

第16回

「電磁力関連のダイナミクス」 シンポジウム

The 16th Symposium on Electromagnetics and Dynamics
(SEAD16)



開催期間: 2004年6月9日(水)～6月11日(金)
会場: 北九州国際会議場

主催: 日本機械学会

共催: 日本AEM学会, 電気学会, 北九州市

協賛: 日本原子力学会, 日本シミュレーション学会,
精密工学会, 日本鉄鋼協会, 計測自動制御学会,
磁性流体研究連絡会, 日本工業技術振興協会,
静電気学会, 高速信号処理応用技術学会,
低温工学協会, 日本応用磁気学会, 日刊工業新聞社

永久磁石の運動制御による振動抑制

井上 淳* (高知工科大学), 岡 宏一 (高知工科大学), 萩森 太一 (高知工科大学)

Vibration Suppression by Motion Control of Permanent Magnet

Jun Inoue* (Kochi Univ. of Tech)

Koichi Oka (Kochi Univ. of Tech)

Taichi Hagimori (Kochi Univ. of Tech)

Abstract

This paper describes a new vibration control method. The distinctive feature of this method is the use of linear actuators and permanent magnets. Linear actuators actuate the magnets and control attractive forces which are used for reducing vibration through adjustments of the air gap between magnets and an object. To examine the performance of the proposed vibration control method, we consider a system modeled on an actual experimental device. Experimental examinations are carried out and the effectiveness of the proposed method is determined.

キーワード: 振動制御, リニアアクチュエータ, 永久磁石, 空隙制御

(Keywords: Vibration Control Method, Linear Actuators, Permanent Magnet, Air Gap Control)

1. まえがき

薄板鋼板の圧延やコーティング, メッキ工程では, その鋼板の搬送の際に生じる振動がしばしば問題となっている。それは, 薄板鋼板は剛性が小さく変形しやすいためである。その対策として機械的な接触で振動を抑制する方法がある。しかし, この方法では鋼板に損傷を加えてしまう可能性がある。非接触での振動抑制は有効な方法であり, それを実現するために電磁石の磁気力を用いて振動を制御するという試みが行われている^[1]。しかし, この制御方法には制御範囲が狭いという問題点がある。なぜなら磁石の吸引力はエアギャップの2乗に反比例し, 鋼板と電磁石の距離が離れると, 十分な制御力が得られなくなるためである。このことは対象物の振動振幅が大きくなったとき, 電磁石を使用して対象物を制御することは制御力が不足する可能性があることを意味する。

著者らは制御範囲を広くできるような, 振動抑制方法を提案している^[2]。この方法の特徴は, リニアアクチュエータと永久磁石を使用していることである。リニアアクチュエータは永久磁石を運動し, 吸引力を制御する。対象物の変位をセンサで検出し, 吸引力を調整することにより, 振動を抑制する。

本報告では, 提案した振動抑制の有効性を検証するために行った実験について報告する。まず試作した装置を紹介し, そのモデル化を行う。次に, 試作装置の性能テストを行

い, そのデータに基づいた振動抑制のための制御パラメータを設定する。最後に振動抑制実験を行い提案した制御方法の有効性について確認する。

2. 実験機の構成とモデル化

2.1 実験機の構成 試作装置の写真を図1に示す。装置は鋼板の振動を模擬し, その振動を抑制するためのものである。この鋼板の代わりにレバーを図1のように取り付けた。レバーはリン青銅 (50×280×5mm 2枚) による並行バネで支持されており, 剛性が低く抑えられ, 振動しやすい構造となっている。このレバーの先には鉄板が取り付けられ磁石の吸引力が働くようになっている。またレバーの先にはモータが取り付けられるようになっており, このモータによって強制振動も可能である。レバーの振動を抑制するための装置として, 最下段からリニアアクチュエータ (NSK 製 メガスラストモータシステム) のスライダ上に永久磁石 (フェライト系磁石: 50×50×18mm) をレバーに対し左右対称に取り付けた。平衡位置では, 2つの永久磁石の中央にレバーが位置するものとした。スライダの動きにより永久磁石とレバーのギャップが変化し, 吸引力を調整する。このことによりレバーの振動を抑制する機構となっている。レバーおよびスライダの変位はレーザーセンサで計測される。

