



制御教育教材としての磁気浮上系の製作

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-12-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 土井, 智晴, 大西, 規雄, 川谷, 亮次, 外川, 一仁 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00007771

制御教育教材としての磁気浮上系の製作

土井 智晴* 大西 規雄** 川谷 亮治*** 外川 一仁****

On an Electromagnetic Suspension System for a Control Education

Tomoharu DOI* Norio ONISHI** Ryoji KAWATANI*** Kazuhito TOGAWA****

ABSTRACT

From the stand point of control education, we consider an electromagnetic suspension system (EMSS). Our EMSS can be produced at a low price and is portable. Thought out a control synthesis of our system based on the linear control theory, we discuss an educational effectiveness.

Key Words: Control education, Electromagnetic suspension system, CAE

Linear control theory

1 はじめに

産業界における高速化、精密化技術は目覚ましい勢いで進んでおり、制御性能の向上はそのための中心的な課題の一つである。そのようななかで、各種のアドバンスな制御手法が多くの注目を集めている。古典制御理論から発展した現代制御理論に基づく制御手法については、実用化の際に問題となるモデルのもつ不確かさを許容するロバスト制御系設計手法の研究が多く行われ、¹⁾ 産業界もその動向に興味をもって観ている。したがって、産業界、研究機関から教育機関に対して、従来からの古典制御理論だけでなく現代制御理論などを含めた制御教育への要望は高い。

また、数多くの分野で技術革新をもたらすであろう技術のひとつに磁気浮上技術がある。磁気浮上技術とは電磁力を適当に制御して磁性体を非接触で支持する技術である。この技術を用いた応用例として、リニア

モーターや磁気軸受などがある。このように磁気浮上技術は高速化、精密化を実現するものであるが、そのためには高度な制御系の設計が要求される。

そこで、本研究ではそのような要求にこたえ、しかも工学部レベルの学生実験に利用できるような磁気浮上系(以下、EMSS: ElectroMagnetic Suspension Systemと略す。)の製作を行う。そのなかでは、学生実験装置として実現できる安価な実験装置の実現、それに対する現代制御理論に基づく制御系設計手順を述べ、最後にEMSSの工学実験としての適性やその教育効果について考察を行う。

2 磁気浮上系実験装置

今回製作したEMSS実験装置の概略図を図1に示す。駆動部には電磁石コイル(電榮社: SE-4-20D)とコイル電流サーボアンプ(サーボランド: SMCM2-AI)を用いている。浮上体の形状は直径 ϕ 60mm、厚さ16mmの鋼製円板で中心まで5.5mmの溝を切りアルミ製支持棒と接続し、他端は浮上体の浮上位置を検出するポテンシオメータ(緑測器: CP-2FA-8)に接続されている。

一般的なEMSS実験装置では浮上位置計測のセンサとして非接触式の渦電流式あるいはレーザ式変位センサ等を用いており、高価な構成となる。本研究ではポ

1995年4月10日受理

* 大阪府立工業高等専門学校 システム制御工学科

(Department of Systems and Control Engineering)

** 名古屋大学 (Nagoya University)

*** 長岡技術科学大学 (Nagaoka University of Technology)

**** 長岡工業高等専門学校

(Nagaoka National College of Technology)

