

薄鋼板の磁気浮上制御 (μ -synthesis を用いた制御性能の基礎的検討)

長谷川真也*1・中村信貴*2・押野谷康雄*3・石橋一久*4・粕谷平和*5

Electromagnetic Levitation Control for Thin Steel Plate (Fundamental Considerations on Control Performance Using μ -Synthesis)

by

Shinya HASEGAWA, Nobutaka NAKAMURA, Yasuo OSHINOYA,
Kazuhisa ISHIBASHI and Hirakazu KASUYA

(Received on September 30, 2005 & accepted on January 14, 2006)

Abstract

Recently, research on a conveyance system based on magnetic levitation of a steel plate has been active. Since the design of its control system is generally carried out for a linearized model, it is difficult to secure satisfactory robustness in the control system. This is because nonlinearity and several disturbances exist in reality. In addition, for an actual steel plate conveyance process it will be necessary to develop a control system that takes into consideration various parameter errors, such as nonuniformity of the plate thickness and the associated weight variation. In this paper, we examine the achievement of robustness to steel plate thickness variation using μ -synthesis.

Keywords : Steel plate, Noncontact vibration control, Electromagnetic levitation, Disturbance, μ -synthesis, Optimal control

1. 緒言

自動車、電機製品、製缶、その他の材料として薄鋼板は現代の産業界において幅広く用いられている。近年では極めて薄い鋼板の製造も可能となり、その多岐にわたる需要から要求される表面品質は高級化の一途を辿っている。しかし薄鋼板生産ラインの搬送工程においては、主にローラによる接触搬送が行われているために表面品質の劣化という問題が発生している。この問題の解決方法として磁気浮上技術の応用による非接触搬送に関する研究が活発になされている^{1)~3)}。本研究グループにおいても、これまでに板厚 0.3mm の薄鋼板を磁気浮上対象とし、磁気浮上搬送工程における鋼板の落下防止や、電磁石との接触回避を目的とした検討を行い、その成果を報告している^{4), 5)}。

ここで薄鋼板の磁気浮上システムを実機工程として実用化した場合を想定すると、様々な板厚の鋼板を安定して搬送可能な制御システムを構築することが必須となる。しかし制御対象である鋼板の板厚の変化に対してロバスト性を維持しようとする試みは少ないのが現状である⁶⁾。また鋼板は板厚が薄くなるほど、電磁石吸引力が持つ非線形性や、電磁石の発熱による抵抗値変動など、微細な不確定要素の影響による振動が励起しやすくなるために、浮上状態を維持すること自体が困難となる。

これらの問題に対する有効な制御手法のひとつとして、 μ -synthesis が提唱され注目を集めている。 μ -synthesis はシステムが有する不確定要素の範囲を定義し、これを陽に含んだモデルを作成することによって、非常に優れたロバスト性能を有するコントローラを構築することが可能であり、大型柔軟衛星、磁気軸受などに対する適用が報告されている^{7), 8)}。そこで本報告では μ -synthesis を用いることによって磁気浮上システムが有する様々な不確定要素に対してロバスト性を確保し、異なる板厚を対象とした場合においても安定な磁気浮上可能なシステムの構築を目指す。

2. 制御システム

実験装置の概略図を Fig. 1 に、その写真を Fig. 2 に示す。磁気浮上対象は長さ 800mm、幅 600mm であり、本研究では鋼板の厚さを従来から使用している 0.3mm と、さらに薄い 0.18mm の 2 種類の長方形垂鉛めつき鋼板 (材質 SS400) とする。長方形薄鋼板を 3 本のフレームに設置した 5 箇所のペアの電磁石 (No.1~5) により吊り下げようとし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、センサを中央に挟むように配置してある。Fig. 3 は制御システムの概略図である。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

*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専攻助教
*4 第二工学部機械工学専攻教授
*5 工学部動力機械工学専攻教授

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。

Fig. 4 に使用した E 型電磁石鉄心の仕様を示す。本研究ではフェライト製の一体型鉄心を使用しているが、渦電流による熱損失等は無視できると仮定している。なお電磁石の磁場による渦電流式非接触変位計への影響を計測した結果、測定誤差は 1% 以下であり制御系に及ぼす影響はほとんどないことを確認している。

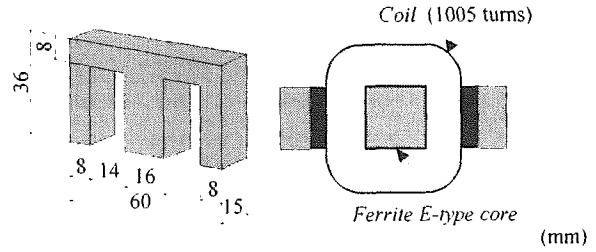


Fig. 4 Specification of the electromagnet core.

