

磁気浮上薄鋼板の非接触位置決め制御における 水平方向安定化に関する検討

長谷川真也*¹・土井雅貴*²・齋藤友志*³
押野谷康雄*⁴・石橋一久*⁵・粕谷平和*⁶

Examination on Horizontal Stabilization in Noncontact Positioning Control of Magnetically Levitated Thin Steel Plate

by

Shinya HASEGAWA, Masaki DOI, Tomoshi SAITO
Yasuo OSHINOYA, Kazuhisa ISHIBASHI and Hirakazu KASUYA

(Received on September 30, 2005 & accepted on March 24, 2006)

Abstract

As a noncontact transferring system of thin steel plates which are used in various industrial products such as automobile, we have proposed a magnetic levitation control system and have confirmed the feasibility by using the digital control experiment. However, we also found the risk that side slipping and dropping of the plate may occur due to inertial force, since the levitation control does not provide restraining force for the direction of travel. Therefore we have proposed to equip some electromagnetic actuators in order to control the horizontal motion of the levitated steel plate. In addition, we have reported that it is possible to suppress elastic vibration of a steel plate in the vertical direction by aligning several permanent magnets parallel to the electromagnets for the horizontal positioning. The attractive force applied to the steel plate by the permanent magnets changes according to the distance between the permanent magnet and the edge of the steel plate. Such uncertainties for the modeling deteriorate the performance of steel plate positioning using the electromagnet. In this paper, we propose to design a horizontal positioning control system for magnetic levitation of a steel plate using μ -synthesis that is robust for the model uncertainty.

Keywords : Steel plate, Electromagnetic levitation, Permanent magnet, Positioning control, μ -synthesis, Optimal control

1. 緒言

鉄鋼製品の中でも薄鋼板は、自動車、電機製品、製缶、その他の材料として幅広く用いられている。しかし、その搬送工程では多数のローラを用いた接触支持搬送が行われており、摩擦によって表面品質の劣化や、めっきの不良などの問題が発生している。近年ではその対応策として磁気浮上技術の応用による解決方法が提案されている^{1), 2)}。鋼板を電磁力で支持搬送することによって、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。そこで当研究グループでは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を行っている³⁾。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^{4), 5)}が問題の解決には至っていない。当研究グループでは搬送時における水平方向の拘束力を得るために、鋼板に対してエッジ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水平一軸方向の非接触位置決め制御を行う手法を提案し、搬送時の性能を含めた考察を行っている⁶⁾。

また、磁気浮上している鋼板に対して水平一軸方向の非接触位置決め制御を行うと同時に、エッジに対して永久磁石を配置し磁場を水平方向から印加することによって、鋼板の横滑り・落下を防止するだけでなく、鉛直方向の弾性振動の抑制も可能であることを確認している⁷⁾。しかし、永久磁石の吸引力が鋼板に対して水平方向の負ばねや不確定要素として作用し、水平方向の位置決め性能が劣化するという問題が発生した。

そこで本報告では、水平方向の制御システムに μ -synthesis⁸⁾を用いることによって永久磁石吸引力の負ばね要素や不確かさに対して、ロバスト性の確保が可能な搬送システムの構築を行う。

*1 工学研究科機械工学専攻博士課程後期
*2 工学研究科機械工学専攻博士課程前期
*3 工学部動力機械工学科
*4 工学部動力機械工学科助教授
*5 第二工学部機械工学科教授
*6 工学部動力機械工学科教授

2. 磁気浮上搬送システム

2.1 システム概要

磁気浮上搬送装置の概略を Fig.1 に示す。鋼板の磁気浮上制御ならびに水平一軸方向位置決め制御を行った後、Fig.1 のように搬送路中央に設置したリニアモータを用いることで鋼板の搬送を可能とする。なお Fig.2 に実験装置全体の写真を示す。