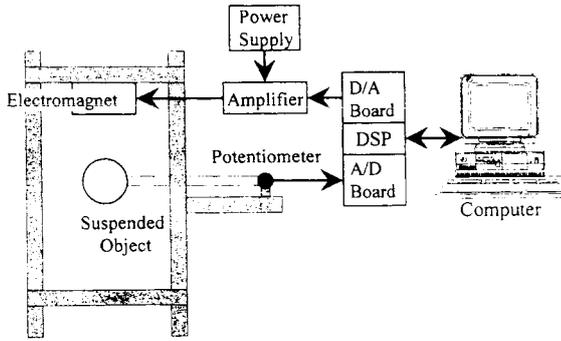


図 1 EMSS 実験装置

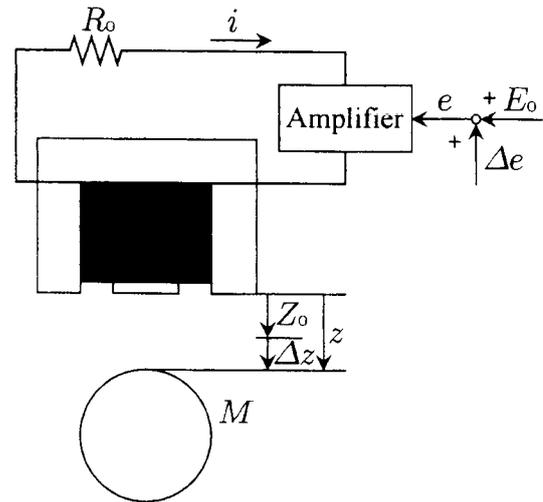


図 2 EMSS 回路図

テンショメータを用いた。これにより一般的な EMSS 実験装置のおよそ 1/3 のコストで実現が可能となる。

3 制御系設計

3.1 状態方程式の導出

図 2 の磁気浮上系に対して次の仮定をおく。

1. コイルコアおよび磁性体の透磁率は無限大。
2. コイルに磁気ヒステリシスは無い。
3. コイル内に生じる渦電流は無視できる。
4. 磁気回路の飽和は無視する。
5. 漏れ磁束は電流に比例する。
6. 空気の粘性は無視できる。
7. コイル電流は指令電圧に比例する。

これらの仮定の下で次式のような基礎方程式^{2),3)}を得る。

$$\ddot{\Delta z} = \frac{QI_0^2}{MZ_0^3}\Delta z - \frac{QI_0}{MZ_0^2}\Delta i \quad (1)$$

なお、数式中の記号の物理的な意味は、次節の表 1 に示す。

そして、次式のような状態空間モデルを得る。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (2)$$

ここで、

$$x = [\Delta z \quad \dot{\Delta z}]^T, u = \Delta i$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{21} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0]$$

$$a_{21} \triangleq \frac{QI_0^2}{MZ_0^3} > 0, b_2 \triangleq -\frac{QI_0}{MZ_0^2} < 0$$

$$Z_c = Z_\infty + Z_0$$

3.2 同定実験

式 (2) 中のパラメータ Q, Z_∞, R は同定実験により同定する。この同定実験方法の詳細については付録に示す。その他のパラメータは簡単な計測から求める。その結果を表 1 に示す。

3.3 制御対象の解析

次に式 (2) に対して安定性および可制御性、可観測性をそれぞれの定義に基づき確認する。そのなかで、状態量 $x \in \mathbb{R}^n$ 、操作量 $u \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 、観測量 $y \in \mathbb{R}^{l \times n}$ とする。なお、EMSS ではそれぞれ、 $n = 2, u = 1, y = 1$ となる。

EMSS の開ループ安定性を調べる。システム行列 A の固有値を求めると、

$$\text{eig}(A) = \pm\sqrt{a_{21}} = \pm 51.2325 \quad (3)$$

となり、正の極が存在する。したがって、EMSS は制御なしでは不安定な系とわかる。

表 1 EMSS のパラメータ

		Value	[unit]
Mass	M	0.2792	[kg]
Equ. position	Z_0	0.0053	[m]
Resistance	R_0	3.0	[Ω]
Coefficient of Amp.	R	1.7551	[Ω]
System para.	Q	2.1755×10^{-4}	[Hm]
System para.	Z_∞	2.1727×10^{-3}	[m]
Equ. current	I_0	1.1855	[A]

EMS が状態フィードバック制御で安定化可能かを調べる。次の可制御 ($n \times nm$) 行列

$$C_c \triangleq \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & \cdots & A^{n-1}B \end{bmatrix} \quad (4)$$

の階数 (rank) が (n) であることが、可制御のための必要十分条件である。したがって、

$$\text{rank}(C_c) = 2 \quad (5)$$

となり、可制御性が満たされていることがわかる。よって、状態フィードバックにより EMSS が安定化できることがわかる。

一般に状態すべてを観測できることは少なく、限られた観測量から観測できない状態を推定するオブザーバを構成する必要がある。次の可観測 ($nl \times n$) 行列

$$C_o \triangleq \begin{bmatrix} C & CA & CA^2 & \cdots & CA^{n-1} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

