3D-FEA 補間法による制御 PM LSM Maglev キャリア の浮上開始時の横運動解析

正員 吉田 欣二郎 (九州大)

学生員 李 柱 (九州大)

学生員 松本章吾 (九州大)

Maglev Starting of Controlled-PM LSM Maglev Carrier with Lateral Motion, Using 3D-FEA-Interpolation

Kinjiro Yoshida, Member, Lee Ju, Student Member,
Shogo Matsumoto, Student Member (Kyushu University)

Maglev starting of the controlled-PM(Permanent-Magnet) LSM(Linear Synchronous Motor) Maglev carrier which has five degrees of freedom exclusive of propulsion motion is investigated theoretically and experimentally. The 3D-FEA(Finite Element Analysis) interpolation is proposed for including that lateral force related with sway and yawing motions which is obtained numerically by 3D-FEA. In vehicle dynamics simulation with Maglev starting, the method is of practical use for calculating 3-dimensional forces of thrust, lift and lateral ones, with extremely small CPU time. The modelling is verified experimentally under an integrated robust-control of Maglev starting of the carrier with lateral-motion.

キーワード：制御 PM LSM Maglev キャリア，浮上開始，横運動，三次元有限要素解析，三次元補間

1. まえがき

リニアモータはコンタクトレスリニアドライブにより，また磁気浮上はコンタクトレスサスペンションにより，環境にやさしい高品質の輸送搬送システムを可能にする。リニアモータ磁気浮上システムは，OA 機器から磁気浮上列車まで広い応用がますます期待されている。特に，クリーンルーム内での搬送やメンテナンスが困難なところなどで実用化が進

みつがある。

リニアモータ磁気浮上システムは，推進，浮上，案内の主要な機能を必要とする。しかも浮上，案内には電力を最小にできるものが望ましい。制御 PM LSM 方式は，電機子と制御 PM (Permanent Magnet) のみによって推進浮上が可能で，浮上制御電力を最小化できる。筆者らは，制御 PM LSM 方式を用いた磁気浮上搬送車 (Maglev キャリア) の基本的な浮上動作である上下運動，ローリング運動，ピッチング運動の制御については既に詳細な研究を行ってきた^{(1)~(4)}。

また，本システムは固定子鉄心と制御 PM の幅が同じで，互いに全面で対向する構成で横変位が無い場合が安定位置である。このシステムの案内機能については，制御 PM の吸引力による復元力を利用することが考えられる⁽⁵⁾。しかし，このシステムの案内動作は，磁気浮上開始動作に及ぼす横変位運動の影響を含め，未だ説明されていない。

本論文は，Maglev キャリア実験システムにおいて，横運動，ヨーイング運動も考慮した推進運動を除く 5 自由度の運動制御解析モデルを誘導し⁽⁶⁾，これに基づいた浮上開始制御シミュレーションと実験によって横運動による案内機能の基本的な動作を検討すると共に，誘導された解析モデルの妥当性を検証したものである。浮上力と案内力の取り扱い方法として，三次元有限要素法による解析データを用い高速に正確なシミュレーションを行える 3D-FEA (Finite Element

図1 Maglev キャリアの概観図

Fig. 1. Configuration of Maglev Carrier

Analysis) に基づく補間法を提案した。

2. Maglev キャリアの運動解析

<2・1> 剛体台車モデル 磁気浮上システムのモデリングには一般に解析モデルの誘導とエレクトロメカニカルなシステムの数学的記述が必要不可欠となる。図1に制御PM LSM方式のMaglev キャリアの概観を示す。また図2はキャリアの横方向断面図、図3はキャリアの進行方向断面図を示す。図2はキャリアが横方向に Δy だけ変位している状態を示す。キャリアは基本的に4点磁気支持方式の剛体台車構造を採用しており、図1～図3のようにLSM固定子表面に対向して2極構成のコンパクトな制御PMが同一平面内にリジッドに4組配置されている。固定子は両側2列で下向きに構成され、これに対して制御PMが上向きに配置されている。PMは保磁力が極めて高く単位エネルギー当たりのコストが安いサマリウムコバルトが選ばれた。また、それぞれ4つのギャップセンサは固定子レール上面との距離を検出し、制御PMとLSM固定子表面のエアギャップ長を測定する。浮上制御回路には各マグネットの状態情報が伝えられ、それぞれの制御コイルの電流をコントロールすることにより安定かつ消費電力最小な磁気浮上を可能にする。

