九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

1個の制御PMが極端にアンバランスな条件下での1/2 スケール制御PMLSM磁気浮上車の吸引浮上実験

吉田, 欣二郎 九州大学大学院システム情報科学研究院電気電子システム工学専攻

戴,政 九州大学大学院システム情報科学研究院電気電子システム工学専攻 :修士課程

高見, 弘 九州大学大学院システム情報科学研究院電気電子システム工学専攻

園田, 章浩 九州大学工学部電気情報工学教室

https://doi.org/10.15017/1474977

出版情報:九州大学大学院システム情報科学紀要.1, pp.111-116, 1996-09-27. 九州大学大学院システ ム情報科学研究院 バージョン: 権利関係:

1 個の制御 PM が極端にアンバランスな条件下での 1/2スケール制御 PM LSM 磁気浮上車の吸引浮上実験

吉田欣二郎* ·戴 政** ·高 見 弘* ·園 田 章 浩***

Attractive-Levitation Experiments of 1/2-Scale Controlled-PM LSM Maglev Vehicle Under an Extremely Unbalanced Condition of One Controlled-PM

Kinjiro YOSHIDA, Zheng DAI, Hiroshi TAKAMI and Akihiro SONODA

(Received June 24, 1996)

Abstract : This paper presents the local control approach for a 1/2-scale controlled-PM LSM Maglev test vehicle in our Laboratory. Under an extremely unbalanced condition of one controlled-PM of which a coercive force is reduced strongly, the 256 kg-heavy-vehicle has been levitated in a dynamically stable state with compensating slowly bending motions of the beams connecting the four controlled-PM's. Minimum power-loss control method for stationary levitation mode and constant-gap-control method for Maglev-starting and -stopping mode have been carried out by using an optimum robust control theory of the digital feedback levitation system. Experimental system is discussed and the experiment results are presented. It is also shown that the control system has provided minimum power-loss levitation and satisfied constant-gap control without noise.

Keywords : Controlled-PM LSM, Attractive-levitation, Local control method, Robust control, Minimum powerloss control

1. まえがき

地上一次形制御PM (Permanent-Magnet) LSM (Linear Synchronous Motor)磁気浮上車は,電力損失 のないPM の吸引力を浮上力として利用し,定格浮上ギ ャップで走行するとき浮上力はPM のみで供給される¹¹. 制御PM は同時に LSM の強力な界磁として作用し, LSM 推進力は磁気浮上車を走行させる^{2,31}.吸引力浮上 系は本来不安定な系であるため,PM 磁束制御用コイル に浮上電流を閉ループフィードバック制御して安定系と する⁴¹.上下方向の不安定な外乱が加わった場合の安定 な浮上システムの設計は,実用上最も重要な課題の一つ である.

本論文は、制御 PM LSM 磁気浮上モデル車に対して、 個別制御法(Local Control Method)を適用して、最適 ロバスト制御の浮上実験を行った。個別制御法は、非線 形浮上系の線形化近似解析に基づく、離散系のロバスト サーボ系構成理論を応用し、4 隅の制御 PM をそれぞれ 独立に制御する方法である⁵⁾.

1/2スケール磁気浮上モデル車の4隅には,10極の制御 PM がそれぞれ配置されている.しかし,何らかの原因で

*** 工学部電気情報工学教室

1個の制御 PM の磁束密度平均値は他の3個のものよ り約25%小さい。その結果として、同じエアギャップで も、この制御 PM は他の制御 PM の60%の浮上力しか発 生できない。このように1個の制御 PM が極端にアンバ ランスな条件の下において、個別制御法による磁気浮上 実験は、安定な磁気浮上を研究する上で非常に興味深い。 もしこの実験が成功すれば、適用したロバスト制御法は 非常に実用的であるという結論を得ることができる。

最適ロバストサーボ系は,目標入力に追従し,制御対 象である浮上系のパラメータ変動に対してロバストであ る利点がある.しかし外力に対するロバストサーボ系の 応答は,LSMのエアギャップ長と制御電流の少なくと もどちらか一方に定常偏差を生じ,両方の定常偏差を同 時に零へ制御することはできない⁴⁾.エアギャップ長の 定常偏差は安全走行の面から望ましくなく,また,制御 電流の定常偏差は車両の軽量化を図るのに必要な制御電 力損失の面から不利である.