の階数 (rank) が (n) であることが、可観測のための必要十分条件である。EMSS について調べると、

$$\text{rank}(C_o) = 2 \quad (7)$$

となり、可観測性が満たされていることがわかる。これにより、可観測性からオブザーバによる状態推定が可能であることがわかる。

3.4 コントローラ的设计

状態フィードバックゲイン K と全状態オブザーバゲイン L を極配置法⁴⁾により設計する。

それぞれ閉ループ系の極とオブザーバの極を極配置法により指定し設計した。これらにより構成されるコントローラは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= (A - BK - LC)\hat{x} + Ly \\ \hat{u} &= -K\hat{x} \end{aligned} \quad (8)$$

3.5 コントローラの実装

ここでは閉ループ系の極 P_c 、オブザーバの極 P_o を次のようにする。

$$\begin{aligned} P_c &= \begin{bmatrix} -120 & -130 \end{bmatrix} \\ P_o &= \begin{bmatrix} -140 & -150 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

そして、それぞれの極から極配置法によりフィードバックゲイン K 、オブザーバゲイン L を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} K &= \begin{bmatrix} 290 & 23625 \end{bmatrix} \\ L &= \begin{bmatrix} 1101.6 & 15.1114 \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

そして、式 (8) で表現されるコントローラを、制御系 CAD である MATLAB⁵⁾ および SIMULINK⁵⁾ により実現した。なお、コントローラの離散化は、SIMULINK 上で自動的に行われている。なお、そのサンプリングタイムは 1msec である。

3.6 制御実験

安定浮上実験の実験結果を図3に示す。平衡位置を中心として 1mm, 6Hz 程度の持続振動をしているものの安定浮上していることがわかる。なお、この持続振動は本 EMSS 装置のポテンショメータに生じる固体摩擦の影響である。これは本装置の観測部をレーザ式変位センサを用いて同様の実験をおこない、持続振動がみられないことと固体摩擦を考慮した非線形シミュレーションにより確認した。

ステップ応答実験の実験結果を図4に示す。はじめギャップ長さを 0.0043m として制御を行い、2秒後に 0.001m の指令値を印可したときの応答波形である。縦軸に平衡点からの距離、横軸に時間をとっている。実線が実験、破線がシミュレーション結果である。この図より指令値にしたがって浮上体が安定に制御されていることがわかり、シミュレーションから EMSS のモデルの妥当性が高いこともわかる。これより、状態フィードバック+オブザーバという構造のコントローラにより EMSS が安定に制御されていることがわかる。

また、サンプリングタイムが安定性におよぼす影響を調べるために限界サンプリングタイムを実験により求めたところ、4msec であった。また、離散化モデルによる閉ループ系の極は 5msec を境に不安定極が生じることがわかった。これらにより EMSS の安定化制御には少なくとも数ミリ秒のサンプリングタイムが要求されることがわかる。

4 教育効果に対する考察

ここでは、その手順が工学実験として実現可能か、そしてその効果を考察する。

まず、実験装置の実現性は一般的な EMSS と比較して高いといえる。今回は使用したポテンショメータに問題があったが、摩擦トルクの小さいポテンショメータを使用することで改善できると考えられる。

工学実験としての実現性および教育効果であるが、これも他の制御対象 (例えば倒立振り子⁶⁾) と比較すると高いといえる。その理由は、本研究で用いた EMSS の状態方程式の次数が 2 次という点にある。2 次であれ

