

浮上推進兼用SLIMの浮上力および推進力解析と脈動抑制制御

吉田, 敬

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

藤部, 秀章

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

袈裟丸, 勝巳

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

<https://doi.org/10.15017/1517955>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 14 (1), pp.19-24, 2009-03-26. 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 :

浮上推進兼用 SLIM の浮上力および推進力解析と脈動抑制制御

吉田 敬* · 藤部 秀章** · 袈裟丸 勝巳*

Analysis of Levitation and Propulsion Forces and Vibration Control Method of Combined-Levitation-and-Propulsion SLIM

Takashi YOSHIDA, Hideaki FUJIBE and Katsumi KESAMARU

(Received December 5, 2008)

Abstract: Based on the decoupled control method of levitation and thrust forces in a single-sided linear induction motor (SLIM), a compact combined-levitation-and-propulsion SLIM Maglev vehicle can be realized without any additional levitation magnet. When the vehicle runs, the levitation and propulsion forces varies depending on the phase of primary current because of the short primary end effect. Especially the fluctuation of the levitation force causes the vertical vibration of the vehicle. To realize a high performance levitation and propulsion control by only SLIM, these fluctuations must be restrained. In this paper, levitation and propulsion forces were analyzed by using space harmonic analysis method and combined-levitation-and-propulsion control taking the fluctuation of the levitation and propulsion forces into consideration was proposed. It was verified by simulation that a stable and high performance combined-levitation-and-propulsion control can be realized.

Keywords: Combined-levitation-and-propulsion, Levitation and propulsion forces, SLIM, Maglev, Short primary end effect

1. ま え が き

国内外で磁気浮上リニアモータは実用化され、いよいよ磁気浮上リニアモータの新時代が始まりつつある^{1), 2)}。磁気浮上リニアモータの中に片側式リニア誘導モータ (Single-sided Linear Induction Motor: SLIM) を用いたものがある。SLIMの特徴としては、リニア同期モータ (Linear Synchronous Motor: LSM) に比べ構造が非常に簡単であり、メンテナンスも容易でコストも非常に安いなどが挙げられる。しかし、SLIMの垂直力は一般に非常に大きい吸引力で、車両の速度、電源周波数などによって変化するため、この垂直力は等価車重を増大するもので、不要なものと考えられ全く用いられていない。従来のSLIM方式磁気浮上車は、SLIMによる推進システムの他に、別途磁気浮上システムが必要である³⁾。筆者らは、これまでにSLIMの吸引力を磁気浮上力として有効に用いたSLIM磁気浮上車の浮上推進兼用制御に関する研究を行ってきており、SLIMのみで浮上推進が可能であることを明らかにしてきた^{4) - 6)}。しかし、SLIMの電機子有限長による端効果の影響で、浮上力及び推進力は電機子電流の位相に依存し、電源の2倍の周波数で脈動する⁷⁾。特に、本システム

では、浮上と推進を兼用させるため、これらの脈動は乗り心地に悪影響を与える⁸⁾。本研究では、初めにSLIMに働く浮上力と推進力の解析を行い、これらの解析結果を基に推進力、浮上力の脈動を抑制する浮上推進兼用制御法の提案を行う。最後にシミュレーションにより提案する制御法の有用性を示す。

2. 浮上推進兼用 SLIM 磁気浮上車

Fig. 1は浮上推進兼用磁気浮上モデル車両を示す。車両の前後には、それぞれ独立した一次巻線が搭載されており、車両の全長は96 cm、車重は約42 kgである。軌道は、厚さ2 mmのアルミニウム板と厚さ5 cmの裏張り鉄板の複合二次導体であり、軌道全長は3 mである。本システム

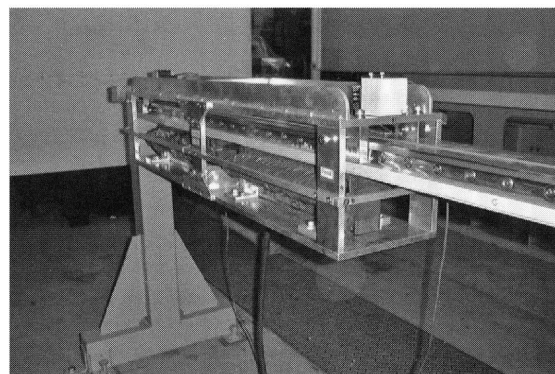


Fig. 1 SLIM experimental Maglev vehicle.