Fig.3 に磁気浮上制御システム並びに水平一軸方向位置決め制御システムの概略を示す。同図において磁気浮上制御システムは中央より上側に示してある。磁気浮上対象は長さ $a=800\text{mm}$ 、幅 $b=600\text{mm}$ 、厚さ $h=0.3\text{mm}$ の長方形亜鉛めっき鋼板(材質 SS400)とする。鋼板をアルミフレーム製装置内に設置した5か所のペアの電磁石(No.1~5)を用いて非接触支持するために、鋼板の変位を5個の渦電流式非接触変位センサにより検出する。なおペアの電磁石の電気回路は直列結合されており、渦電流式非接触変位センサを中央に挟むように配置してある。さらに電磁石コイル電流を測定用の外部抵抗より検出し、合計10個の観測値をA/DコンバータからDSPに入力し制御則を計算する。D/Aコンバータから電流供給用アンプへ制御電圧を出力し、5個の電磁石吸引力を制御し、鋼板を電磁石表面から5mmの位置に磁気浮上させる。

水平方向の位置決めシステムの概要は、Fig.3における中央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印加し、非接触位置決め制御を行う。鋼板エッジ部の水平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、電磁石は浮上システムで使用したものと同一のものを使用する。これらがFig.3に示したように、鋼板の相対する二辺に沿って2個ずつ設置されており、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。

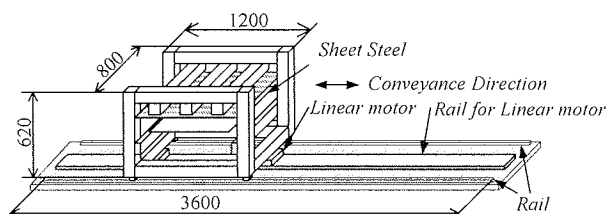


Fig.1 Conveyance system of the steel plate.

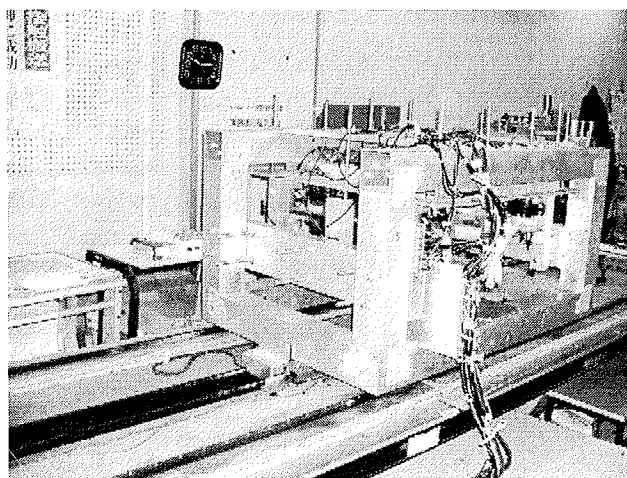


Fig.2 Photograph of the electromagnetic conveyance system.

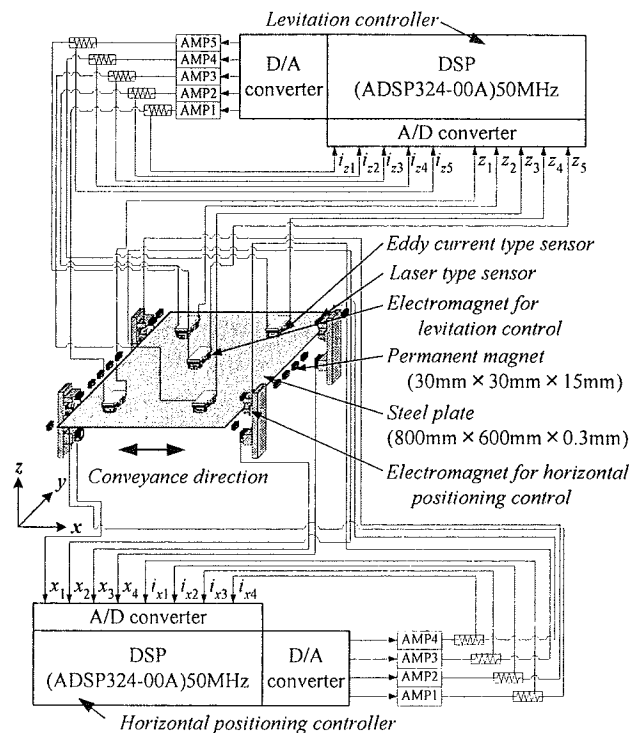


Fig.3 Electromagnetic levitation control system with horizontal positioning controller.

