

学術論文

磁気浮上鋼板の水平一軸方向非接触位置決め制御 (柔軟鋼板に対する基礎的検討)

**Horizontal Noncontact Positioning Control for a Magnetic Levitation Steel Plate
(Basic research for a flexible steel plate)**

長谷川 真也 (東海大学)	学生員
押野谷 康雄 (東海大学)	会員
石橋 一久 (東海大学)	会員

Shinya HASEGAWA	Tokai University	Student Member
Yasuo OSHINOYA	Tokai University	Member
Kazuhisa ISHIBASHI	Tokai University	Member

In the thin steel plates which are used in many industrial products, including those of the automobile industry, flaws on the plate surface and peeling during the surface treatment process are induced due to the use of many rollers in the conveyance process. These lead to deterioration of the quality of the plate surface. In order to solve this problem, the authors proposed a magnetic levitation control method for rectangular thin steel plates, the circumference of which is not supported and which is most likely to generate elastic vibration, and reported the feasibility of the method. However, there is the risk that side slipping and dropping of the plate may occur due to inertial force, since there is no restraint in the horizontal direction when the plate is supported without contact only in the vertical direction. In this report, we examine the change of the levitation performance during conveyance, with the addition of positioning control in its horizontal direction.

Key Words : Electromagnetic Levitation Control, Steel Plate, Positioning Control, Elastic Vibration, Digital Control, Optimal Control, Sliding Mode Control.

1 まえがき

自動車産業や、製缶産業など、多くの工業製品で利用されている薄鋼板の塗装工程において、現状ではローラによる接触搬送が行われているため、ひとつの工程において片面のみの塗装しか行えずコスト面、作業効率において大きな問題となっている。また搬送工程においてもローラを使用しているために鋼板表面に傷が生じ、表面品質の劣化が生じている。この問題の解決方法として、電磁力による鋼板の非接触支持搬送が考えられる[1]。鋼板を電磁力で支持搬送することによって、塗装工程においては、一度に両面の塗装が可能となり、作業工程の短縮化が行え、コスト面、作業効率の改善が期待できる。また搬送工程においても電磁力による非接触搬送によってローラによる表面品質の劣化を防ぐことが可能となり、より高度な鋼板表面品質の要求に応えることが出来る。そこで、切り板の非接触搬送制御の実現を目的として、デジタル最適制御理論による磁気浮上制御に関する検討が行われている[2]。一方、磁気浮上した鋼板を高速搬送するためには横滑り、落下という問題をクリアしなければならず、

連絡先：押野谷康雄，〒259-1292 平塚市北金目 1117，東海大学工学部動力機械工学科、未来科学技術共同研究センター，e-mail: ossy@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

様々な検討がなされているが問題の解決には至っていない[3]～[5]。著者らの研究グループではこれまでに搬送時における水平方向の拘束力を得るために、鋼板に対して水平方向の相対する二辺に対向するように電磁石を配置することで平面内の非接触位置決め制御を行う手法を提案している[6]。さらに磁気浮上剛体鋼板に対する水平一軸方向非接触位置決め制御実施時の制御性能について検討を行い[7]、搬送時の性能を含めた考察を行っている[8]。本研究では、浮上対象を柔軟鋼板に拡張し、スライディングモード制御、最適制御によってそれぞれ磁気浮上している鋼板への水平位置決め制御の付加が浮上方向弹性振動に与える影響を実験的に考察する。本報では電磁石位置における独立制御を適応するが、その際の外乱に対するスライディングモード制御と最適制御の制振性能の比較も行う。

2 磁気浮上制御システム

2.1 システム概要

Fig.1 の中央に磁気浮上対象である長方形亜鉛めっき鋼板(長さ 800mm, 幅 600mm, 厚さ 0.3mm, 材質 SS400)を示す。本研究では、鋼板に生じる弹性振動を弹性 1 次モードま

でに限定した考察を行うために、極軽量のカーボンファイバーパイプ（直径6mm、使用した全パイプ質量の薄鋼板質量に対する割合は約4%）を図の点線で示すように取り付けた。磁気浮上制御系の概要は同図の鋼板より上側に示してある。

渦電流式非接触変位センサ、電磁石から構成された非接触支持機構をアルミフレーム製装置内の天井に5カ所設置し、変位、速度ならびに電磁石コイル電流をフィードバックして各電磁石表面から5mmの位置に鋼板を磁気浮上させる。このフレーム全体をFig.2のように搬送路中央に設置したリニアモータを用いて移動させ、制御対象の鋼板を搬送する。

Fig.3に実験装置全体の写真を示す。

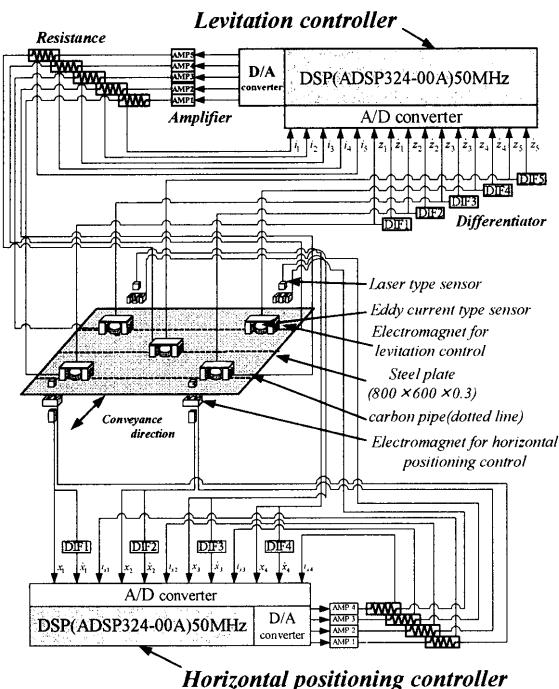


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system with horizontal positioning controller.

