ME03の静止浮上時のピッチング制御

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部門

阪元,修一

九州大学大学院システム情報科学府電気電子システム工学専攻 : 修士課程

https://doi.org/10.15017/1525465

出版情報:九州大学大学院システム情報科学紀要.7(2), pp.149-154, 2002-09-26.九州大学大学院シ ステム情報科学研究院 バージョン: 権利関係:

ME03の静止浮上時のピッチング制御

吉田 欣二郎*•阪元 修一**

A Pitching Motion Control of ME03 at Standstill Levitation

Kinjiro YOSHIDA and Shuichi SAKAMOTO

(Received June 14, 2002)

Abstract: Marine-Express (ME) is a unique amphibious linear motor (LM) train which is able to run both on land and under the water. The third LM model train ME03, which is a 1/5-th scale land travelling model train composed of three vehicles, has been successfully levitated and propelled in repulsive-mode following very well the demand patterns for shuttle ground-flight. For much more speed-up, a pitching motion control is one of the most important problems to be solved.

This paper presents the experiments for the pitching motion control at the standstill. The LSM guideway is divided by section A and section B. An armature current is independently supplied to each section. The corresponding lift force is also produced independently on each section. A pitching motion can be controlled by making use of the lift forces in the section A and B. It is shown experimentally that the pitching motion can be suppressed effectively when the ME03 is controlled at the five kinds of typical locations.

Keywords : Linear motor train, Marine-Express, Pitching motion control

1. まえがき

筆者らは、車上にマグネット、軌道にコイルのみで構成する推進浮上兼用反発制御形 LSM¹⁾を提案し、実験車両 ME03²⁾ によって検証してきた.

ME03 は, PM 形リニア同期モータ (LSM) 方式水陸 両用列車マリーン・エクスプレス (ME)³⁾の陸上走行モ デル車の1/5スケールモデルである. ME03 は,車両が浮 上推進を行う際,電流と機械的負荷角によって,推進力 と浮上力を独立に制御するため,速度に無関係に走行停 止時から浮上できる⁴⁾. また,軌道はセクション A, B に 分割され,2台の汎用 PWM インバータと給電するセク ションを切り換えるためのスイッチ (セクションスイッ チ)を用いて複数のセクション間を走行できるシステム になっている.

本論文は, ME03 のセクション渡り時において, ピッチ ング制御を行う方法を提案し,基礎実験として静止浮上 時のピッチング制御実験を行ったものである. ME 03 の 浮上推進時に起こる車両重心周りの回転運動(ピッチン グ運動)は車両の浮上を不安定にするものであり, ME 03 が安定な浮上走行をするためにはピッチング運動の抑制 が必要である.提案するピッチング制御法は, 車両の PM がセクション A と B 上にある状態において, セクショ ン A, B での浮上力を制御することによって,抑制ピッ

平成 14 年 6 月 14 日受付

**電気電子システム工学専攻修士課程

チングトルクを発生させてピッチング制御を行うもので ある.

2. ME03の構造

Fig. 1 は ME 03 の写真である. 軌道は,全長が 10m のステンレス U 形軌道で,電機子コイルが軌道面上に設 置されている.また,側壁には案内分岐制御用コイルが 配置されている.地上 1.1mの位置に水平に固定された 軌道は,全長にわたってプラスチックのトンネルを設え ている.車両は 3 両編成で,全長約 220cm,1車両は 71 cm,幅約 50cm,高さ 35cm である.1車両の重さは約 47 kg,全車両で約 150kg である.ME03 は地上一次形リニ ア同期モータ方式である.

車両には N 極 S 極が交互に並ぶように PM が配置さ れており、軌道の電機子コイルには磁界が車両と同期し て移動するように三相交流電流を流す.この移動磁界を



Fig. 1 ME03 and its LSM guideway

^{*}電気電子システム工学部門

制御することにより、反発力の大きさと方向を変化させ、 車両の浮上・推進制御を独立に行う.また ME03は同期式 であるため、速度に依存しない浮上制御を行うことがで きる.