3. 基礎方程式

鋼板を各電磁石の静的吸引力によって支持すれば、鋼板が電磁石から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を $z(x, y)$ とすると、鋼板に対する運動方程式は以下ようになる。

$$\rho h \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \frac{Ch^3}{12} \frac{\partial}{\partial t} \nabla^4 z + D \nabla^4 z = \sum_{n=1}^5 f_{zn} \{ \delta(x - x_{a1n}) \delta(y - y_{a1n}) + \delta(x - x_{a2n}) \delta(y - y_{a2n}) \} \quad (1)$$

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \quad (2)$$

ここで ρ : 鋼板の密度 [kg/m^3], h : 鋼板の厚さ [m], C : 鋼板の内部減衰係数 [Ns/m], $D = Eh^3/12(1 - \nu^2)$, E : 鋼板の縦弾性係数 [N/m^2], ν : ポアソン比, f_{zn} : 各電磁石の吸引力の変動値 [N], t : 時間 [s], $z(x, y)$: 鋼板の平衡浮上位置からの鉛直方向変位 [m], x : 鋼板の長手方向の座標 [m], x_{a1n}, x_{a2n} : ペアの電磁石の x 方向の位置 [m], y : 鋼板の幅方向の座標 [m], y_{a1n}, y_{a2n} : ペアの電磁石の y 方向の位置 [m], $\delta(\cdot)$: ディラックのデルタ関数⁹⁾である。

また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コイル電流に関する方程式は以下ようになる。

$$f_{zn} = \frac{F_{zn}}{Z_{zn}} z(x_{sn}, y_{sn}) + \frac{F_{zn}}{I_{zn}} i_{zn} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} i_{zn} = - \frac{L_{eff}^{-1} z_{n1} d}{L_{zn} Z_{zn}^2} z(x_{sn}, y_{sn}) - \frac{R_{zn}}{2L_{zn}} i_{zn} + \frac{1}{2L_{zn}} v_{zn} \quad (4)$$

電磁石コイルのインダクタンスは、鋼板表面と電磁石表面のギャップに反比例する成分と漏れに相当する成分の和で表すことが一般的に知られている¹⁰⁾。そこで平衡浮上状態における電磁石 1 個当たりのコイルのインダクタンス $L_{zn}[\text{H}]$ を以下のように表す。

$$L_{zn} = \frac{L_{eff}^{-1} z_n}{Z_n} + L_{lea} z_n \quad (5)$$

ここで x_{sn}, y_{sn} : 渦電流式非接触変位センサの位置 [m], F_{zn} : 平衡浮上状態において各ペアの電磁石の両方から発生する静的吸引力の合計値 [N], Z_{zn} : 平衡浮上状態における各電磁石表面と鋼板表面とのギャップ [m], I_{zn} : 平衡浮上状態における各電磁石コイルの定常電流値 [A], i_{zn} : 各電磁石コイルの定常電流からの変動値 [A], L_{zn} : 平衡浮上状態における各電磁石コイル 1

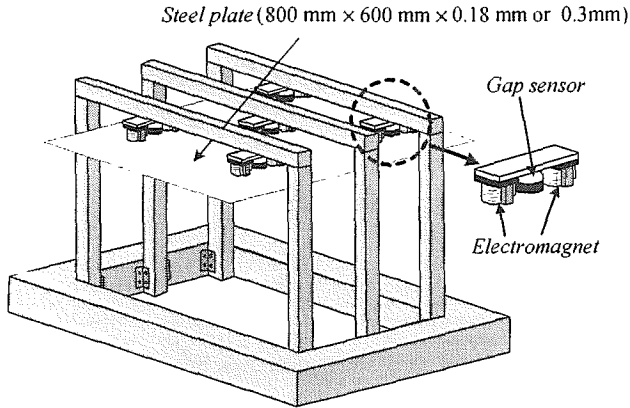


Fig. 1 Experimental apparatus.

