

# 磁気浮上鋼板の水平一軸方向非接触位置決め制御 (搬送時における基礎的検討)

長谷川真也\*<sup>1</sup>・押野谷康雄\*<sup>2</sup>・石橋一久\*<sup>3</sup>

## Horizontal Uniaxial Noncontact Positioning Control for a Magnetic Levitated Steel Plate (Basic Research during Conveyance)

by

Shinya HASEGAWA, Yasuo OSHINOYA and Kazuhisa ISHIBASHI

(Received on 31.3.2003 & accepted on 16.7.2003)

### Abstract

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 in the levitation performance during conveyance, with the addition of positioning control in its horizontal direction.

**Keywords:** Electromagnetic Levitation Control, Steel Plate, Positioning Control, Elastic Vibration, Digital Control, Optimal Control, Sliding Mode Control.

## 1. 緒言

製罐産業や自動車産業などで、広く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<sup>(1)</sup>。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<sup>(2)</sup>。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、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<sup>(3)~(5)</sup>。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<sup>(6)</sup>。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<sup>(7)</sup>、搬送時の性能を含めた考察を行っている<sup>(8)</sup>。

本報告では、浮上対象を柔軟鋼板に拡張し<sup>(9)(10)</sup>、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に水平位置決め制御を付加することによる浮上方向制御に与える影響を実験的に考察する。

## 2. 浮上システム

### 2.1 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、鋼板に生じる弾性振動を弾性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製パイプ(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。磁気浮上制御システムの概要は同図の鋼板より上側に示してある。

\* 1 東海大学工学研究科機械工学専攻博士課程後期  
\* 2 東海大学工学部動力機械工学科助教授  
\* 3 東海大学第二工学部機械工学科教授

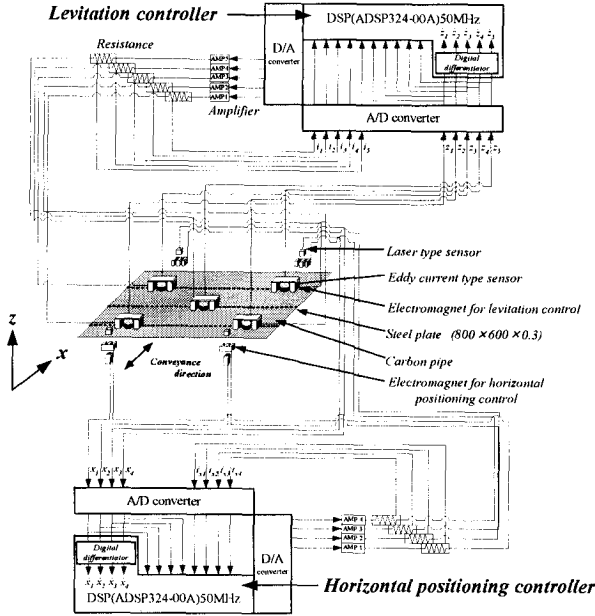


Fig.1 Electromagnetic levitation control system with horizontal positioning controller.

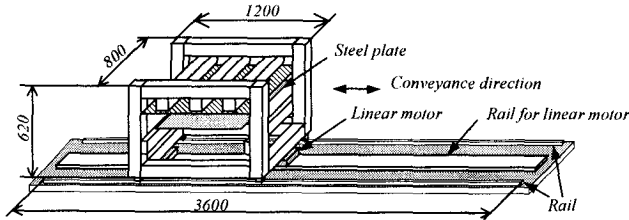


Fig.2 Conveyance system.

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させる。

## 2.2 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、ローカルフィードバック制御を行う。そこで、Fig.3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コロケーションとなるように配置した。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 $f_z$ 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。

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、線形化近似を行った電磁石吸引力に関する方程式および電磁石回路方程式は以下のようになる。

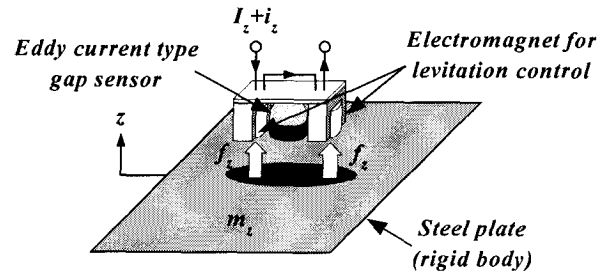


Fig.3 Theoretical model of levitation control of the steel plate.