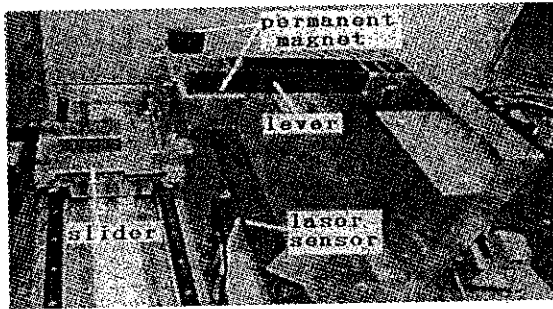


図1 試作装置

Fig. 1 Photograph of exponential setup

2. 2 制御システム 図2は装置を上から見た場合の構成である。システムの構成は図のように、レバー変位、スライダ変位はともにレーザーセンサによって計測された後 D/A コンバータを介し、DSP ボード内に取り込まれる。これらの変位信号に基づいて DSP は適切なスライダへの出力を計算する。計算された値は D/A コンバータによって電圧に変換され、モータースライダのドライバユニットに出力される。ドライバユニットはこの電圧によってスライダを駆動する。スライダは入力電圧に比例して速度制御される。制御は dSPACE と MATLAB を使っている。

2. 3 モデル化 試作装置において制御方法やフィードバックゲインを適切に決定するために、装置のモデル化を行った。レバー（制御対象）は並行バネを使っているため正確には直線運動ではなく、また変位の大きいところではバネ定数も変化するが今回のモデル化では、簡略化のために直線運動を行うものとし、常に等しいバネ定数を持つものとする。また、図2の上向き方向を正としてモデル化を行った。

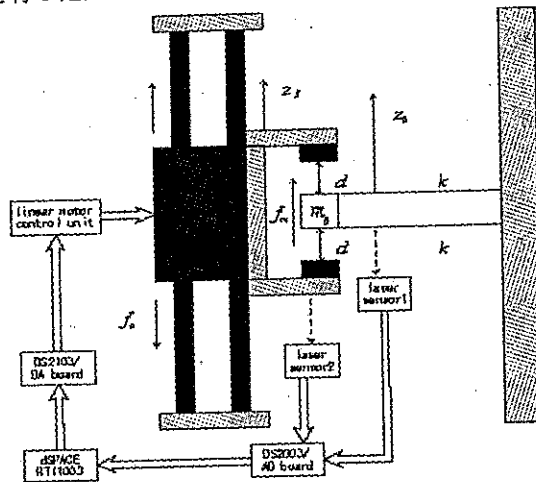


図2 システム構成

Fig. 2 System configuration

使用する信号を以下に示す。

- z_0 : レバー（振動対象）の変位
- z_1 : スライダ（永久磁石）の変位
- d_0 : 平衡状態のエアギャップ
(レバーが磁石間の中心にするとときのギャップ)
- k_{s0} : レバーのばね定数
- c_0, c_1 : レバーおよびスライダの減衰係数
- m_0 : レバー先端部（強磁性体などを含む）の質量
- m_1 : スライダ部（永久磁石を含む）の質量
- f_m : 永久磁石の吸引力
- f_a : アクチュエータの駆動力
- k : 永久磁石の吸引力に関する定数

永久磁石の吸引力はエアギャップの2乗に反比例すると仮定し、レバーに対し上向きの力を発生する方向をせいとする

$$f_m = \frac{k}{(d_0 - z_0 + z_1)^2} - \frac{k}{(d_0 + z_0 - z_1)^2} \dots (1)$$

となる。レバー（制御対象）の運動方程式は、 $m_0 \ddot{z}_0 = f_m - k_{s0} z_0 - c_0 \dot{z}_0 \dots (2)$

である。スライダの運動方程式は、

$$m_1 \ddot{z}_1 = -f_m - k_{c1} \dot{z}_1 + f_a \dots (3)$$

となる。永久磁石の吸引力 f_m は線形化により、

$$f_m = k_m z_0 - k_m z_1 \dots (4)$$

となる、ただし $k_m = 4k/d_0^3$ である。

式(4)を式(2)に代入すると

$$m_0 \ddot{z}_0 = (k_m - k_{s0}) z_0 - c_0 \dot{z}_0 - k_m z_1 \dots (5)$$

同様に、式(4)を式(3)に代入すると

$$m_1 \ddot{z}_1 = -k_m z_0 + k_m z_1 - c_1 \dot{z}_1 + f_a \dots (6)$$

となる。今回のシステム入力スライダの速度であることを考慮すると、状態方程式は $x = (z_0 \ z_1 \ \dot{z}_0 \ \dot{z}_1)^T$ として次のような線形モデルが得られる。

$$\dot{x} = Ax + bu$$

$$y = cx \dots (7)$$

ただし、

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ k_m - k_{s0} & c_0 & -k_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_m & k_m & -c_1 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

