

電 気 学 会 研 究 会 資 料

リニアドライブ研究会

LD-01-107~112

2001 年 12 月 7 日

社団法人 電 気 学 会

東京都千代田区五番町 6-2

リニア駆動永久磁石を用いた制振制御

岡 宏一
(高知工科大学)

Vibration Control with Linear Actuated Permanent Magnet,
Koichi OKA (Kochi University of Technology)

Abstract

This paper proposes a vibration control method which uses linear actuators and permanent magnets. The control forces of reducing vibration are generated by the attractive force of magnets and are adjusted by changing the air gap between the object and the magnets driven by linear actuators. The feature of this vibration control methods is that linear actuators control the generating forces and the range for control vibration is very wide. It will be verified that this new control methods is effective.

キーワード：制振制御，永久磁石，リニアアクチュエータ，吸引力制御
(vibration control, permanent magnet, linear actuator, attractive force control)

1. はじめに

薄板鋼板のメッキ工程などでは，その鋼板の搬送の際に生じる振動が問題となる．そのための対策として電磁石の磁気力を用いてその振動を制御しようとする試みが行われている．この制振方法の問題点の一つとして，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いことが挙げられる．本報告では，制御力の有効範囲を拡大するために，永久磁石とリニアアクチュエータを用いて鋼板に与える磁気力を制御し，制振する方法を提案する．リニアアクチュエータを用い，その制御範囲をアクチュエータの可動範囲とほぼ同程度にすることによって，より大きな振動に対応が可能な制振システムの開発を目標とするものである．しかし，この制振方法は，アクチュエータによる機械的な制御であるため，その遅れが問題となる可能性がある．電磁石のコイル電流を変化させるより，永久磁石の位置を変位させる方が遅いためである．

本報告では，リニア駆動永久磁石を用いた制振方法の研究の第一段階として，機械的な遅れを考慮した場合の制振性能について考察する．簡単な1自由度の対象物の振動を考え，その振動に対して機械的な遅れがある場合とない場合について制振性能を考察する．

2. 1自由度制振システムとそのモデル化

対象とするシステムは，Fig. 1 に示されるような1自由度の振動系である．対象物は回転の自由度を持つレバーであり，バネで支持されている．対象物は強磁性体であると考え，その両側から永久磁石の吸引力を加えられるような構造になっている．永久磁石はリニアアクチュエータによって上下に駆動される．

今回のシステムではバネによる振動を抑制するための条件について検討する．Fig. 1 のシステムでは，制御対象は回転運動を行うものであるが，簡単のために直線運

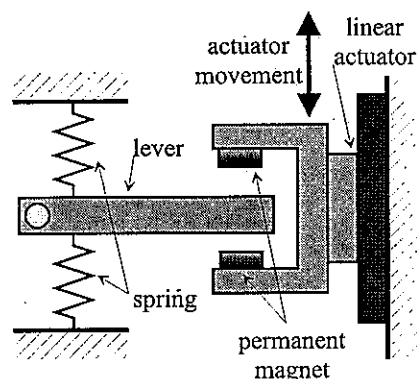


Fig. 1: Outline of the System

動をするものとしてモデル化する．用いる記号を， z_0 :対象物の変位， z_1 :磁石変位， k_s :対象物支持バネ定数， d_0 :平衡状態のエアーギャップ， k :永久磁石の定数， m_0 :対象物の換算質量， m_1 :永久磁石部の質量， k_r :対象物支持部の減衰係数，として，図中の上方向を正とすると，対象物の運動方程式は，

$$m_0 \ddot{z}_0 = \frac{k}{(d_0 - z_0 + z_1)^2} - \frac{k}{(d_0 + z_0 - z_1)^2} - k_s z_0 - k_r \dot{z}_0 \quad (1)$$

となる．永久磁石の動きは次のように，3つに分けて考察する．

- I. システムの入力は永久磁石部の位置である場合
 - II. システムの入力はアクチュエータへの位置指令であり，永久磁石位置はその入力に対し遅れがある場合
 - III. システムの入力は永久磁石への力と考える場合
- 以下ではそれぞれについて，線形化した状態方程式を求めシステムの特性を把握する．

2.1 システムの入力が永久磁石位置

このときは、遅れのないシステムということができる。
線形化した状態方程式は、

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + b_1 u_1 \quad (2)$$

ここで、状態ベクトルと入力はそれぞれ

$$x_1 = \begin{pmatrix} z_0 \\ \dot{z}_0 \end{pmatrix}, \quad u_1 = z_1$$

であり、

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{k_m - k_s}{m_0} & -\frac{k_r}{m_0} \end{pmatrix}, \quad b_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{k_m}{m_0} \end{pmatrix}$$

