

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)

柏原賢*¹・押野谷康雄*²・石橋一久*³

Noncontact Guide for a Change Part in Traveling Direction of Traveling Elastic Steel Plate Using Electromagnetic Force (Basic Research on Acceleration and Deceleration)

by

Ken KASHIWABARA, Yasuo OSHINOYA and Kazuhisa ISHIBASHI

(Received on 30.9.2003 & accepted on 26.11.2003)

Abstract

Recently, along with high-end products, users have demanded high-quality and high-value-added steel plates manufactured by the continuous steel plate process. In factories, a continuous thin steel plate subjected to iron and steel processes is supported on a series of rollers during processes such as rolling; the thin steel plate moves on the rollers at a speed of 10 m/s or more. In the plating process, the steel plate is conveyed 20-50 m in the vertical direction for drying, during which steel plates are negligibly supported by rollers and other mechanisms. Therefore, plating nonuniformity due to vibration and other factors prevents the increase in productivity. To solve this problem, we developed a new noncontact guide system for parts of the steel plate at which its traveling direction changes by applying an electromagnetic force from the direction of the edge of the thin steel plate, and experimentally examined the effectiveness of the system.

Keywords: Steel Plate, Traveling, Noncontact Guide, Electromagnet, Edge Control, Elastic Vibration

1. はじめに

ユーザの高級化指向に伴い鋼板の高品質、高付加価値化が求められている薄鋼板は、製品製造時の連続熱処理や圧延及び連続表面処理などの工程でローラによる接触支持搬送されている。搬送時、鋼板は装置上を毎秒 10メートル以上の速度で走行しており、このような連続処理の一つであるめっき処理工程では、処理後に鋼板は 20~50m鉛直方向へ搬送される。その間、乾燥のためにローラなどによる接触支持ができず、同時に高い張力の付加ができないことから、鋼板支持のために設置されている上下ローラ間では振動、波動が発生する。このことが要因となって、支持ローラと走行鋼板の摩擦変動が生じ、鋼板表面に傷、ひずみ、めっきの剥離などの表面品質劣化が起ることが問題となっている。

この解決策として、当研究グループでは水平方向に走行する薄鋼板の電磁石による非接触支持制御システムを設計し実験、理論的考察を行っている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。また、製鉄プロセスラインにおける実用例として、森井ら⁽⁴⁾、藤崎⁽⁵⁾が形状制御、制振制御や中心位置決め装置について提案している。一方、岡田ら⁽⁶⁾、中川ら⁽⁷⁾、村岸ら⁽⁸⁾によって静止している長尺の鋼板の電磁石による振動抑制に関する研究がなされている。しかし、いずれの

場合も電磁石吸引力を鋼板表面に対して作用させ制御を試みている。この場合、電磁石を鋼板に十分に接近させることによって、制御性能の向上を期待できるが、実機において高速走行している薄鋼板には、変形や振動など様々な要因があるために電磁石を十分に接近させることは、電磁石と薄鋼板とが接触してしまうことが考えられるので難しい。これを解決する手法の一つとして、薄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、走行連続鋼板の振動を抑制する非接触案内機構を提案している^{(9)~(12)}。また、前報の紀要⁽¹³⁾では薄鋼板の直進部分に非接触案内機構を適用して振動抑制の検証を行っている。本研究では、この非接触案内機構を進行方向変更部分に適用し、薄鋼板が加減速状態での振動抑制性能について実験を行い、有効性を検証した。

2. 非接触案内機構

2.1 実験装置

非接触案内機構実験装置の概要図を Fig.1 に示す。長さ 6894mm、幅 150mm、厚さ 0.3mm の焼入れした鋼材 (SK3) をベルト状に溶接した薄鋼板を、直径 700mm、幅 154mm のプーリに図の様に吊り下げた。プーリは DC サーボモータから直径 100mm の平プーリを介して駆動する。これにより、薄鋼板のエンドレス走行を可能としている。また、ベルト下部にはプーリ