3. 制御における基礎式

3.1 推進力と浮上力の非干渉制御

Fig. 2(a)は ME 03 の PM LSM の解析モデルを示す. PM は保持力 H_c で z 方向に対して一様に磁化されてお り、移動子はx方向に同期速度で走行しているものとす る. 電機子電流の起磁力の基本波成分(MMF)₁ が、PM の起磁力の基本波成分 $H_{c1}(x)$ に対して、機械的負荷角 x_0 の位相距離だけ進んでいる場合の起磁力分布を Fig. 2(b)に示す.

ME03は、エアコア電機子コイルを有した反発形 PM LSM システムであり、推進力 F_x と浮上力 F_z は以下の ように解析的に得られる⁵⁾⁶⁾.

$$F_x = K_{F0}(\delta) I_1 \sin \frac{\pi}{\tau} x_0 \tag{1}$$

$$F_z = -K_{zS}(\delta) I_1^2 - K_{zMS}(\delta) I_1 \cos \frac{\pi}{\tau} x_0$$
(2)

ここで、 I_1 は電機子電流の実効値、r はポールピッチ (120mm)、 δ はエアギャップ長である.

$$K_{F0}(\delta) = K_{zMS}(\delta) = K_1 e^{-\frac{\pi}{\tau}\delta}$$
(3)

$$K_{zS}(\delta) = K_2 e^{-2\frac{\pi}{\tau}\delta} \tag{4}$$

であり、 K_1 、 K_2 は PM LSM の設計パラメータから得 られる定数である。(2)の第1項は電機子電流が PM ヨ ークを吸引する力であり、第2項は電機子電流と PM 間 に働く電磁力である。

(1), (2)より *I*₁と*x*₀を求めると,

$$I_{1} = \sqrt{\frac{1}{2K_{zMS}(\delta)} \frac{F_{x}^{2} + F_{z}^{2}}{F_{c} - F_{z}}}$$
(5)
$$x_{0} = \begin{cases} \frac{\tau}{\pi} \sin^{-1} \frac{F_{x}}{K_{F0}I_{1}}, & (I_{1} \neq 0, F_{z} \leq -K_{zS}I_{1}^{2}) \\ \tau - \frac{\tau}{\pi} \sin^{-1} \frac{F_{x}}{K_{F0}I_{1}}, & (I_{1} \neq 0, F_{z} \geq -K_{zS}I_{1}^{2}) \end{cases}$$
(6)
Arbitrary value $(L = 0)$

(Arbitrary value, $(I_1=0)$

ただし,

$$F_c = \frac{K_{F0}(\delta)^2}{2K_{zMS}(\delta)} = \frac{K_1^2}{2K_2} : \text{constant}$$

である.

本実験では推進力と浮上力の指令値 F_x , F_z から電機 子電流と機械的負荷角の指令値 L^* , x^* を, 演算が簡単に 行える(5), (6)の非干渉制御則に従って計算する.



(b) Mechanical load-angle Fig. 2 Model for analysis

3.2 推進力と浮上力の制御

反発浮上形 ME03を安定に制御するために,推進運動 と浮上運動に関する運動方程式に基づくフィードバック 制御により,推進力と浮上力の制御を行う.従って,推 進力と浮上力の指令値 F_x^* , F_z^* は次式によって求めら れる.

$$F_{x}^{*} = K_{xP} (x_{20} - x_{2}) + K_{xD} (v_{x20} - v_{x2}) + K_{xA} (a_{x20} - a_{x2}) + K_{xI} \int (x_{20} - x_{2}) dt + M a_{x20}$$
(7)

$$F_{z}^{*} = K_{zP} \left(\delta_{0} - \delta \right) + K_{zD} \left(v_{\delta 0} - v_{\delta} \right) + K_{zI} \int \left(\delta_{0} - \delta \right) dt + Mg + Ma_{\delta 0}$$
(8)

ここで、添え字の0は目標値であり、K はフィードバ ックゲイン、*a*_{x20} と *a*₈₀ はそれぞれ推進方向と浮上方向の 加速度目標値である.

3.3 電流の制御

ME03 の電流制御は高速高精度に電流制御可能な Intelligent-CCS⁷ により行う. Intelligent-CCS では軌道 の速度起電力を補償するだけでなく,その空間高調波成 分も考慮した次式のような電圧方程式を用いる.

$$\boldsymbol{v}_{s0}^* = r_s \boldsymbol{i}_s + L_s p \boldsymbol{i}_s + \boldsymbol{e}_s \tag{9}$$

$$e_a = v_{x2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ -n \, \frac{\pi}{\tau} \sin n \left(\frac{\pi}{\tau} x_2 + \phi_n \right) \lambda_{fn} \right\} \tag{10}$$

ここで、 λ_m は PM による n 次高調波の鎖交磁束数、 ϕ_n は位相差である.