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

$$f_z = \frac{2F_z}{Z_0} z + \frac{2F_z}{I_z} i_z \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} i_z = -\frac{L_{eff}}{L_z} \cdot \frac{I_z}{Z_0^2} \dot{z} - \frac{R_z}{2L_z} i_z + \frac{1}{2L_z} v_z \quad (3)$$

$$L_z = \frac{L_{eff}}{Z_0} + L_{lea} \quad (4)$$

式(1)~(4)を状態方程式化すると、

$$\dot{z} = A_z z + B_z v_z \quad (5)$$

$$z = [z \quad \dot{z} \quad i_z]^T$$

$$A_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2F_z}{m_z Z_0} & 0 & \frac{2F_z}{m_z I_z} \\ 0 & -\frac{L_{eff}}{L_z} \cdot \frac{I_z}{Z_0^2} & -\frac{R_z}{2L_z} \end{bmatrix}$$

$$B_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_z} \end{bmatrix}^T$$

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個当りの吸引力の変動値、 $F_z$ ：静的吸引力、 $Z_0$ ：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、 $I_z$ ：静的吸引力を得るための定常電流、 $i_z$ ：電磁石コイル電流の変動値、 $L_z$ ：平衡浮上状態における電磁石コイルのインダクタンス、 $R_z$ ：2つの電磁石コイルの総抵抗値、 $v_z$ ：電磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値、 $L_{lea}$ ：電磁石の漏れ磁束に相当する定数である。

## 3. 位置決めシステム

### 3.1 概要

水平一軸方向の位置決めシステムの概要は、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、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5mmに非接触位置決め制御する。

### 3.2 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、鋼板の一辺に配置した2個の電磁石からは同じ吸引力が発生するとして Fig. 4 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。基礎方程式は以下になる。

$$m\ddot{x} = f_1 - f_2 + f_w = f_x + f_w \quad (6)$$

$$f_x = \frac{4F_x}{X_0}x + \frac{4F_x}{I_x}i_x \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt}i_x = -\frac{L_{seff}}{L_x} \cdot \frac{I_x}{X_0^2} \dot{x} - \frac{R_x}{2L_x} i_x + \frac{1}{2L_x} v_x \quad (8)$$

$$L_x = \frac{L_{seff}}{X_0} + L_{stea} \quad (9)$$

式(6)~(9)を状態方程式化すると、

$$\dot{x} = A_x x + B_x v_x \quad (10)$$

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

$$A_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2F_x}{m_x X_0} & 0 & \frac{2F_x}{m_x I_x} \\ 0 & -\frac{L_{seff}}{L_x} \cdot \frac{I_x}{X_0^2} & -\frac{R_x}{2L_x} \end{bmatrix}$$

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

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、 $F_x$ ：静的吸引力、 $X_0$ ：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、 $I_x$ ：静的吸引力を得るための定常電流、 $i_x$ ：電磁石コイル電流の変動値、 $L_x$ ：水平方向位置決め電磁石コイルのインダクタンス、 $R_x$ ：2つの電磁石コイルの総抵抗値、 $v_x$ ：電磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値、 $L_{stea}$ ：電磁石の漏れ磁束に相当する定数、 $L_{seff}$ ：電磁石の有効磁束に相当する定数である。

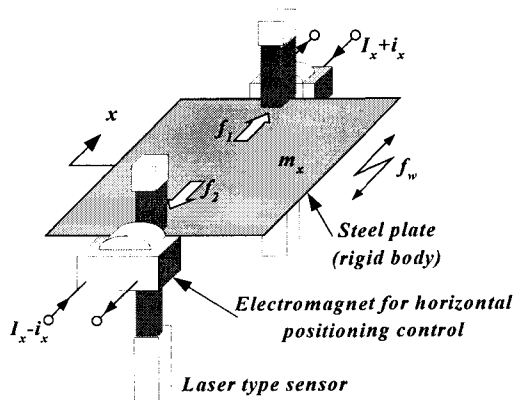


Fig.4 Theoretical model of horizontal positioning control of the steel plate.

