

社団法人 日本設計工学会 四国支部
平成 21 年度研究発表講演会
講演論文集

開催日：2010 年 3 月 16 日（火）
会 場：香川大学 工学部

主 催
社団法人 日本設計工学会 四国支部
共 催
香川大学 工学部

永久磁石の左右独立駆動による薄板鋼板の非接触制振機構

○佐野明幸（高知工科大学大学院）

廣川悠太（高知工科大学工学部）

Phaisarn SUDWILAI（高知工科大学大学院）

岡宏一（高知工科大学工学部）

楠川量啓（正，高知工科大学工学部）

1. はじめに

鋼板の溶融メッキ工程では、搬送の際に生じる振動が問題になる。なぜなら、鋼板の搬送スピードが非常に速く、鋼板の剛性が低いため、変形や損傷などの原因になるからである。その対策として、機械的な接触を用いた振動抑制方法¹⁾が考えられる。しかし、鋼板の乾燥工程では、接触させたことで溶液が剥がれてしまう可能性がある。この対策として、電磁石の吸引力を用いた振動抑制方法²⁾がある。これは、電磁石の吸引力を調整し、振動を抑制する方法である。しかし、電磁石が固定されているため、大きな振動が発生した場合には対応できない。なぜなら、吸引力は空隙距離の2乗に反比例するため、十分な制御量を得るには、コイルに流す電流が大きくなり、コイルの発熱や耐久性に問題がでる。

本論文では、非接触かつ、広範囲の振動に対応するため、リニアアクチュエータの一種であるボイスコイルモータ（以下 VCM と表記する）と永久磁石を用いて製作した二つの試作装置より、非接触制振機構の有効性の検証について述べる。

2. 制振原理

2. 1 試作装置

永久磁石と VCM を用いた非接触制振機構の検証を行うため、Fig.1, Fig.2 に示すような実験装置を製作した。Fig.1 に示す装置は永久磁石の独立駆動方式による振動抑制装置であり、Fig.2 に示す装置は永久磁石の同時駆動方式である。

2.1.1 独立駆動方式による試作装置

Fig.1 に示すように、中心に Vibration body と表している弾性体（以下振動体と表記）で支持された部分を振動させ、左右にある VCM に取り付けられた永久磁石の駆動を制御し、振動を抑制する。装置の概要は以下に述べる通りである。装置の中心に吊り下げられた磷青銅板（190×50×0.2mm）2枚を平行ばね支持し、吸引力の効果が得られる位置に、鉄板を貼り付ける。その鉄板に左右対称になるように、永久磁石（Φ25×5mm）を取り付けた VCM を設置する。これにより、永久磁石を左右に駆動させることができる。また、振動体の上部には、強制外乱が発生するように DC モータを取り付ける。