ここでは、浮上モデル車が浮上開始位置から定格キャップまで浮上する動作は、浮上開始と呼ぶ。モデル車が 車重と釣り合う浮上状態から浮上開始位置に戻る動作は、 浮上停止と呼ぶ。また、浮上モデル車が釣り合う浮上状 態での動作は、安定浮上と呼ぶ。

浮上開始と停止の時,ギャップ偏差を零に収束する最 適浮上系を用いて,浮上モデル車を衝撃なく,ソフトに 浮上させ着地させる.定常安定浮上の時,制御電流を零

平成8年6月24日受付

^{*} 電気電子システム工学専攻

^{**} 電気電子システム工学専攻修士課程

に収束する最適浮上系を用いて、制御電力の消費を最小 化をする.このような最適ロバスト制御を施すことによ って、制御 PM が極めて強く減磁された危険な状態で も、実験モデル車は安定に浮上させることができること を明らかにする.

2. 解析モデル

Fig.1 は磁気浮上モデル車の写真である.磁気浮上モデル車は, Fig.2 に示すように,LSM 表面に対向して10 極構成の制御 PM が同一平面状に配置されており,各制 御 PM は,一次サスペンションを介して台車につながっ た構成である.基本的にモデル車は4 点支持方式の構造 をしており,垂直案内輪を停止時及び非常時用車輪とし て,PM による磁気吸引力を利用し,磁気吸引力と車重が 釣り合い,電力を消費することなく完全非接触の磁気浮 上を実現できる.

本解析では、左右両側および列車推進方向に分布する すべての制御 PM 系は全く同一の上下運動をするもの と仮定する⁴⁾.



Fig. 1 Controlled-PM LSM Maglev vehicle for experiment

上下方向の制御 PM の浮上力 F_z は, 文献 4), 6) に示 したように, エアギャップ長 δ , 制御電流 Λ の関数とし て求まる.ただし、スロットの影響はカーター係数 kc を 用いて補正する.台車の上下運動方程式は次式となる.

$$-\frac{M}{4}\frac{d^2\delta_i}{dt^2} = F_{z,i} - \frac{Mg}{4} + \frac{F_{z,ex}}{4}$$
(1)

ここで、 $F_{z,ex}$ は外乱として作用する。 浮上力の線形化した計算式は

$$F_{z,i} = \frac{F_{z0}}{4} + K_{FD}(\delta_i - \delta_{0i}) + K_{FI}I_{2i}$$
(2)

となる. ただし、 δ_{0i} は定格浮上ギャップ、 F_{z0} は定格浮 上力($F_{z0}=Mg$)、 K_{FD} 、 K_{FI} は線形化定数であり、次式に 求められる.

$$K_{FD} = \left(\frac{\partial F_z}{\partial \delta}\right)\Big|_{\delta = \delta_0, I_2 = 0}$$
$$K_{FI} = \left(\frac{\partial F_z}{\partial I_2}\right)\Big|_{\delta = \delta_0, I_2 = 0}$$

一方,制御コイル回路方程式は次式で表される.

$$L_2 \dot{I}_{2i} + K_{\dot{\delta}} \dot{\delta} + R_2 I_{2i} = e_c \tag{3}$$

Table 1Paramaters for experiment

Item	Symbol	Value
Vehicle mass	M	256(kg)
Rated airgap	δ_o	8.51(mm)
Primary spring constant	K_{s2}	$1.96 \times 10^4 (N/m)$
Primary damping con- stant	K_{d2}	3.04×10^{3} (Ns/m)
F_z coefficient linearized with respect to airgap	K_{FD}	-8.84×10^{4} (N/m)
F_z coefficient linearized with respect to controlled current	K_{FI}	8.17(N/A)
emf. factor	$K^{:}_{\delta}$	-8.03(V/m)
Inductance of controlled coil	L_2	1.44×10^{-3} (H)
Resistance of controlled coil	R_2	0.393(Ω)