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

を設置していない。これは、水平方向に搬送されてきた連続鋼板がめっき処理槽を通過した後、鉛直方向に送られる部分や、その後下方向に送り返される部分、さらにはループなどにおける方向転換部分を想定しているためである。既に提案している非接触位置決め制御機構⁽¹⁴⁾と同様の電磁石をアクチュエータとして、ベルト下部の進行方向変更部分に3箇所設置した。設置箇所を図のようにNo.1, 2, 3とする。図中の $x_1 \sim x_3$ 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、 $z_1 \sim z_3$ は電磁石位置での鋼板の平面に垂直な方向の座標を示す。また、同様に電磁石位置における鋼板の平面方向の横揺れを示す座標を $y_1 \sim y_3$ とする。Fig.2に実験装置の写真を示す。

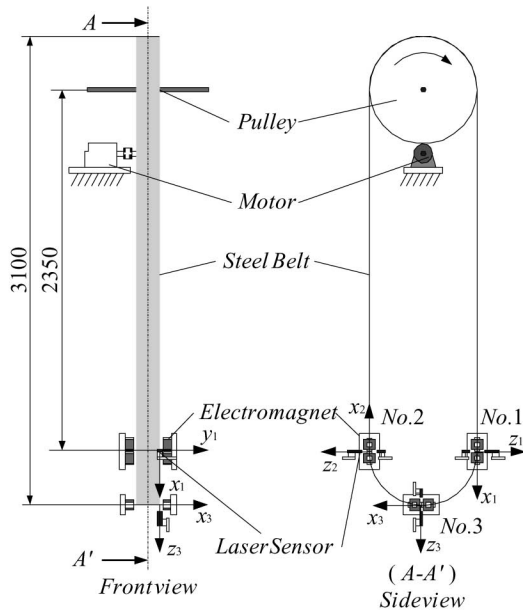


Fig.1 Electromagnetic edge control system for a traveling steel belt



Fig.2 Photograph of the experimental apparatus

2.2 制御システム

本研究では、進行方向変更部分に3箇所電磁石を設置して制御を行っているが、1箇所の電磁石位置で検出した変位と、その変位をデジタル微分した速度を、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。Fig.3に制御システムの概略を示す。また、電磁石位置における $y_1 \sim y_3$ 方向変位を計測するためのレーザセンサ(Fig.4)を3箇所に設置した。この際のフィードバックゲインは、第4章に示す離散時間系最適制御理論を適用し求めた。また、電磁石は2個直列接続し、対向するように配置して4個で1つのアクチュエータとした。本実験では電磁石表面と鋼板エッジとの距離を5mmに維持できるように設定し、そこからの変動値の制御を行う。なお、使用した電磁石の静的吸引力は定常位置において約0.83N（電磁石コイル定常電流0.5A）である。

