

## 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 LSM<sup>1)</sup> を提案し、実験車両 ME03<sup>2)</sup> 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ン・エクスプレス (ME)<sup>3)</sup> 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<sup>4)</sup>。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

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けている。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

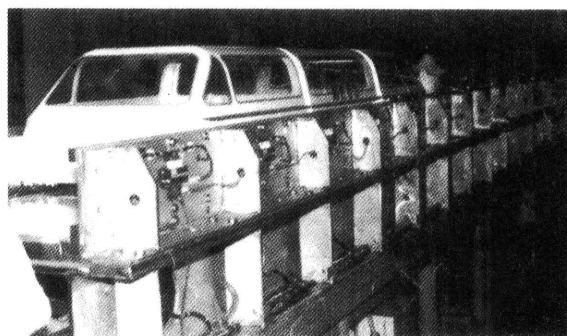


Fig. 1 ME03 and its LSM guideway

平成 14 年 6 月 14 日受付

\*電気電子システム工学部門

\*\*電気電子システム工学専攻修士課程

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<sup>5)6)</sup>。

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

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

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

また、

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

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

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 ヲ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、

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2K_{zMS}(\delta)} \frac{F_x^2 + F_z^2}{F_c - F_z}} \quad (5)$$

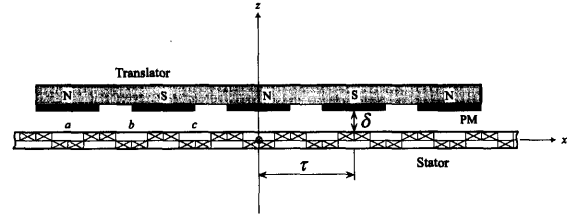
$$x_0 = \begin{cases} \frac{\tau}{\pi} \sin^{-1} \frac{F_x}{K_{F0} I_1}, & (I_1 \neq 0, F_z \leq -K_{zS} I_1^2) \\ \tau - \frac{\tau}{\pi} \sin^{-1} \frac{F_x}{K_{F0} I_1}, & (I_1 \neq 0, F_z \geq -K_{zS} I_1^2) \\ \text{Arbitrary value,} & (I_1 = 0) \end{cases} \quad (6)$$

ただし、

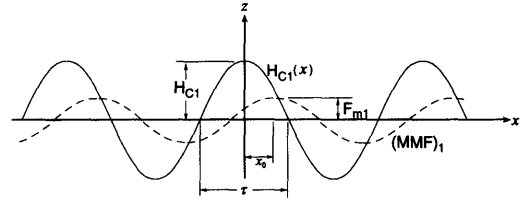
$$F_c = \frac{K_{F0}(\delta)^2}{2K_{zMS}(\delta)} = \frac{K_1^2}{2K_2} : \text{constant}$$

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  $I_1^*$ 、 $x_0^*$  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。



(a) Model for analysis



(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。

$$F_x^* = K_{xP}(x_{20} - x_2) + K_{xD}(v_{x20} - v_{x2}) + K_{xA}(a_{x20} - a_{x2}) + K_{xI} \int (x_{20} - x_2) dt + M a_{x20} \quad (7)$$

$$F_z^* = K_{zP}(\delta_0 - \delta) + K_{zD}(v_{\delta 0} - v_{\delta}) + K_{zI} \int (\delta_0 - \delta) dt + M g + M a_{\delta 0} \quad (8)$$

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  $a_{\delta 0}$  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-CCS<sup>7)</sup> 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。

$$v_{s0}^* = r_s i_s + L_s p i_s + e_s \quad (9)$$

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

ここで、 $\lambda_{fn}$  は PM による  $n$  次高調波の鎖交磁束数、 $\phi_n$  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。

$$\mathbf{v}_s^* = \mathbf{v}_{s0}^* + \Delta \mathbf{v}_s \quad (11)$$

$$\Delta \mathbf{v}_s = K_P (\mathbf{i}_s^* - \mathbf{i}_s) + K_I \int (\mathbf{i}_s^* - \mathbf{i}_s) dt \quad (12)$$