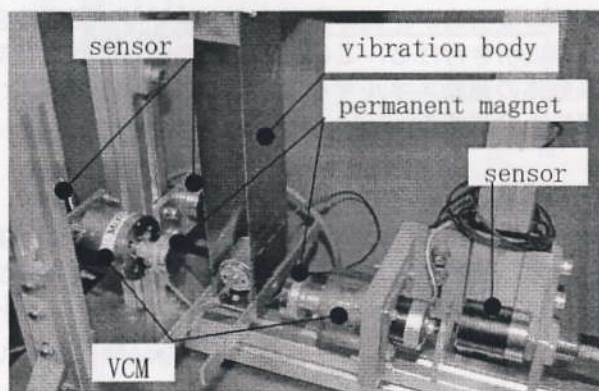


Fig.1 Experimental device of the independent drive type

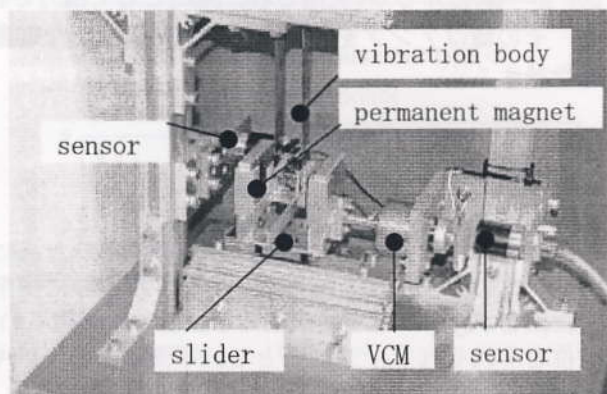


Fig.2 Experimental device of the simultaneous drive type

2.1.2 同時駆動方式による試作装置

次に Fig.2 に示す同時駆動方式による試作装置の解説を行う。装置の構成は、独立駆動方式による試作装置と比較すると、永久磁石の駆動方法以外、ほぼ一緒である。磷青銅板（190×20×0.3mm）により平行ばね支持した振動体と向かい合うように、コの字型のフレームを設置する。そのフレームの内両面に永久磁石（40×40×2mm）を取り付け、VCM と連結させる。振動体には永久磁石の吸引力の影響を受ける位置に電磁軟鉄を貼り付ける。しかし、このままでは、フレームの重量が重く、滑らかな駆動をせず、また、フレームを固定していないため、回転してしまうのを防ぐために、スライダに取り付け、滑らかな駆動ができるようにしている。

本論文では、主に独立駆動方式による試作装置を用いた検証を中心に述べる。

2. 2 制振原理

振動の抑制方法を Fig.3 に示す。まず、Fig.3 の上図のように、振動体が右側に振れると、左と右の永久磁石を VCM の駆動により右側に移動させる。すると、左側の永久磁石と振動体の距離（以下空隙距離と表記）が縮小し、左側の吸引力が右側の吸引力より強くなり、振動体を左側に引き付ける。次に、Fig.3 の下図のように、振動体が左側に振れると右と左の VCM によって永久磁石を左側に移動させ、右側の永久磁石と振動体の空隙距離が縮小することで、右側の吸引力が左側の吸引力より強くなり振動体を右側に引き付ける。この動作を繰り返し行うことで振動体の運動エネルギーを吸収し 0 に近づけることで、振動を抑制する。

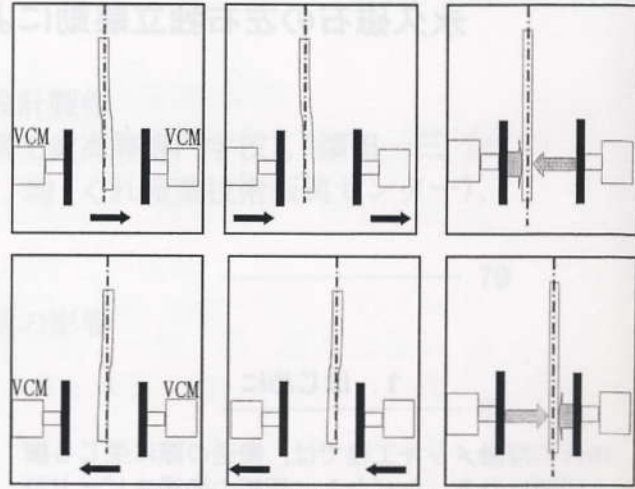


Fig.3 Method of controlling vibration

2. 3 制御コントローラ

本実験で使用する装置の制御コントローラを Fig.4 に示す。振動体と永久磁石を取り付けた VCM の変位を、渦電流変位センサにより計測し、DSP ボードを介し AD 変換を行い、PC 上に取り込む。取り込まれた値は MATLAB/Simulink というソフトウェアのプログラムによって計算処理を行い、処理された値は DSP ボードを介し DA 変換され、電圧として出力される。その値はアンプを介すことで VCM に適切な電源を供給する。