である。ただし、 $k_m = 4k/d_0^3$ である。

このシステムでは $k_s > k_m$ であれば、無制御で安定なシステムであり、通常の2次のシステムを力制御する形となっている。

2.2 システムの入力がアクチュエータ位置指令

アクチュエータの位置の指令から実際の動きまでの遅れの伝達関数 $G_a(s)$ が

$$G_a(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (3)$$

と与えられるとき、その状態方程式は状態ベクトルを $x'_2 = (z_0 \ z_0 \ z_1)$ とし、

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + b_2 u_2 \quad (4)$$

となる。ここで、

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_m - k_s}{m_0} & -\frac{k_r}{m_0} & -\frac{k_m}{m_0} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{pmatrix}, \quad b_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau} \end{pmatrix}$$

である。この場合も $k_s > k_m$ であれば安定である。

2.3 システムの入力が永久磁石への力

この場合には、永久磁石部の運動方程式が次式のように表せる。

$$m_1 \ddot{x} = -\frac{k}{(d_0 - z_0 + z_1)^2} + \frac{k}{(d_0 + z_0 - z_1)^2} + f_a \quad (5)$$

ただし、 f_a はシステムの入力であるアクチュエータの発生力である。このとき、状態方程式は、状態ベクトルを $x'_3 = (z_0 \ z_0 \ z_1 \ \dot{z}_1)$ 、入力を $u_3 = f_a$ とし、

$$\dot{x}_3 = A_3 x_3 + b_3 u_3 \quad (6)$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_m - k_s}{m_0} & -\frac{k_r}{m_0} & -\frac{k_m}{m_0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_m}{m_1} & 0 & \frac{k_m}{m_1} & 0 \end{pmatrix}, \quad b_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \end{pmatrix}$$

である。このシステムは入力を能動的に制御しない場合、 z_1 が不安定になる。

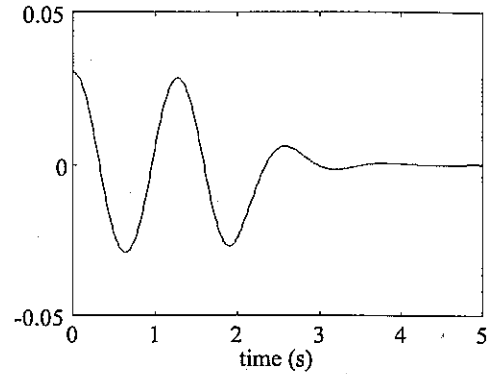


Fig. 2: Simulation I

3. シミュレーション

今回の報告では、上に述べた3つのシステムを比較する目的でシミュレーションを行う。制御システムは直結フィードバックを用いてPD制御を行うものとする。I, IIについては、Pゲインは0とした。シミュレーションは、最初対象物を平衡位置から0.3だけ変位させた状態から開放して自由振動させ、その2秒後から適当なゲインを与えて応答を観察した。

まず、遅れのないシステムIの応答をFig. 2に示す。図は横軸に時間、縦軸に対象物の変位を表している。図からわかるように2秒までは対象物が振動していることが確認される。その後は、平衡点に向かって収束していることがわかる。この結果永久磁石をリニアアクチュエータで制御して制振性能を高めることが可能であることがわかる。

次に指令値からアクチュエータまでの間に遅れがある場合のシミュレーション結果をFig. 3とFig. 4に示す。実線は対象物の動き、破線は永久磁石の動きである。

2つの図の違いは、Fig. 3は $\tau = 0.1$ であり、Fig. 4は $\tau = 1$ であることである。遅れのない応答であるFig. 2から、対象物の共振周波数はこの2つのシミュレーションの間にあることがわかる。また、永久磁石の動きは2秒の間は静止しており、2秒より後に制御動作に入っていることがわかる。

結果は予想される通り、アクチュエータの遅れが共振周波数より高いところにある $\tau = 0.1$ の場合は、遅れのないシステムとほぼ同じような結果を示した。しかし、アクチュエータの遅れが大きい $\tau = 1$ のシステムでは、永久磁石の動きが対象物の振動を抑制できていないことが確認される。この結果、遅れの大きいアクチュエータを用いることは制振性能に大きく影響することがわかる。

次にシステムの入力が永久磁石への力であるときのシミュレーション結果を、Fig. 5からFig. 7に示す。IおよびIIの実験では、システムが安定であったため、制御を行わないときには永久磁石を運動させる必要はなかつ

