

走行する連続鋼板に対する非接触案内 (コイル抵抗値変動に対する検討)

小倉浩一郎*¹・柏原賢*²・熊谷博昭*³
押野谷康雄*⁴・石橋一久*⁵・粕谷平和*⁶

Noncontact Guide System for Traveling Elastic Steel Plate (Considerations on Coil Resistance Variation)

by

Kouichirou OGURA, Ken KASHIWABARA, Hiroaki KUMAGAI
Yasuo OSHINOYA, Kazuhisa ISHIBASHI and Hirakazu KASUYA

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

Abstract

In a factory, a continuous thin steel plate subjected to iron and steel processes supported by rollers tends to experience plate vibrations that lower the quality of the surface finish. In the plating process, rollers negligibly support the steel plates. Therefore, plating nonuniformity due to the generation of vibrations and other factors prevents an increase in productivity. To solve this problem, we developed a noncontact guide system in which electromagnetic forces are applied at the edges of the steel plates. However, it will be necessary to develop a control system that takes into consideration various parameter errors, such as nonuniformity of resistance change for an actual continuous thin-steel-plate process caused by the heat of the electromagnet used. In this study, we confirm the suppressive effect of a sliding-mode control theory that exhibits robustness to resistance variation.

Keywords: Steel plate, Traveling, Edge control, Noncontact guide system, Vibration control, Sliding-mode control

1. 緒言

製鉄所において連続鋼板の製造ラインの長さは数 km にも及び、その間連続鋼板はローラにより接触支持搬送されている。この際、連続鋼板は走行中ローラによる接触支持により適度に張力を調整することで振動が抑制されている。しかしめっきや塗装などの表面処理後、乾燥のため鉛直方向や水平方向へ 20～50m 搬送される際ローラによる支持が行えず、同時に高い張力の付加ができないことにより、振動、波動が発生する。乾燥後、ローラによって支持された際に、この影響で支持ローラと走行連続鋼板の間に摩擦力変動が生じ、鋼板の表面に発生する傷、ひずみ、めっきの剥離など解決すべき課題が数多く存在する。

このような問題の解決方法として、流体を利用して帯鋼を浮上させるフロータを用いた非接触帯鋼搬送装置などの研究がなされている^{1) 2)}。また、実機工程においては電磁石の磁力を利用した非接触で鋼板の支持・振動抑制を行う研究がされている^{3) 4)}。これに対し当研究グループでは、連続鋼板のエッジ方向に電磁石を設置し磁力を付加することによって、走行する連続

鋼板のエッジおよび平面方向の振動を抑制する非接触案内を提案している⁶⁾。これまでにこの非接触案内を連続鋼板が直線走行する部分や、進行方向を変更しながら走行する部分に対して適用し、その有効性について報告をしている^{7) 10)}。また、ランニングコストの削減を目的として、使用する電磁石の一部を永久磁石に置き換えた永久磁石と電磁石を併用した非接触案内に関する検討も行っている^{11) 12)}。しかしながらアクチュエータとして用いている電磁石の抵抗値のばらつきや、発熱などにより抵抗値が変動してしまうなどの問題が依然残されている。そこで本研究では、抵抗値変動に対してロバスト制御理論であるスライディングモード制御理論を非接触案内の制御システムに適用することの有効性を検証した。

2. 非接触案内

2.1 実験装置

本研究で使用する実験装置を Fig.1 に示す。長さ 6894mm、幅 150mm、厚さ 0.3mm の焼入れしたベルト状の鋼材(SK3)を、直径 700mm、幅 154mm のプーリに図の様に吊り下げた。プーリは DC サーボモータにより駆動することで鋼板の連続走行を可能にしている。すでに提案している位置決め制御機構⁶⁾と同様の電磁石(Fig.2)をアクチュエータとして、プーリの中心から鉛

* 1 工学研究科機械工学専攻博士課程前期
* 2 工学研究科機械工学専攻博士課程後期
* 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

直下方向 2000mm 部分に 2 箇所設置した。この部分に対して設置箇所を図のように No.1, 2 とする。図中の x_1, x_2 はそれぞれの電磁石位置での鋼板の接線方向の座標を示し、 z_1, z_2 は鋼板の平面に垂直な方向の座標を示す。また、同様に電磁石位置での鋼板のエッジ方向の横揺れを示す座標を y_1, y_2 とする。