また,電圧方程式のモデリング誤差を補償するために, 電流誤差に PI 制御を施した電圧をフィードバックする。 従って, Intelligent-CCS による電圧指令値は次式とな る.

$v_s^* = v_{s0}^* + \varDelta v_s$		(11)
$\Delta \boldsymbol{v}_{s} = K_{P} \left(\boldsymbol{i}_{s}^{*} - \boldsymbol{i}_{s} \right) + K_{I}$	$\int (\mathbf{i}_s^* - \mathbf{i}_s) dt$	(12)

4. セクション分割

ME03 の軌道は **Fig. 3** に示すようにセクション A と セクション B に分割している. セクション A のコイル はインバータ A から, セクション B のコイルはインバ ータ B から給電を行っている.

また,各セクションへの給電において,セクションス イッチによる切り換え制御を行っている.これにより, 車両のあるセクションにのみ給電することができ,運転 に関わっていないセクションへの不要な電力の削減が可 能である.

本論文では、このセクション切り換えによる不要電力 の削減のほかに、各セクションに別々な給電を行うこと で、より高度な制御を実現することを目的としている.



Fig. 3 ME03 control system for experiment

5. ピッチング制御

5.1 セクション渡りにおける制御

これまで,ME03の浮上走行実験においては車両がセ クションを渡る際に,セクションAとセクションBで 同じ電流の指令値により給電を行っていた。これに対し, 今回の実験においてはセクションA,Bに別々な電流を 給電している.これにより,ME03がセクションを渡る際 に,セクションA,Bでの浮上力を制御することによっ て,抑制ピッチングトルクを発生させてピッチング制御 を行うことが可能になる.

5.2 ピッチング制御式の導出

セクション渡りにおいて ME03 のピッチング制御を 行うために、車両の前方が存るセクションの推進力の指



Fig. 4 Model for analysis of pitching motion

令値 *F*^{**} と浮上力の指令値 *F*^{**}, 後方が存るセクション の推進力の指令値 *F*^{**} と浮上力の指令値 *F*^{**} に関して, **Fig.** 4 に示すピッチング運動の解析モデルを用いて等 式を導出する.

式(7),(8)の推進力の指令値と浮上力の指令値に次式 に示す回転方向のピッチングトルクの指令値

$$T^* = K_{\phi P} \left(\delta_R - \delta_F \right) + K_{\phi D} \left(v_{\delta R} - v_{\delta F} \right) + K_{\phi I} \int \left(\delta_R - \delta_F \right) dt$$
(13)

$$F_x^* = F_{xF}' + F_{xR}' = \varepsilon_1 F_{xF}^* + \varepsilon_2 F_{xR}^* \tag{14}$$

$$F_{z}^{*} = F_{zF}^{\prime} + F_{zR}^{\prime} = \varepsilon_{1} F_{zF}^{*} + \varepsilon_{2} F_{zR}^{*}$$
(15)

$$T^* = -D_1 F_{xF}' + D_2 F_{zF}' - D_3 F_{xR}' - D_4 F_{zR}'$$
(16)

ただし,

$$\varepsilon_{1} = \frac{L_{0} - L}{L_{0}}, \quad \varepsilon_{2} = \frac{L}{L_{0}}$$

$$D_{1} = \left(d\cos\phi - \frac{L}{2}\sin\phi\right), \quad D_{2} = \left(d\sin\phi + \frac{L}{2}\cos\phi\right)$$

$$D_{3} = \left(d\cos\phi + \frac{L_{0} - L}{2}\sin\phi\right),$$

$$D_{4} = \left(-d\sin\phi + \frac{L_{0} - L}{2}\cos\phi\right)$$

と表すことができる。また今回の実験では

$$F_{xF}^* = F_{xR}^* = F_x^* \tag{17}$$

という条件を加える.