平成20年12月5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

Table 1 Specifications of SLIM Maglev vehicle.

item	symbol	value
number of pole	p	6
pole pitch	τ	51 mm
width of primary iron core	h	50 mm
width of slot	w_s	10 mm
slot pitch	t_s	17 mm
number of phase	m	3
number of slot per pole-phase	q	1
turns per phase	N_{ph}	300
thickness of secondary back-iron	d_1	50 mm
thickness of aluminum	d_2	2 mm

の最大の特徴は、SLIM に働く吸引垂直力を浮上力として用いることにより SLIM のみで浮上と推進を実現できることである。

エアギャップ長は、車両に取り付けられたガイドローラにより制限され、上部ガイドローラが軌道と接触したときエアギャップ長は 6 mm であり、下部ガイドローラが軌道と接触したときエアギャップ長は約 2 mm となる。

3. 浮上力および推進力

本 SLIM の最も大きな構造的特徴である短一次形による有限長起磁力の端効果により、浮上力及び推進力は電流の位相に依存し脈動する。そこで、短一次形による有限長起磁力の端効果を考慮できる空間高調波解析法⁹⁾を用いて、SLIM の浮上力および推進力の導出を行った。推進力 F_x と浮上力 F_z は、それぞれ次式で表される。

$$F_x = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{hLk_n^2}{\mu_0} [-k_{mfn}^2 K_{Hfnl} + k_{mbn}^2 K_{Hbnl} - k_{mfn} K_{mbn}] \times \{(K_{Hfnl} - K_{Hbnl}) \cos(2\omega_1 t) + (K_{HfnR} - K_{HbnR}) \sin(2\omega_1 t)\} \quad (1)$$

$$F_z = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{hk_l k_m}{4\mu_0} [P_{lm}(f_{z1} + f_{z4} + f_{z6} + f_{z7}) \times \sin(L/P_{lm}) + Q_{lm}(f_{z2} + f_{z3} + f_{z5} + f_{z8}) \times \sin(L/Q_{lm})] \quad (2)$$

ここで、 $2L_1$ はフーリエ級数展開の基本波長、 $k_n = -2\sqrt{2}I k_{wn} N_{ph} \mu_0 K_{Lpn} / n p \tau_{1n}$ 、 k_{mfn} 、 k_{mbn} は第 n 調波の相数係数、 τ_{1n} は第 n 調波に対する等価ポールピッチ、 K_{Hfn} 、 K_{Hbn} はそれぞれ第 n 調波のすべり周波数の関数で表される。また、SLIM のパラメータを **Table 1** に示す。さらに、各値は以下で表される。