2.2 制御システム

電磁石によるアクティブ制御を行うため Fig.3 に示すような制御システムを構築した。アクチュエータとして用いた電磁石を 2 個直列に接続し、それを連続鋼板のエッジ方向の両側に設置することで 4 個の電磁石を 1 つのアクチュエータとした。制御対象質量は同図に示される電磁石の前方を通過する質量 m_n ($n=1, 2$) と近似した。制御では 1 箇所の電磁石位置で連続鋼板のエッジ部分の横揺れ変動値 (y 方向) を検出するために帯状のレーザ光によって位置を検出できるセンサを設置し、変位、及びこれをデジタル微分して得られる速度と制御電流の 3 つの情報を、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。本研究では制御理論として、ロバスト性を有するスライディングモード制御理論を適用し、比較として最適制御理論を用いた。

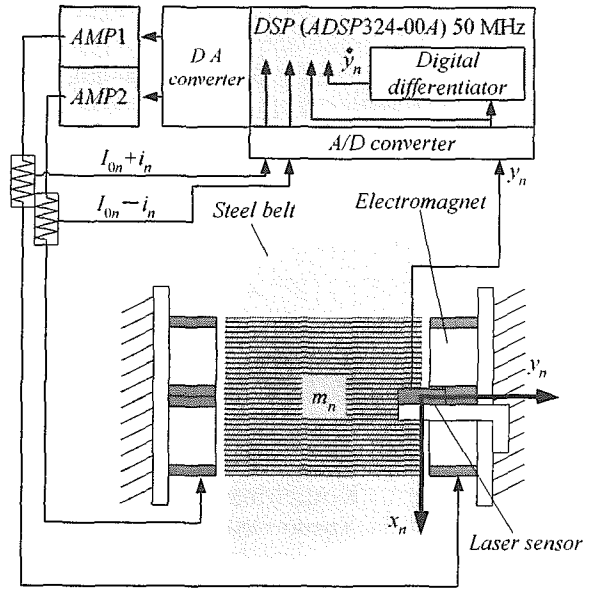


Fig. 3 Control system of the non-contact guide system.

3. モデリングと制御手法

3.1 運動方程式

本研究では走行する連続鋼板のエッジ方向に設置した電磁石の前方を通過する質量部分を制御対象としている (Fig.3)。それぞれの制御対象となる質量を m_n とし、電磁石からの制御力 u_n とした並進 1 次自由度モデルとして運動方程式は次のようになる。

$$m_n \ddot{y}_n = 2u_n \quad (1)$$

$$u_n = \frac{2F_{0n}}{\Gamma_{0n}} y_n + \frac{2F_{0n}}{I_{0n} R_n} v_n \quad (2)$$

また本研究においてアクチュエータとして使用している電磁石のダイナミクスを考慮した特性式は次式のようになる。

$$v_n = R_n i_n + L_n \frac{d}{dt} i_n - L_{effn} \frac{I_{0n}}{\Gamma_{0n}^2} \frac{d}{dt} y_n \quad (3)$$

m_n : 制御質量 [kg], y_n : 鋼板と平衡点からの y 軸方向変位 [m], u_n : 鋼板エッジ部分に設置した電磁石の片側 2 個あたりの吸引力の変動値 [N], F_{0n} : 電磁石 1 個あたりから発生する平衡状態における定常的な吸引力 [N], Γ_{0n} : 平衡状態における電磁石と対象物のギャップ [m], I_{0n} : 平衡状態における定常的な電磁石コイル電流 [A], R_n : 2 個の電磁石コイルの抵抗値 [Ω], v_n : 電磁石コイルの定常電圧からの変動値 [V], i_n : 電磁石コイル電流の定常電圧からの変動値 [A], L_n : 全インダクタンス [H], L_{effn} : 鋼板へ有効に作用するインダクタンス [Hm].