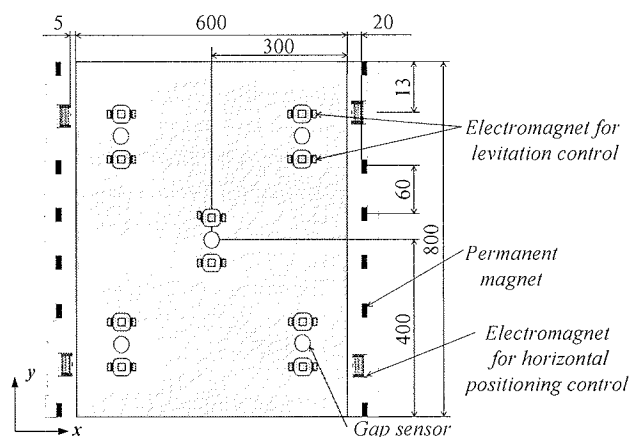


Fig.4 Layout of the permanent magnets.

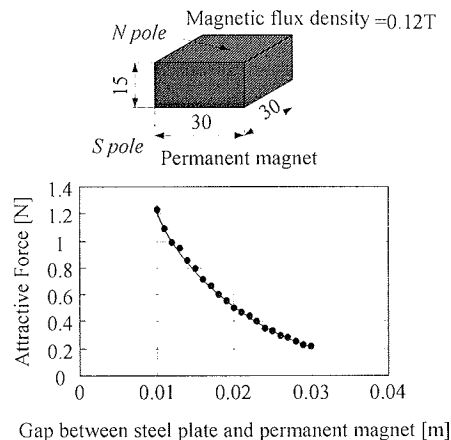


Fig.5 Characteristics of attractive force of a permanent magnet.

また、本研究で使用する永久磁石は Fig.3, Fig.4 のように鋼板エッジに対して片面 6 個配置した。永久磁石は Fig.5 上図に示すように 30mm×30mm、高さ 15mm、磁束密度 0.12T の直方体磁石である。永久磁石の大きさは使用している電磁石とほぼ同程度のものとし、材質は実用性を考慮に入れ廉価なフェライト磁石を使用している。永久磁石 1 個の吸引力は Fig.5 下図に示したように 0.50N である。

2.2 モデル化と状態方程式

鋼板の鉛直方向運動は平板の方程式をモード展開することによってモデル化を行う。このとき鋼板に対して 5 箇所配置した渦電流式非接触変位計全ての位置における鋼板の変位、並びにそのデジタル微分値である速度、5 箇所の一対の電磁石コイルに流れる電流値を各電磁石の制御電圧の決定に全て用いる統合制御を実施する。ただし、本研究の主な考察対象が水平方向の位置決め制御であることから、鉛直方向の詳細なモデル化及び運動方程式、状態方程式に関しては参考文献³⁾を参照のこととする。

一方、水平方向運動は各水平位置決め用電磁石に対して鋼板が一自由度で運動すると仮定し、モデル化を行う。このとき鋼板変位に関する運動方程式は次のようになる。

$$m_x \ddot{x}_n = f_{xn} \quad (1)$$

ここで、 $m_x = m/2$ [kg]、 x_n : 各レーザ式センサで測定した薄鋼板の水平平衡位置からの変位 [m] である。このとき線形化近似を行った電磁石吸引力の変動値 f_{xn} [N] と電磁石コイル電流の変動値 i_{xn} [A] は以下のようになる。

$$f_{xn} = \frac{4F_{xn}}{X_n} x_n + \frac{4F_{xn}}{I_{xn}} i_{xn} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} i_{xn} = -\frac{L_{eff\ xn} I_{xn}}{L_{xn} X_n^2} \dot{x}_n - \frac{R_{xn}}{L_{xn}} i_{xn} + \frac{1}{2L_{xn}} v_{xn} \quad (3)$$