$$P_{lm} = 2L_1 / \pi (l + m), \quad Q_{lm} = 2L_1 / \pi (l - m)$$

$$f_{z1} = K_{1clm} \cos(2\omega_1 t) + K_{1slm} \sin(2\omega_1 t)$$

$$f_{z2} = k_{mfl} k_{mfm} (K_{Hfl} K_{Hfml} + K_{Hbl} K_{Hbml} - 1)$$

$$f_{z3} = K_{3clm} \cos(2\omega_1 t) + K_{3slm} \sin(2\omega_1 t)$$

$$f_{z4} = k_{mfl} k_{mfm} (K_{Hfl} K_{Hbml} + K_{Hbl} K_{Hbml} + 1)$$

$$f_{z5} = K_{5clm} \cos(2\omega_1 t) + K_{5slm} \sin(2\omega_1 t)$$

$$f_{z6} = k_{mbl} k_{mfm} (K_{Hbl} K_{Hfml} + K_{Hbl} K_{Hfml} + 1)$$

$$f_{z7} = K_{7clm} \cos(2\omega_1 t) + K_{7slm} \sin(2\omega_1 t)$$

$$f_{z8} = k_{mbl} k_{mbm} (K_{Hbl} K_{Hbml} + K_{Hbl} K_{Hbml} - 1)$$

$$K_{1clm} = k_{mfl} k_{mfm} (K_{Hfl} K_{Hfml} - K_{Hbl} K_{Hfml} - 1)$$

$$K_{1slm} = k_{mfl} k_{mfm} (K_{Hfl} K_{Hfml} + K_{Hbl} K_{Hfml})$$

$$K_{3clm} = k_{mfl} k_{mbm} (K_{Hfl} K_{Hbml} - K_{Hbl} K_{Hbml} + 1)$$

$$K_{3slm} = k_{mfl} k_{mbm} (K_{Hfl} K_{Hbml} + K_{Hbl} K_{Hbml})$$

$$K_{5clm} = k_{mbl} k_{mfm} (K_{Hbl} K_{Hfml} + K_{Hbl} K_{Hfml} - 1)$$

$$K_{5slm} = k_{mbl} k_{mfm} (K_{Hbl} K_{Hfml} + K_{Hbl} K_{Hfml})$$

$$K_{7clm} = k_{mbl} k_{mbm} (K_{Hbl} K_{Hbml} + K_{Hbl} K_{Hbml} - 1)$$

$$K_{7slm} = k_{mbl} k_{mbm} (K_{Hbl} K_{Hbml} + K_{Hbl} K_{Hbml})$$

このとき、三相電流は次式で定義される。

$$i_u = \sqrt{2} I_1 \cos(\omega_1 t')$$

$$i_v = \sqrt{2} I_1 \cos(\omega_1 t' - 2\pi/3)$$

$$i_w = \sqrt{2} I_1 \cos(\omega_1 t' - 4\pi/3)$$

$$\omega_1 t' = \omega_1 t - 2\pi/3$$

ここで、推進力と浮上力を定常項（時間平均）と時変項（脈動）に分けると、

$$F_x = F_{xa} + F_{xt} = F_{xa} \{1 + A_x \cos(2\omega_1 t - \theta_x)\} \quad (3)$$

$$F_z = F_{za} + F_{zt} = F_{za} \{1 + A_z \cos(2\omega_1 t - \theta_z)\} \quad (4)$$

ここで、

$$F_{xa} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{hLk_n^2}{\mu_0} (-k_{mfn}^2 K_{Hfnl} + k_{mbn}^2 K_{Hbnl}) \quad (5)$$

$$F_{xt} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{hLk_n^2}{\mu_0} k_{mfn} k_{mbn} \{(K_{Hfnl} - K_{Hbnl}) \cos(2\omega_1 t) + (K_{HfnR} - K_{HbnR}) \sin(2\omega_1 t)\}$$

$$= \sqrt{(\sum_{n=1}^{\infty} A_{cx})^2 + (\sum_{n=1}^{\infty} A_{sx})^2} \cos(2\omega_1 t - \theta_x) \quad (6)$$

$$A_x = \sqrt{(\sum_{n=1}^{\infty} A_{cx})^2 + (\sum_{n=1}^{\infty} A_{sx})^2} / F_{xa} \quad (7)$$

$$\theta_x = \frac{1}{2} \tan^{-1}(\sum_{n=1}^{\infty} A_{sx} / \sum_{n=1}^{\infty} A_{cx}) \quad (8)$$

$$F_{za} = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{hk_l k_m}{4\mu_0} [P_{lm}(f_{z1} + f_{z6}) \sin(L/P_{lm}) + Q_{lm}(f_{z2} + f_{z8}) \sin(L/Q_{lm})] \quad (9)$$

$$F_{zt} = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{hk_l k_m}{4\mu_0} [P_{lm}(f_{z1} + f_{z7}) \sin(L/P_{lm}) + Q_{lm}(f_{z3} + f_{z5}) \sin(L/Q_{lm})]$$

$$= \sqrt{(\sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_c)^2 + (\sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_s)^2} \cos(2\omega_1 t - \theta_z) \quad (10)$$

$$A_z = \sqrt{(\sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_c)^2 + (\sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_s)^2} / F_{za} \quad (11)$$

$$\theta_z = \frac{1}{2} \tan^{-1}(\sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_s / \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_c) \quad (12)$$

A_x , A_z はそれぞれ推進力, 浮上力の時間平均値に対する振幅率を表し, $\omega_1 t = \theta_x$ のとき推進力は最大値となり, $\omega_1 t = \theta_z$ のとき浮上力は最大値となる. また, 推進力および浮上力は (5), (6), (9), (10) 式のように無限個の級数和の形で表されるが, 実際特性評価は有限個の繰返し計算で十分であり, 本解析では l , m ともに 1000 回までの繰返し計算を行っている.