これより状態方程式は

$$\dot{y}_n = A_{yn} y_n + B_{yn} v_n \quad (4)$$

ただし、

$$y_n = [y_n \quad \dot{y}_n \quad i_n]^T$$

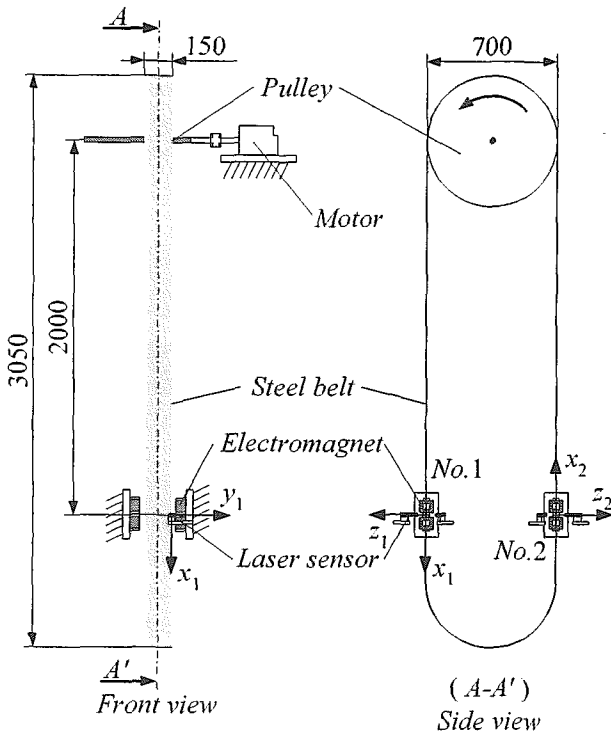


Fig.1 Non-contact guide system for a traveling steel belt.

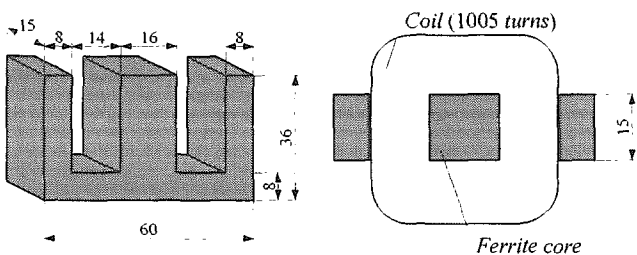


Fig.2 Specification of the electromagnet.

$$A_{yn} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{4F_{0n}}{m_n \Gamma_{0n}} & 0 & \frac{4F_{0n}}{m_n I_{0n}} \\ 0 & -\frac{L_{eff} I_{0n}}{L_n \Gamma_{0n}^2} & \frac{R_n}{L_n} \end{bmatrix}, B_{yn} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_n} \end{bmatrix}$$

3.2 最適制御理論

最適制御理論では、式(4)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。

$$J_{yn} = \sum_{i=0}^{\infty} [y_n^T Q_{yn} y_n + r_{yn}^T v_n^2] \quad (5)$$

ただし、

$${}^0Q_{yn} = \text{diag}({}^0q_{yn}, {}^0q_{vn}, {}^0q_{in})$$

$${}^0v_n = -F_{yn} y_n$$

$$F_{yn} = -{}^0r_{yn}^{-1} B_{yn}^T P$$

0v_n : 状態フィードバックの制御則, ${}^0r_{yn}$: 制御入力に関する重み係数, ${}^0q_{yn}$: 変位に関する重み係数, ${}^0q_{vn}$: 速度に関する重み係数, ${}^0q_{in}$: 電磁石コイル電流に関する重み係数。

P は連続時間系 Riccati 型代数方程式

$$P A_{yn} + A_{yn}^T P - P B_{yn} {}^0r_{yn}^{-1} B_{yn}^T P + {}^0Q_{yn} = 0 \quad (6)$$

の一意正定解である。

3.3 スライディングモード制御理論

スライディングモード制御理論の切換関数を次式で表す。

$$\sigma = S_n y_n \quad (7)$$

本研究では前節で述べた最適制御理論を用いて切り替え超平面の設計を行う¹³⁾。なお、その場合の重み係数を ${}^s q_{yn}$, ${}^s q_{vn}$, ${}^s q_{in}$, ${}^s r_{yn}$ とする。