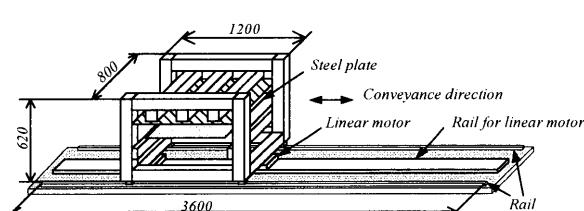


Fig. 2 Conveyance system.

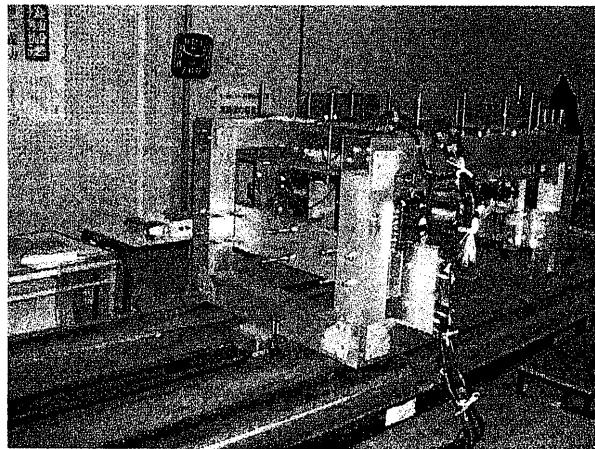


Fig. 3 Photograph of the electromagnetic conveyance system.

2.2 モデル化と基礎方程式

本研究では、1カ所の電磁石位置で検出した変位、速度と電磁石コイル電流値を、その電磁石に対してのみフィードバックする独立制御を行う。そこで、Fig.4に示すような、磁気浮上対象の5分の1に相当する質量を浮上させる1自由度系としてモデル化する。同図に示したように電気回路が直列結合した2つの電磁石の中央に渦電流式センサを配置した。なお、電磁場によるセンサの測定誤差や、2個の離れた場所に設置してある電磁石から同じ吸引力が発生することによる制御性能への影響はほとんどないことを確認している。

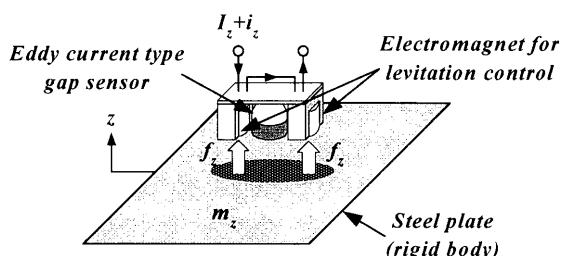


Fig. 4 Theoretical model of levitation control of the steel plate.

電磁石からの静的吸引力によって鋼板を支持すれば一定の距離に保たれる平衡状態が存在する。そこからの鉛直方向変位 z に関する運動方程式は以下のようになる。

$$m_z \ddot{z} = 2f_z \quad (1)$$

ここで、 $m_z = m/5$ (m : 磁気浮上対象の質量)、 z : 薄鋼板の平衡浮上位置からの変位、 f_z : 電磁石1個当たりの吸引力の変動値である。 f_z は以下の手順で導出する。

電磁石1個当たりのコイルのインダクタンス L_z を次式のように、鋼板と電磁石のギャップ Z に反比例する成分 $L_{z\text{eff}}/Z$

と磁束の漏れに相当する成分 L_{zle} の和として近似する。

$$L_z(Z) = \frac{L_{zeff}}{Z} + L_{zle} \quad (2)$$

電磁石吸引力 F_z は次式のように表すことができる。

$$F_z(Z, I_z) = -\frac{\partial}{\partial Z} \left\{ \frac{1}{2} L_z(Z) \cdot I_z^2 \right\} = \frac{L_{zeff} I_z^2}{2Z^2} \quad (3)$$

本研究では線形制御理論を適用するために、平衡点近傍での微小変化を考え線形化を行う。ここで Z_0 : 平衡浮上状態における電磁石表面と鋼板表面とのギャップ、 I_{z0} : 静的吸引力を得るための定常電流、 F_{z0} : Z_0 、 I_{z0} における静的吸引力、 z_γ : 薄鋼板の平衡浮上位置からのギャップ、 i_z : 電磁石コイル電流の変動値とすると

$$Z = Z_0 + z_\gamma \quad (4)$$

$$I_z = I_{z0} + i_z \quad (5)$$

$$F_z(Z_0, I_{z0}) = F_{z0} = \frac{L_{zeff} I_{z0}^2}{2Z_0^2} \quad (6)$$

となる。吸引力 $F_z(Z, I_z)$ を (Z_0, I_{z0}) 近傍でテーラー展開し整理すると平衡状態の鋼板に加わる吸引力の変動分 f_z は次式で示される。

$$f_z = -\frac{2F_{z0}}{Z_0} z_\gamma + \frac{2F_{z0}}{I_{z0}} i_z \quad (7)$$

また電磁石に加える電圧 V_z と流れる電流 I_z の関係は、電磁石コイルの抵抗値を R_z とすると

$$V_z(Z, I_z) = R_z I_z + \frac{d}{dt} \{ L_z(Z) \cdot I_z \} \quad (8)$$

である。吸引力の式と同様に (Z_0, I_{z0}) 近傍でテーラー展開すると、電磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値 v_z は

$$v_z = 2R_z i_z + 2L_{z0} \frac{d}{dt} i_z - 2L_{zeff} \cdot \frac{I_{z0}}{Z_0^2} \frac{d}{dt} z_\gamma \quad (9)$$