$$L_{xn} = \frac{L_{eff\ xn}}{X_n} + L_{lea\ xn} \quad (4)$$

ここで F_{xn} : 平衡状態において各電磁石から発生する静的吸引力 [N]、 X_n : 平衡状態における各電磁石表面と薄鋼板エッジとのギャップ [m]、 I_{xn} : 平衡状態における各電磁石コイルの定常電流値 [A]、 L_{xn} : 平衡状態における各電磁石コイルのインダクタンス [H]、 R_{xn} : 各電磁石コイルの抵抗値 [Ω]、 v_{xn} : 各電磁石コイルの定常電圧からの変動値 [V]、 $L_{eff\ xn} / X_n$: 各電磁石の有効インダクタンス [H]、 $L_{lea\ xn}$: 各電磁石の漏れ磁束 [H] である。式 (1) ~ (4) を状態方程式化すると、

$$\dot{\psi}_n = A_{xn} \psi_n + B_{xn} v_{xn} \quad (5)$$

$$y_{xn} = C_{xn} \psi_n \quad (6)$$

ただし、

$$\psi_n = [x_n \quad \dot{x}_n \quad i_{xn}]^T$$

$$A_{xn} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{4F_{xn}}{m_x X_n} & 0 & \frac{4F_{xn}}{m_x I_{xn}} \\ 0 & -\frac{L_{eff\ xn} I_{xn}}{L_{xn} X_n^2} & -\frac{R_{xn}}{2L_{xn}} \end{bmatrix}$$

$$B_{xn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_{xn}} \end{bmatrix}^T, \quad y_{xn} = [x_n \quad \dot{x}_n]^T$$

$$C_{xn} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

となる。

3. 制御システムの設計

3.1 磁気浮上システム、水平方向位置決めシステムの設計方法

磁気浮上システムにおける制御電圧の決定には最適制御理論¹⁰⁾を適用した。コントローラの設計は文献³⁾と同様に行う。また水平方向位置決めシステムにおける制御電圧の決定には μ -synthesis を適用し、そのロバスト性の検討のため最適制御理論を用いて検討を行う。そこで以下では水平方向位置決めシステムの設計について述べる。

3.2 最適制御理論を用いた制御系設計

最適制御理論では、式(5)を用いて以下に示す二次形式評価関数を最小とするコントローラを求める。

$$J_x = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t (\psi_n^T Q_x \psi_n + v_{n,opt}^T R_x v_{n,opt}) dt \quad (7)$$

ここで Q_x : 各電磁石位置における鋼板変位とその微分値である速度、さらに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_x : 制御入力に関する重み係数である。

3.3 μ -synthesis を用いた制御系設計

Doyle の記法¹¹⁾を用いると式(5)、(6)は以下のように表すことができる。

$$P_x = \begin{bmatrix} A_{xn} & B_{xn} \\ C_{xn} & \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

Fig.6 に本報告で用いた一般化プラントを示す。 μ -synthesis におけるロバスト制御性能問題を H_∞ ノルムを 1 以下にするというロバスト安定化問題に帰着させるために、同図において e_x から d_x の間に仮想的な摂動 Δ_{xF} を導入した。また同図において Δ_x は加法的誤差を表す。ここで e_x は制御量、 d_x は外部入力、 z_x は Δ_x への入力、 w_x は Δ_x からの出力、 W_{xm} 外乱抑制制御に関する重み、 W_{xo} は加法的誤差に関する重みである。Fig.6 において点線で囲った部分は以下の入出力関係を持つ。

$$\begin{bmatrix} z_x \\ e_x \\ y_{xn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & W_{xo} & W_{xo} \\ W_{xm} & W_{xm} P_x & W_{xm} P_x \\ I & P_x & P_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_x \\ d_x \\ v_{xn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

なお W_{xo} は永久磁石の負ばね要素などの乗法的誤差の上限をカバーするように定めた。これらの条件のもと D-K イテレーションを 4 回行いコントローラの作成を行った。なおコントロ