Fig. 2 は, 一次電流実効値 1 A, ギャップ長 4 mm のときのすべり周波数 sf に対する SLIM の時間平均推進力, 時間平均浮上力の空間高調波解析による解析結果と基本波解析による解析結果を示す. 基本波解析とは, 起磁力の基本波成分のみを考慮した解析法であり, 後述するように実際は推進力, 浮上力ともにすべり周波数のみならず速度にも依存するが, これを考慮できない反面計算が非常に簡単である. 実線は基本波解析, 点線は速度 0 m/s のときの高調波解析, 一点鎖線は速度 0.5 m/s のときの高調波解析結果を示す. 時間平均推進力は速度による依存性がほとんど見られないことが判る. また, 基本波解析と高調波解析の結果も非常によく一致している. 時間平均浮上力については速度による依存性が多少見られるが, その差は最大でも 3% 程度である. また, 基本波解析と高調波解析の誤差もみられ, 解析した範囲内での最大誤差は 10% 程度である. ただし, 実際走行させた場合の動作範囲内では誤差は 6% 程度である.

Fig. 3 は, 一次電流実効値 1 A, ギャップ長 4 mm, 速度 0.5 m/s, 電源周波数 10 Hz のときの電流位相 $\omega_1 t'$ に対する SLIM の浮上力, 推進力の解析結果を示す. 推進力, 浮上力ともに電源周波数の 2 倍周期で脈動していることが判る.

4. 浮上力推進兼用制御

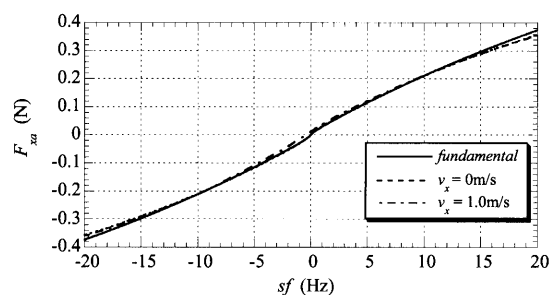
従来の浮上推進兼用制御法と比較しながら, 提案する SLIM の推進力, 浮上力の脈動を抑制する制御法について述べる.

4.1 従来の浮上推進兼用制御

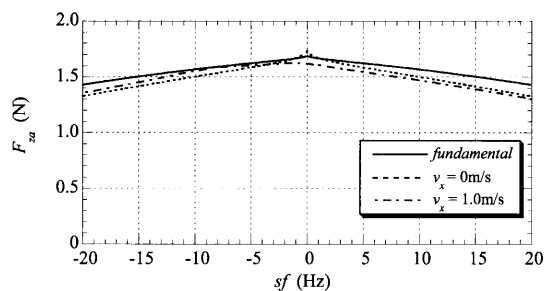
従来は, 基本波解析の結果を基に浮上推進兼用制御を構成している¹⁰⁾. 基本波解析によると, SLIM の推進力, 浮上力とともに, 一次電流の実効値 I_1 , すべり周波数 sf , エアギャップ長 g の関数で表されることが解析的に求まる. 従って, 必要な推進力, 浮上力が決まり, 現在のエアギャップ長を計測すれば, 一次電流の実効値およびすべり周波数が逆問題を解くことにより計算される. つまり, 目標通りの浮上走行を行うのに要求される浮上力, 推進力に対し, 一次電流に流すべき電流が一意に求まる.