## 4. 浮上制御システムの設計

### 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)の薄鋼板に弾性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<sup>(11)(12)</sup>。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全チャンネルの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次式のようにになる。

$$z_d(i+1) = \Phi_z z_d(i) + \Gamma_z v_{zd}(i) \quad (11)$$

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。

$$J_{zd} = \sum_{i=0}^{\infty} [z_d(i)^T Q_{zd} z_d(i) + r_{zd} v_{zd}(i)^2] \quad (12)$$

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(12)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

$$M_z = \Phi_z^T M_z \Phi_z + Q_{zd} - \Phi_z^T M_z \Gamma_z (\Gamma_z^T M_z \Gamma_z)^{-1} \Phi_z^T M_z \Phi_z \quad (13)$$

において正定対称解  $M_z$  を求めることで得られ、

$$v_{zd}^o = -F_{zd} z_d \quad (14)$$

$$F_{zd} = (\Gamma_z^T M_z \Gamma_z)^{-1} \Gamma_z^T M_z \Phi_z$$

$$\Phi_z(T_s) = \exp(A_z T_s), \Gamma_z(T_s) = \int_0^{T_s} [\exp(A_z \tau)] d\tau B_z$$

であり、 $T_s$  はサンプリング時間(0.2ms)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 の lqrd 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。

$$\sigma(i) = S_d z_d(i) \quad (15)$$

また、等価制御入力は次式となる。

$$v_{eq}^s(i) = -(S_d \Gamma_z)^{-1} S_d (\Phi - I) z_d(i) \quad (16)$$

よって等価制御系は次のように表すことができる。

$$z_d(i+1) = \{\Phi_z - \Gamma_z (S_d \Gamma_z)^{-1} S_d (\Phi_z - I)\} z_d(i) \quad (17)$$

$S_d$  は式(17)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( $A_z^s, B_z$ )を離散化して得られるシステム( $\Phi_z, \Gamma_z$ )を考え、これに対して離散時間系最適制御理論を適用し  $S_d$  を得る。ここで安定余裕を指定したシステム  $A_z^s$  は次式で表される。

$$A_z^s = A_z + \varepsilon I \quad (18)$$

また、 $S_d$  は次式により求まる。

$$S_d^T = (r_{zd}^s + \Gamma_z^T M_z^s \Gamma_z)^{-1} \Gamma_z^T M_z^s \Phi_z \quad (19)$$

ただし、 $M_z^s$  は正定な重み係数行列に対する式(12)に示す離散時間系 Riccati 型代数方程式の正定解である。この  $S_d$  により等価制御系(17)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<sup>(13)(14)</sup>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。

$$\left. \begin{aligned} v_{zd}^s(i) &= v_{eq}^s(i) + v_{nl}^s(i) \\ v_{eq}^s(i) &= -(S_d \Gamma_z)^{-1} S_d (\Phi_z - I) z_d(i) \\ v_{nl}^s(i) &= -\{\alpha(i) + \beta(i)\} \text{sgn}\{\sigma(i)\} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

ここで

$$\alpha(i) = \eta \frac{\|\sigma(i)\|}{\|S_d \Gamma_z\|}, \quad 0 < \eta < 2, \quad \beta(i) \geq F_{max} \quad (21)$$

$F_{max}$  : 外乱の最大値である。

## 5. 位置決め制御システムの設計

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。

$$J_{xd} = \sum_{i=0}^{\infty} [x_{id}(i)^T Q_{xd} x_{id}(i) + r_{xd} v_{xd}(i)^2] \quad (22)$$

ここで  $Q_{xd}$  : 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(22)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

$$M_x = \Phi_x^T M_x \Phi_x + Q_{xd} - \Phi_x^T M_x \Gamma_x (r_{xd} + \Phi_x^T M_x \Gamma_x)^{-1} \Gamma_x^T M_x \Phi_x \quad (23)$$