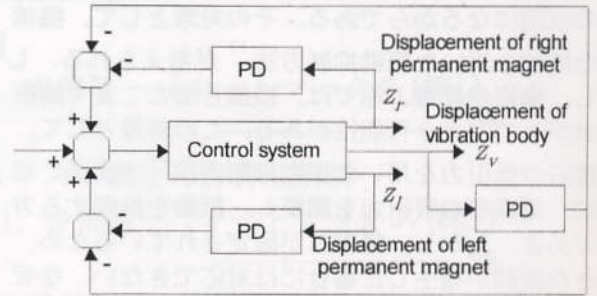


Fig.4 Block Diagram

3. モデル

3. 1 モデル化

実験を行うにあたり、最適な制御値を得るためにシステムのモデル化を行った。モデル化の際に使用した図を Fig.5 に示す。振動体と左右の永久磁石の変位をそれぞれ z_0 , z_r , z_l とし、平衡状態のエアギャップを d_r , d_l とする。振動体先端の質量を m_v とし、永久磁石の質量と VCM のコイルの質量をそれぞれ m_l , m_r とする。振動体、モータの減衰定数はそれぞれ c_v , c_r , c_l とする。また、振動体のばね定数を k_v とし、磁石定数を k とする。そして、左と右の吸引力定数をそれぞれ f_{ml} , f_{mr} 、左と右の VCM の駆動力をそれぞれ f_{vl} , f_{vr} とし、振動体の外乱を f_d とする。

3. 2 運動方程式の導出

振動体の運動方程式は通常のパネマス系と考え

$$m_v \ddot{z}_v + c_v \dot{z}_v + k_v z_v = f_{mr} - f_{ml} + f_d \quad (1)$$

となる。また、右と左の永久磁石も同様にそれぞれ、

$$m_r \ddot{z}_r + c_r \dot{z}_r + k_r z_r = -f_{mr} + f_{vr} \quad (2)$$

$$m_l \ddot{z}_l + c_l \dot{z}_l + k_l z_l = f_{ml} + f_{vl} \quad (3)$$

となる。次に、吸引力は 2 乗に反比例するという関係から、右と左の吸引力はそれぞれ、

$$f_{mr} = \frac{k}{(d_r + z_r - z_v)^2} \quad (4)$$

$$f_{ml} = \frac{k}{(d_l - z_l + z_v)^2} \quad (5)$$

と導出した。

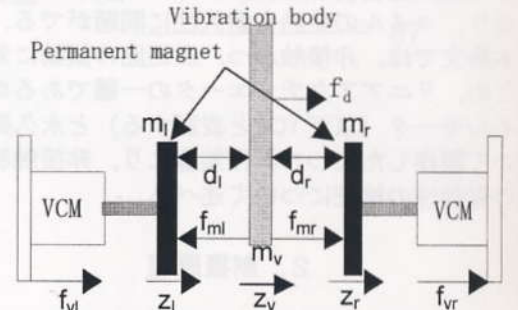


Fig.5 Modeling of system

3. 3 システムの線形化

最適レギュレータを用いて、システムの制御値を得るため、システムの線形化を行った。線形化後の吸引力は右と左それぞれ、

$$\Delta f_{mr} = k_m (z_r - z_v) \quad (6)$$

$$\Delta f_{ml} = k_m (z_v - z_l) \quad (7)$$

となる。ただし、 k_m は線形化後の吸引力定数で、

$$k_m = -\frac{2k}{d_0^3} \quad (8)$$

とする。線形化後の振動体の運動方程式は、

$$m_v \ddot{z}_v = -c_v \dot{z}_v - k_v z_v + k_m (z_r - z_v) - k_m (z_v - z_l) + f_d \quad (9)$$

となる。また右と左の運動方程式はそれぞれ

$$m_r \ddot{z}_r = -c_r \dot{z}_r - k_r z_r - k_m (z_r - z_v) + f_{vr} \quad (10)$$

$$m_l \ddot{z}_l = -c_l \dot{z}_l - k_l z_l + k_m (z_v - z_l) + f_{vl} \quad (11)$$