4.2 提案する浮上推進兼用制御

速度を速くすると, 端効果の影響により速度による依存性が大きくなることが知られているが, 通常は, 端効果の



(a) Average propulsion force



(b) Average levitation force

Fig. 2 Average propulsion and levitation forces.

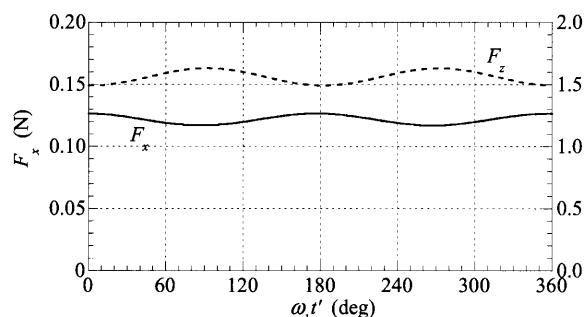


Fig. 3 Propulsion and levitation forces depending on primary current phase.

影響が出ない領域で使用するため, 本研究では, 推進力, 浮上力ともに時間平均値に関しては速度には依存しないものとする.

Fig. 4 は, 浮上力および推進力の脈動を考慮した浮上推

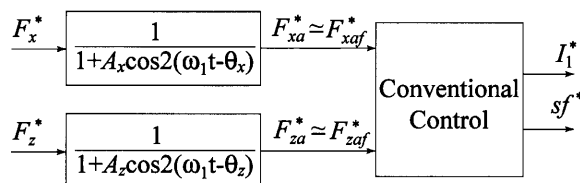


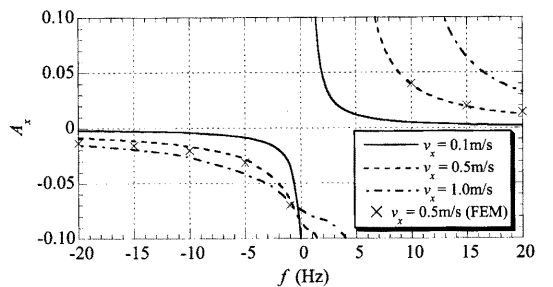
Fig. 4 Proposed combined levitation and propulsion control.

進兼用制御のブロック線図を示す。

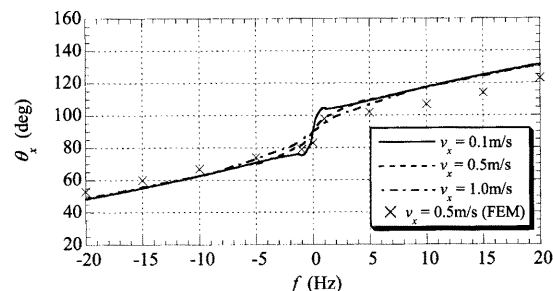
推進力指令 F_x^* および浮上力指令 F_z^* は運動制御から決まる。時間平均推進力 F_{xa}^* および時間平均浮上力指令 F_{za}^* は、(3)、(4) 式により計算される。先に示したように推進力、浮上力は速度による依存性がある。また、高調波解析による特性と基本波解析による特性も多少誤差があることを示した。しかし、制御サンプリング内で行わなければならない計算量の削減という観点から $F_{xa} = F_{xaf}$ 、 $F_{za} = F_{zaf}$ とする。ただし F_{xaf} 、 F_{zaf} はそれぞれ基本波解析による推進力および浮上力を表す。 F_{xaf}^* および F_{zaf}^* が決まれば、従来用いていた浮上推進兼用制御法を適用することができ、一次電流実効値 I^* およびすべり周波数 sf^* が決まり、一次巻線に流す三相電流の値が決定される。従来の制御法では、推進力、浮上力の脈動を考慮していなかったため、指令値に対し、実際に SLIM に働く推進力、浮上力は脈動を含むことになるが、提案する制御法では、実際に SLIM に働く推進力、浮上力の脈動を極力抑えることが可能になる。

ここで、実際に制御を行う際、 A_x 、 A_z 、 θ_x 、 θ_z の計算は(7)、(8)、(11)、(12) 式から判るように、かなり多くの計算量となり、サンプリング周期内で計算することは困難である。そこで、実際に制御を行う際、振幅率及び位相の計算は計算量削減のため予め多項式近似したものを用いている。