において正定対称解  $M_x$  を求めることで得られ、

$$v_{xd}^o = -F_{xd} x_{id} \quad (24)$$

$$F_{xd} = (r_{xd} + \Gamma_x^T M_x \Gamma_x)^{-1} \Gamma_x^T M_x \Phi_x$$

$$\Phi_x(T_s) = \exp(A_x T_s), \quad \Gamma_x(T_s) = \int_0^{T_s} [\exp(A_x \tau)] d\tau B_x$$

であり、 $T_s$  はサンプリング時間(0.2ms)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 の lqrd を使用した。

## 6. 実験結果と考察

### 6.1 制御性能の比較基準

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行う場合、その基準として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を設定する。外乱未入力時の定常浮上状態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  $2 \times 10^{-5}$  m である。

### 6.2 鋼板搬送時におけるピッチング運動および弾性振動の抑制効果について

Fig.5 にフレーム搬送用リニアモータの搬送速度(指令値)(同図(a))とそのときの加速度(実測値)(同図(b))を示す。

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、水平方向位置決め制御の定常電流を 0.5A 付加した場合、1.5A 付加した場合、また、鋼板の両端を硬質ゴムによって支えた場合の 4 つの条件下において、それぞれ搬送を行い、鋼板搬送方向前方部、後方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を測定した。

水平方向位置決め制御を行わず搬送を行った場合(Fig.6, Fig.7), 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(c)の変位  $x$ )。またこの衝撃力によって、鋼板搬送方向前方部、後方部ともにピッチング運動に相当する大きな変位を発生している(両図(a), (b)の変位  $z$ )。この原因は鋼板の横滑りに伴う重心移動によるものである。また、電磁石のような衝突するものが存在しなければ、鋼板は搬送直後に落下することを確認している。ただし、Fig.6, Fig.7 の場合、電磁石を接触式のストップにしながら鋼板は落下せず搬送可能であった。この場合において、最適制御に比べスライディングモード制御は  $z$  方向のピッチング運動最大値を約 60% に減少させており、外乱に対するロバスト性が確認できる。