となる。ただし L_{z0} は平衡浮上状態における電磁石コイルのインダクタンスであり、以下の式で表せる。

$$L_{z0} = \frac{L_{zeff0}}{Z_0} + L_{zle0} \quad (10)$$

ここで L_{zle0} : 平衡浮上状態における電磁石の漏れ磁束に相当する定数、 L_{zeff0}/Z_0 : 平衡浮上状態における電磁石の有効磁束に相当する定数であり、 L_{zle0} 、 L_{zeff0} は実験的に求める値である。

また鉛直方向変位 z とギャップ増減値 z_γ の関係は鉛直方向上向きを正とすると

$$z = -z_\gamma \quad (11)$$

の関係があることから、式(7)、(9)に式(11)を代入し整理すると以下の式を得る。

$$f_z = \frac{2F_{z0}}{Z_0} z + \frac{2F_{z0}}{I_{z0}} i_z \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} i_z = -\frac{L_{zeff0}}{L_{z0}} \cdot \frac{I_{z0}}{Z_0^2} z - \frac{R_z}{L_{z0}} i_z + \frac{1}{2L_{z0}} v_z \quad (13)$$

なお本研究では $Z_0 = 5\text{mm}$ 、 $I_{z0} = 0.5\text{A}$ として式(12)、(13)の線形化近似を行った。

式(1)、(12)、(13)を整理し、状態方程式化すると以下のようになる。

$$\dot{z} = \mathbf{A}_z z + \mathbf{B}_z v_z \quad (14)$$

ただし

$$\begin{aligned} z &= [z \quad \dot{z} \quad i_z]^T \\ \mathbf{A}_z &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{4F_{z0}}{m_z Z_0} & 0 & \frac{4F_{z0}}{m_z I_{z0}} \\ 0 & -\frac{L_{zeff0}}{L_{z0}} \cdot \frac{I_{z0}}{Z_0^2} & -\frac{R_z}{L_{z0}} \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{B}_z &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_{z0}} \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

3 水平位置決め制御システム

3.1 システム概要

水平一軸方向の位置決め系の概要は、Fig.1 における中央の鋼板より下側に示してある。浮上した鋼板のエッジに対しても、水平方向から電磁石吸引力を付加し、非接触位置決め制御を行う。鋼板エッジ部の水平一軸方向の変位計測にはレーザ式センサ（帯状のレーザ光の遮断量で変位を計測）を用いる。また、電磁石は磁気浮上系で使用したものと同一のものを使用する。これらが Fig.1 に示したように、鋼板の相対する二辺に沿って 2 個ずつ設置されている。水平変位、速度、電磁石コイル電流をフィードバックし、各電磁石表面から鋼板エッジまでの距離を 5 mm に非接触位置決め制御する。

3.2 モデル化と基礎方程式

水平方向の運動は一軸方向のみに運動する1自由度系としてモデル化する。したがって、鋼板の一边に配置した2個の電磁石からは同じ吸引力が発生するとしてFig.5に示すような鋼板の2分の1を対象とした解析モデルを考える。運動方程式は次のようになる。

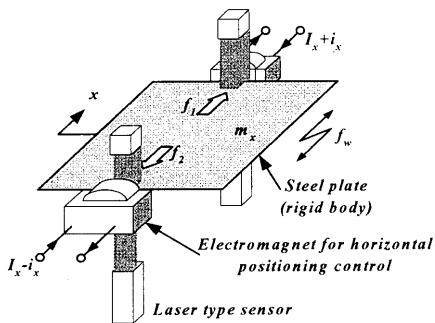


Fig. 5 Theoretical model of horizontal positioning control of the steel plate.

$$m_x \ddot{x} = f_1 - f_2 + f_w = f_x + f_w \quad (15)$$

ここで、 $m_x = m/2$ 、 x ：薄鋼板の水平平衡位置からの変位、 f_w ：外乱である。電磁石吸引力の変動値 f_x と電磁石コイル電流の変動値 i_x は、2.2節と同様に線形化近似を行い以下のように導出した。

$$f_x = \frac{4F_{x0}}{X_0} x + \frac{4F_{x0}}{I_{x0}} i_x \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt} i_x = -\frac{L_{xeff0}}{L_{x0}} \cdot \frac{I_{x0}}{X_0^2} \dot{x} - \frac{R_x}{L_{x0}} i_x + \frac{1}{2L_{x0}} v_x \quad (17)$$

$$L_{x0} = \frac{L_{xeff0}}{X_0} + L_{xle0} \quad (18)$$

ここで X_0 ：平衡状態における電磁石表面と薄鋼板エッジとのギャップ、 I_{x0} ：静的吸引力を得るために定常電流、 F_{x0} ： X_0 、 I_{x0} における静的吸引力、 L_{x0} ：水平方向位置決め電磁石コイルのインダクタンス、 R_x ：電磁石コイルの抵抗値、 v_x ：電磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値、 L_{xle0} ：平衡状態における電磁石の漏れ磁束に相当する定数、 L_{xeff0}/X_0 ：平衡状態における電磁石の有効磁束に相当する定数である。なお本研究では $X_0 = 5\text{mm}$ 、 $I_{x0} = 0.5\text{A}$ として式(16)、(17)の線形化近似を行った。