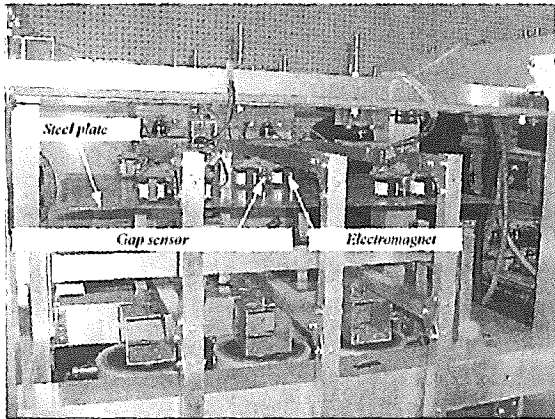


Fig. 2 Photograph of the electromagnetic levitation control system.

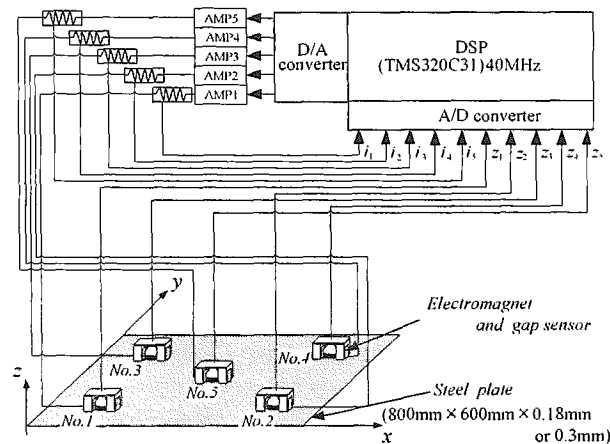


Fig. 3 Electromagnetic levitation control system.

個当りのインダクタンス[H], R_{zm} : 各ペアの電磁石コイルの総抵抗値[Ω], v_{zn} : 各電磁石コイルの定常電圧からの変動値[V], $L_{eff,zn}/Z_n$: 各電磁石1個当りにおける有効インダクタンス[H], $L_{lea,zn}$: 各電磁石1個当りの漏れ磁束[H]である。

4. 状態方程式

薄鋼板の平衡浮上位置からの変位 $z(x,y)$ を、固有関数 $\phi_M(x,y)$ と基準座標 $\xi_M(t)$ ($M=1\sim 5$) を用いてモード展開する。このとき鋼板の固有関数は x 方向, y 方向にそれぞれ独立な両端自由梁の固有関数の積 $X_{mm}(x) \cdot Y_{nn}(y)$ ($mm,nn=1,2,\dots$) で表すことができると仮定する。ただし本研究では電磁石の設置位置の関係より、鋼板の短手方向の弾性振動モードが顕著に励起される。そのため弾性振動モードは y 軸方向のみを検討対象とする。またセンサ数が5個であるため5次モード(弾性1次モード)まで考慮した制御を行う。以下にモード展開式を示す。

$$z(x,y) = \sum_{M=1}^5 \phi_M(x,y) \xi_M(t) \quad (6)$$

状態変数として鋼板の各振動モードの基準座標とその時間微分値および各電磁石コイル電流の定常値からの変動分を選ぶ。式(6)を式(1)に代入し固有関数の直交条件を用いて整理すると以下に示す式を得る¹¹⁾。

$$\dot{\xi} = A_\xi \xi + B_\xi v_z \quad (7)$$

$$y_z = C_\xi \xi \quad (8)$$

$$\xi = [\xi_1 \dots \xi_5 \quad \dot{\xi}_1 \dots \dot{\xi}_5 \quad i_{z1} \dots i_{z5}]^T, v_z = [v_{z1} \dots v_{z5}]^T$$

$$y_z = [\xi_1 \dots \xi_5]^T$$

ここで、行列 A_ξ, B_ξ, C_ξ の詳細に関しては、紙面の都合上省略する¹²⁾。

5. 制御理論

5.1 μ -synthesis を用いた制御系設計

Doyle の記法¹³⁾を用いると式(7)(8)は以下のように表せる。

$$P_z = \begin{bmatrix} A_\xi & B_\xi \\ C_\xi & \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