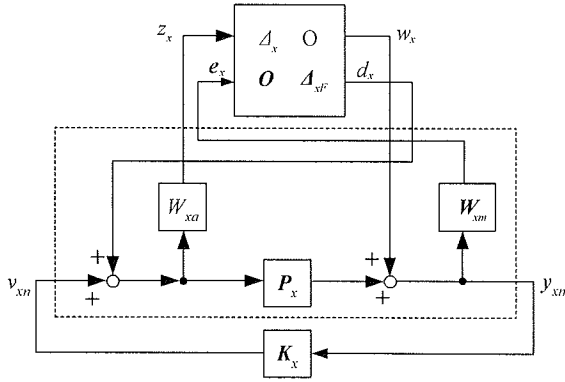


Fig.6 Block diagram of generalized plant

ーラの次数の増加を避けるために、このコントローラとは独立した電流フィードバックを行う¹²⁾。このとき電流フィードバック用のコントローラは、各電磁石コイルの定常電流値と制御電流値の偏差にフィードバックゲインを乗ずる単純な比例コントローラを用いた。これにより各電磁石コイル電流の一時遅れ特性を改善することができると同時に、 μ -synthesis コントローラの可解条件を緩やかにすることによって、次数を減少させることが可能となる。なお電流のフィードバックゲインの値は試行錯誤を繰り返すことによって定めた。

4. 制御実験

4.1 実験装置諸元

本研究における各パラメータの値は以下の通りである(実測値)。

$$m=1.08\text{kg}, X_1 \sim X_4=5\text{mm}, F_{x1} \sim F_{x4}=0.45\text{N}, I_{c1} \sim I_{c4}=0.5\text{A}, R_{x1} \sim R_{x4}=10.3\ \Omega, L_{x1} \sim L_{x4}=0.19\text{H}, L_{\text{eff } x1} \sim L_{\text{eff } x4}=0.90 \times 10^{-4}\text{Hm}, L_{\text{lea } x1} \sim L_{\text{lea } x4}=0.17\text{H}.$$

4.2 制御系相互の比較基準設定について

本研究では最適制御適用時と μ -synthesis 適用時における鋼板の位置決め性能に関する検討を行う。両制御系相互の性能を比較するためには何らかの基準を定めなければならない。そこで最適制御のコントローラ設計時における式(7)の重み行列を $Q_{x \text{ opt}}=I$, $R_{x \text{ opt}}=1$ とし、このコントローラを用いて、永久磁石を配置せずに搬送を行った際の鋼板の最大振幅と、 μ -synthesis を適用し永久磁石を配置せずに搬送を行った際の最大振幅がほぼ同等となるように試行錯誤を繰り返し、式(9)における W_{xm} , W_{xa} を以下のように決定した。

$$W_{xm} = \text{diag}(W_{xm1}, W_{xm2}) = \text{diag}\left(\frac{500s+10000}{11s+10}, \frac{10000s+15000}{100s+9}\right)$$

$$W_{xa} = \frac{0.001s+10}{0.01s+30}$$

このときの W_{xm} の周波数伝達特性を Fig.7 に、 W_{xa} の周波数伝達特性を Fig.8 に示す。

4.3 鋼板搬送時における水平方向位置決め性能に関する検討

Fig.9 にフレーム搬送用リニアモータの搬送速度(指令値)と加速度(実測値)を示す。Fig.10 は永久磁石を配置しない場合と、永久磁石を配置した場合それぞれに対して、磁気浮上鋼板の搬送

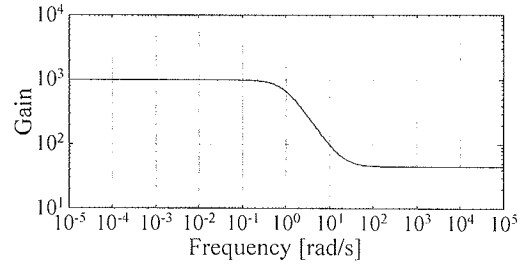
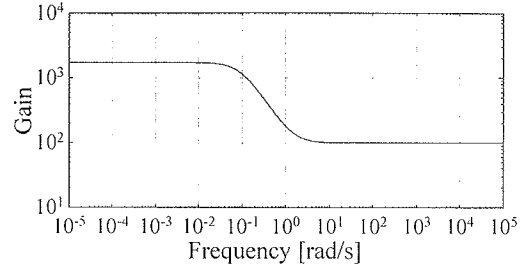
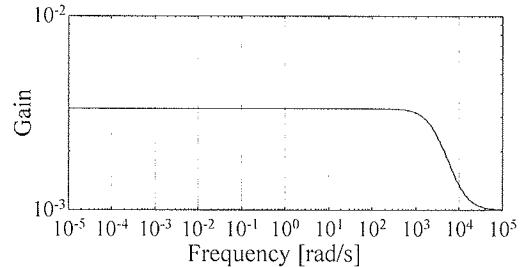

 (a) Weighting function of displacement of the plate (W_{xm1})

 (b) Weighting function of velocity of the plate (W_{xm2})

 Fig.7 Frequency response of W_{xm} .