次に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。チャタリングを低減させる設計法¹³⁾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式が与えられる。

$$\left. \begin{aligned} {}^s v_n &= {}^s v_{eqn} + {}^s v_{nlm} \\ {}^s v_{eqn} &= -(S_n B_{yn})^{-1} S_n (A_{yn} - I) y_n \\ {}^s v_{nlm} &= -\{\alpha\} \text{sgn}\{\sigma\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここで α は次式の通りである。

$$\alpha = \eta \frac{\|\sigma\|}{\|S_n B_{yn}\|} \quad (9)$$

4. 制御実験

4.1 実験条件

コイル抵抗値変動に対するロバスト性について、スライディングモード制御理論ならびに最適制御理論適用時において検討

する。電磁石の通常の抵抗値(常温, 実測)は 20Ω であるが、コントローラ設計抵抗値 R_n ($n=1, 2$) を 5Ω (通常の抵抗値から 75% 変化させた場合) から 35Ω (通常の抵抗値から 75% 変化させた場合) の間において 5Ω 間隔で変化させ、それぞれの場合に対する 7 種類のコントローラを設計した。また、アクチュエータを設置した 2 箇所(Position No.1, 2) の y_n 方向の振動を制御対象とし、その際の鋼板は表面検査工程などの高速走行を想定し走行速度を 600m/min とした。なお、電磁石の通常の抵抗値の場合に対して、Position No.1 でのスライディングモード制御理論、最適制御理論適用時の標準偏差が一致するようにそれぞれのゲインを決定し、これを比較基準とした。

実験装置および各制御理論の重み関数における各パラメータの値は表 1 に示す通りである。

Table 1 The symbols and values.

Symbol	Value
m_n	0.19kg
F_{0n}	0.83N
Γ_{0n}	5×10^{-3} m
I_{0n}	0.5A
L_n	2.3×10^{-2} H
L_{effn}	2.1×10^{-5} Hm
${}^0r_{yn}$	1.0×10^4 V ⁻²
${}^0q_{yn}$	9.0×10^6 m ⁻²
${}^0q_{vn}$	7.0×10^2 s ⁴ /m ²
${}^0q_{in}$	5.0×10^1 A ⁻²
${}^s q_{yn}$	1.0m ⁻²
${}^s q_{vln}$	1.0s ⁴ /m ²
${}^s q_{in}$	1.0A ⁻²
${}^s r_{yn}$	1.0V ⁻²
η	0.4

4.2 実験結果及び考察

4.2.1 y 方向振動に関する検討

本報告では実験結果の一例として電磁石設置位置 Position No.1(y_1 方向)について示す。Fig.4 に最適制御理論およびスライディングモード制御理論のコントローラの抵抗値 R_1 が 20Ω, 5Ω, 35Ω の場合における y_1 方向変位の時刻歴を示す。横軸が時間、縦軸が変位を示している。 $R_1=20\Omega$ における、最適制御理論とスライディングモード制御理論を適用した場合のそれぞれの制御における鋼板の振幅の標準偏差が一致するようにゲインを決定しているため、振動に差は発生していない(同図(a))。しかしコントローラ設計抵抗値 $R_1=5\Omega$ の場合、 $R_1=20\Omega$ の場合と比較すると最適制御理論では振動が劣化している。これに対して、スライディングモード制御理論では $R_1=20\Omega$ の場合と比較すると振動の劣化がほとんど見られない(同図(b))。また、コントローラ設計抵抗値 $R_1=35\Omega$ の場合も同様の傾向が確認でき、最適制御理論では振動が劣化しているがスライディングモード制御理論では振動の劣化がほとんど見られない(同図(c))。

そこで、コントローラの抵抗値変動にともなう y_1 方向の振動

抑制効果について変位の標準偏差を計算し Fig.5 にまとめた。なお、同図における横軸は通常の抵抗値 20Ω に対してコントローラで設定した抵抗値の差の割合を示している。したがって、横軸 -75% がコントローラの抵抗値 $R_1=5\Omega$ 、 75% が $R_1=35\Omega$ に相当する。