本報告で用いる一般化プラントの構成を Fig. 5 に示す。 μ -synthesis^{14), 15)}は、Fig 5 のように不確かさを陽に含んだ枠組みをもち、そのなかでロバスト安定、ノミナル性能、ロバスト性能を同時に達成するコントローラを求めることが可能である。 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_z から d_z の間に仮想的な摂動 A_{zF} を導入した。ここで e_z は制御量, d_z は外部入力, z_z は A_z への入力, w_z は A_z からの出力である。Fig. 5 において点線で囲った部分は以下の入出力関係を持つ。

$$\begin{bmatrix} z_z \\ e_z \\ y_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O & W_{za} & W_{za} \\ W_{zm} & W_{zm}P_z & W_{zm}P_z \\ I & P_z & P_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_z \\ d_z \\ v_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

このとき外乱抑制制御に関する重み W_{zm} および加法的誤差に関する重み W_{za} は次のように選んだ。

$$W_{zm} = \text{diag}(W_{zm1} \ W_{zm2} \ W_{zm3} \ W_{zm4} \ W_{zm5}) \quad (11)$$

$$W_{za} = \text{diag}(W_{za1} \ W_{za2} \ W_{za3} \ W_{za4} \ W_{za5}) \quad (12)$$

加法的誤差に対する重み W_{za} は、磁気浮上システムが有する様々な不確かさを許容するよう以下のように選択する必要がある。ノミナルな公称モデルと、様々な不確かさを有する実プラントとの間のモデル化誤差を考慮するために、公称モデルだけではなくプラントモデルの集合を考え、実プラントがその中に存在すると仮定する。そこでモデル化誤差を以下のように定義する。

$$\Delta_z(j\omega) = P_f(j\omega) - P_z(j\omega) \quad (13)$$

公称伝達関数とそれぞれの摂動モデルの伝達関数 P_f とのゲインの差により、様々な周波数特性を持つモデル化誤差が得られる。本研究において P_f は、薄鋼板の板厚、電磁石の非線形特性などのパラメータ変化を十分考慮し選択することが重要になる。

ここで不確かさに対する周波数重み W_{za} を以下の式を満たすように設計する。

$$|\Delta_z(j\omega)| \leq |W_{za}(j\omega)| \quad (14)$$

これにより、無視された非線形性やパラメータの誤差や変化などに起因する不確かさを厳密に $\Delta_z W_{za}$ に取り込むことが可能となる。本磁気浮上システムにおける考慮していないダイナミクスやセンサノイズなどに起因する不確かさは陽に取り扱っていないが、それらの不確かさも $\Delta_z W_{za}$ に取り込まれていると仮定する。そこで W_{za} は高周波帯域において比較的大きなゲインを持つように選定する。

また、 W_{zm} は磁気浮上制御の応答性を左右するために、低周波数域で大きくする必要がある。

次に Fig. 5 に示したシステムを変換し、Fig. 6 に示されるような等価な閉ループシステム M_z を考える。ここで $\|d\|_\infty \leq 1$ が与えられるとき、

$$\text{Sup}_{\sigma(d) \leq 1} \|F_{zu}(M_z, d)\|_\infty \leq 1 \quad (15)$$

となる磁気浮上用のコントローラ K_z を設計する。ここで F_{zu} は LFT(線形分數変換)である。式(16)は構造化特異値 μ を用いて、これと等価な次式によって表すことが出来る。

$$\mu_J(M_z) \leq 1 \quad (16)$$

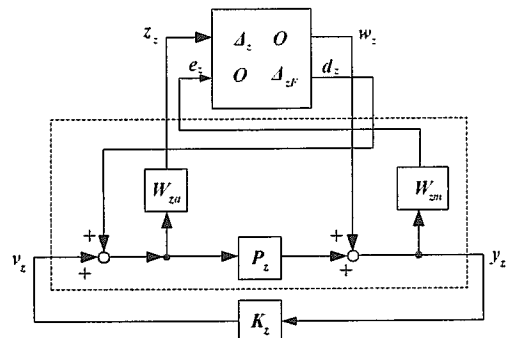


Fig. 5 Block diagram of generalized plant.