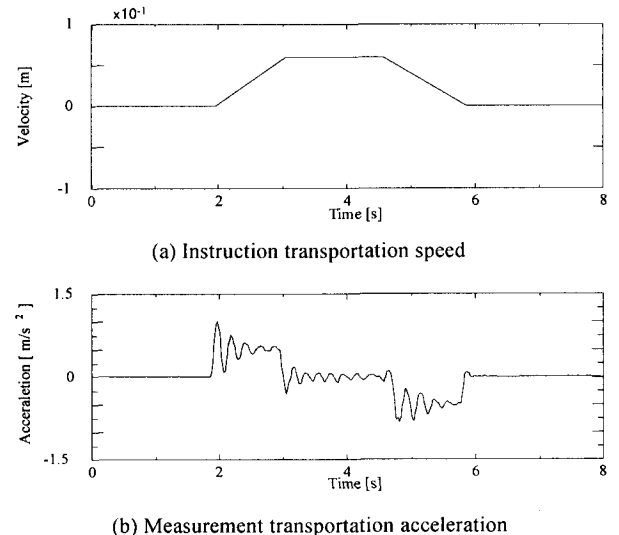
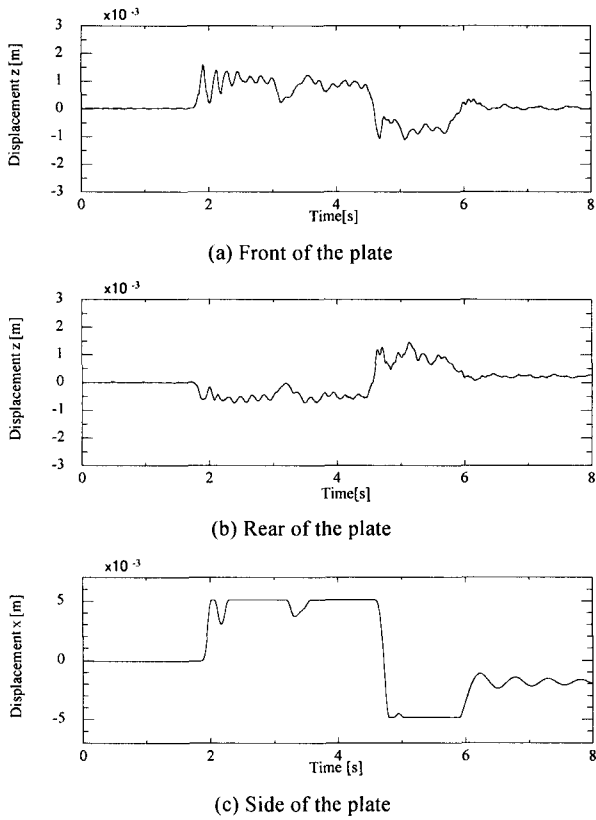
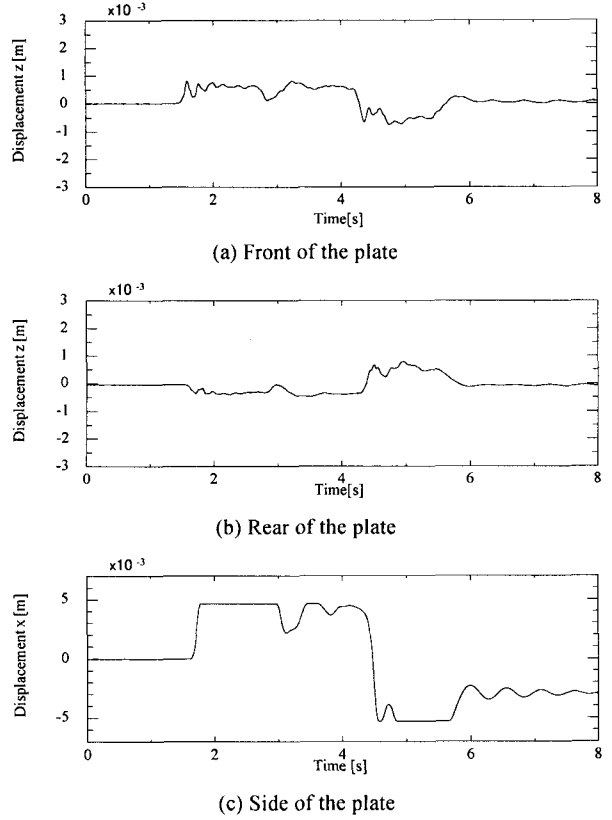


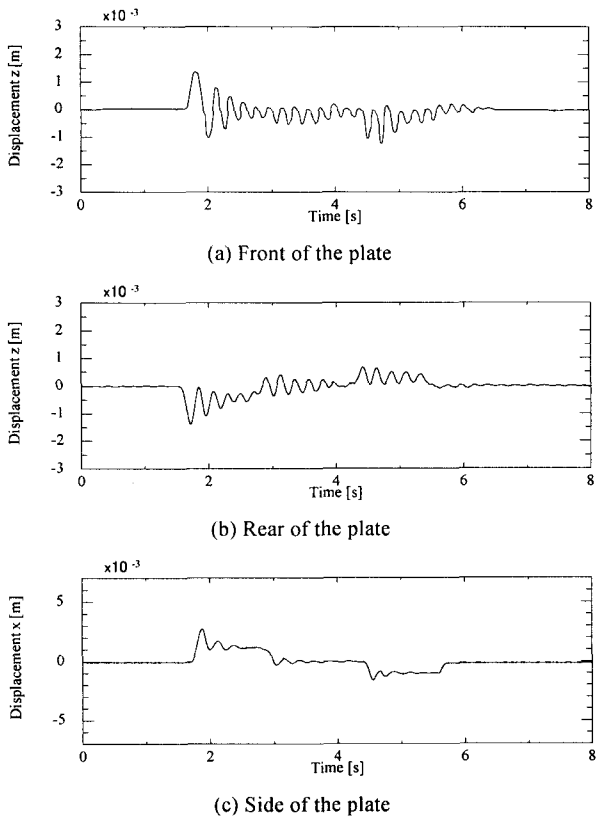
Fig.5 Instruction transportation speed and measurement transportation acceleration.