となる。これらの式から状態方程式を導き、最適レギュレータを用いて最適な制御値を得た。シミュレーションと実験を行う際、この制御値を使用し検証を行う。

4. 自由振動によるシミュレーション及び実験結果

本実験を行うと伴に、モデル化した運動方程式とブロック線図を元に、MATLAB/Simulink を用いて振動体と永久磁石の変位シミュレーションを行った。独立駆動方式による試作装置の振動体の振動は、初期変位 5mm を与え、自由振動させた場合で検証を行った。同時駆動方式による試作装置のシミュレーションでは、装置の構成上、初期変位を 3mm 与えた自由振動のシミュレーションを行った。それぞれ、振動を抑制しなかった場合と、振動を抑制した場合で比較を行った。そして、独立駆動方式におけるシミュレーションと同時駆動方式におけるシミュレーションの結果を比較した。

4. 1 自由振動におけるシミュレーション

シミュレーション結果を Fig.6, Fig.7, Fig.8 に示す。Fig.6 の結果は永久磁石の吸引力を利用しなかった場合のグラフであり、Fig.7 の結果は独立駆動方式による永久磁石の吸引力を利用した結果である。そして、Fig.8 に示す結果は同時駆動方式におけるシミュレーション結果である。グラフの横軸は時間(単位は sec)であり、縦軸は変位(単位は mm)である。Fig.6, と Fig.7, Fig.8 の結果を比較すると、Fig.6 の結果では、10 秒たっても振動体の変位は 0 に収束していないが、Fig.7, Fig.8 の結果では、2 から 3 秒程で振動体の変位が 0 に収束している。この結果から、吸引力の効果があると考えられる。また、Fig.7 と Fig.8 を比較すると、Fig.7 のシミュレーション結果の方が 1 秒ほど速く 0 に収束している。この結果から、永久磁石はそれぞれ独立させて駆動させた方が、吸引力の効果が生かせると考えられる。

4. 2 自由振動における実験結果

実験結果を Fig.9, Fig.10, Fig.11 に示す。Fig.9 の結果は振動抑制を行わなかった場合のグラフである。Fig.10 のグラフは独立駆動方式による振動抑制の実験結果であり、Fig.11 に示す結果は、同時駆動方式による実験結果のグラフである。Fig.10, Fig.11 のグラフは、1 秒から 5 秒までの結果を表示している。また同時駆動方式の実験結果では、初期変位 2 mm を与えた結果を表示している。まず、独立駆動方式による実験結果について述べる。Fig.9 と Fig.10 のグラフを比較すると、振動抑制を行わない場合のグラフは 10 秒を経過しても振動は停止していないが、振動抑制を行った場合、2 秒ほどで振動が停止していることがわかる。次に、同時駆動方式による実験結果では、振動抑制を行った場合の結果は、与えた初期変位は 2 mm であるが、振動体の変位は 1 秒ほどで 0 に収束した。このことから、永久磁石の吸引力の効果があることが確認することができた。また、独立駆動方式のシミュレーション結果と実験結果を比較すると、振動体の変位は良く似ているが、実験結果の方がシミュレーション結果より振動体の変位の収束が速かった。これは、正確なモデル化ができていないことが考えられる。