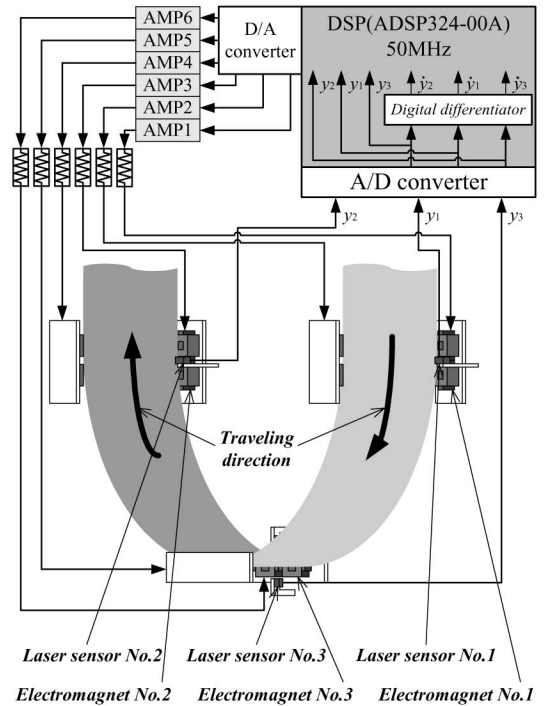


Fig.3 Control system

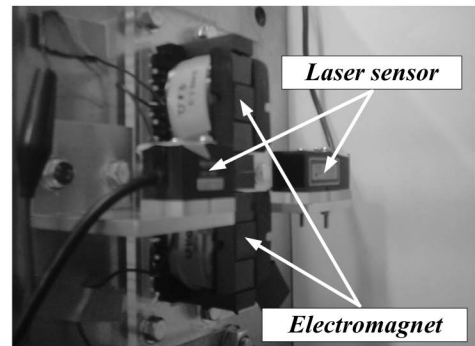


Fig.4 Laser Sensor (y direction) and Electromagnet

3. モデルリング

3.1 運動方程式

Fig.5 に制御対象のモデル概念図を示す. 図の中央は 3 箇所の電磁石で制御を行う進行方向変更部分(曲線部分)及び一部直線走行部分である. これを 3 分割し, 1 箇所の電磁石が同等の質量を制御するものと近似した. それぞれの制御対象の質量を $m_n(n=1\sim3)$ とし, 電磁石からの制御力を f_n とした並進-自由度モデルを考えると, 運動方程式は次式ようになる.

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

また, 本実験で使用した電磁石の特性は平衡点近傍で線形近似することより, 以下の様に表される.

$$f_n = \frac{2F_0}{\Gamma_0} y_n + \frac{2F_0}{I_0 R} v_n \quad (2)$$

ただし,

$$v_n = Ri_n$$

なお, 各パラメータは, Γ_0 : 平衡状態における電磁石と対象物のギャップ[m], I_0 : 平衡状態における定常的な電磁石コイル電流[A], F_0 : 電磁石から発生する平衡状態における定常的な吸引力[N], R : 電磁石の抵抗[Ω], y_n : 制御対象の変動値[m], v_n : 制御電圧[V], i_n : 制御電流[A]である.

3.2 状態方程式

状態変数として鋼板の変位, 速度を採用し, 式(1), (2)より以下のような状態方程式を得る.

$$\dot{y}_n = A_y y_n + B_y v_n \quad (3)$$

ただし

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

$$A_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{4F_0}{\Gamma_0} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_y = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{4F_0}{I_0 R} \end{bmatrix}$$

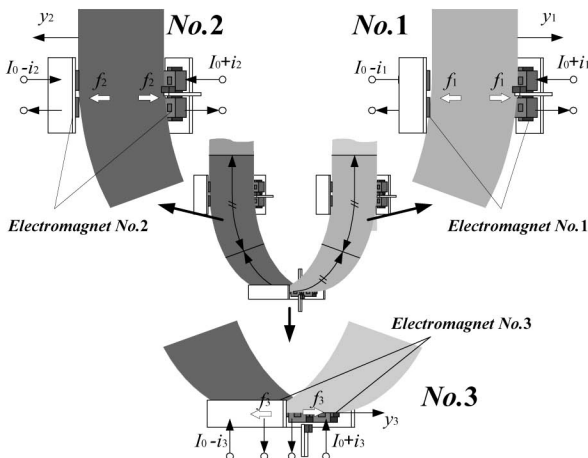


Fig.5 Model of noncontact guide system for a traveling steel belt

4. 離散時間系最適制御

本研究では制御系を離散時間系で構成するため, 連続系の評価関数を離散化し, 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

$$J_d = \sum_{i=0}^{\infty} [y_{nd}(i)^T Q_{yd} y_{nd}(i) + r_{yd} v_{nd}(i)^2] \quad (4)$$

$$Q_{yd} = \text{diag}(q_{yd} \quad q_{\dot{y}d})$$

ここで Q_{yd} : 変位, 速度に関する重み係数行列, r_{yd} : 制御入力に関する重み係数である. 式(4)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

$$M = \Phi^T M \Phi + Q_{yd} - \Phi^T M \Gamma (r_{yd} + \Gamma^T M \Gamma)^{-1} \Gamma^T M \Phi \quad (5)$$

において正定対称解 M を求めることで得られ,

$$v_{nd}^o = -F_{yd} y_{nd} \quad (6)$$

$$F_{yd} = (r_{yd} + \Gamma^T M \Gamma)^{-1} \Gamma^T M \Phi \quad (7)$$

となる.

ただし,

$$\Phi(T_s) = \exp(A_y T_s)$$

$$\Gamma(T_s) = \int_0^{T_s} [\exp(A_y \tau)] d\tau B_y$$

であり, T_s はサンプリング時間($T_s=0.0078$ s)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(The Math Works, Inc)内の組み込み関数である lqrd を使用した.