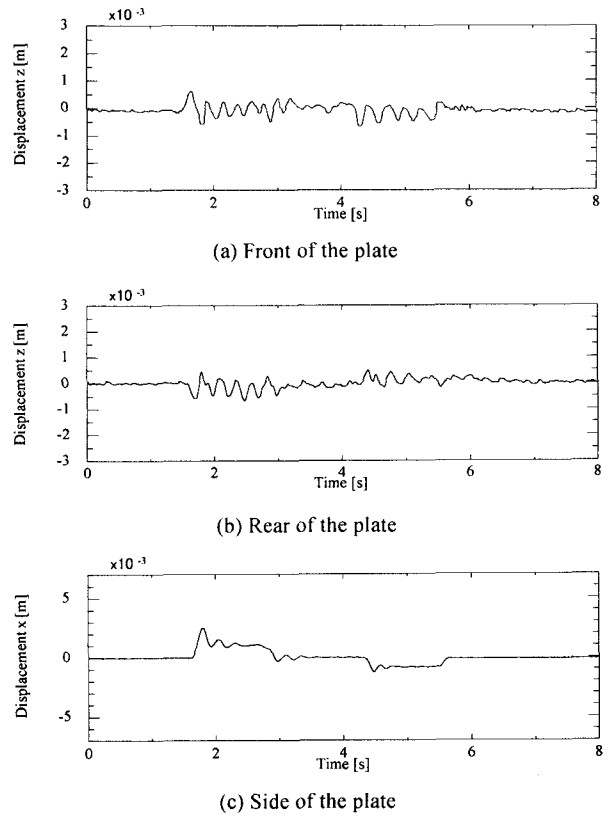
**Fig.6** Vertical displacements and horizontal displacements of the plate in traveling in the case of using optimal control. (Without horizontal positioning control)



**Fig.7** Vertical displacements and horizontal displacements of the plate in traveling in the case of using sliding mode control. (Without horizontal positioning control)



**Fig.8** Vertical displacements and horizontal displacements of the plate in traveling in the case of using optimal control. (Steady current of electromagnet  $I_x=0.5A$ )



**Fig.9** Vertical displacements and horizontal displacements of the plate in traveling in the case of using sliding mode control. (Steady current of electromagnet  $I_x=0.5A$ )

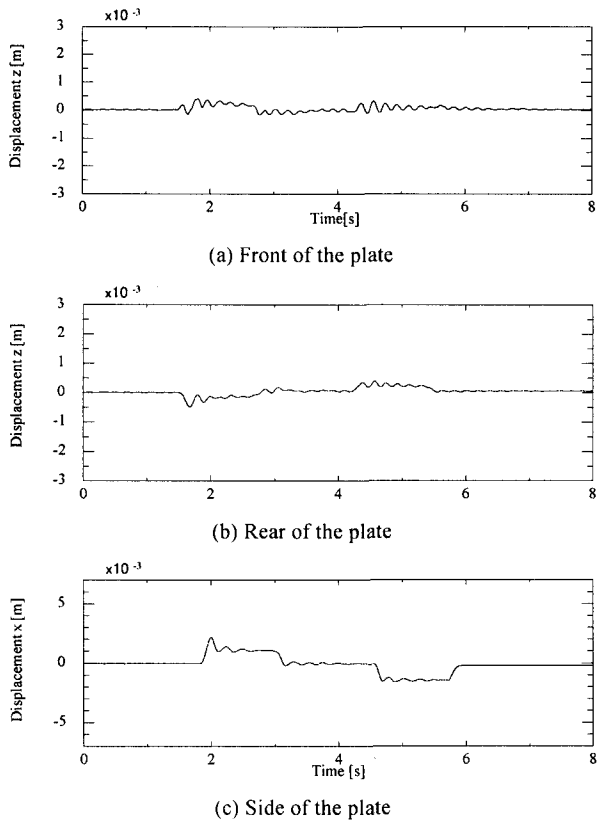


Fig.10 Vertical displacements and horizontal displacements of the plate in traveling in the case of using optimal control. (Steady current of electromagnet  $I_x=1.5A$ )