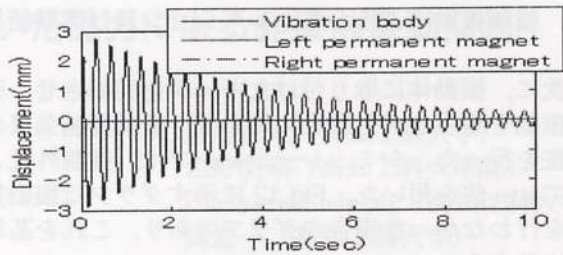


Fig.6 No vibration control

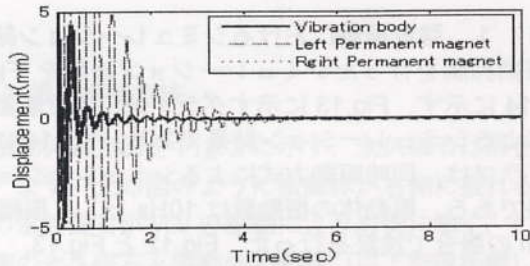


Fig.7 The independent drive type of vibration control

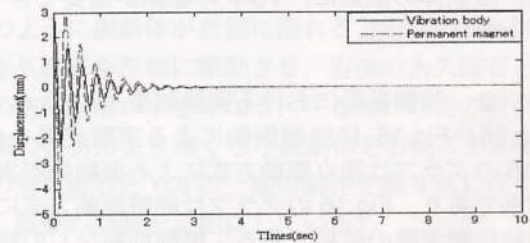


Fig.8 The simultaneous drive type of vibration control

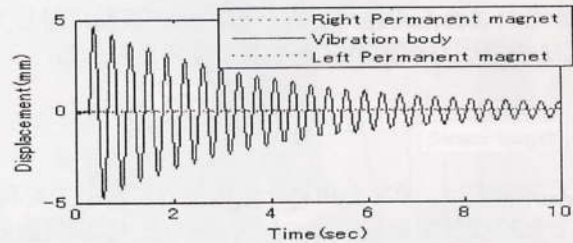


Fig.9 Experiment result of no vibration control

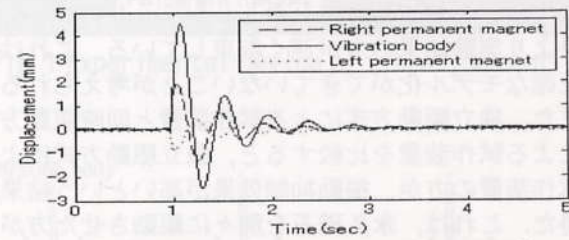


Fig.10 Experiment result of vibration control by independent drive type

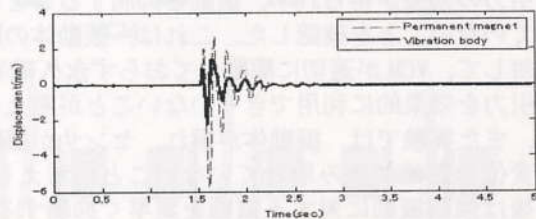


Fig.11 Experiment result of vibration control by simultaneous drive type

5. 強制振動によるシミュレーション及び実験結果

次に、振動体に取り付けたモータを回転させ、強制振動を発生させた振動に対して、振動抑制効果の検証を行った。シミュレーションでは、強制外乱として sin 波を用いた。Fig.12 に示すグラフは振動抑制を行わなかった場合のグラフであり、これを基準に比較する。

5. 1 強制振動におけるシミュレーション結果

振動抑制を行ったシミュレーション結果を Fig.13, Fig.14 に示す。Fig.13 に示すグラフは、独立駆動方式によるシミュレーション結果であり、Fig.14 に示すグラフは、同時駆動方式によるシミュレーション結果である。振動体の振動数は 10Hz とし、振幅は 1mm の場合で検証を行った。Fig.12 と Fig.13, Fig.14 のグラフを比較すると、振動体の振幅に変化がなく、振動を抑制できていないことがわかる。これは、振動体の振動に、VCM の駆動が追従できていないと考えられる。

5. 2 強制振動における実験結果

Fig.15, Fig.16 に強制振動による実験結果を示す。Fig.15 のグラフは独立駆動方式による振動抑制実験の結果であり、Fig.16 のグラフは同時駆動方式による振動抑制実験の結果である。振動抑制なしの結果と比較すると、シミュレーションと同様に、どちらも振幅に変化がなく振動を抑制できていないことがわかる。これらの結果から、振動体の振動に対して VCM の適切な駆動が必要であると考えられる。