同図より最適制御理論適用時には抵抗値 $R_1=20\Omega$ (横軸が 0% の場合) を中心に抵抗値が変動するにともない制御性能が劣化しており、抵抗値の変化の割合が -75% の場合では変位の標準偏差が約 13% 、抵抗値の変化の割合が 75% の場合では変位の標準偏差が約 62% の劣化が生じた。一方、スライディングモード制御理論適用時には抵抗値が変化しても安定した制御性能が得られた。これは、スライディングモード制御理論において状態

が超平面に拘束される場合、状態方程式がモデル化誤差から完全に独立となることから抵抗値変動のようなモデル化誤差に対して不変となったことに起因している。

以上の結果より、制御システムにスライディングモード制御理論を適用することで、最適制御理論適用時に比べて抵抗値変動に対するロバスト性が得られることを実験的に確認できた。また、スライディングモード制御理論適用時には抵抗値が約 $\pm 75\%$ 程度の変動を生じて、安定した制御性能を得ることも確認できた。なお、電磁石位置 No.2 の y_2 方向においても、No.1 の y_1 方向と同様の結果となった。

4.2.2 z 方向振動に関する検討

Fig.6 に実験結果の一例として電磁石設置位置 No.1 における最適制御理論およびスライディングモード制御理論適用時の z_1 方向における時刻歴を示す。横軸が時間、縦軸が変位を示している。同図は y_1 方向における Fig.4 と同様にコントローラの抵抗値 R_1 が 20Ω (同図(a)), 5Ω (同図(b)), 35Ω (同図(c)) の場合における時刻歴である。z 方向の振動に対してはアクティブに制御を行っていないためコントローラの抵抗値が 5Ω 場合における最適制御適用時、スライディングモード制御適用時を比較すると振動に大きな差が無い。同様にコントローラの抵抗値が 20Ω の場合、 35Ω の場合の各抵抗値においても最適制御適用時とスライディングモード制御適用時を比較した場合、振動に大きな差が無いことが確認できた。

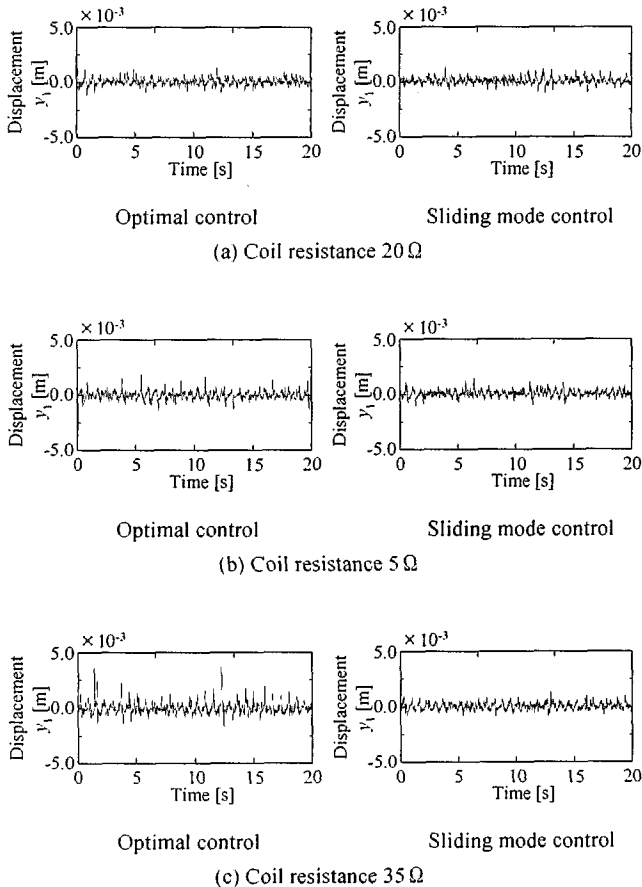


Fig.4 Time histories of displacement (y_1 - direction).