式(15)～(17)を状態方程式化すると、

$$\dot{x} = A_x x + B_x v_x \quad (19)$$

ただし

$$x = [x \quad \dot{x} \quad i_x]^T$$

$$A_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{4F_{x0}}{m_x X_0} & 0 & \frac{4F_{x0}}{m_x I_{x0}} \\ 0 & -\frac{L_{xeff0}}{L_{x0}} \cdot \frac{I_{x0}}{X_0^2} & -\frac{R_x}{L_{x0}} \end{bmatrix}$$

$$B_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_{x0}} \end{bmatrix}^T$$

4 磁気浮上制御系の設計

4.1 制御系設計方法

最適制御理論並びにスライディングモード制御理論を用いてローカルコントローラを設計し中央に配置してある電磁石以外の4か所に適用する。一方鋼板の中央に配置してある電磁石位置では最適制御を用いる。ただし速度成分のフィードバックゲインを計算値の約15分の1とし、浮上中(水平方向位置決め制御なし)の薄鋼板に弹性1次モードに相当する振動が残留しやすい状況を作り出した。最適制御、スライディングモード制御適用時の制御性能の比較のための基準としては、水平方向位置決め制御なしの定常浮上状態で鉛直方向変位 z の計測に用いる5つのセンサ位置における鋼板変位の標準偏差がほぼ両手法適用時に同等となる場合を採用した。

4.2 離散時間系最適制御

離散時間系で記述された1自由度磁気浮上系の状態方程式は式(14)を離散化し次式のようになる。

$$z_d(i+1) = \Phi_z z_d(i) + \Gamma_z v_{zd}(i) \quad (20)$$

制御系を離散時間系で構成するため、離散時間系の最適制御理論に基づいて制御則を求める。離散時間系の評価関数は次のように表される。

$$J_{zd} = \sum_{i=0}^{\infty} [z_d(i)^T Q_{zd} z_d(i) + r_{zd} v_{zd}(i)^2] \quad (21)$$

ここで Q_{zd} ：変位、速度および電磁石コイル電流に関する重み係数を要素とする行列、 r_{zd} ：制御入力に関する重み係数で

ある。式(21)を最小にする離散時間系最適制御則は次の離散時間系 Riccati 型代数方程式

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_z &= \boldsymbol{\Phi}_z^T \mathbf{M}_z \boldsymbol{\Phi}_z + \mathbf{Q}_{zd} \\ &\quad - \boldsymbol{\Phi}_z^T \mathbf{M}_z \boldsymbol{\Gamma}_z (r_{zd} + \boldsymbol{\Phi}_z^T \mathbf{M}_z \boldsymbol{\Gamma}_z)^{-1} \boldsymbol{\Phi}_z^T \mathbf{M}_z \boldsymbol{\Phi}_z \end{aligned} \quad (22)$$

において正定対称解 \mathbf{M}_z を求めることで得られ、

$$\begin{aligned} v_{zd}^o &= -\mathbf{F}_{zd} z_d \\ \mathbf{F}_{zd} &= (r_{zd} + \boldsymbol{\Gamma}_z^T \mathbf{M}_z \boldsymbol{\Gamma}_z)^{-1} \boldsymbol{\Gamma}_z^T \mathbf{M}_z \boldsymbol{\Phi}_z \end{aligned} \quad (23)$$

$$\boldsymbol{\Phi}_z(T_s) = \exp(\mathbf{A}_z T_s), \boldsymbol{\Gamma}_z(T_s) = \int_0^{T_s} [\exp(\mathbf{A}_z \tau)] d\tau \mathbf{B}_z$$

であり、 T_s はサンプリング時間(1ms)である。本研究では離散系 Riccati 型代数方程式の解を求める際、MATLAB – toolbox(The Math Works, Inc)の lqrdd を使用した。

4.3 離散時間系スライディングモード制御

最適制御理論適用時と同様に、スライディングモードコントローラはコンピュータ内で実現されるため離散時間系の制御系設計を行う。

切換関数を次式で表すことにする。

$$\sigma(i) = \mathbf{S}_d z_d(i) \quad (24)$$

また、等価制御入力は次式となる。

$$v_{eq}^s(i) = -(\mathbf{S}_d \boldsymbol{\Gamma}_z)^{-1} \mathbf{S}_d (\boldsymbol{\Phi} - \mathbf{I}) z_d(i) \quad (25)$$

よって等価制御系は次のように表すことができる。

$$z_d(i+1) = \{\boldsymbol{\Phi}_z - \boldsymbol{\Gamma}_z (\mathbf{S}_d \boldsymbol{\Gamma}_z)^{-1} \mathbf{S}_d (\boldsymbol{\Phi}_z - \mathbf{I})\} z_d(i) \quad (26)$$

\mathbf{S}_d は式(26)のシステムが安定になるように選択する必要がある。本研究ではこの設計法にシステムの零点を利用する方法を用いる。安定余裕を指定した連続時間系システム $(\mathbf{A}_z^s, \mathbf{B}_z)$ を離散化して得られるシステム $(\boldsymbol{\Phi}_z, \boldsymbol{\Gamma}_z)$ を考え、これに対して離散時間系最適制御理論を適用し \mathbf{S}_d を得る。ここで安定余裕を指定したシステム \mathbf{A}_z^s は次式で表される。

$$\mathbf{A}_z^s = \mathbf{A}_z + \varepsilon \mathbf{I} \quad (27)$$

また、 \mathbf{S}_d は次式により求まる。

$$\mathbf{S}_d^T = (r_{zd}^s + \boldsymbol{\Gamma}_z^T \mathbf{M}_z^s \boldsymbol{\Gamma}_z)^{-1} \boldsymbol{\Gamma}_z^T \mathbf{M}_z^s \boldsymbol{\Phi}_z \quad (28)$$