Fig. 5 は、推進力の振幅率 A_x および推進力が最大となる位相 θ_x を示す。 A_x は、各速度において非常に大きい値を取る領域がある。これは、**Fig. 2** から判るとおり、す

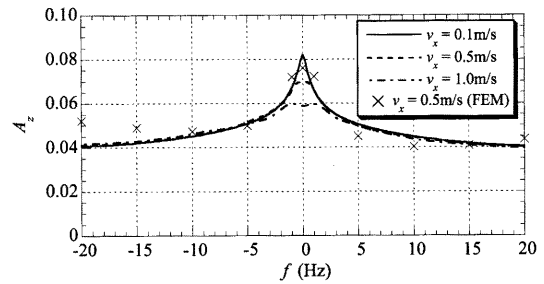


(a) Amplitude ratio of propulsion force

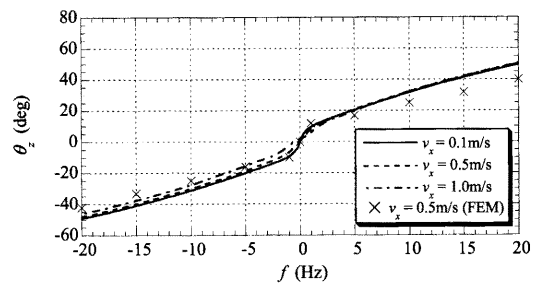


(b) Primary current phase of maximum propulsion force

Fig. 5 Amplitude ratio and primary current phase of propulsion force.



(a) Amplitude ratio of levitation force



(b) Primary current phase of maximum levitation force

Fig. 6 Amplitude ratio and primary current phase of levitation force.

べり周波数が 0 付近に相等する。時間平均値が 0 付近であるため振幅率が非常に大きくなる。つまり、時間平均値と比較して、相対的に脈動成分が大きくなるだけであり、脈動成分自身が大きいわけではない。**Fig. 6** は、浮上力の振幅率 A_z および浮上力が最大となる位相 θ_z を示す。電源周波数および車両の速度 v_x の増加と共に減少することがわかる。これは、浮上力の脈動は低速度のときに大きく、速度の増加と共に電源周波数も増加し、浮上力の脈動が小さくなることを意味している。例えば、電源周波数 5 Hz、車両速度 0.5 m/s のとき、浮上力は時間平均浮上力に対して、約 $\pm 5\%$ 脈動することになる。また、**Fig. 5**、**Fig. 6** には有限要素法解析 (FEM) による結果も示す。高調波解析の結果が妥当なものであることが判る。

5. 浮上走行シミュレーション

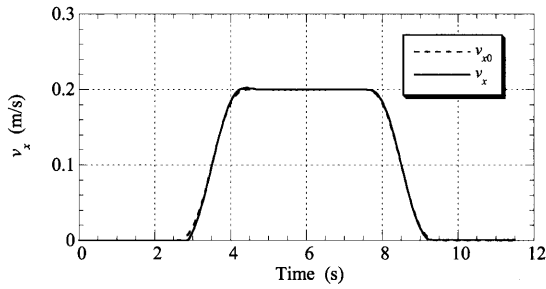
初期ギャップ 6 mm から 2 mm 静止浮上し、走行距離 1.0 m を最高速度 0.2 m/s で走行し、静止浮上を終えるシミュレーションを行った。

Fig. 7 は、従来制御法を用いたときの浮上走行シミュレーション結果であり、**Fig. 8** は、提案する制御法を用いたときの浮上走行シミュレーション結果である。**Fig. 7**、**Fig. 8(a)**、**(b)** はそれぞれ車両の速度、加速度を示す。点線の目標速度に対し車両速度が追従していることが判る。また、僅かではあるが加速度の脈動が改善されている。**Fig. 7**、**Fig. 8(c)** は浮上高さを示す。従来法では、車両の加速、減速時に大きく振動し、定速走行時にも目標値に