Fig. 2 Levitation of Controlled-PM LSM model vehicle

(3)式において、 e_c は制御電圧、 L_2 は制御コイルの自 己インダクタンス、 R_2 は制御コイルの巻線抵抗、 K_i は δ に対する速度起電力係数である。以上の各パラメータ は Table 1 に示す。なお、(1)~(3)式の詳しい導出につ いては文献4)を参照のこと。

3. 制御系の設計

3.1 最適ロバスト制御

実験において,電力最小化最適浮上系による安定浮上 及びギャップ偏差を零に収束する定ギャップ最適浮上系 による浮上開始と停止の2つの動作モードがある.どち らの動作モードの設計も,制御対象システムに対して状 態フィードバックによる制御則を求め,そのゲインを決 定する.ロバストサーボ系構成理論を適用するため,(1) ~(3)式を定格浮上状態で線形化し,制御状態方程式を求 めると次式となる.

$$\begin{array}{c}
\dot{X} = AX + Bu + d \\
Y = CX
\end{array}$$
(4)

ここで、(4)式の状態変数を次に示す。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{4K_{FD}}{M} & 0 & -\frac{4K_{FI}}{M} \\ 0 & -\frac{K_{\delta}}{L_2} & -\frac{R_2}{L_2} \end{bmatrix}$$
(5)

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{L_2} \end{bmatrix}^{\mathsf{T}} \tag{6}$$

$$d = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{F_{z,ex}}{M} & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(7)

$$X = \left[\varDelta \delta_i \quad \varDelta \dot{\delta}_i \quad I_2 \right] \tag{8}$$

$$u = e_{ci} \tag{9}$$

サンプリング周期 $T_s \sigma(4)$ 式を離散化すると次式となる.

$$X_{k+1} = A_d X_k + B_d u_k + d_k$$

$$Y_k = C X_k$$
(10)

h

ただし、(10)式の離散系状態変数は次式で与える。

$$A_d = e^{AT_s}$$
$$B_d = \int_0^{T_s} e^{A\tau} d\tau \cdot B$$

~

 (10)式で表される線形浮上系に、Fig.3に示すような 演算時間遅れを考慮したフィードバック制御を施すと、
 出力 Y を指令値 r に追従させることができる。制御入 力電圧は

$$e_{c}(k+1) = -K_{F}X_{k} + K_{I}\sum(r_{k} - Y_{k})T_{s} - K_{u}e_{c}(k) \quad (11)$$

のように決定される。ただし、 r_k は目標値である。出力 Y_k と目標 r_k の偏差に対する積和演算によって、出力 Y_k を目標 r_k に定常誤差なく追従させることができる。

ここでは,最適ゲインの計算法について,簡単に述べる.離散形2次形式評価関数を

$$J = \sum_{k=0} (X_k^{\mathsf{T}} Q X_k + u_k^{\mathsf{T}} R u_k)$$
(12)

で表すと,評価関数を最小にする制御入力は

$$\begin{array}{c}
u_k = -F^* X_k \\
F^* = (R + A_d^{\mathsf{T}} S A_d)^{-1} A_d^{\mathsf{T}} S B_d
\end{array}$$
(13)

である. ここで, *S* は離散形リカッチ方程式を満たす正 定対称行列である.

$$S = Q + B_d^{\mathsf{T}} S B_d - B_d^{\mathsf{T}} S A_d (R + A_d^{\mathsf{T}} S A_d)^{-1} A_d^{\mathsf{T}} S B_d$$
(14)