ただし、 \mathbf{M}_z^s は正定な重み係数行列に対する式(22)に示す離散時間系 Riccati 型代数方程式の正定解である。この \mathbf{S}_d により等価制御系式(26)は安定となる。

続いて状態を超平面に収束させ、スライディングモードを発生させる制御入力を考える。離散時間系での設計においてはチャタリングを低減させる設計法[9][10]が提案されているため、本研究ではその方法を用いる。この条件を満たすようなスライディングモード制御則として次のように与えられるものを用いる。

$$\left. \begin{aligned} v_{zd}^s(i) &= v_{eq}^s(i) + v_{nl}^s(i) \\ v_{eq}^s(i) &= -(\mathbf{S}_d \boldsymbol{\Gamma}_z)^{-1} \mathbf{S}_d (\boldsymbol{\Phi}_z - \mathbf{I}) z_d(i) \\ v_{nl}^s(i) &= -\{\alpha(i) + \beta(i)\} \operatorname{sgn}\{\sigma(i)\} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$\alpha(i) = \eta \frac{\|\sigma(i)\|}{\|\mathbf{S}_d \boldsymbol{\Gamma}_z\|}, \quad 0 < \eta < 2, \quad \beta(i) \geq F_{\max} \quad (30)$$

ここで、 F_{\max} : 外乱の最大値である。

5 水平方向位置決め制御系の設計

水平方向位置決め制御系も磁気浮上系と同様、離散時間系の最適制御理論に基づいて最適制御則を求める。離散時間系の評価関数は次のように表される。

$$\mathbf{J}_{xd} = \sum_{i=0}^{\infty} [x_d(i)^T \mathbf{Q}_{xd} x_d(i) + r_{xd} v_{xd}(i)^2] \quad (31)$$

ここで \mathbf{Q}_{xd} : 変位、速度および電磁石コイル電流に関する重み係数を要素とする行列、 r_{xd} : 制御入力に関する重み係数である。式(31)を最小にする離散時間系最適制御則は次の離散時間系 Riccati 型代数方程式

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_x &= \boldsymbol{\Phi}_x^T \mathbf{M}_x \boldsymbol{\Phi}_x + \mathbf{Q}_{xd} \\ &\quad - \boldsymbol{\Phi}_x^T \mathbf{M}_x \boldsymbol{\Gamma}_x (r_{xd} + \boldsymbol{\Phi}_x^T \mathbf{M}_z \boldsymbol{\Gamma}_z)^{-1} \boldsymbol{\Gamma}_x^T \mathbf{M}_x \boldsymbol{\Phi}_x \end{aligned} \quad (32)$$

において正定対称解 \mathbf{M}_x を求めることで得られ、

$$v_{xd}^o = -\mathbf{F}_{xd} x_d \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{xd} &= (r_{xd} + \boldsymbol{\Gamma}_x^T \mathbf{M}_x \boldsymbol{\Gamma}_x)^{-1} \boldsymbol{\Gamma}_x^T \mathbf{M}_x \boldsymbol{\Phi}_x \\ \boldsymbol{\Phi}_x(T_s) &= \exp(\mathbf{A}_x T_s), \boldsymbol{\Gamma}_x(T_s) = \int_0^{T_s} [\exp(\mathbf{A}_x \tau)] d\tau \mathbf{B}_x \end{aligned}$$

であり、 T_s はサンプリング時間(1ms)である。浮上系と同様離散系 Riccati 型代数方程式の解を求める際、MATLAB – toolbox (The Math Works, Inc) の lqrdd を使用した。また式(31)における重み行列は $\mathbf{Q}_{xd} = \mathbf{I}$, $r_{xd} = 1$ とし水平方向位置決め制御系の設計を行った。

6 制御実験と考察

6.1 実験装置諸元

本研究における各パラメータの実測値は以下の通りである。

磁気浮上系: $m=1.08\text{kg}$, $F_{z0}=2.12\text{N}$, $R_z=10.3\Omega$, $\rho=7500\text{kg/m}^3$ (鋼板の密度), $E=217\text{GPa}$ (鋼板の純弾性係数), $\nu=0.3$ (ボアソン比), $C=2.49 \times 10^8\text{Ns/m}$ (鋼板の内部減衰係数), $L_{zef0}=2.12 \times 10^4\text{Hm}$, $L_{xdef0}=0.1891\text{H}$.

水平方向位置決め系: $F_{x0}=0.45\text{N}$, $R_x=9.5\Omega$, $L_{xef0}=9.0 \times 10^5\text{Hm}$, $L_{xdef0}=0.170\text{H}$.

6.2 水平位置決め制御なしの定常浮上状態について

スライディングモード制御, 最適制御によってそれぞれ鋼板を浮上用電磁石表面から 5mm の平衡位置に浮上させた。Fig.6 は最適制御理論, スライディングモード制御理論を用いて鋼板の浮上を行った際の, 鋼板中央部時間応答波形の一例である。

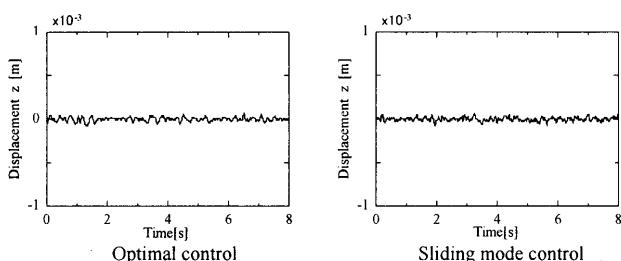


Fig. 6 Time histories at center of the plate (steady state).

