋼板変更前よりも振動が大きくなっているが,  $H_\infty$  DIA 制御の方が振動の増加は小さく, また制御特性もほとんど変化していない事が確認できる。以上のことから,  $H_\infty$  DIA 制御は PID 制御と比較してモデル変動に対するロバスト性が高いことが示された。

総合的に  $H_\infty$  DIA 制御は PID 制御よりも優れている事が示された。しかし, 現段階ではオーバーシュートが大きく, 特性改善が期待される。

## 6. おわりに

本稿では,  $H_\infty$  DIA 制御を鋼板磁気浮上システムに適用し, 良好な振動抑制特性とモデル変動に対するロバスト性を持つことを検証した。

具体的には, 提案法を鋼板磁気浮上システムに適用して制御系設計を行い, 2つの異なる制御対象により制御実験を行った。そして, PID 制御と  $H_\infty$  DIA 制御を比較し, PID 制御との応答の違いを明らかにした。 $H_\infty$  DIA 制御は PID 制御より過渡応答時のオーバーシュートの面で劣るが, 鋼板の振動抑制に優れる事, モデル変動に対するロバスト性が高い事を確認した。

今後は  $H_\infty$  DIA 制御のモデル変動に対するロバスト性の理論的検証を行うこととする。また, 今回実験に使用した鋼板よりも更に厚い, 厚さ 1[mm] の鋼板を安定浮上させる事を目指す。

## 文 献

- (1) K. Suematsu, K. Nakashima, T. Tsujino and T. Fujii: "Application of ILQ Design Method to a Multivariable Magnetic Levitation System", T.SICE, Vol.31, No.9, pp1471-1480 (1995)(in Japanese)  
末松, 中島, 辻野, 藤井: 「ILQ 設計法の多変数磁気浮上系への応用」, 計測自動制御学会論文集, 31, 9, pp.1471-1480 (1995)
- (2) N. Toshiko and H. Mikio: "Study of Magnetic Levitation Control by Means of Correcting Gap Length Command for a Thin Steel Plate", T.IEE Japan, Vol.120-D, No.4, pp.489-494.(2000-4)(in Japanese)  
中川・浜: 「ギャップ長指令値修正による薄鋼板の磁気浮上制御」, 電気学会論文誌 D, 120, 4, pp.489-494 (2000-4)
- (3) Y. Oshinoya, K. Ishibashi and T. Sekihara: "Conveyance Control for an Electromagnetic Levitation Rectangular Sheet Steel (Proposition of Noncontact Control Mechanism for the Horizontal Inertial Force of the Steel Plate which Suppressed the Elastic Vibration)", T.JSME. Series C, Vol.68, no.669, pp.86-92 (2002)(in Japanese)  
押野谷, 石橋, 関原: 「磁気浮上長方形薄鋼板の搬送制御 (弾性振動を抑制した鋼板の水平方向慣性力に対する非接触接続機構の提案)」, 日本機械学会論文集 (C 編), 68 巻, 669 号, pp.86-92 (2002)
- (4) M. Morishita and M. Akashi: "Inclination Guide Experiment for Magnetically Levitated Steel Plates", 1988 National Convention Record I.E.E.Japan, pp.5-183(1998)(in Japanese)  
森下, 明石: 「磁気浮上鋼板の傾斜案内制御実験」, 平成 10 年電気学会全国大会論文集, pp.5-183(1998)
- (5) T. Namerikawa, M. Fujita, R.S. Smith and K. Uchida: "A Generalized  $H_\infty$  Control System Design Attenuating Initial State Uncertainties", Proc. of American Control Conf., pp. 2204-2209 (2002)

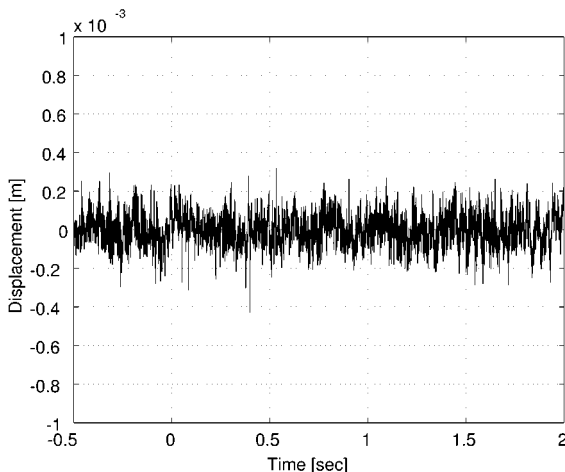


図 8 *Steel Plate1* の定常状態 ( $H_\infty$  DIA)