Fig. 3 Discrete robust feedback control system

F*を用いて,離散形制御ゲインを次式によって計算する.

$$[K_F \quad K_I] = [F^* A_d^2 \quad F^* A_d B_d + F^* B_d + I] \Gamma^{-1} \quad (15)$$

$$K_u = F^* B_d + I \tag{16}$$

ただし,

 $\Gamma = \begin{bmatrix} A_d - I & B_d \\ C & 0 \end{bmatrix}$

3.2 定常浮上時の電力最小化ロバスト制御

電力最小化に基づく最適ロバスト制御系に対して、 $C = [0 \ 0 \ 1]$ とすると、出力は $Y_k = I_2(k)$ となる、フィードバックゲインを $K_1 \sim K_5$ とすれば、安定浮上モードの制御電圧式は次式で与えられる、

$$e_{ci}(k+1) = K_{1i} \varDelta \delta_i + K_{2i} \varDelta \delta_i - K_{3i} I_{2i} - K_{4i} \sum I_{2i}(k) T_s - K_{5i} e_{ci}(k) (i=1, 2, 3, 4)$$
(17)

ここで,

 $\Delta \delta_i = \delta_i - \delta_{0i}, \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & K_3 \end{bmatrix} = K_F, \\ K_4 = K_I, K_5 = K_u$

最適ゲインの計算には、MATLABを用いて行った. 得られた最適ゲインを基に、減磁された制御 PM3に対す るフィードバックゲインについては、繰り返し実験によ りわずかに調整して、実験用ゲインを決定した.

3.3 浮上開始と停止時の定ギャップロバスト制御

浮上開始と停止モードでは、制御 PM のコイル電流の 許容値内で、モデル車を衝撃なくソフトに浮上させ、浮 上開始位置に戻すことを目的として制御を行う。このモ ードでは、 $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ と選び、出力を $Y_k = \Delta \delta_i$ で与え る.

フィードバックゲインを *K*₁~*K*₅ とすれば浮上開始と 停止モードの制御電圧式は次式で与えられる.

$$e_{ci}(k+1) = K_{1i} \varDelta \delta_i + K_{2i} \varDelta \dot{\delta}_i - K_{3i} I_{2i} - K_{4i} \sum (\delta_i - \delta_{ri}) T_s - K_{5i} e_{ci}(k) (i=1, 2, 3, 4)$$
(18)

ここで、 δ_{ni} はギャップ目標値である。

安定浮上モードと同様に,MATALBによってゲイン を計算する.実験では,浮上モデル車をソフトに浮上開 始し停止させるため,ギャップ目標値 δ_nを,2秒間で静 止位置から定格ギャップ直線及び2秒間で釣り合いギャ ップから静止位置へ向かう2つの直線で与える.実験車 がそれぞれのギャップ目標値にうまく追従すれば,衝撃 のない浮上開始と停止が達成できる.この手法は,浮上 開始と停止における乗客の乗り心地に対しても非常に有 利である.

4. 実験システム

Fig.4に実験システムの構成を示す.浮上モデル車の 4隅の制御 PM の隣に,4組のレーザ変位型のギャップ センサがそれぞれ配置され,固定子レール下面との距離 を検出し,間接的に制御 PM と LSM 固定子表面間のエ アギャップ長をセンシングしている.制御 PM のコイル 電流は,微小抵抗を電流回路に挿入し,その電圧降下を 通して計測している.ギャップセンサと電流センサから の測定値は,制御プログラムに組み込まれた校正式によ り,実際値になるようにした.

制御演算には,NEC 製の PC9821 (CPU: Pentium75 MHz)を使用した. 電流とギャップのデータ取得,制御



Fig. 4 Levitation control system for experiment

演算と PWM コントローラへの指令電圧は全てこのコ ンピュータで処理する。また、制御サンプリング周期は 0.5ms とし、この時間内で制御演算を行うため、制御プ ロセス部はアセンブラ言語と8087専用アセンブラ言語を 用い、インタフェース部はC言語で処理するようにし た.