#### 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。

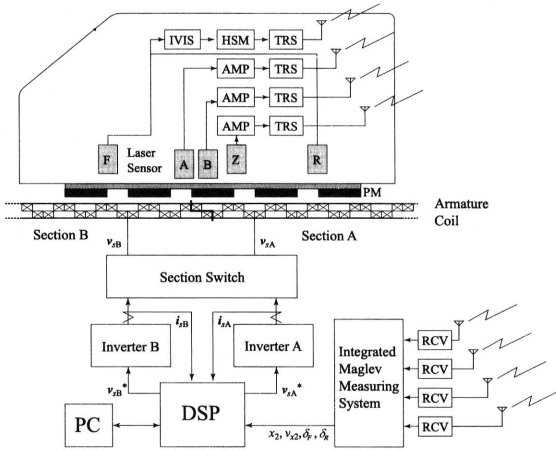


Fig. 3 ME03 control system for experiment

#### 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

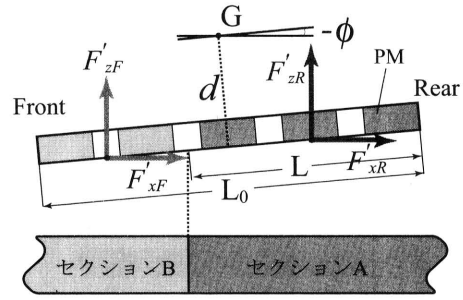


Fig. 4 Model for analysis of pitching motion

令値  $F_{xF}^*$  と浮上力の指令値  $F_{zF}^*$ 、後方が存るセクションの推進力の指令値  $F_{xR}^*$  と浮上力の指令値  $F_{zR}^*$  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

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

を考慮すると、Fig. 4より

$$F_x^* = F_{xF}^* + F_{xR}^* = \varepsilon_1 F_{xF}^* + \varepsilon_2 F_{xR}^* \quad (14)$$

$$F_z^* = F_{zF}^* + F_{zR}^* = \varepsilon_1 F_{zF}^* + \varepsilon_2 F_{zR}^* \quad (15)$$

$$T^* = -D_1 F_{xF}^* + D_2 F_{zF}^* - D_3 F_{xR}^* - D_4 F_{zR}^* \quad (16)$$

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

$$F_{xF}^* = F_{xR}^* = F_x^* \quad (17)$$

という条件を加える。

(14)~(17)の4式より、 $F_{zF}^*$ 、 $F_{zR}^*$ が以下のように導出される。

$$F_{zF}^* = \frac{F_z^* D_4 + F_x^* (\varepsilon_1 D_1 + \varepsilon_2 D_3) + T^*}{\varepsilon_1 (D_2 + D_4)} \quad (18)$$

$$F_{zR}^* = \frac{F_z^* D_2 - F_x^* (\varepsilon_1 D_1 + \varepsilon_2 D_3) - T^*}{\varepsilon_2 (D_2 + D_4)} \quad (19)$$