<2・2> 浮上系に関する運動方程式 Maglev キャリアの浮上系に関する5自由度の運動方程式を以下に示す。

図2 Maglev キャリアの横方向断面図
Fig. 2. Transverse cross-section of Maglev carrier

図3 Maglev キャリアの進行方向断面図
Fig. 3. Longitudinal cross-section of Maglev carrier

$$M \frac{d^2 \Delta h_{Gz}}{dt^2} = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4} - Mg + F_{z,ex} \quad \dots (1)$$

$$I_\theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} = (F_{z1} - F_{z2} + F_{z3} - F_{z4}) l_y - (F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4}) l_z + N_{\theta,ex} \quad \dots (2)$$

$$I_\phi \frac{d^2 \phi}{dt^2} = (-F_{z1} - F_{z2} + F_{z3} + F_{z4}) l_x + (F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4}) l_z + N_{\phi,ex} \quad \dots (3)$$

$$M \frac{d^2 \Delta h_{Gy}}{dt^2} = F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4} + F_{y,ex} \quad \dots (4)$$

$$I_\psi \frac{d^2 \psi}{dt^2} = (-F_{x1} + F_{x2} - F_{x3} + F_{x4}) l_y + (F_{y1} + F_{y2} - F_{y3} - F_{y4}) l_x + N_{\psi,ex} \quad \dots (5)$$

(1)～(5)式の順に上下運動、ローリング運動、ピッチング運動、横運動、ヨーイング運動を表わす。

ただし、 M はキャリアの重量、 I_θ はローリング軸周りの慣性モーメント、 I_ϕ はピッチング軸周りの慣性モーメント、 I_ψ はヨーイング軸周りの慣性モーメント、 $F_{z1} \sim F_{z4}$ はそれぞれマグネット1～4の浮上力、 $F_{x1} \sim F_{x4}$ はそれぞれ推進力、 $F_{y1} \sim F_{y4}$ はそれぞれ案内力 $F_{x,ex}$, $F_{z,ex}$, $N_{\theta,ex}$, $N_{\phi,ex}$, $F_{y,ex}$, $N_{\psi,ex}$ は各運動モードにおける外力または外力モーメントとする。

<2・3> 3D-FEAによる浮上力と案内力のデータ 案内力の定式化は一般に非常に困難で、三次元有限要素法による静磁界解析^{(5),(7)}を行って、Maxwellの磁気テンソルの式より厳密な推進力、浮上力、案内力のデータが得られた。図4～5は制御コイル1個当たりの浮上力と案内力を示す。図4は制御電流が0A, 5A, -40Aの場合における浮上力 F_z のエアギャップ、横変位 Δy に対する依存性を示す。浮上力は横方向の構造的対称性のため横変位が正の部分と負の部分では対称なグラフとなる。浮上力は横変位が大きくなるにつれてわずかに減少しているが、浮上力の横変位に対する依存性は非常に弱いことが判る。図4において、正の電流に対して浮上力は増大し、負の電流に対して減少している。したがって、制御コイルの制御電流をコントロールすることによって安定浮上させることができる。

また、図5は制御電流が0A, 5A, -40Aの場合における案内力 F_y のエアギャップ、横変位 Δy に対する依存性を示す。案内力は横変位が正の範囲では負の力、横変位が負の範囲では正の力であり、図5のような対称な図となる。しかも、横変位が大きくなるにつれて案内力も大きくなるので、システムは本質的に安定である。図5から判るように、正の電流は案内力を増大し、負の電流は案内力を減少する。これは、制御電流で案内力がある程度コントロールできることを意味する。

3. Maglev キャリアの制御系理論

本研究では制御系を浮上系と推進系とに分け、独立にそれ

図4 浮上力のエアギャップ、横変位依存性

Fig. 4. Dependence of lift force on airgap length and lateral displacement

図5 案内力のエアギャップ、横変位依存性

Fig. 5. Dependence of guidance force on airgap length and lateral displacement

ぞれの設計を行っている。図1のように、4つの制御PMは1平面内にリジッドに配置されているため、運動モード別制御⁽¹⁾を行うことが必要である。浮上系には、現代制御理論を適用し、安定したロバスト制御系を設計することができる。浮上系に関する各制御PMの制御則は次式のように与えられる。

$$e_{czi}(k+1) = K_{z1}\Delta\delta_i + K_{z2}\Delta\dot{\delta}_i - K_{z3}i_{zi} - K_{z4}\sum_{n=1}^{k-1} i_{zi}(n) - K_{z5}e_{czi}(k) \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad \cdots (6)$$

ただし、 K_{zm} ($m=1, 2, 3, 4, 5$)は、各運動モードにおける最適化されたゲインを用いて与えられる係数である。図6は時間遅れを考慮したサーボシステムを示す。

4. シミュレーションおよび実験

<4・1> 3D-FEA補間法 浮上力 F_z と案内力 F_y はそれぞれエアギャップ、横変位、制御コイルの電流 I_2 の3つのパ

図6 時間遅れを考慮したサーボシステム

Fig. 6. Servo system counting for sampling time

ラメータの関数である。案内力 F_y を解析的に求めるのは困難なため、浮上力、案内力 F_y は三次元有限要素解析⁽⁵⁾によって計算される。しかし、3つのパラメータの依存性は陽には判らない。しかも、運動解析シミュレーションにおいて三次元有限要素法計算は膨大な計算時間を必要とするので、オンラインで直接用いるのは実用的でない。