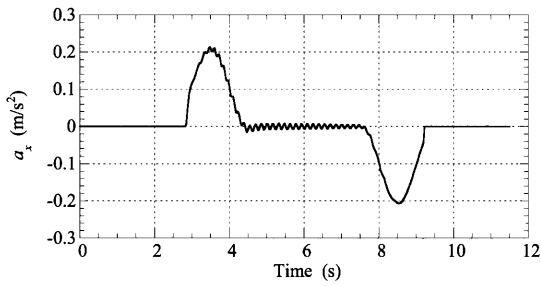
対して振動しており、振動周波数は約 7 Hz である。一方、提案する制御法では、振動はほとんどみられない。Fig. 7, Fig. 8(d) はピッチング角を示す。従来法では、車両の加速、減速時にピッチング運動が生じているのに対し、提案する制御法では、全領域でほとんどピッチングが抑えられている。

以上のシミュレーション結果から、推進方向に関しては、推進力の脈動を僅かではあるが抑制することが確認された。

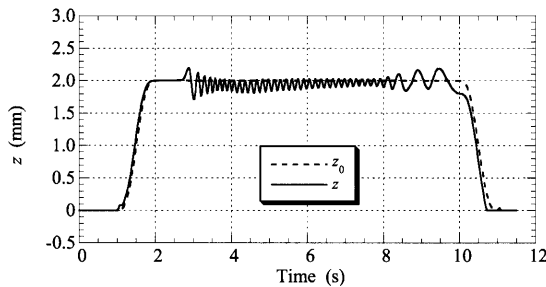
しかし、従来法においても推進方向に関しては脈動が問題にならない程度であることもシミュレーション結果より確認された。一方、浮上方向に関しては、従来の制御法に比べ、提案する制御法では、車両の縦振動をほとんど抑制できることが判った。一般に、車両の縦振動は数 Hz ~ 10 Hz 程度までが最も振動を抑えるよう要求されている。実規模サイズの浮上推進兼用 SLIM を考えた場合、定格速度時は電源周波数が上がるため、従来方式でもさほど縦振動



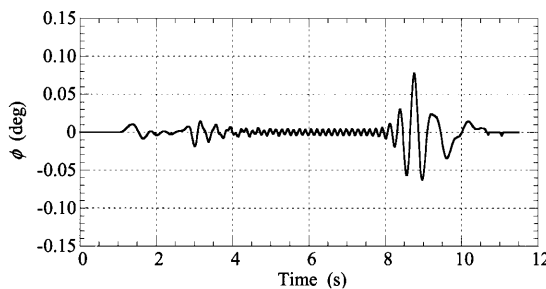
(a) Vehicle speed



(b) Vehicle acceleration

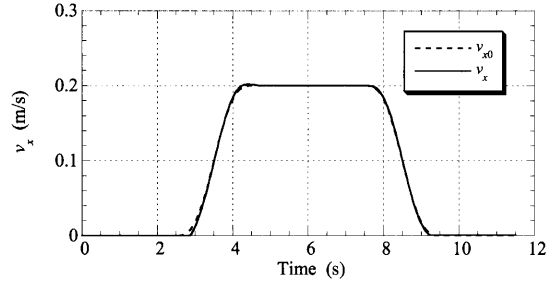


(c) Levitation height

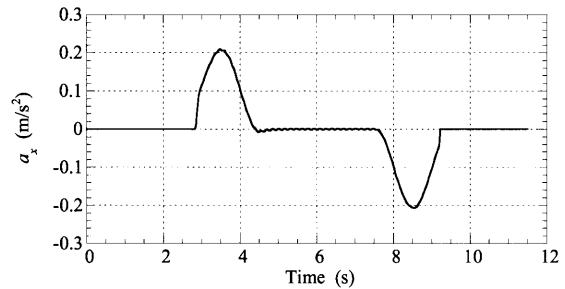


(d) Pitching angle

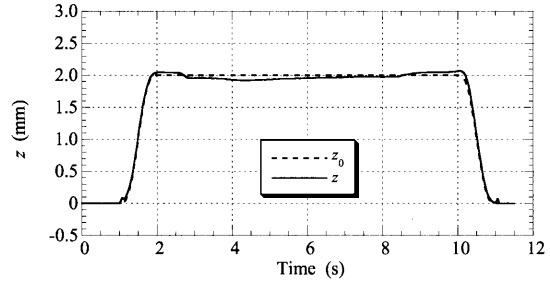
Fig. 7 Simulation results of conventional control method.