5. 制御実験および結果の考察

5.1 走行実験条件

本研究では Fig.6 に示すような(a)未制御, (b)電磁石による制御の 2 条件において加減速走行実験を行う.

薄鋼板の走行は Fig.7 に示すように, 区間①: 0~9 秒の間が未走行, 区間②: 9~30 秒の間で加速, 区間③: 30~33 秒の間で最高速 5m/s で走行, 区間④: 33~71 秒で減速, 区間⑤: 71~80 秒で未走行となっている. また, 電磁石を設置した場合(実験条件(b)), 7~74 秒の間で電磁石による制御を実施する.

実験条件(a), (b)共に電磁石を設置した 3 箇所(No.1, 2, 3)の y, z 方向の振動を計測する. 鋼板平面に垂直な方向($z_1 \sim z_3$)の振動計測用に Fig.8 に示すレーザーセンサを設置した.

なお, 実験で使用した各パラメータの値は以下の通りである.

$$\Gamma_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}, \quad I_0 = 0.5 \text{ A}, \quad F_0 = 0.83 \text{ N}, \quad R = 10 \Omega, \\ m_n(n=1\sim3) = 2.67 \text{ kg}, \quad Q_{yd} = \text{diag}(1000 \quad 10), \quad r_{yd} = 1.0 \times 10^{-4}$$

5.2 実験結果および考察

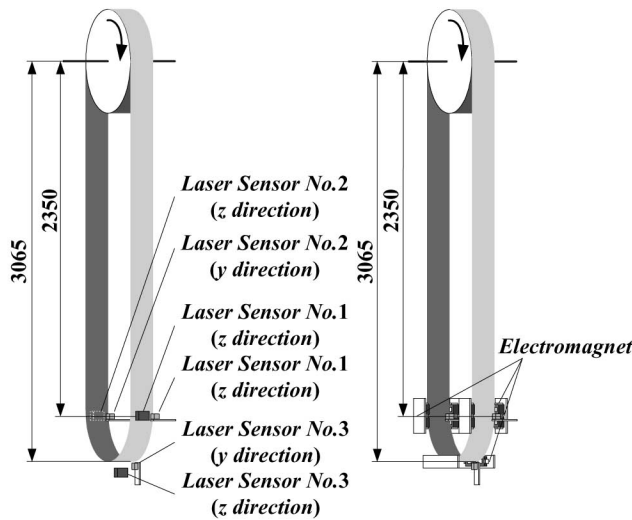
5.2.1 未走行時における位置決め性能に関する考察

未制御時における進行方向変更部分の薄鋼板は, Fig.9 の点線で示すような位置, 形状である. 本実験では, 同図の実線に示

す位置、形状を目標とする非接触案内路を設定する。

Fig.10, 11 は Fig.7 に示した速度で、鋼板を走行をさせたときの未制御時の y, z 方向変位の時刻歴の一例である。また、Fig.12, 13 は同一状況下での電磁石による制御を実施した時の y, z 方向変位の時刻歴の一例である。

Fig.12(a), (b)における横軸 7 秒以前(制御前)では、鋼板は自然に吊り下げられた状態で静止しており、制御を開始すること



(a) Noncontrol (b) With electromagnets
Fig.6 Layout of electromagnets

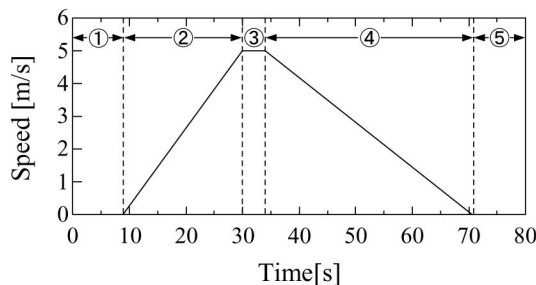


Fig.7 Traveling speed of steel plate

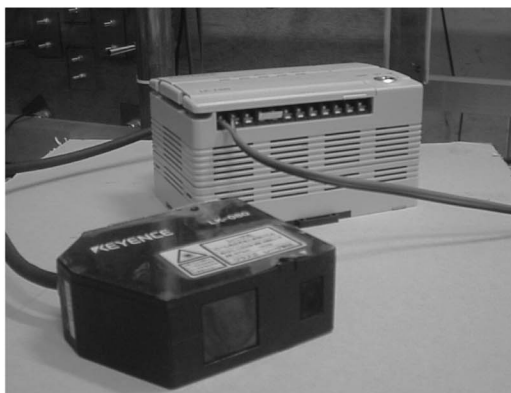


Fig.8 Laser Sensor (z direction)