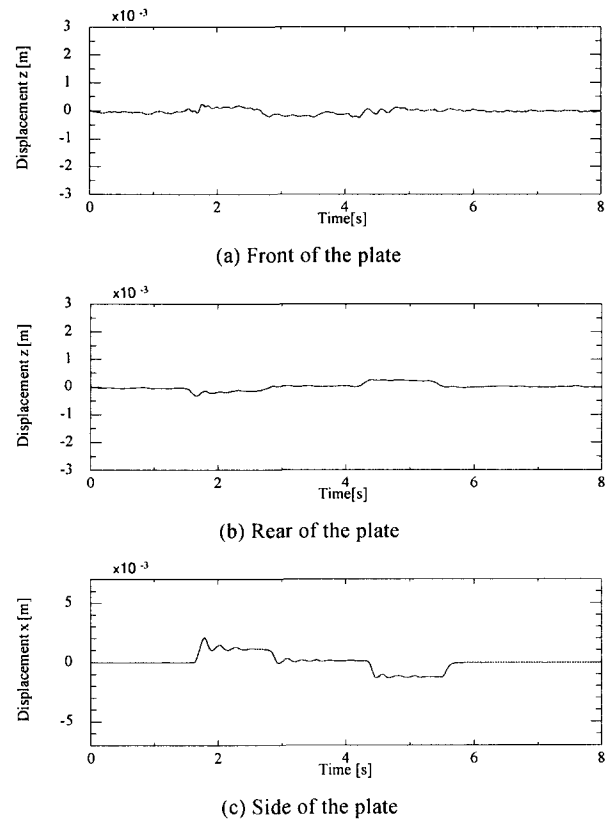


Fig.11 Vertical displacements and horizontal displacements of the plate in traveling in the case of using sliding mode control. (Steady current of electromagnet  $I_x=1.5A$ )

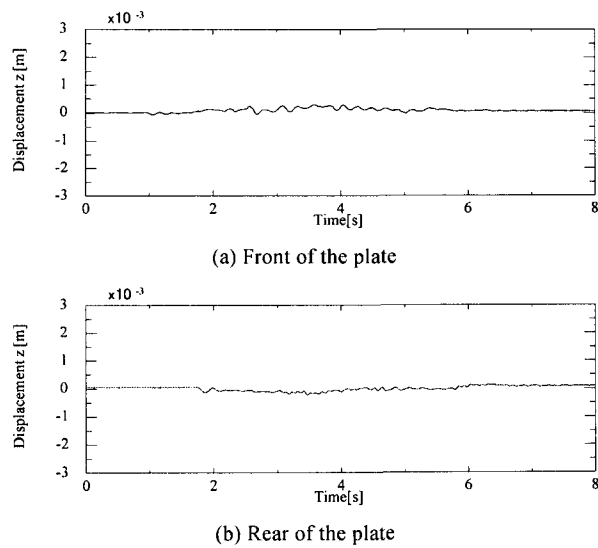


Fig.12 Vertical displacements and horizontal displacements of the plate in traveling in the case of using optimal control. (With support by rubber)

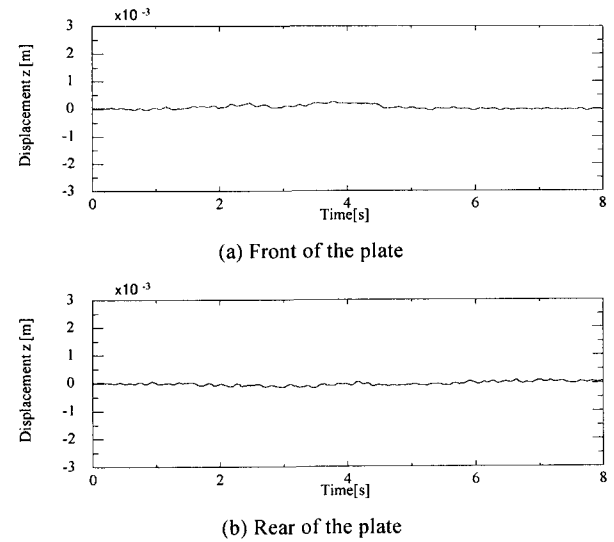


Fig.13 Vertical displacements and horizontal displacements of the plate in traveling in the case of using sliding mode control. (With support by rubber)