前述のように本実験ではスライディングモード制御理論と最適制御理論の浮上性能の比較を, 水平位置決め制御なしの定常浮上状態における変位振幅がほぼ同じとみなせる条件下において行う。同図における変位振幅の標準偏差は最適制御理論, スライディングモード制御理論とも $2 \times 10^{-5}\text{m}$ である。このときの制御パラメータを以下に示す。

最適制御 (式 (21)) における重み行列 :

$$\mathbf{Q}_{zd}^{l,opt} = \mathbf{I}, \quad r_{zd}^{l,opt} = 1$$

スライディングモード制御において安定余裕を指定するパラメータ (式 (27)), 切換関数 S_d を決定する際に用いる重み行列 (式 (29)), 並びに式 (30) における非線形入力項におけるパラメータ : $\varepsilon = 10$, $\mathbf{Q}_{zd}^{l,smc} = \mathbf{I}$, $r_{zd}^{l,smc} = 1$,

$$\eta = 0.05, \quad \beta = 3$$

以後の実験は上述の制御系にて行うものとした。

6.3 静的吸引力 (定常電流) の変化に伴う薄鋼板弹性振動抑制効果について

スライディングモード制御, 最適制御によってそれぞれ薄鋼板を浮上させた後, 薄鋼板中央部の電磁石制御電圧にランダムノイズを加え弹性 1 次モードの振動を励起させ, 同時に水平方向位置決め制御を行った。なおその際, 鋼板エッジ部に対する静的吸引力を発生させるための定常電流 I_{z0} を $0.5\text{A}, 1.0\text{A}, 1.5\text{A}$ と変化させた。

制御電圧に加えた入力外乱は $0\text{Hz} \sim 50\text{Hz}$ までに帯域制限したピリオディックランダムノイズ(電流の標準偏差 0.01A)である。Fig.7 はこのときの電磁石コイル電流の変動値に関する時刻歴の一例およびパワースペクトル密度である。

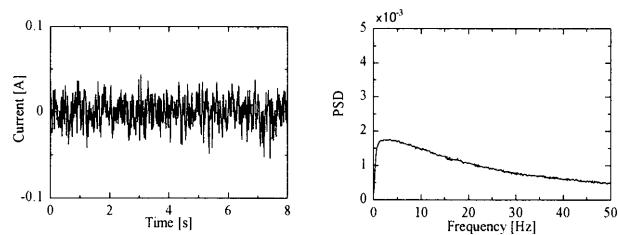


Fig. 7 Time histories and power spectrum of disturbance.

本節では静的吸引力の変化に伴う鋼板中央部弹性振動の抑制効果について Fig.8 のようなトレードオフ曲線を作成し考察を行うと同時に, スライディングモード制御と最適制御の制振性能の比較を行う。

Fig.8 における横軸は水平方向定常電流, 縦軸は鋼板中央部振動の標準偏差を示す。図中の●印は最適制御, ■印はスライディングモード制御を用いた実験結果 (共に 10 回の平均値) である。また, 図中 without disturbance は 6.2 節で基準としたスライディングモード制御, 最適制御浮上時において外乱未入力時における鋼板中央部振動の標準偏差である(両制御とも $2 \times 10^{-5}\text{m}$)。この状態に対して, 外乱を入力した場合, 最適制御では約 $5.8 \times 10^{-4}\text{m}$ まで標準偏差が上昇するが, スライディングモード制御は外乱に対し強いロバスト性を有するため, 約 60%に相当する約 $3.4 \times 10^{-4}\text{m}$ までしか上昇せず, 制振性能の良さが現れている。

さらに, 水平方向定常電流 I_{z0} を印加し, これを増加させることで最適制御, スライディングモード制御共に, 鋼板中央部の標準偏差を減少させることが可能となっている。ただし I_{z0} の値が上昇するにともない, 鉛直方向の制御手法の差は見られなくなることから, エッジに対する定常的な吸引力の影響が大きいことを示している。これは水平方向位置決め制御を付加することによって, 鋼板の両端が拘束されたため

めであると考えられる。そこで実際に鋼板の両端を硬質ゴムによって接触し実験を行ったところ(図中 with support by rubber), 水平方向定常電流 1.5A の場合とほぼ同程度の鋼板中央部の振動を示した。

Fig.9, Fig.10 は Fig.8 のトレードオフ曲線における時刻歴の一例とそのパワースペクトル密度である。水平方向位置決め制御を付加しない場合(Fig.9(a), Fig.10(a))においては両制御手法とも鋼板に弾性振動が励起され、弾性 1 次モードの固有振動数である 4.75Hz に大きなパワースペクトル密度のビ

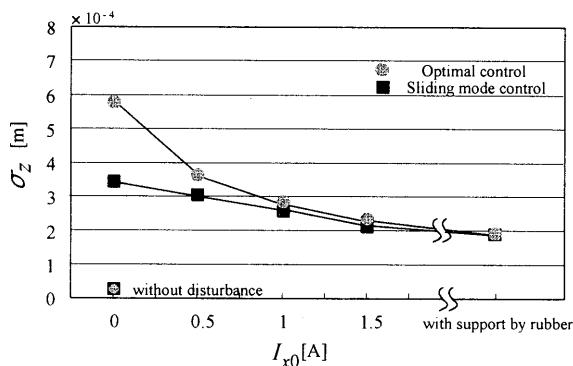


Fig. 8 Trade off curve.