(14)~(17)の4式より, *F*^{*}_z, *F*^{*}_z が以下のように導出 される.

$$F_{zF}^{*} = \frac{F_{z}^{*}D_{4} + F_{x}^{*}(\varepsilon_{1}D_{1} + \varepsilon_{2}D_{3}) + T^{*}}{\varepsilon_{1}(D_{2} + D_{4})}$$
(18)

$$F_{zR}^{*} = \frac{F_{z}^{*}D_{2} - F_{x}^{*}(\varepsilon_{1}D_{1} + \varepsilon_{2}D_{3}) - T^{*}}{\varepsilon_{2}(D_{2} + D_{4})}$$
(19)

6. 静止浮上時のピッチング制御実験

ME03 のセクション渡りにおける静止浮上時のピッチ ング制御実験を行った。車両には 5 極の PM が搭載され



Fig. 5 Five levitation patterns for experiments of ME03 train with one vehicle



Fig. 6 Experimental results without pitching control

ている。

ここでは車両前方がセクション B に,車両後方がセク ション A にあるとして, Fig. 5 に示す 5 つの場合にお いて静止浮上実験を行った.なお,(a) については,ピッ チング制御を適用する場合と適用しない場合の両方の実 験を行った.実験開始から 3 sec で目標浮上高さ10mm に到達, 7 sec まで静止浮上させる実験を行った.

F:R=1:1の場合における実験結果を Fig. 6, 7の (a)~(d)に示す.(a)は車両の前後でのギャップ長,(b)は ピッチング角を示す.ピッチング制御を適用した場合は, 適用しない場合に比べ,ギャップはほぼ安定しており, ピッチングもほとんど起こっていない.(c)は車両の前後

(セクション B, A) での電機子電流の測定値, (d)はピ ッチングトルクの指令値を示す. セクション A, B の電 流を別々に制御することにより,抑制ピッチングトルク を発生させていることが判る.

Fig. 8~11の(a)~(c)に各セクションの PM の比率が 3:2,2:3,4:1,1:4の場合における実験結果を示す。 前述の比率が等しい場合と比べて(c)の電機子電流の測 定値に大きな振動がみられる。しかし,抑制ピッチング トルクが同様に発生し,(a)の車両前後のギャップ長,(b) のピッチング角の結果から,車両位置が変わった場合に





(d)Command pitching torque









おいても、安定した浮上が行えていることが判る.

7. む す び

ME03 のセクション渡り時において, セクション A, B での浮上力を制御することで発生する抑制ピッチング トルクによるピッチング制御法を提案し,静止浮上によ る基礎実験によって検証した。ME03 の静止浮上時にお いて, ピッチング運動を抑制し,安定した浮上を行うこ とができた。また,セクションの継ぎ目で車両の位置を 変えた場合においても,提案するピッチング制御により ピッチング運動を抑制できた。

尚,本研究室では,すでに本論文で提案したピッチン グ制御を適用した浮上走行実験を行っており,静止時と 同様にピッチング制御ができ,これについては改めて発 表する予定である.







- 1) 吉田:「同期形リニアモータによる軌道車両の推進方法」,特 公,平成3年,No.1991-277-03
- K. Yoshida, H. Takami, N. Shigemi and Y. Nagano: "Repulsive-Mode Levitation Control during a Standstill of a Land Travelling Marine-Express Model Train ME03", Proc. of ISEM Seoul (book), pp.471-474, 1994.
- K. Yoshida, H. Muta and N. Teshima: "Underwater Linear Motor Car", Journal of Applied Electro-magnetics in Materials, Vol.2, pp.275–280, July, 1991.
- 4) 電気工学ハンドブック(第6版),電気学会、リニアモータと 磁気浮上(16編), pp.676-678, 2001年
- K. Yoshida and H. Weh: "A method of modeling permanent magnet for analytical approach to electrical machinery", Archiv fur Elektrotechnik, Vol.68, No.4, pp. 229, May, 1985.
- K. Yoshida and H. Weh: "Theory of Controlled-PM Linear Synchronous Motor", Tenth International Conference on Magnetically Levitated Systems (Maglev), pp. 281-298, June, 1988.
- K. Yoshida, H. Takami H. Mihara and H. Nonaka: "Levitation-and-Propulsion Motion Control of Intelligent-CCS Fed Land Travelling Marine-Express Model Vehicle ME03", Proc. of ICPE-Tokyo, Vol.1, pp. 725-730, 2000.