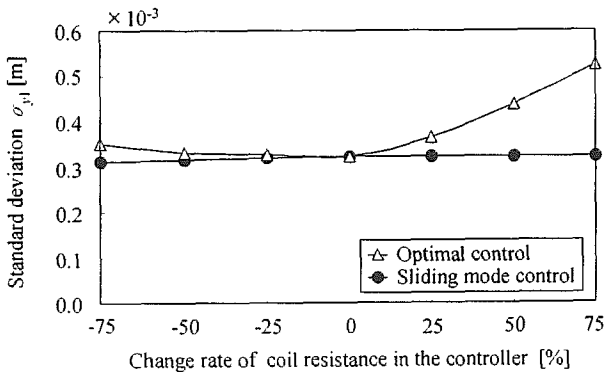


Fig.5 Standard deviation of displacement (y_1 - direction).

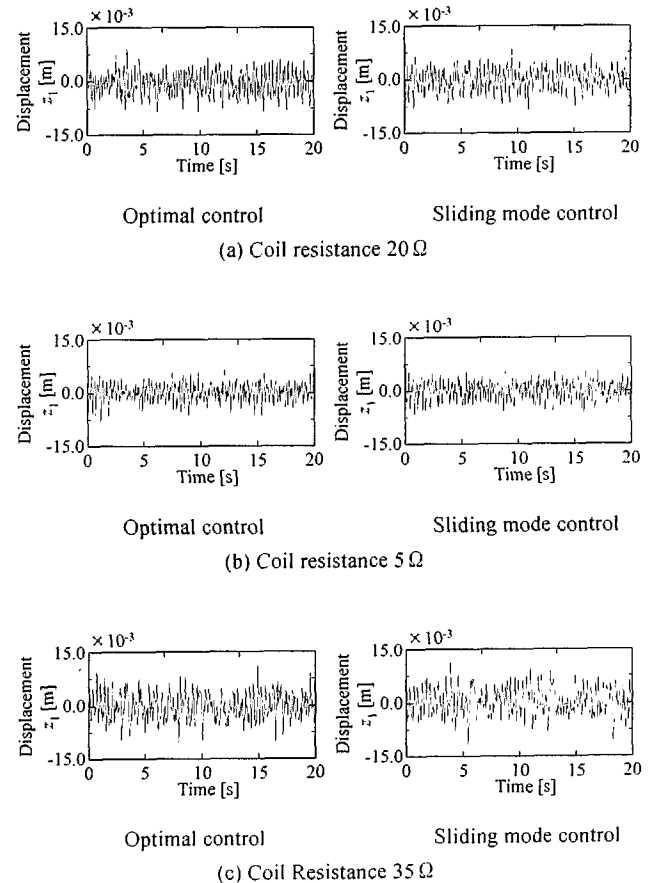


Fig.6 Time histories of displacement (z_1 - direction).

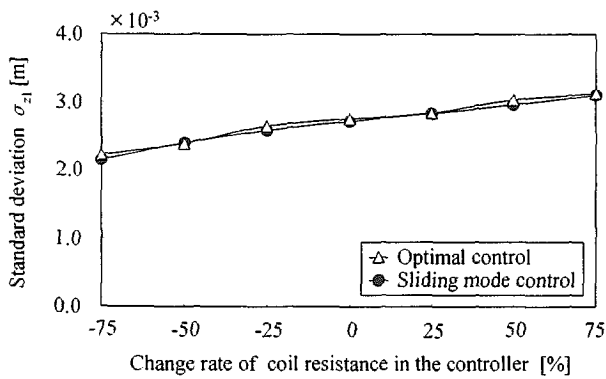


Fig.7 Standard deviation of displacement (z_1 -direction).

ここで、コントローラの抵抗値変動にともなう z_1 方向の振動抑制効果について変位の標準偏差を計算し Fig.7 にまとめた。同図における縦軸は変位の標準偏差、横軸は通常抵抗値 20Ω に対してコントローラで設定した抵抗値の差の割合を示している。通常抵抗値 20Ω である 0% から抵抗値の変化の割合を 75% に変化させた場合、最適制御適用時、スライディングモード制御適用時共に変位の標準偏差が約 14% 劣化し、反対に抵抗値の変化の割合を -75% に変化させた場合では変位の標準偏差が約 20% 抑制された。これは、 z 方向においてはアクティブな制御が行われていないため、 y 方向振動に対して変化する制御入力による電磁石の磁力よりも、定常電流による電磁石の磁力の影響が大きい。そのため実際の電磁石の抵抗値である 20Ω からコントローラの抵抗値を上昇させた場合では、電磁石に流れる定常電流が減少することで z 方向の振動が劣化し、反対にコントローラの抵抗値を減少させた場合では電磁石に流れる定常電流が増加することで z 方向の振動が抑制された。