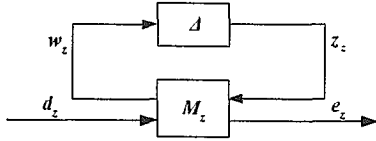


Fig. 6 Closed loop system.

ここで $\mu_J(M_z)$ は次式で定義される.

$$\mu_J(M_z) = \frac{1}{\min\{\sigma(\Delta): \Delta \in \mathcal{A}, \det(I - M_z \Delta) = 0\}} \quad (17)$$

ただし, $\det(I - M_z \Delta) = 0$ となる $\Delta = \Delta$ が存在しない場合, $\mu_J(M_z) = 0$ とする.

これらの条件のもと D-K イテレーション¹⁶⁾を4回行い, 式(15)の左辺を最小とするコントローラの作成を行った. なおコントロ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¹⁷⁾, 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.

5.2 最適制御理論を用いた制御系設計

最適制御理論¹⁸⁾では, 式(7)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.

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T (\xi^T Q_{opt} \xi + v_z^{opt T} R_{opt} v_z^{opt}) dt \quad (18)$$

なお Q_{opt} : 各モードの基準座標とその微分値, 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_{opt} : 制御入力に関する重み係数を要素とする行列である. 式(18)を最小にする最適制御則は次式で表せる.

$$v_z^{opt} = -F_{opt} \xi \quad (19)$$

$$F_{opt} = R_{opt}^{-1} B_{\xi}^T P_{opt} \quad (20)$$

なお P_{opt} は以下に示す Riccati 型代数方程式の正定対称解である.

$$P_{opt} A_{\xi} + A_{\xi}^T P_{opt} - P_{opt} B_{\xi} R_{opt}^{-1} B_{\xi}^T P_{opt} + Q_{opt} = 0 \quad (21)$$

6. 制御実験

6.1 実験装置諸元

本研究では制御対象である鋼板の厚さが 0.3mm の場合のパラメータ値を用いて制御系の設計を行い, 板厚 0.18mm の鋼板を浮上させる場合もこのコントローラを用いる. このときの各パラメータ値を以下に示す.

Table 1 The symbols and values.

| Symbol | Value | Symbol | Value |
|----------------|---------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| m | 1.08kg | ρ | $7.50 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ |
| Z_0 | $5.00 \times 10^{-3} \text{ m}$ | E | 217GPa |
| $F_1 \sim F_4$ | 1.85N | ν | 0.30 |
| F_5 | 3.21N | C | $2.49 \times 10^8 \text{ Ns/m}^2$ |
| $I_1 \sim I_4$ | 0.51A | L_z | 0.225H |
| I_5 | 0.67A | K | $3.60 \times 10^{-2} \text{ Hm}$ |
| $R_1 \sim R_5$ | 20.6 Ω | L_{lea} | 0.189H |

6.2 制御系相互の比較基準設定について

本研究では, μ -synthesis 適用時における薄鋼板の浮上性能を評価するために, 現代制御理論の中でも標準的な制御手法である最適制御を適用し比較, 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, μ -synthesis コントローラを用いて浮上している板厚 0.3mm の薄鋼板中央部振動の標準偏差と, 最適制御コントローラを適用し浮上している板厚 0.3mm の薄鋼板中央部振動の標準偏差がほぼ同等となるように制御システムを構築する.