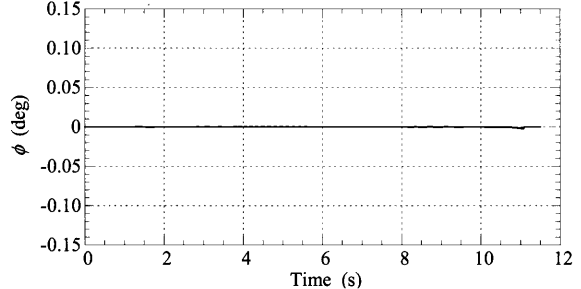
(a) Vehicle speed



(b) Vehicle acceleration



(c) Levitation height



(d) Pitching angle

Fig. 8 Simulation results of proposed control method.

は問題にならないと思われるが、加速時および減速時は、速度が遅いため、電源周波数も低くなり、浮上力の脈動が乗心地に悪影響を与える。一方、提案する制御法では、全領域で縦振動の加震源となる浮上力の脈動を抑えることができる。

6. む す び

本研究では、SLIM に働く推進力および浮上力の脈動を抑制する浮上推進兼用制御法について述べた。始めに、空間高調波解析法を用いて推進力、浮上力の解析を行った。次に、解析結果に基づいた浮上推進兼用制御法の提案を行った。最後に、SLIM モデル車両の浮上走行シミュレーションを行い、提案する制御法を用いた場合、特に浮上力の脈動を抑制することができ、車両の縦振動を抑えることができることを確認した。

参 考 文 献

- 1) Y. Luguang: Development of the Maglev Transportation in China, *Proc. of the MAGLEV 2004*, vol. 1, pp.1-12 (2004).
- 2) Y. Yasuda, M. Fujino, M. Tanaka and S. Ishimoto: The First MAGLEV Commercial Train in Japan, *Proc. of the MAGLEV 2004*, vol. 1, pp.76-85 (2004).
- 3) H. Soejima and K. Isoura: Development of the Maglev system in Japan, *Proc. of the MAGLEV 98*, pp. 8-11 (1998).
- 4) K. Yoshida, T. Yoshida, K. Hayashi, and H. Takami: Decoupled Control of Levitation and Propulsion in SLIM Experimental Maglev Vehicle, *Proc. of Int. Conf. on Electrical Machines*, pp. 228-232 (2000).
- 5) K. Yoshida, T. Yoshida, and K. Hayashi: Combined Levitation and Propulsion Control in a SLIM Experimental Maglev Vehicle, *Proc. of Int. Symposium on Magnetic Suspension Technology*, pp. 404-409 (2001).
- 6) K. Yoshida, and T. Yoshida: Soft Touch Mass-Reduced-Mode Control of Attractive Force in SLIM Vehicle Propulsion, *IEEJ Trans. on Industry Applications*, Vol. 123-D, No. 5, pp. 575-581 (2003).
- 7) K. Yoshida, T. Yoshida, and K. Noda: Influence of Instantaneous End Effects on Attractive Levitation Force at Standstill of Combined-Levitation-and- Propulsion SLIM, *Proc. of 6th International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 187-190 (2003).
- 8) 吉田: 浮上推進兼用 SLIM 車両の瞬時吸引力解析と縦振動抑制制御法, 電気学会論文誌 D, Vol. 128, No. 2, pp. 149-150 (2008).
- 9) K. Yoshida, and S. Nonaka: Levitation Force in Single-Sided Linear Induction Motors for High-speed Ground Transportation, *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-11, No.6, pp.1717-1719 (1975).
- 10) K. Yoshida, L. Shi and T. Yoshida: A Proposal of Decoupled-Control of Attractive-Normal and Thrust Forces in a SLIM for Maglev Vehicle, *Proc. of the 6th Int. Conf. ELECTRIMACS*, pp.221-226 (1999).