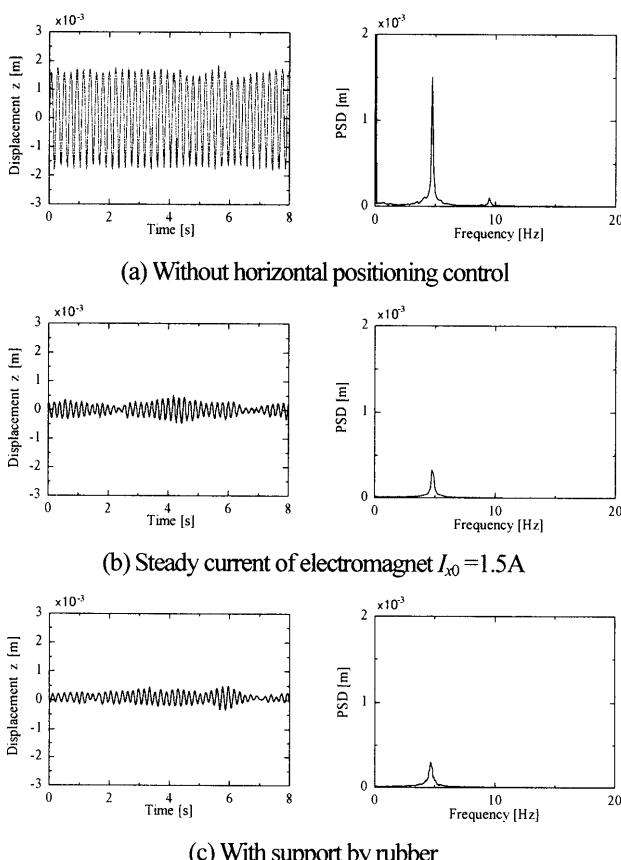


Fig. 9 Time histories and power spectrum at center of the plate in the case of using optimal control.

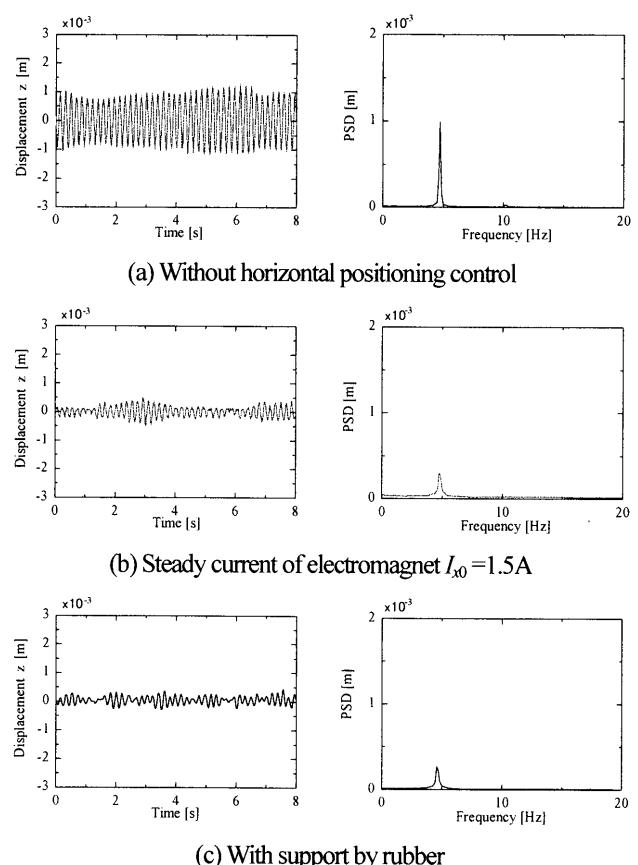


Fig. 10 Time histories and power spectrum at center of the plate in the case of using sliding mode control.

ークが現れている。なお本研究では鋼板にカーボンパイプ製の梁を取り付け、弾性振動を一軸方向にのみに限定しているため、Fig.9, Fig.10 において 20Hz 以上の高次モード振動はほとんど励起されていないことを確認している。

また、水平方向位置決め制御の定常電流を 1.5A 付加した場合 (Fig.9(b), Fig.10(b)) と、鋼板の両端を硬質ゴムによって支えた場合 (Fig.9(c), Fig.10(c)) におけるパワースペクトル密度を比較すると、そのピークは 4.75Hz であり変化はない。これらの結果より水平方向位置決め制御の定常電流を増加させることにより、鋼板の両端を電磁力により等価的に拘束することが可能となり、鋼板の両端を硬質ゴムで支えた場合と同様の効果、すなわち両端自由境界から両端固定に近い境界条件へと変化することが示せた。

6.4 鋼板搬送時における弾性振動の抑制効果について

Fig.11 にフレーム搬送用リニアモータの搬送速度(指令値)とそのときの加速度(実測値)を示す。Fig.12, Fig.13 は 6.3 節と同一条件のもと、最適制御、スライディングモード制御でそれぞれ磁気浮上している鋼板に対して、水平方向位置決めを行わない場合と、水平方向位置決め制御の定常電流 1.5A

付加した場合でそれぞれ搬送を行った際の、鋼板中央部振動の時間応答波形および鋼板エッジ部の時間応答波形である。水平方向位置決め制御を行わず搬送を行った場合、両制御手法とも加・減速時において鋼板は横滑りを起し水平方向位置決め用電磁石に衝突している様子が分かる(両図(a)の変位 x)。またこの衝突によって、鋼板中央部に弾性振動が大きく励起されている(両図(a)の変位 z)。この場合は6.3節と同様に、スライディングモード制御に優位性が見出せる(特に加・減速時の減衰特性)。一方、定常電流が1.5Aのとき(両図(b))には搬送を行っても鋼板エッジ部の振動 x が1mm程度に抑えられ、さらに鋼板中央部の弾性振動 z も特に減速時において抑えられていることが確認できる。また、スライディングモード制御と最適制御に差がほとんど生じておらず、水平方向位置決め制御の定常電流を1.5A程度付加することによって、鉛直方向の制御系に依存せず磁気浮上の安定化に効果があることが明らかとなった。

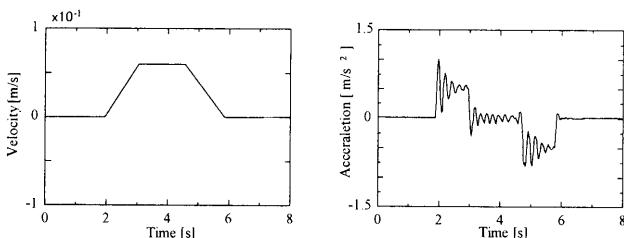


Fig. 11 The command value of transportation speed and its observed acceleration.