により約 5mm 移動し制御目標位置に到達していることが分かる。同様に Fig.12(c)においても、鋼板は約 2mm 移動して制御目標位置に到達している。また、 z 方向はアクティブに制御を行っていないが、Fig.13(a)~(c)に示す 3 箇所センサ設置位置で、鋼板は約 10mm 移動し、Fig.9 右図実線に示したように案内路に対し位置決めされている。

5.2.2 走行時の y 方向に関する考察

Fig.10(a)~(c)において、未制御時には最大片振幅が約 40mm 発生している。これに対し Fig.12 に示す制御時では、最大片振幅が 2mm 程度(未制御時の 5%)まで制御されている。また、Fig.10 より未制御時では加減速時共に大きな振動が発生していることが確認できる。しかし、Fig.12 に示すように制御時には加減速時共に大きな振動が発生していない。これより、非接触案内制御は加減速時においても y 方向に対して有効に作用していることが明らかとなった。

5.2.3 走行時の z 方向に関する考察

未制御において、鋼板は走行を開始すると Fig.11(a)に示すように約 20mm 正側(z_1 軸)に変位し、Fig.11(b)では約 20mm 負側(z_2 軸)に変位している。これは、鋼板が Fig.1 において制御対象の進行方向変更部分で、全体として右側に移動していることを示している。この原因としては、鋼板ベルトを駆動しているプーリ部において、ベルトがプーリ表面から離れる部分では鋼板の弾性体としてのばね力が作用し、外側へ力が作用したためと考えられる。一方、プーリに巻き始められる側では、その逆に弾性体として外側に広がっているベルトが内側に巻き込まれる力が作用する。これは、ベルトの剛性に対して、駆動用プーリ径が小さいという本装置における固有の現象である。しかし、Fig.13(a), (b)に示すように電磁石を設置することで鋼板の変形を抑制できている。

Fig.11 では、加減速時に最大片振幅が約 20mm 発生している。これに対して、 y 方向の振動に対する制御にともない、Fig.13 に示すようにアクティブに制御していない z 方向の振動も最大片振幅が 10mm 程度まで抑制されている。また、 y 方向と同様に z 方向も加減速時に大きな振動が発生しているが、電磁石を設置することにより振動を抑制できている。このことより、電磁石を設置することで、加減速時にもアクティブに制御していない z 方向の弾性振動も抑制できることが明らかとなった。

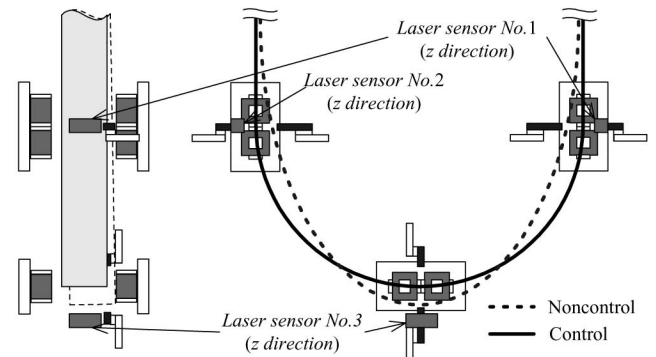
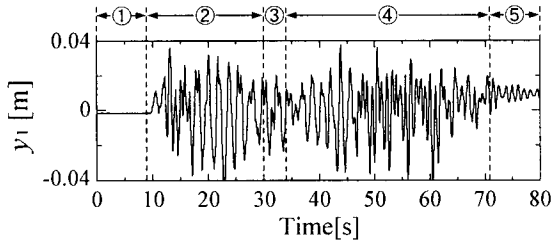
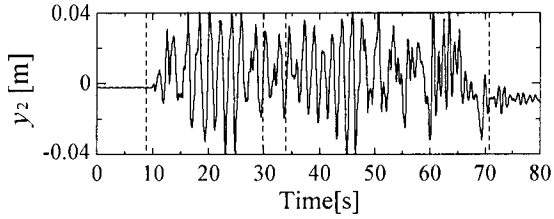