 Fig.8 Frequency response of W_{xa} .

を行った際のレーザセンサ No.1(Fig.3)から検出した鋼板水平方向の時間応答波形である。ここで縦軸 0 は鋼板エッジと電磁石との距離 5mm である平衡位置を示しており、(a)は最適制御を適用した場合、(b)は μ -synthesis を適用した場合の結果である。両制御手法において永久磁石を配置しない場合(Fig.10(a),(b)の左図)では4.2節で述べた通りほぼ同等の位置決め性能を示している。しかしながら永久磁石を配置した場合(Fig.10(a),(b)の右図)では最適制御適用時の最大振幅が約2倍に上昇し、位置決め性能が劣化している。これは永久磁石の負ばね要素や、不確かさが外乱として水平方向位置決め制御システムに影響したためであると考えられる。一方、 μ -synthesis 適用時では永久磁石を配置した場合でも水平方向位置決め性能はほとんど変化せず、安定した搬送制御を維持している。

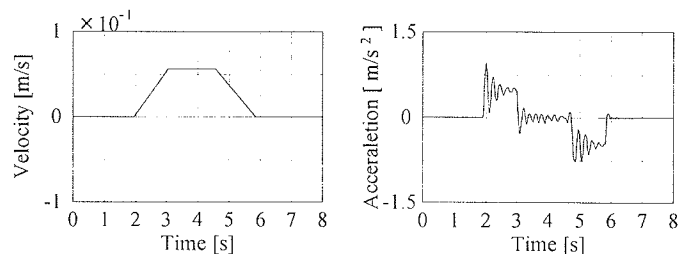


Fig.9 The command value of transportation speed and its observed acceleration.

一方, Fig.11 は Fig.10 と同じ条件におけるエッジ部分の鉛直方向の時間応答波形であり, 水平方向の制御が(a)最適制御, (b) μ -synthesis の場合である. ここで縦軸の 0 は鋼板と電磁石表面の距離が 5mm の平衡浮上位置を示す. 両制御適用時とも, 永久磁石を用いることにより, 鉛直方向の振動抑制効果が得られていることが確認できる. また, その効果は水平方向の制御手法に依存せず, 永久磁石の吸引力が大きく影響していることが確認できる.

5. 結言

磁気浮上している鋼板のエッジに対して永久磁石を配置し磁場を水平方向から印加することによって, 鉛直方向の弾性振動の抑制が可能である. しかし, 永久磁石の吸引力が鋼板に対して水平方向の負ばねや不確定要素として作用し, 水平方向の位置決め性能が劣化するという課題があり, 本報告では位置決め制御性能の改善を行った.

その結果 μ -synthesis を制御システムに適用することによって, 永久磁石の負ばね要素や不確かさを許容することが可能となり, さらに安定な鋼板の搬送を実現できることが明らかになった.

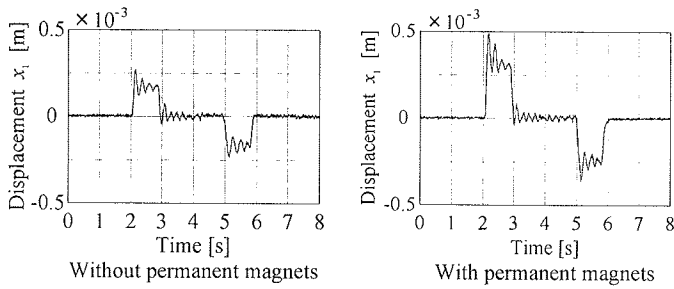
今後は永久磁石の磁場によって鉛直方向の弾性振動を抑制すると同時に, 水平方向位置決め用電磁石の定常電流をカットするゼロパワー制御を適用することで, 実用的なローコスト・ハイブリッド位置決め制御システムの構築を目指す.