μ -synthesis コントローラ設計時における式(11)における W_{zm} は数値シミュレーションによる試行錯誤を繰り返し, コントローラが目的の制御性能を得ることができるように, 以下のように選定した.

$$W_{zm1 \sim 4} = \frac{7500s+100}{500s+1}, \quad W_{zm5} = \frac{56400s+384}{380s+1}$$

一方, 式(12)における W_{z0} は式(14)を満たすように決定し, その際板厚の変化幅は式(1)における板厚 h の値を 0.3mm から 0.15mm まで変化させることでモデルにおいて考慮した. また考慮していない不確かさに対してもロバスト性を確保するために, 高周波帯域において比較的大きなゲインを持つように以下のように選定した.

$$W_{z01 \sim 4} = \frac{0.0002s+1}{0.0002s+10000}, \quad W_{z05} = \frac{0.0005s+3}{0.025s+4400}$$

なお $W_{zm1 \sim 5}$ の周波数伝達特性を Fig. 7 に, $W_{z01 \sim 5}$ の周波数伝達特性を Fig. 8 に示す.

また最適コントローラ設計時における式(18)の重み行列は $Q_{opt} = I, R_{opt} = I$ とした.

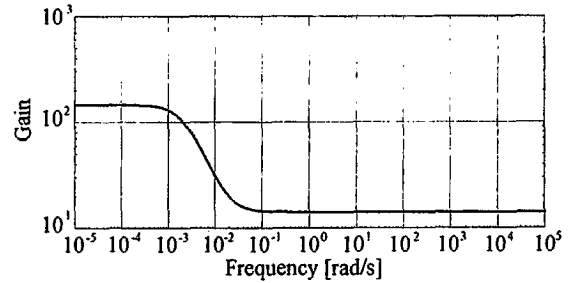
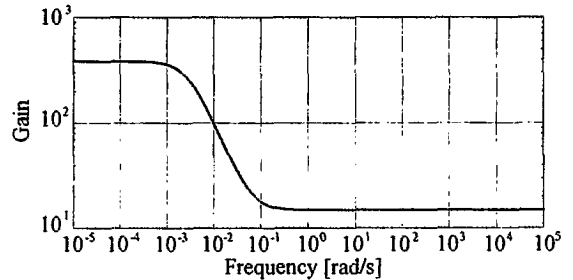

 (a) Weighting function for 1st - 4th mode ($W_{zm1 \sim 4}$)

 (b) Weighting function for 5th mode (W_{zm5})

 Fig. 7 Frequency responses of W_{zm} .

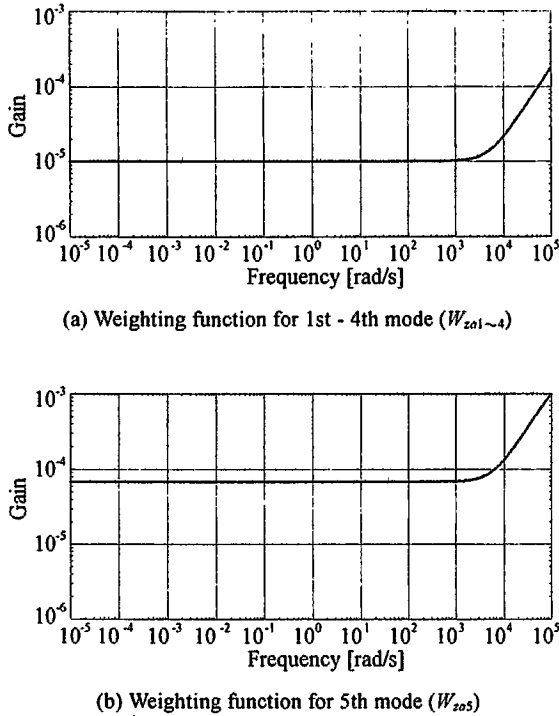


Fig. 8 Frequency responses of $W_{z\alpha}$.

6.3 ロバスト性能に関する検討

鋼板を μ -synthesis, または最適制御理論を用いて浮上させた後, 全ての浮上用電磁石の制御電流にインパルスノイズを入力した場合の過渡状態における制御性能について検討を行う. なお, この時のインパルス外乱は鋼板の片振幅が 1mm となるように入力した.

Fig. 9 は板厚が 0.3mm の場合における鋼板中央部の時間応答波形の一例である. なお同図(a)は μ -synthesis 適用時, (b)は最適制御理論適用時における実験結果を示している. ここで両図とも横軸における 1 秒の時点でインパルスノイズが入力されている. (a), (b)の結果で過渡状態から定常状態に落ち着くまでの時間を比較すると, (a)の μ -synthesis 適用時では約 1.4 秒, (b)の最適制御理論適用時では約 1.6 秒でありほぼ同等である. この結果から, 板厚などの設計パラメータが正しく, モデル化誤差が生じない場合には最適制御理論適用時と μ -synthesis 適用時に大きな制御性能の差が生じないことが確認できる. ここで定常状態とは, 各電磁石表面から鋼板の距離が 5mm である状態と定義する.