Fig. 8. Steady state of Steel Plate1 for  $H_\infty$  DIA

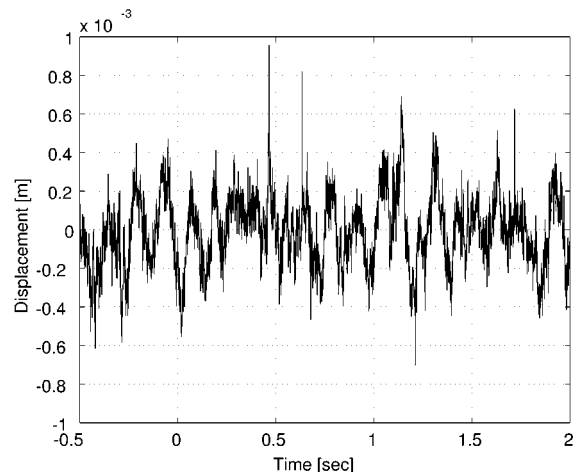


図 9 *Steel Plate1* の定常状態 (PID)

Fig. 9. Steady state of Steel Plate1 for PID

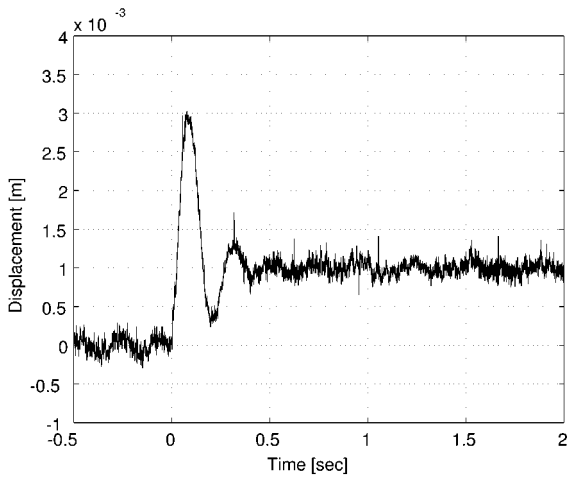


図 10 Steel Plate1 の目標値応答 ( $H_{\infty}$ DIA)  
 Fig. 10. Step response of Steel Plate1 for  $H_{\infty}$ DIA