謝辞

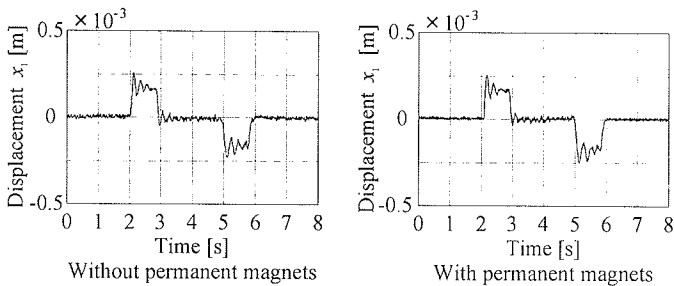
本報告に際して東海大学工学部・竹田彰氏に多大な協力を得た. ここに感謝の意を表する.

参考文献

- 1) T.Nakagawa, M.Hama, and T.Furukawa : Study of Magnetic Levitation Technique Applied to Steel Plate Production Line, IEEE Trans Magn, Vol.36, No.5, (2000), pp.3686-3689.
- 2) M.Sase, S.Torii : Magnetic levitation control with real-time vibration analysis using finite element method, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.13, (2001/2002), pp.129-136.
- 3) Y.Oshinoya, T.Obata : Noncontact Vibration Control of a Magnetic Levitated Rectangular Thin Steel Plate, JSME International Journal, Vol.45, No.1, (2001), pp.60-69.
- 4) 森下, 明石 : 傾斜案内鋼板磁気浮上装置用アクチュエータ制御方式の検討電気学会全国大会講演論文集, (1997), pp.183-184.
- 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(D編), Vol.120, No.7, (2000), pp.928-933.
- 6) 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.
- 7) S.Hasegawa, Y.Oshinoya and K.Ishibashi : Study on Conveyance Control for a Levitated Flexible Thin Steel Plate, ISMST'7, (2003), pp.240-247.
- 8) 藤田, 滑川 : 磁気浮上系のロバスト制御, 機械の研究, Vol.46, No.3, (1994), pp15-23.
- 9) 野波, 西村, 平田 : MATLAB による制御系設計, 東京電機大学出版局, (1998), p.64.
- 10) K.Ogata : Modern Control Engineering, Prentice-Hall, inc, New Jersey, (1997), p915.
- 11) J.C.Doyle, B.A.Francis, A.R.Tannenbaum (藤井訳) : フィードバック制御の理論, コロナ社, (1992).
- 12) 長谷川, 太田, 押野谷, 石橋 : 薄鋼板磁気浮上システムにおける外乱相殺制御(剛体鋼板に対する基礎的検討), 東海大学紀要工学部, Vol.44, No.1, (2004), pp.67-73.

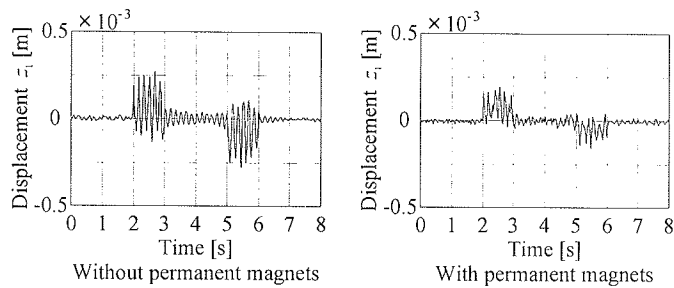


(a) Optimal control

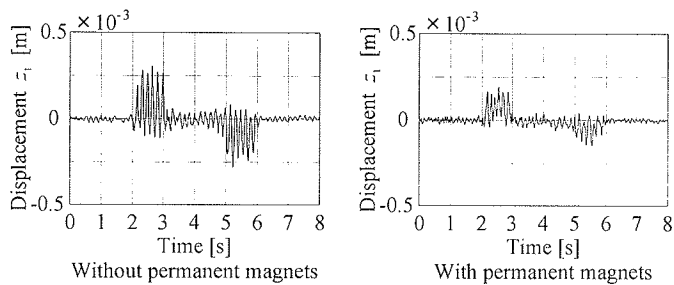


(b) μ -synthesis

Fig.10 Time histories of horizontal displacements of the steel plate in traveling.



(a) Optimal control



(b) μ -synthesis

Fig.11 Time histories of vertical displacements of the steel plate in traveling.