次に 6.1 節で述べたようにコントローラの変更はせず, 板厚を 0.18mm に変更し同様の実験を行った. Fig. 10 はこのときの実験結果である. Fig. 9 と同様, (a)は μ -synthesis 適用時, (b)は最適制御理論適用時における実験結果の一例を示している. なお最適制御適用時では板厚 0.18mm の鋼板を浮上させること自体が困難であり, 電磁石表面と鋼板の距離が 5mm である定常浮上状態を実現できたのは実験全体の 30%程度であった. 一方 μ -synthesis 適用時には, ほぼ 100%定常浮上状態を実現することが可能であった.

Fig. 10 (a), (b)の結果で過渡状態から定常状態に落ち着くまでの時間を比較すると, (a)の μ -synthesis 適用時では約 1.6 秒, (b)の最適制御理論適用時では約 4.7 秒であり, 大きな制御性能の

差が生じている. ここで Fig. 9 と Fig. 10 を比較すると, 最適制御適用時では板厚が変化することによって, 振動の収束時間が長くなっているが, μ -synthesis 適用時には板厚が変化しても制御性能に大きな変化は生じていないことが確認できる.

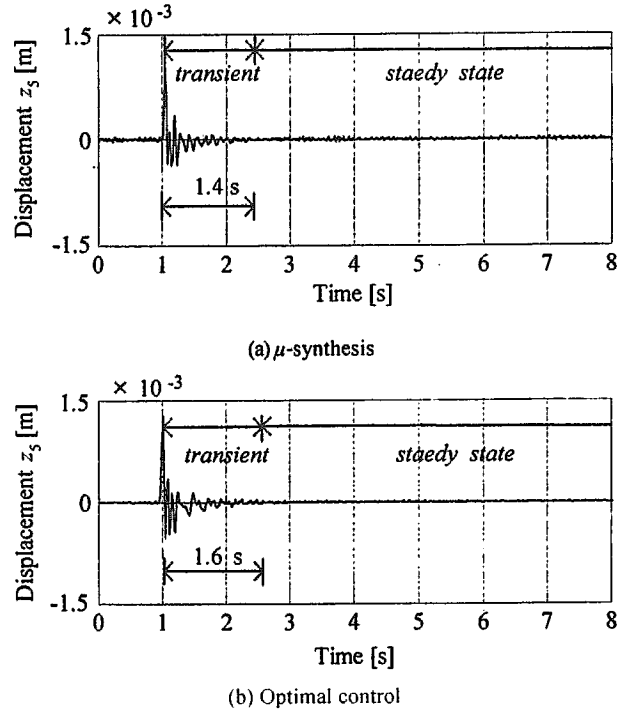


Fig. 9 Transient responses of the plate vibration (Plate thickness = 0.3mm).

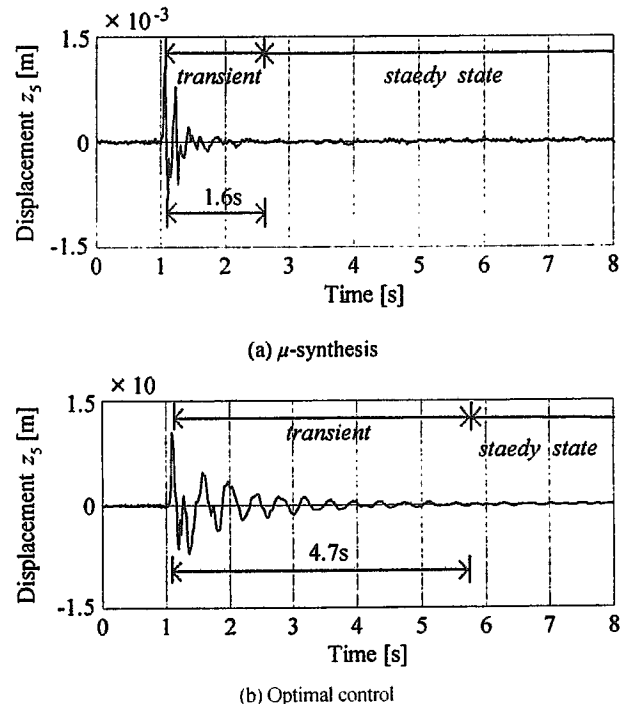


Fig. 10 Transient responses of the plate vibration (Plate thickness = 0.18mm).