#### 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

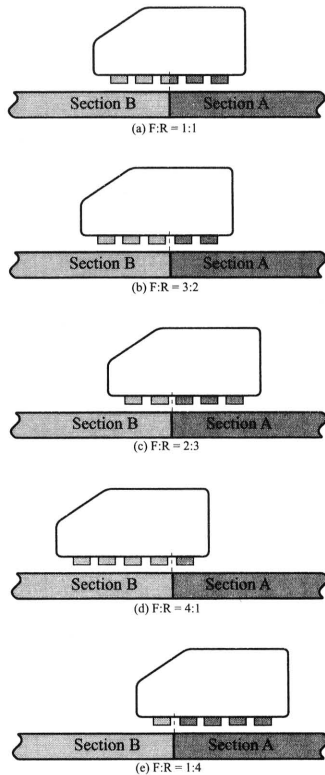


Fig. 5 Five levitation patterns for experiments of ME03 train with one vehicle

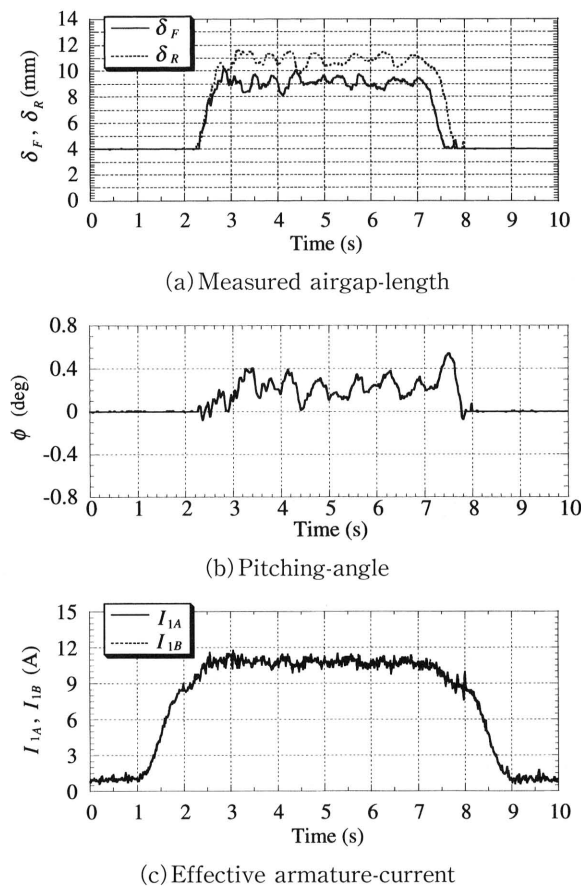


Fig. 6 Experimental results without pitching control

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

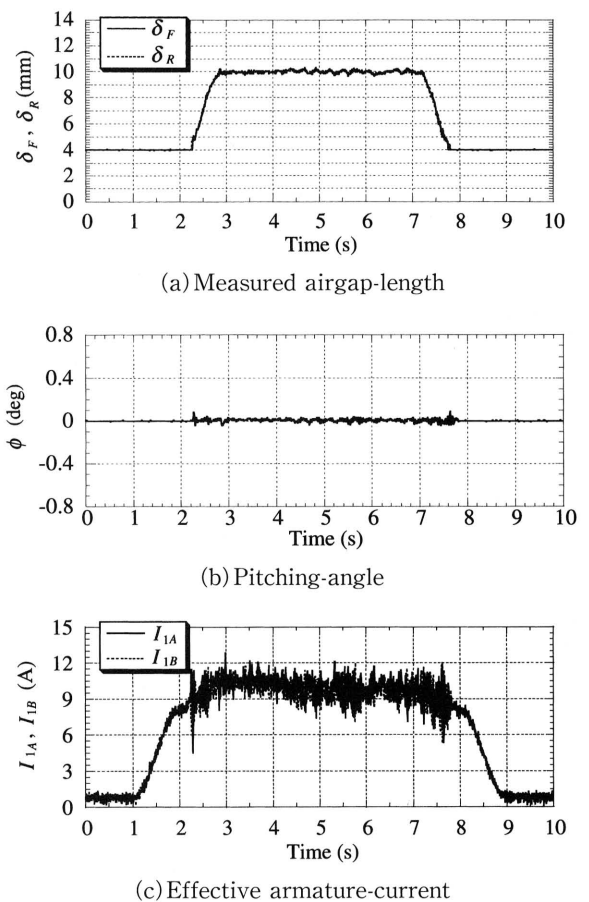
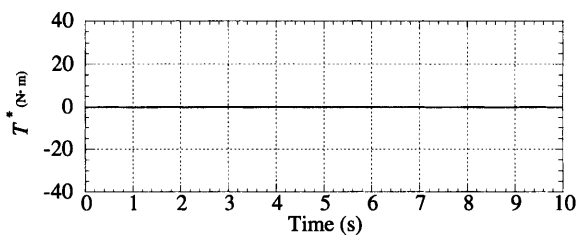
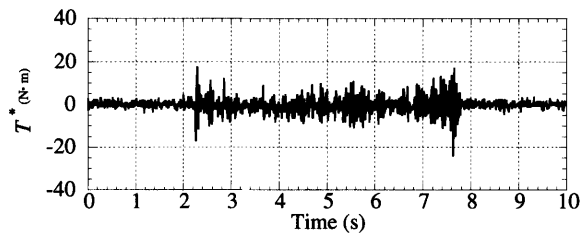