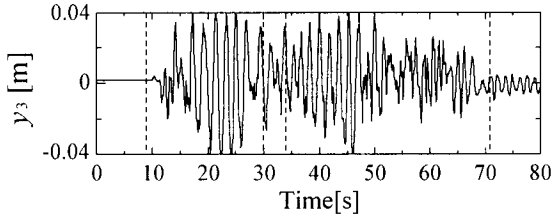
Fig.9 Position of steel plate before / after the positioning control



(a) Laser Sensor No.1

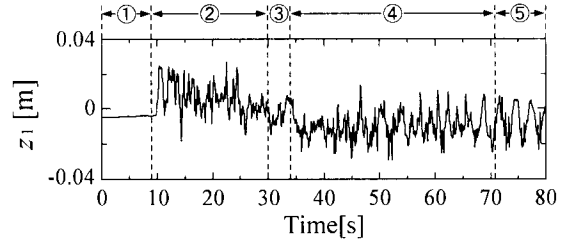


(b) Laser Sensor No.2

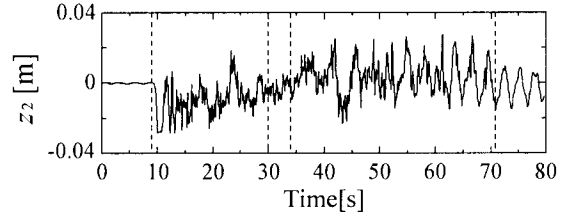


(c) Laser Sensor No.3

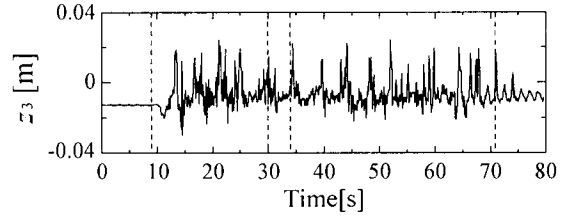
Fig.10 Time histories of y direction displacement (Noncontrol)



(a) Laser Sensor No.1

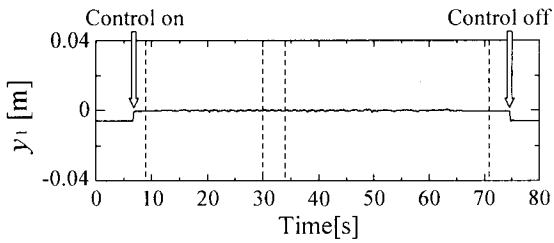


(b) Laser Sensor No.2

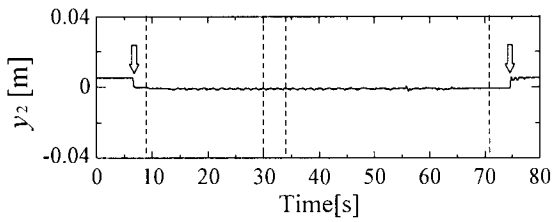


(c) Laser Sensor No.3

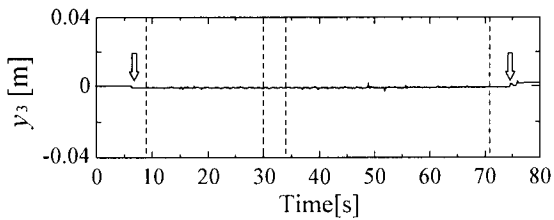
Fig.11 Time histories of z direction displacement (Noncontrol)