7. 結言

本報告では μ -synthesisを用いることによって磁気浮上システムが有する様々な不確定要素に対して、安定性の確保が可能なシステムを構築し、制御対象である鋼板の板厚が変化する場合においても薄鋼板の安定浮上が可能なシステムの実現を目指した検討を行った。

その結果、 μ -synthesisを制御システムに適用することによって、板厚を変化させた場合において、コントローラのチューニングを行うことなく安定した浮上が可能であり、さらには振動の収束時間を短縮する効果を制御系が有することが明らかになった。本報告のように多くの不確定要素を許容可能な制御系の構築は、鋼板の磁気浮上搬送ラインを工業的に実現した場合に、多様な環境の下でも鋼板を落下させず安全な搬送が可能な、実用レベルに耐えうる極めて有効な磁気浮上システムの構築につながる。

謝辞

本研究に際して東海大学工学部 崎野直宏氏、中田大地氏には多大な協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) K. Matsuda, M. Yoshihashi, Y. Okada, and A. C. C. Tan : Self-Sensing Active Suppression of Vibration of Flexible Steel Sheet, Trans. ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 118, No.3, (1996), pp.469-473.
- 2) 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.
- 3) M. Sase, S. Torii : Magneticlevitation control with real-time vibration analysis using finite element method, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.13, No. 1-4, (2001/2002), pp.129-136.
- 4) Y.Oshinoya, T.Obata : Noncontact Vibration Control of a Magnetic Levitation Rectanglar Thin Steel Plate, JSME International Journal, Vol.45, No.1, (2002), pp.60-69.
- 5) 長谷川, 押野谷, 石橋 : 薄鋼板磁気浮上システムにおける弾性振動抑制に関する基礎的検討, 東海大学紀要工学部 Vol.43, No.2, (2003), pp.59-64.
- 6) 滑川, 水谷 : 磁気浮上系のロバスト制御に関する考察, 電気学会リニアドライブ研究会資料, Vol.LD-04, No.84-96, (2004), pp.31-36.
- 7) 長塩, 木田 : パラメータ変動のある宇宙構造物の制御 ディスクリプタ形式による μ 設計, 日本機械学会論文集(C編), Vol.65, No.635, (1999), pp.2693-2699.
- 8) Y.Xu, 野波 : 磁気軸受のフェジィモデリングと μ 設計理論によるロバスト超平面を有するスライディングモード制御, 日本機械学会論文集(C編), Vol.68, No.666, (2002), pp.398-405.
- 9) C. R. Wylie : 工業数学 (上), ブレイン図書出版 (1962).
- 10) 社団法人日本機械学会新技術融合シリーズ第一巻磁気軸受の基礎と応用, 養賢堂, (1995).
- 11) 長谷川, 押野谷, 石橋 : 柔軟磁気浮上鋼板の振動絶縁に関する検討, 日本応用磁気学会誌, Vol.29, No.5, (2005), pp.582-588.
- 12) 押野谷, 石橋, 岡本 : 四辺自由鋼板の非接触振動制御 弾性振動のスピルオーバーに関する実験的考察, 日本 AEM 学会誌 Vol.9, No.3, (2001), pp.384-392.
- 13) J.C.Doyle, B.A.Francis, A.R.Tannenbaum(藤井隆雄訳) : 制御の理論, コロナ社, (1992).
- 14) 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), pp.15-23.
- 15) 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).
- 16) A. Packard , J. Doyle : The complex structured singular value, Automatica, vol.29, No.1, (1993), pp.71-109.
- 17) 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.
- 18) K.Ogata : Modern Control Engineering, Prentice-Hall, inc, New Jersey, (1997)