なお、電磁石位置 No.2 の z_2 方向においても No.1 の z_1 方向と同様の結果となった。

5. 結言

本研究では、直線走行する連続鋼板に対して電磁石による非接触案内を実施し、電磁石の抵抗値変動に対してロバストなスライディングモード制御理論を適用し、その有効性に関する実験的検討を行った。その結果、 y 方向変位においてコントローラ設計抵抗値が変動した場合における最適制御理論とスライディングモード制御理論適用時を比較すると、最適制御理論適用時は抵抗値の変動により振動が劣化した。スライディングモード制御理論適用時には振動の劣化が無く、安定した制御性能を得られることが確認できた。また、 z 方向変位では最適制御適用時とスライディングモード制御適用時ともに振動に大きな差が見られなかった。しかし、 z 方向ではコントローラの抵抗値変化にともなって定常電流が変化するため、その影響により最適制御、スライディングモード制御共に抵抗値が変動するとともに変位の標準偏差が変動した。

今後は、ランニングコストの削減を目的とした電磁石と永久磁石を併用した場合における非接触案内の制御システムに、ロバスト制御理論であるスライディングモード制御理論を適用することで永久磁石を効果的に用いる検討を行う予定である。

謝辞

本研究に際して、東海大学工学部・長田淳氏には多大な協力を得た。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 藤原, 今田, 木田, 安富: 高温用フローラの空力特性について, 日本機械学会通常総会講演会講演論文集, (1993), pp.314-316.
- 2) 平井, 東尾, 田沢, 三本竹, 宮川, 山下: 帯鋼用浮上式ヘリカルターナの実用化, 三菱重工技報, Vol.36, No.6, (1999), pp.312-315.
- 3) H.L.Gerber: Magnetic Damping of Steel Sheet, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.39, No.5, (2003), pp.1448-1453.
- 4) 藤崎: 鉄鋼プロセスへの電磁気応用, 日本 AEM 学会誌, Vol.5, No.2, (1997), pp.1-8.
- 5) 森井, 川田, 井上, 末盛, 佃: 製鉄プロセスラインのストリップ形状制御・制御装置, 三菱重工技報, Vol.32, No.2, (1995), pp.128-131.
- 6) 柏原, 大杉, 押野谷, 石橋: 電磁力による走行柔軟磁性体の非接触案内, 第 45 回自動制御連合講演会論文集, (2002), CD-ROM.
- 7) 柏原, 押野谷, 石橋: 走行連続鋼板の電磁力エッジコントロールに関する基礎的検討(スライディングモード制御の適用), 東海大学紀要工学部, Vol.43, No.1, (2003), pp.59-64.
- 8) 柏原, 押野谷, 石橋: 走行磁性体に対する非接触案内制御(高速走行時に対する基礎的検討), 日本応用磁気学会誌, Vol.29, No.3, (2005), pp.326-331.
- 9) 柏原, 押野谷, 石橋: 電磁力による走行磁性体の進行方向変更部分に対する非接触案内(加減速時に対する基礎的検討), 東海大学紀要工学部, Vol.43, No.2, (2003), pp.53-58.
- 10) 柏原, 押野谷, 石橋: 電磁力による走行磁性体の非接触エッジコントロールに関する基礎的検討, 日本 AEM 学会誌, Vol.11, No.4, (2003), pp.235-241.
- 11) 柏原, 押野谷, 石橋: 薄鋼板のエッジ方向に加える電磁力が薄鋼板の垂直振動に及ぼす影響, 東海大学紀要工学部, Vol.44, No.1, (2004), pp.75-81.
- 12) 小倉, 柏原, 三觜, 押野谷, 石橋: 薄鋼板のエッジ方向に設置する永久磁石の最適な磁力と位置の関係に対する検討, 東海大学紀要工学部, Vol.44, No.2, (2004), pp.43-48.
- 13) 例えば, 野波, 田: スライディングモード制御, コロナ社 (1994).