(a) Laser Sensor No.1

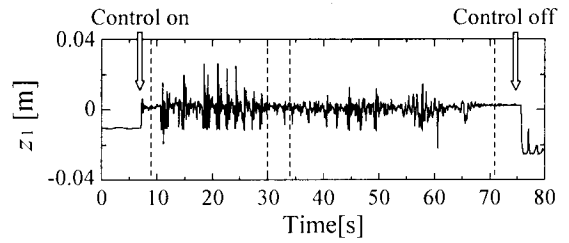


(b) Laser Sensor No.2

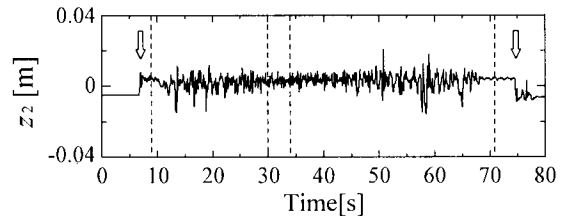


(c) Laser Sensor No.3

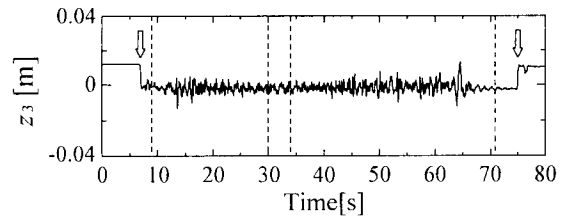
Fig.12 Time histories of y direction displacement (with electromagnets)



(a) Laser Sensor No.1



(b) Laser Sensor No.2



(c) Laser Sensor No.3

Fig.13 Time histories of z direction displacement (with electromagnets)

6. おわりに

本研究では、薄鋼板の進行方向変更部分に電磁石による非接触案内機構を適用することを提案し、実験的考察を行った。エッジ方向に設置した電磁石により非接触案内制御を実施することで、薄鋼板を設定した走行路に案内することが可能なことを示した。また、加減速走行実験では薄鋼板のエッジ方向に電磁石を設置して制御を行うことにより、エッジ方向の振動を制御できるだけでなく、アクティブに制御していない薄鋼板の平面方向の弾性振動も抑制できることを示した。

今後の課題として、実機処理工程への実装を想定して、高速走行や、より大きな加減速での走行実験を行い振動制御、振動抑制効果の検証を行うこと、走行が鋼板の張力、コリオリ力、遠心力などに与える影響の解明などがあげられる。

謝辞

本研究に際して東海大学大学院生三觜佳彦氏、東海大学学部生野口晃氏に多大な協力を得た。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 押野谷, 下郷: 走行弾性ベルトの磁気浮上制御, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 56, No. 531, (1990), 2911-2918.
- (2) 押野谷, 下郷: 走行弾性ベルトの磁気浮上制御(センサとアクチュエータの配置に関する検討), 日本機械学会論文集(C編), Vol. 57, No. 536, (1991), 1246-1253.
- (3) 押野谷, 下郷: 走行弾性ベルトの磁気浮上制御(臨界速度を超えた走行速度における制御性能に関する考察), 日本機械学会論文集(C編), Vol. 58, No. 556(1992), 3473-3480.
- (4) 森井, 井上: 製鉄プロセスラインのストリップ形状制御・制御装置, 日本機械学会誌, Vol. 100, No. 943, (1997), 74.
- (5) 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), 1-8.
- (6) 佐藤, 岡田: 薄鋼板の振動制御, 第 11 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, (1999), 219-222.
- (7) 田中, 中川: ストリップ磁気特性と電流センサを用いた制振制御に関する検討, 第 11 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, (1999), 527-530.
- (8) 村岸, 木村, 加藤, 今林: 電磁力による薄板鋼板の振動・形状制御, 第 12 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, (2000), 597-600.
- (9) 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), 309-210.
- (10) 柏原, 大杉, 三觜, 押野谷, 石橋: 電磁力による走行柔軟磁性体の非接触案内に関するモデリング, 日本機械学会関東支部第 9 期総会講演会講演論文集, (2003), 209-210.
- (11) K. Kashiwabara, Y. Oshinoya, K. Ishibashi: Noncontact Guide for a Traveling Steel Plate, The 12th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics in VERSAILLES, (2003), 66-67.
- (12) K. Kashiwabara, Y. Oshinoya, K. Ishibashi: Study on Noncontact Guide for a Traveling Steel Plate(Application to Change Part in Traveling Direction), 7th International Symposium on Magnetic Suspension Technology, (2003), 発表予定.
- (13) 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, Vol. 43, No. 1, (2003), 59-64.
- (14) 押野谷, 薄鋼板の水平方向非接触位置決め制御に関する基礎的研究, 日本 AEM 学会誌, Vol. 6, No. 4, (1998), 52-57.