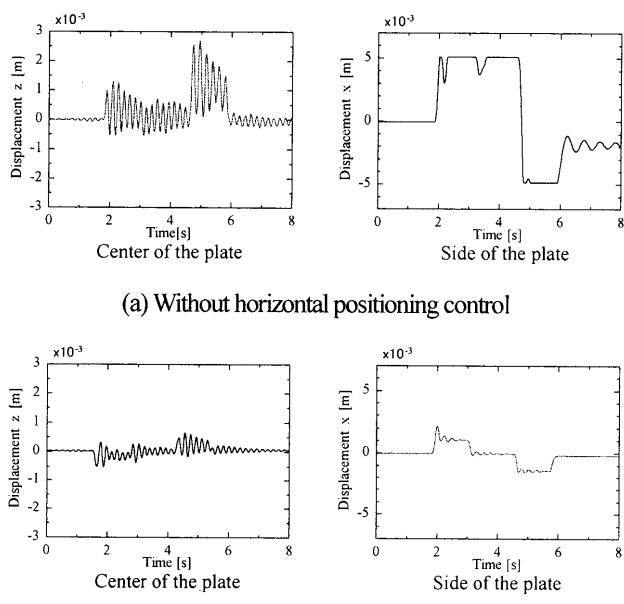


Fig. 12 Vertical displacements and horizontal displacements of the plate in traveling in the case of using optimal control.

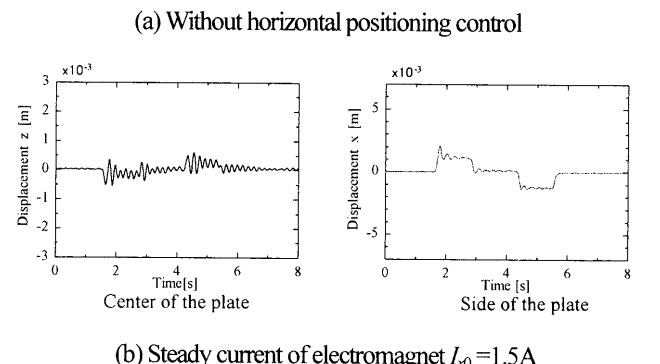
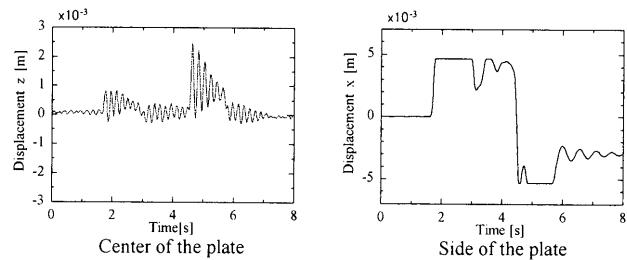


Fig. 13 Vertical displacements and horizontal displacements of the plate in traveling in the case of using sliding mode control.

7 むすび

本研究は、磁気浮上している鋼板に生ずる弾性振動が水平方向からの静的吸引力によってどのような影響を受けるかを明らかにするために実験的考察を行った。その結果水平方向からの静的吸引力を上昇させることにより、鉛直方向の制御系に依存せず搬送時に発生する弾性振動を抑制する効果が確認できた。薄鋼板の弾性振動抑制には、これまで主に薄鋼板の平面方向への電磁石による制御に依存してきた。本研究はエッジ方向からの電磁力によっても弾性振動を十分抑制できる可能性を明らかにした。

今後は水平方向電磁石の静的吸引力が上昇することによって磁気浮上系に与える影響のモデル化や、水平一軸方向の制御に加えてそれに直交する方向に対する制御の実施、水平方向の衝撃力に対する検討、梁を取り付けない柔軟な薄鋼板に関するシステム設計などをを行い、さらに工学的、技術的に有用性のあるシステムの構築を目指す。

(2003年3月1日受付, 2003年10月23日再受付,
2004年1月7日再々受付)

参考文献

- [1] 川田, 森井, 片山, 高橋, 第2回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム, 1990, pp.59-62.
- [2] 押野谷, 小林, 丹野, 日本機械学会論文集(C編), Vol.62, No.600, 1996, pp.127-133.
- [3] 森下, 明石, 電気学会全国大会講演論文集, 1997, pp.183-184.

- [4] 林屋, 大崎, 正田, 電気学会論文誌, Vol.120-D, No.7, 2000, pp.928-933.
- [5] 押野谷, 石橋, 関原, 日本AEM学会誌, Vol. 9, No. 1, 2001, pp. 39-45.
- [6] 押野谷, 石橋, 関原, 日本機械学会論文集(C編), Vol.68, No.669, 2002, pp.86-92.
- [7] 押野谷, 石橋, 関原, 日本AEM学会誌, Vol. 10, No. 2, 2002, pp. 200-207.
- [8] 野波, 田, スライディングモード制御, コロナ社, 1994.
- [9] 田, 野波, 日本機械学会論文集(C編), Vol.60, No.580, pp.136-143, 1994.