3. 実験

3. 1 リニアアクチュエータの性能実験

今回の実

験では、提案した振動抑制方法の有効性を実験により確認することを目的としている。以下ではアクチュエータの成

性評価の実験と振動抑制実験について述べる。まず、アクチュエータの基本的な性能を確認するための実験を行った。図3のようなブロック線図を用いスライダの変位をフィードバックさせて制御したとき、入力に対する追従性能について検討した。

図の左下のブロックはA/Dコンバータからの信号でゲインを乗じた後の値が mm になるように調整した。また PID コントローラは比例ゲインのみに値を入力し制御を行った。この設定で、スライダの遅れ角とゲインについての実験を行った。結果を図4、図5に示す。入力振動は 10mm であり、図4の周波数は 1Hz、図5は 10Hz である。比例制御のゲインはここでは 0.02 とした。これは実験装置の発振しない最も大きな値として設定した。10Hz の応答はゲインが小さく遅れも大きいことがわかる。

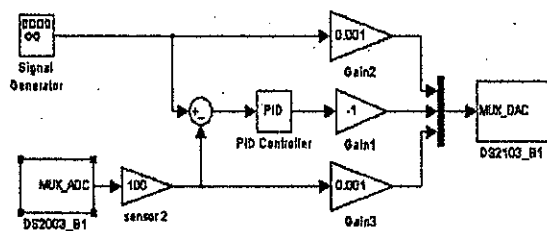


図3 スライダ評価用制御システム
Fig. 3 Slider evaluation control system

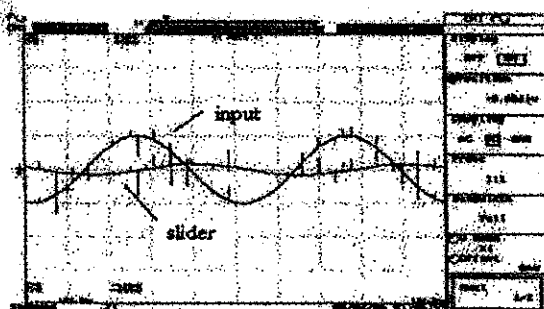


図4 1Hzのときのスライダ応答波形
Fig. 4 Experimental result (Frequency=1Hz)

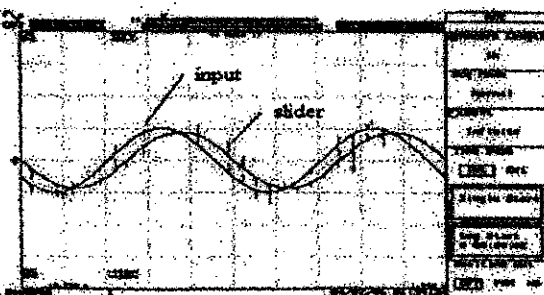
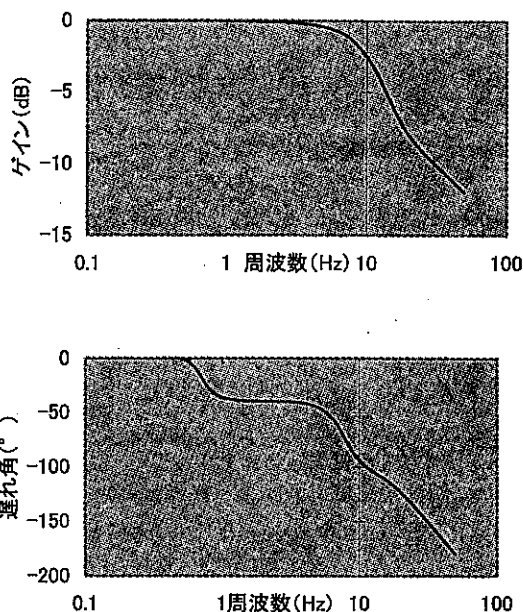


図5 10Hzのときのスライダ応答波形
Fig. 5 Experimental result (Frequency=10Hz)

図6は、スライダの応答のボード線図である。50Hzを

超えると、スライダは正常に駆動できなくなり、ドライバの安全装置などのため意味のあるデータを計測できなかった。グラフより比較的振動が遅い(8Hz以下)場合は遅れが大きいものの追従性能は高く、振動の抑制に十分な性能を持つことがわかった。また、20Hz程度までの制御は可能であり、これはレバーの固有振動に比べて十分な高い数字であるためこの装置を用いて振動抑制が可能であると考えられる。