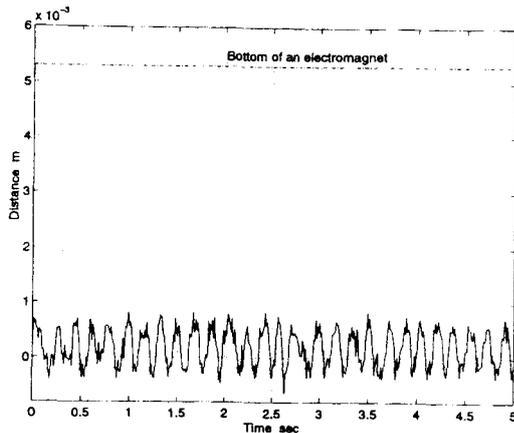


図3 安定化制御実験結果

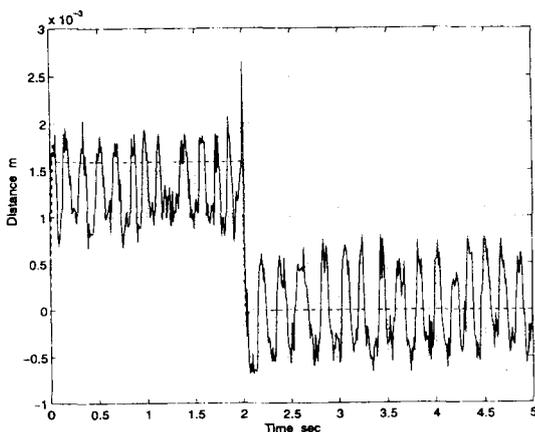


図4 ステップ応答実験結果

ばいくつかの理論計算は手計算が可能であり、物理的側面もとらえ易いと考えられる。また、それと並行あるいは単に制御系 CAD である MATLAB などを利用することにより理解を深めたり計算時間を短縮させることができ、実現性および教育効果を高めることが期待できる。

また、これらのことから工学実験にかぎらず EMSS は制御理論に関する講義のテーマ、制御系 CAD の導入テーマとしても適当であると考えられる。さらに、近年各種学校機関で進んでいる機械・電気・情報などの複合学科の卒業研究、あるいは1年間を通した実験実習のようなカリキュラムの範囲で考えると有意義なものとなる。なぜなら、2章では機械、電気工学と制御工学、3.1節は数学と物理工学、3.3節と3.4節では制御理論とコンピュータ演習、3.6節では言語教育およびハードとソフトのインターフェイスについて、というようにメカトロニクス関連の分野がほぼ包含されるからである。

これらのことから EMSS は制御教育教材として教育効果の高いものと考えられる。

5 おわりに

本研究では、工学実験装置として適当な安価な EMSS の製作を行った。また、現代制御理論に基づいて制御系を設計し、安定化実験、ステップ応答実験、限界サンプリングタイム測定を行った。そして、EMSS に対するそれらの手順が工学部レベルの工学実験に適していることを示し、制御教育の立場からみて非常にすぐれた対象であることも示した。

参考文献

- [1] 例えば、ミニ特集：ロバスト制御 - H^∞ 制御を中心にして、計測と制御, 29-2 (1990)
- [2] 電気学会・磁気浮上応用技術調査専門委員会, 磁気浮上と磁気軸受, コロナ社, 3/4 (1993)
- [3] 松村, 大振幅動作に適した磁気吸引つり下げ系, 電気学会論文誌 B, 99 25/32 (1979)
- [4] 増淵 正美, システム制御, コロナ社, 55/203 (1987)
- [5] The Math Works Inc., MATLAB and SIMULINK
- [6] 土井, 山崎, 川谷, 外川: 制御教育教材としての倒立振り子系の製作, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 講演論文集 94 Vol.B, 1057/1058 (1994)

付録

【コイルのパラメータ Q, Z_∞ の同定】

まず、 Z_0 を決定し、コイルと質量 M の浮上体の間に 1mm 厚程度のアクリル板をはさみ浮上体を吸引する。そして、アンプ指令電圧 (以下、電圧) を減少させてゆき、浮上体が落ちる瞬間の外部抵抗 R_0 の両端の電圧を測定し、その電圧から電流を求める。以下、適当な厚さのアクリル板で同様の実験を繰り返す。縦軸に電流、横軸にアクリル板の厚さとし、それらの点を通る直線の傾きと切片を求める。それらより次式を用いてパラメータ Q, Z_∞, I_0 を求める。

$$I_0 = \sqrt{\frac{2Mg}{Q}}(Z_0 + Z_\infty)$$

【アンプの電圧・電流変換係数 R の同定】

アンプ指令電圧 (以下、電圧) を 0V にして外部抵抗 R_0 の両端の電圧を測定し、その電圧から電流を求める。以下、電圧を適当に変えて同様の実験を繰り返す。縦軸に電圧、横軸に電流としそれらの点を通る直線の傾きがアンプの電圧・電流変換係数 R となる。