6. おわりに

本実験では、VCM を用いた永久磁石の吸引力を利用した非接触制振機構について述べた。自由振動のシミュレーション結果と実験結果を比較すると、永久磁石の吸引力の効果が得られ、振動を効果的に抑制することができた。しかし、シミュレーション結果より実験結果の方が速く収束している。これは、正確なモデル化ができていないことが考えられる。また、独立駆動方式による試作装置と同時駆動方式による試作装置を比較すると、独立駆動方式による試作装置の方が、振動抑制効果が高いという結果を得た。これは、永久磁石を別々に駆動させた方が、滑らかな駆動ができると考えられる。次に、強制振動における実験結果とシミュレーション結果では、吸引力の効果が得られず、振動を抑制することができていないことを確認した。これは、振動体の駆動に対して、VCM が適切に駆動しておらず永久磁石の吸引力を効果的に利用できていないことが考えられる。また実験では、振動体が振れ、センサが振動体の変位を正確に読み取れていないことが考えられる。今後は強制振動に対する振動を素早く抑制するため、独立駆動方式による試作装置を用いて、有効性の検証を行う。

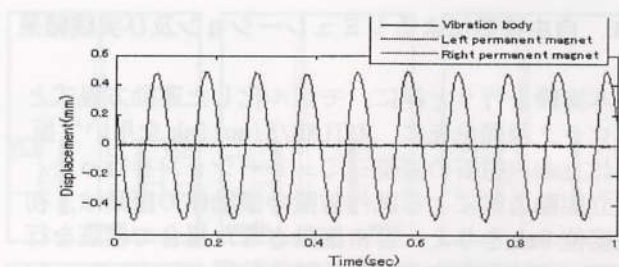


Fig.12 No vibration control

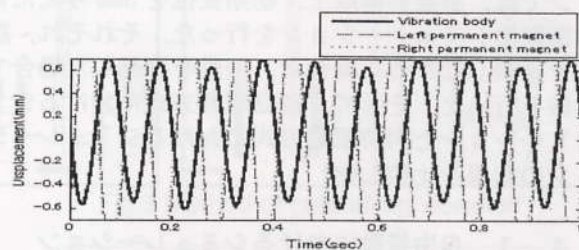


Fig.13 Experiment result of vibration control by independent drive type

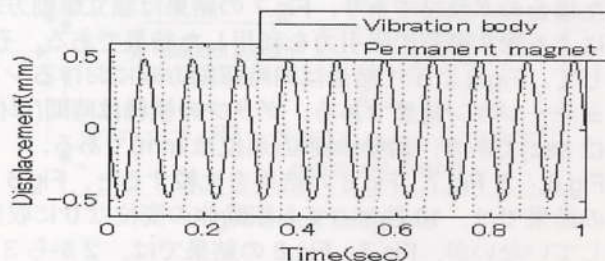


Fig.14 Experiment result of vibration control by simultaneous drive type

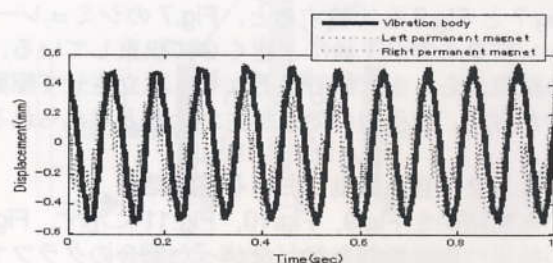


Fig.15 Experiment result of vibration control by independent drive type

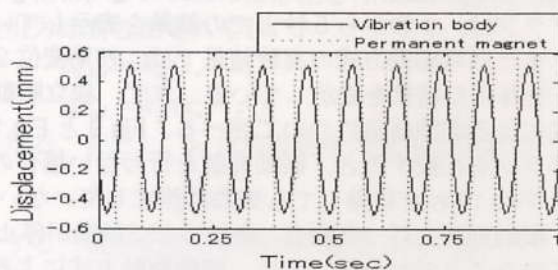


Fig.16 Experiment result of vibration control by simultaneous drive type

参考文献

- 1) <http://www.maruchikokan.co.jp/product/process.html>
- 2) http://www.shinko-elec.co.jp/NewsRelease/new_18.htm