一方、水平方向位置決め制御の定常電流が  $0.5A$  のとき (Fig.8, Fig.9) 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、安定な非接触搬送が行われている (両図(c)の変位  $x$ )。そのため鋼板搬送方向前部、後方部ともにピッチング運動が水平方向位置決め制御を行わない場合と比較し、減少していることが確認できる (両図(a), (b)の変位  $z$ )。しかしながら水平方

向からの定常電流が比較的小さいため、搬送を行う際の加速度によって鋼板に弾性振動が励起されている。この場合もスライディングモード制御は最適制御に比べ、鋼板に生ずる弾性振動を特に加・減速時において抑制しており優位性が確認できる。

また、定常電流が  $1.5A$  のとき (Fig.10, Fig.11) には搬送を行った際の鋼板エッジ部の振動  $x$  が Fig.8(c), Fig.9(c) と同様  $1mm$  程度に抑えられている。さらに鋼板搬送方向前部、後方部のピ

ツチング運動と弾性振動を共に抑制していることが確認できる(両図(a), (b)の変位  $z$ ).

これは鋼板の両端を硬質ゴムによって支えた場合に近い制振性能を示している(Fig.12, Fig.13). 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いない. これは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って, 鋼板の両端を電磁力によって等価的に拘束することが可能となり, 両端自由境界から両端固定境界に近い境界条件へと変化した為である. これらの結果から, 本実験装置においては, 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.

## 7. 結言

本報告は, 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, 浮上制御にスライディングモード制御, 最適制御という2つの異なるコントローラを用いて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が, 本報告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.

### 参考文献

- (1) 川田, 森井, 片山, 高橋: 薄鋼板の磁気浮上特性, 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: 相対する二辺が梁で補強された薄鋼板の磁気浮上制御, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.62, No.600, 1996, pp.127-133.
- (3) 森下, 明石: 磁気浮上鋼板の傾斜案内制御実験, 電気学会全国大会講演論文集, 1997, pp.183-184.
- (4) 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, Vol.120-D, No.4, 2000, pp.489-494.
- (5) 林屋, 大崎, 正田: 横方向磁束型リニアモータを用いた鋼板の磁気浮上搬送, 電気学会論文誌, Vol.120-D, No.7, 2000, pp.928-933.
- (6) 押野谷, 石橋, 関原: 磁気浮上薄鋼板の水平方向非接触位置決め時における弾性振動抑制効果に関する実験的考察, 日本 AEM 学会誌, Vol. 9, No. 1, 2001, pp. 39-45.
- (7) 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制御機構の提案), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.68, No.669, 2002, pp.86-92.
- (8) 押野谷, 石橋, 関原, 日本 AEM 学会誌: 磁気浮上鋼板の水平一軸方向非接触位置決め制御 (剛体鋼板に対する基礎的検討), Vol. 10, No. 2, 2002, pp. 200-207.
- (9) 長谷川, 押野谷, 石橋: 磁気浮上薄鋼板の水平方向非接触位置決め時における浮上性能に関する考察, 日本機械学会 2002 年度年次大会, 2002, pp. 279-280.
- (10) 長谷川, 福島, 押野谷, 石橋: 鋼板の磁気浮上搬送システム (水平方向非接触位置決め性能の改善), 日本機械学会 関東支部第9回総会, pp. 203-204, 2003.
- (11) 長谷川, 押野谷, 石橋: 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), 第12回 MAGDA コンファレンス, pp. 151-158, 2003.
- (12) Shinya HASEGAWA, Yasuo OSHINOYA and Kazuhisa ISHIBASHI: Conveyance Control for a Levitated Plate, The 11th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics in Versailles, 2003. 5. 12(発表予定).
- (13) 野波, 田: スライディングモード制御, コロナ社, 1994.
- (14) 田, 野波: 離散時間スライディングモード制御による弾性ロータ・磁気軸受系の高速回転時特性, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.60, No.580, pp.136-143, 1994.