Fig. 7 Experimental results with pitching control (F : R = 1 : 1)



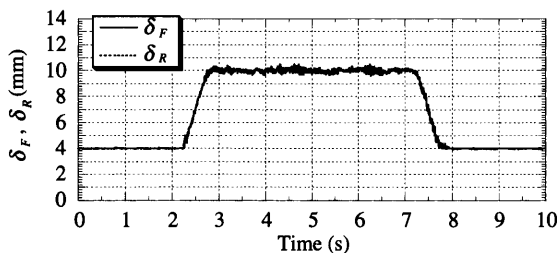
(d) Command pitching torque

Fig. 6 Experimental results without pitching control

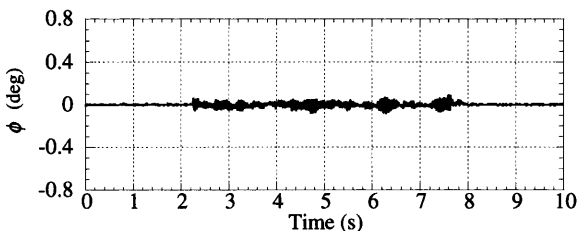


(d) Command pitching torque

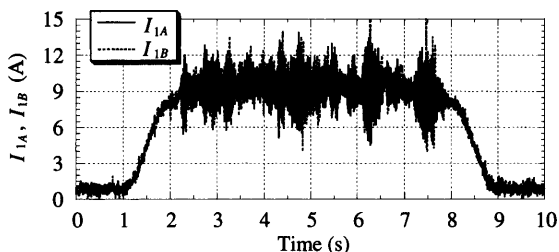
Fig. 7 Experimental results with pitching control (F : R = 1 : 1)



(a) Measured airgap-length

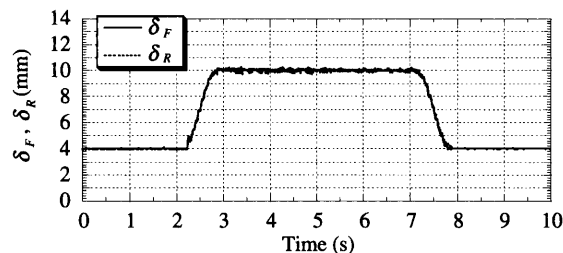


(b) Pitching-angle

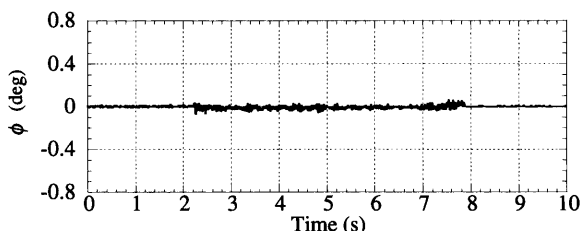


(c) Effective armature-current

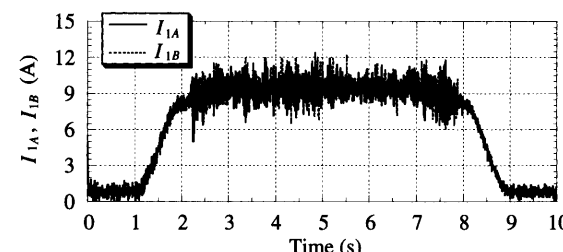
Fig. 8 Experimental results with pitching control (F : R = 3 : 2)