スライダ性能のボード線図
Fig. 6 Bode diagram of linear actuator

3. 2 振動抑制実験 次にレバーの振動を抑制することが可能であることを確認するための実験を行った。コントローラを図7に示す。左端のA/Dコンバータからの出力のうち上側からレバーの変位が下側からはスライダの変位が計測される。制御則は状態フィードバックを行うものとする。このため 図7の中にあるPIDコントローラの積分ゲインと下部のPIDコントローラの積分と微分ゲインは0に設定されている。実際の各ゲインの値はレバーのためのPDゲインがそれぞれ0.0004と1、スライダの比例ゲインは0.008をして実験を行った。実験は、エアギャップ40mmで、レバーに初期変位を与えた後自由振動させてその収束波形を記録した。

図8、図9に制振制御実験の結果を示す。レバーに初期値を与え自由振動させ、その振動の抑制性能を調べた。図8は制御を行わずスライダを停止させて行った実験結果であり、図9は制振制御を行った結果である。図からわかるようにスライダの駆動によって制振制御が実現できていることがわかる。ただし今回は、ゲイン調整などが適切

に設定されていないため十分な減衰特性は得られていない。

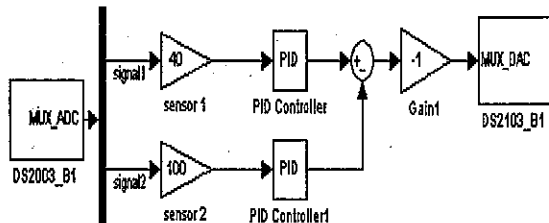


図7 制御システムのブロック線図

Fig. 7 Block diagram of control system

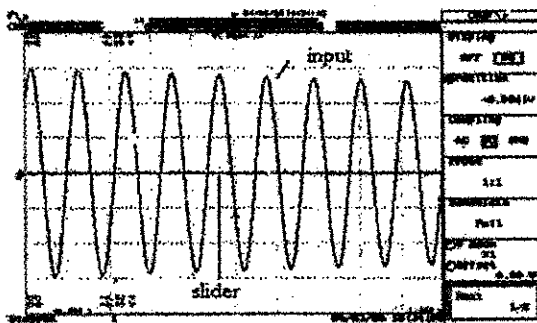


図8 制振実験結果（制御無し）

Fig. 8 Experimental result (without control)

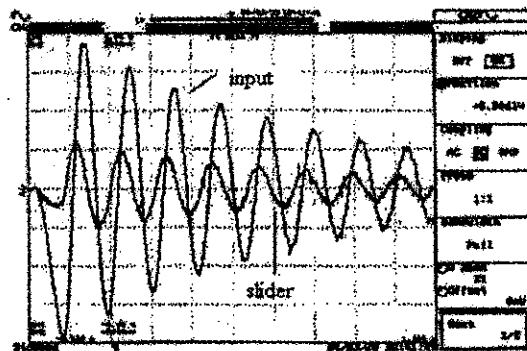


図9 制振制御実験結果（制御あり）

Fig. 9 Experimental result (with control)

5. まとめ

鋼板の搬送時などに発生する振動を抑制する目的で、リニアアクチュエータと永久磁石を使った振動抑制システムについて実験的な検討を行った。実験装置はリニアアクチュエータによって永久磁石を駆動し、吸引力を制御するものとなっている。制御対象はリン青銅の平行ばねを用いて振動するレバーを用いた。この実験装置に対してアクチュエータの性能を調べ、制御対象の制振が可能であることを確認した。その後実際に制振制御を行い、減衰制御が可能であることを確認した。永久磁石の位置をずらすことに

より、レールの長さの範囲であればどんな厚さにでも対応できる汎用性も同時に確保できている。また、制御にかかる時間も従来のほぼ同じであるため実用範囲だと考えられ、調整を完全に行えていないことを考えると振動抑制にかかる時間短縮は可能であると考えている。

今後の発展として現在自由振動させているレバーの振動はモータを使うことにより、強制振動を減衰させる実験を行いたいと考えている。

参考文献

[1] SHINKO ELECTRIC CO.LTD.

URL:http://www.shinko-elec.co.jp/NewsRelease/new_18.htm

[2] Kouichi Oka・Yoshio Inoue The 6th International Conference on Motion and Vibration Control, Saitama, August 19-23,2002