電流センサとギャップセンサを用いて,制御電流とエ アギャップを検出する。その情報は1サンプリング周期 毎に,A/Dコンバータを介して,パソコンに取り込ま れ,離散値系の制御式(17),(18)式により,指令電圧を 計算し,その値はD/Aコンバータを介して PWM コン トローラに送られる。

実験用の A/D と D/A コンバータの最高変換速度は それぞれ45 μ s (8CH) と20 μ s (4CH) である。現在,制 御則の処理時間は約120 μ s であり,サンプリング周期0.5 msec に対して十分容裕があるので,更に複雑な制御を 行うことが可能である。

PWM コントローラの直流入力電源として,24V のバ ッテリを用いている.また,制御 PM の制御コイルの最 大出力電流は制御 PM の巻線抵抗や PWM コントロー ラの MOSFET の電圧降下等により約40A に制限され ている.

4 個の制御 PM は, **Fig.2**のように進行方向に向かっ て前方左側から右側へ順に制御 PM 1, 2, 3, 4と呼 ぶことにする.実測により,制御 PM 3の磁束密度平均 値は他の3個の制御 PM と比べて約25%小さい.従っ て,制御 PM 3で発生する浮上力は他の3個の制御 PM の約60%しかない.また,浮上モデル車は完全な剛体で はなく,4個の制御 PM システムはそれぞれ異なる特性 を持つ.4個の制御 PM はフレキシブルなビームで連結 されていると考えられることができ,低周波な曲げ運動 を行いながら,それぞれ異なる浮上動作をすることにな る.特に制御 PM 3は弱いので,釣り合うギャップは他



---: Experimental airgap values

----: Reference values

の3つのギャップより小さく,釣り合う浮上状態で4個の制御 PM は平面にならない.

— 115 —

5. 実 験 結 果

実験では、個別制御法に基づき、目標ギャップに偏差 なく追従する最適浮上制御により、それぞれの車輪支持 ギャップから定格ギャップ δ_{0i} まで持ち下げ浮上開始モ ード制御を行い、実験車を2秒間でソフトに浮上させる。 浮上開始の2秒後、定常浮上モード制御に切り換え、電



Fig. 6 Measured currents of controlled-PM's

力損失を最小にしつつ実験車を120秒間安定に浮上させ る.その後,浮上停止モード制御に切り換え,実験車を 2秒間でソフトに初期ギャップに戻し,着地させる.4 個の制御 PM のギャップと電流の実験結果を Fig.5 に 示す.点線は,ギャップ指令値のパタンである.また, 制御 PM 3の保磁力は他の3 個の制御 PM と比べて小 さいので,制御 PM 3の定格ギャップ値は他の制御 PM の定格ギャップ値8.51mm より小さい値8.0mm とした.

浮上開始と停止モード制御の実験結果から,ほぼ定格 電流の1/2で浮上開始と停止が可能である。制御 PM 3 の保磁力は小さいので,制御 PM 3のギャップを8mm 前後の目標ギャップに追従させることができず,急にギ ャップが大きくなる傾向を示す。そのため,若干の振動 を生じ,電流の振動も発生する。しかし,上部支持ロー ラによる制限は,12mm であり,落下することはなく, 十分に余裕を持って浮上できている。一方,浮上停止モ ード制御で4個の制御 PM とも目標ギャップに追従し ながら,ソフトに軌道に戻る。その結果,制御回路の負 担を軽くして実験車に衝撃を与えることなくソフトに浮 上開始,停止制御が達成できた。

定常浮上モード制御に切換えた後,各制御 PM のコイ ル電流はほぼゼロに追従しており,電力最小化浮上制御 が実現されている.しかし,各制御 PM のギャップはゆ っくり周期的に変化しており,それに応じて電流もギャ ップの変化を打ち消すように,小さく同じ周期で変動す る.制御 PM 磁気浮上システムは,4個の制御 PM をビ ームで連結した柔軟な構造体である.そのため,釣り合 う浮上状態で4個の制御 PM は平面上に存在せず,低周 波数の曲げ運動によって上下運動を誘発する.提案した 個別制御法では,ビームの曲げ運動は外乱として作用し, これを除去するのはむずかしいことであるが,実験結果 より,定常安定浮上が達成できていることが判る.