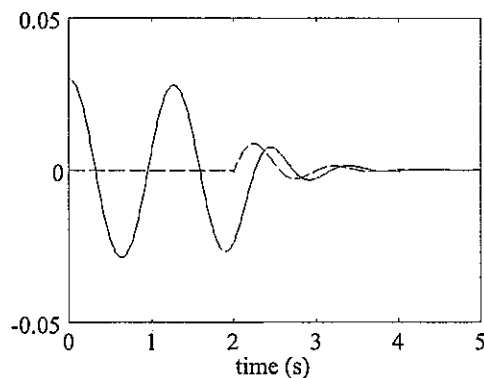


Fig. 3: Simulation II, $\tau = 0.1$

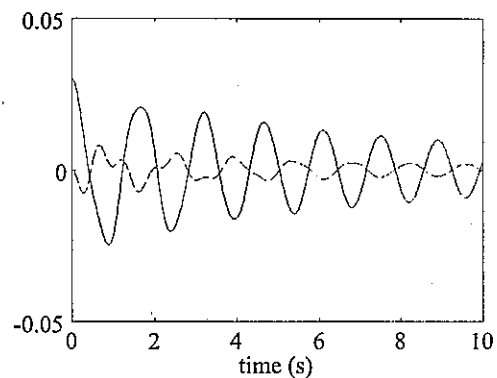


Fig. 5: Simulation III, $k_d = 0$

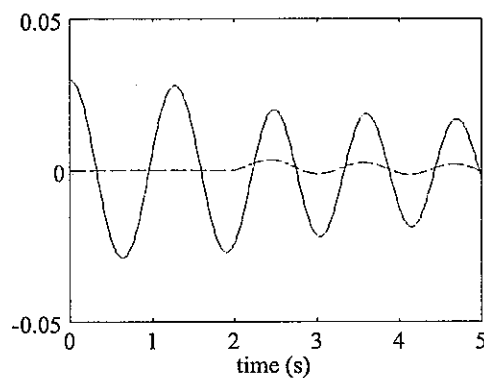


Fig. 4: Simulation II, $\tau = 1$

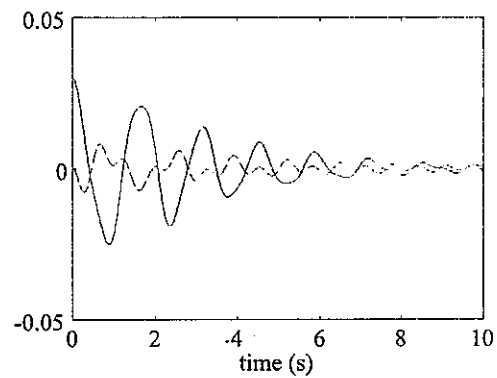


Fig. 6: Simulation III, $k_d = 3$

たが、III のシステムでは、元のシステムが不安定であるため制振制御を行わない場合でも安定化の制御が必要である。よってシミュレーションでも2秒までの間も永久磁石を安定化のために駆動している。

3つの図の違いは制振のためのフィードバックゲインの大きさである。Fig. 5は、制振のためのフィードバックゲインは0である。この図より、安定化の制御だけでも徐々に制振の効果があることがわかる。

Fig. 6は制振のためのゲインを与えた場合で、制御により制振効果があることがわかる。Fig. 6は、制振のためのより大きなゲインを与えたときのシミュレーション結果である。この図よりわかるように力を入力とするシステムでは大きな制御ゲインは不安定になることがわかる。

以上のシミュレーション結果より制御対象のモデル化により違いはあるが、提案した方法により対象物を制振することができる可能性があることがわかった。

4. おわりに

永久磁石とリニアアクチュエータを用いて、薄板の鋼板を搬送するときの1つの制振方法を提案した。提案し

た制御方式の特徴はその制御範囲を広くできる可能性があることである。この制振方法を用いた数値シミュレーションを行い、提案した制振方法の実際の応用への可能性を示した。

現在、このシステムのための実験装置を試作中である。今後の課題として、この実験装置を用いた実際の制振実験と平行し、より詳しいシステムの解析を行い非線形制御などを考慮した制御方法を検討することを行ってきたい。

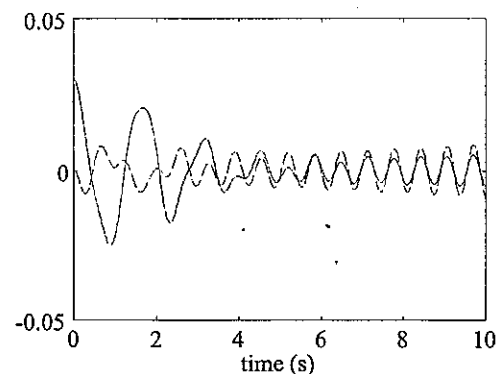


Fig. 7: Simulation III, $k_d = 6$

原稿受付日

平成13年11月19日