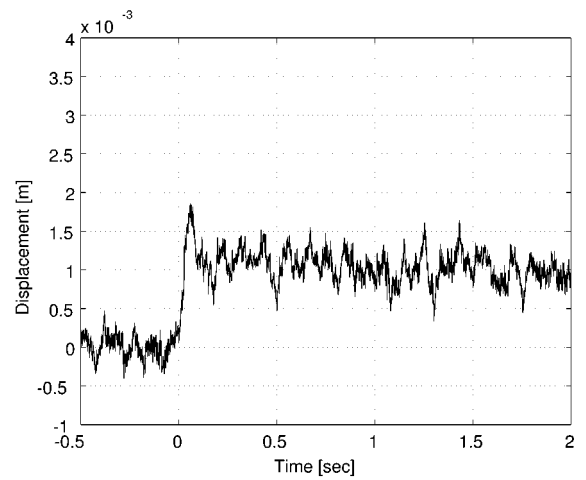


図 13 Steel Plate1 の目標値応答 (PID)  
 Fig. 13. Step response of Steel Plate1 for PID

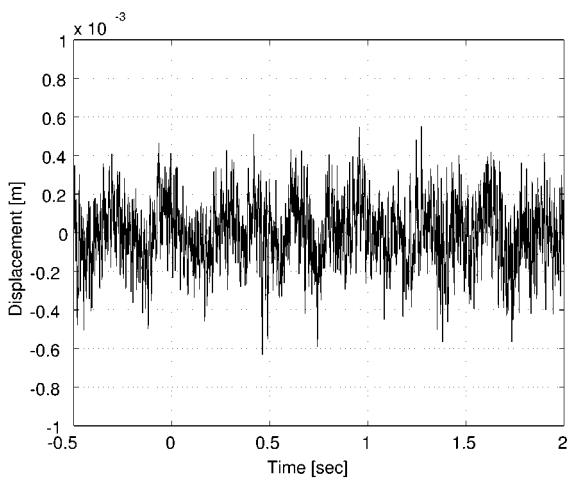


図 11 Steel Plate2 の定常状態 ( $H_{\infty}$ DIA)  
 Fig. 11. Steady state of Steel Plate2 for  $H_{\infty}$ DIA

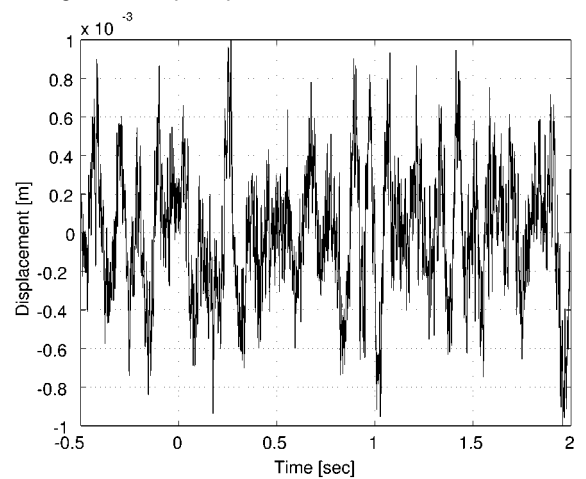


図 14 Steel Plate2 の定常状態 (PID)  
 Fig. 14. Steady state of Steel Plate2 for PID

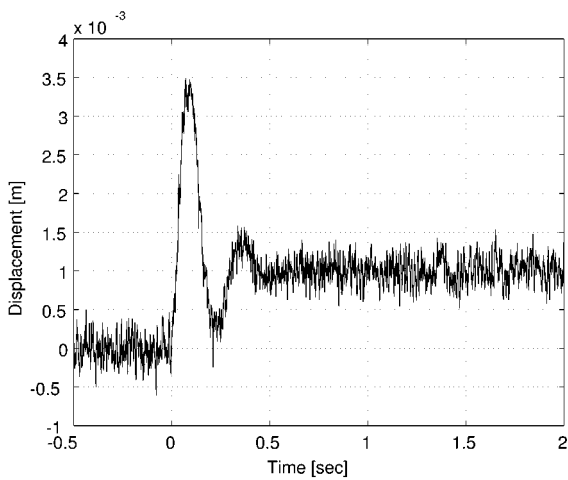


図 12 Steel Plate2 の目標値応答 ( $H_{\infty}$ DIA)  
 Fig. 12. Step response of Steel Plate2 for  $H_{\infty}$ DIA

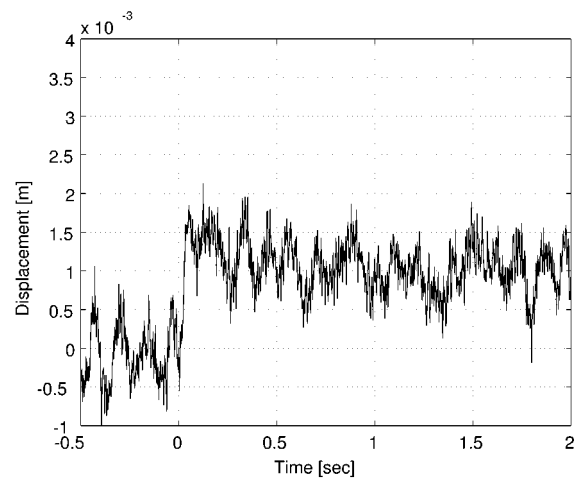


図 15 Steel Plate2 の目標値応答 (PID)  
 Fig. 15. Step response of Steel Plate2 for PID