また,実験車は6個のバッテリを搭載している.その うちの2個はセンサシステムと制御回路などの弱電用電 源として,残りの4個は制御 PM コイル駆動用電源とし て使われる.しかしながら,長時間の連続実験で,強電 用バッテリはまだ十分な電気量が残っているが,弱電用 バッテリが先に切れるという現象がしばしば起こった. これは,電力最小化制御を行うために,実験車の浮上電 力消費が非常に小さいことを証明した.一方,現在使用 中のセンサシステムの電力消費が問題であることも明ら かにした.

実験では電磁ノイズもほとんど発生せず,浮上開始と 停止の時における衝撃もなく,静かに,滑らかに車両を 制御することができた.

6. む す び

制御 PM LSM 磁気浮上実験車は,4隅に配置した制 御 PM を硬いビームで連結しているが,10mm 程度の高 精度なエアギャップ制御を伴う磁気浮上の観点からは, いわゆる取り扱いのむずかしい柔軟構造体である。特に, 制御 PM が極端にアンバランスな条件下における磁気 浮上車の安定浮上は,非常にむずかしい問題である.我々 は,今回1個の制御 PM が極端に弱いという厳しい条件 の下で,車重256kg の1/2スケール磁気浮上車の浮上実験 に成功した。これは,提案した制御法がこのシステムに 十分実用的であることを明らかにしたものである。定常 浮上は,動的に安定なものであって,制御 PM を繋ぐビ ームの低周波な曲げ運動を補償しながら,電力最小化制 御が実現された。

本制御法は、個別制御法を基礎として、最適ロバスト 制御法を適用し、定常安定浮上時に電力最小化制御を行 い、浮上開始と停止時に定ギャップ制御を組み込んだハ イブリッド制御である。実験車のように車重が大きいシ ステムでは、エアギャップ変動の大きい浮上開始と停止 のモードでは、定ギャップロバスト制御を適用する方法 が非常に重要であることが明らかになった。これによっ て、実験車を衝撃も電磁ノイズもなく、静かに、滑らか に離着地させる安定な浮上開始と停止の動作を実現した。

参考文献

- K. Yoshida and H. Weh: "Analytical Approach to Linear Synchronous Motors Excited Using Flat Type Controlled Permanent - Magnets", Proc. of ICEM, Lausance, pp. 173-176, 1984
- K. Yoshida, H. Takami, S. Ogusa and D. Yokota: "FEM Dynamics Simulation of Controlled-PMLSM Maglev Vehicle", Electric and Magnetic Fields, Plenum Press (book), pp. 327-330, 1995
- 吉田,高見,横田,西谷,園田:「制御 PMLSM 磁気浮上 モデル車の軌道追従制御 — 車重軽減モード走行における FEM シミュレーションと実験 — 」,電学論 D,115, pp.240 -248, 1995
- 吉田、年田:「制御 PMLSM 磁気浮上列車の浮上系の最適 ロバストサーボ系設計とシミュレーション」,電学論 D, 107, pp.972-979, 1987
- 5) 吉田,戴,園田:「制御 PMLSM 磁気浮上モデル車の浮上 開始及び停止実験」,平成8年電気学会全大,No.1114
- 6) 吉田,吉田,高見:「解析式と有限要素解析に基づく1/2ス ケール制御 PMLSM 磁気浮上車の推進力と浮上力の二次 元補間法」,九州大学工学集報,69巻3号,pp.285-292,1996