(a) Measured airgap-length

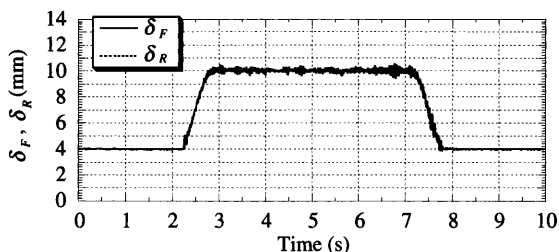


(b) Pitching-angle

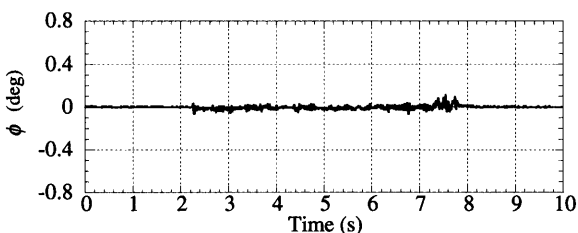


(c) Effective armature-current

Fig. 9 Experimental results with pitching control (F : R = 2 : 2)

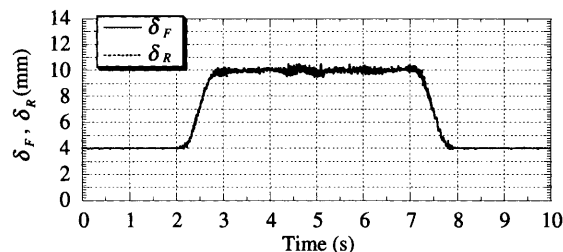


(a) Measured airgap-length

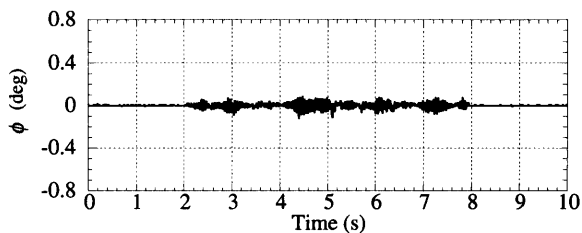


(b) Pitching-angle

Fig. 10 Experimental results with pitching control (F : R = 4 : 1)

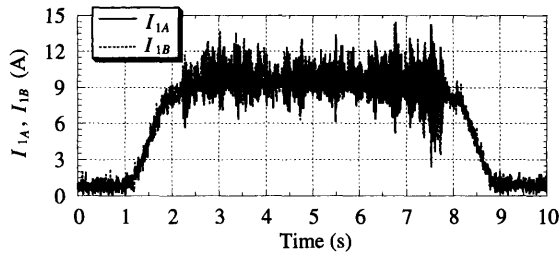


(a) Measured airgap-length



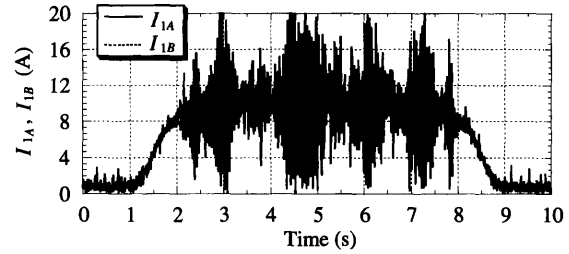
(b) Pitching-angle

Fig. 11 Experimental results with pitching control (F : R = 1 : 4)



(c) Effective armature-current

Fig.10 Experimental results with pitching control  
(F : R=4 : 1)



(c) Effective armature-current

Fig.11 Experimental results with pitching control  
(F : R=1 : 4)

においても、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。

## 参 考 文 献

- 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
- 2) 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.
- 3) 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
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.