そこで、浮上開始シミュレーションで用いるパラメータの使用範囲内で、浮上力 F_z と案内力 F_y を十分な精度で内挿できる程度に予め離散的にオフラインで計算させておく。シミュレーションを行うときにそのデータを3つのパラメータに基づく三次元補間によって、任意の浮上力と案内力を計算する。このような手順で、高速に正確なシミュレーションを行うことができる。この方法を3D-FEA補間法と呼ぶことにする。この方法を用いることによってシミュレーションの計算時間を約600分の1にすることができる。なお、補間については、三次元エルミート補間を用い自然な補間曲線を得ている。

<4・2> シミュレーションの概要 前章で述べた理論

図7 磁気浮上制御システム

Fig. 7. Maglev control system for experiment

によるMaglevキャリアのモデリングを確かめるために、ワークステーション上で制御PM LSM Maglev キャリアの浮上開始プログラムを作製した。プログラム言語には、FORTRANを用いた。また、運動方程式の解析にはルンゲ・クッタ・ギル法を用いた。浮上力と案内力は3D-FEA 補間法によって計

算した。本実験システムは、磁気浮上コントローラが地上にあり、台車との間にギャップセンサの情報と浮上電力の伝送用ケーブルを有している。これらのケーブルにより、特に制御を行っていない案内方向には、機械的ダンピング力を無視することができない。したがって、これらのダンピング力を

図 8 実験結果 (I)

($\Delta y_0 = -1.4 \text{ mm}$)

Fig. 8. Experimental results (I)

($\Delta y_0 = -1.4 \text{ mm}$)

図 9 シミュレーション結果 (I)

($\Delta y_0 = -1.4 \text{ mm}$)

Fig. 9. Simulated results (I)

($\Delta y_0 = -1.4 \text{ mm}$)

図 10 実験結果 (I)

($\Delta y_0 = -1.4 \text{ mm}$)

Fig. 10. Experimental results (I)

($\Delta y_0 = -1.4 \text{ mm}$)

図 11 シミュレーション結果 (I)

($\Delta y_0 = -1.4 \text{ mm}$)

Fig. 11. Simulated results (I)

($\Delta y_0 = -1.4 \text{ mm}$)

以下のように考慮して浮上開始のダイナミクスシミュレーションを行った。

$$F_{y,ex} = -k_s \Delta y, k_s = 2 \text{ Ns/m} \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$F_{z,ex} = 0 \text{ N}, N_{\theta,ex} = N_{\phi,ex} = N_{\psi,ex} = 0 \text{ Nm} \quad \dots \dots \dots (8)$$

初期エアギャップ長はいずれも 0.5mm とし、キャリア本体

を横方向にそれぞれ 1.4mm (シミュレーションⅠ), 2.4mm (シミュレーションⅡ) だけ負の方向に変位させた初期状態から、約 5 秒間の浮上開始制御シミュレーションを行った。本シミュレーションでは横方向運動は全く制御していない。なお、制御則のゲインは実験と同じゲインを使用した。

< 4・3 > 実験の概要

図 7 は浮上系コントローラを含

(a) エアギャップ長

(a) エアギャップ長

(a) 横方向変位

(a) 横方向変位

(b) 制御電流

(b) 制御電流

(b) 上下、ピッチ、ロール、横、ヨー運動

(b) 上下、ピッチ、ロール、横、ヨー運動

図 12 実験結果 (Ⅱ)

図 13 シミュレーション結果 (Ⅱ)

図 14 実験結果 (Ⅱ)

図 15 シミュレーション結果 (Ⅱ)

($\Delta y_0 = -2.4 \text{ mm}$)

($\Delta y_0 = -2.4 \text{ mm}$)

($\Delta y_0 = -2.4 \text{ mm}$)

($\Delta y_0 = -2.4 \text{ mm}$)

Fig. 12. Experimental results (Ⅱ)

Fig. 13. Simulated results (Ⅱ)

Fig. 14. Experimental results (Ⅱ)

Fig. 15. Simulated results (Ⅱ)

($\Delta y_0 = -2.4 \text{ mm}$)

($\Delta y_0 = -2.4 \text{ mm}$)

($\Delta y_0 = -2.4 \text{ mm}$)

($\Delta y_0 = -2.4 \text{ mm}$)

めた磁気浮上制御実験システムを示す。渦電流型ギャップセンサからのエアギャップ情報とシャント抵抗による電流検出法での制御電流情報は電圧値として、12bit精度のA/Dコンバータを介し、デジタル情報としてパソコンに取り込まれる。パソコンでは、これらの情報を用いてデジタル制御理論に基づく制御則に従い演算を施し、算出された制御電圧は12bit精度のD/Aコンバータを介しアナログ信号としてPWMコントローラに供給される。キャリアの質量は27.0kgであり、無負荷時目標エアギャップ長は2.9mmである。また横方向エアギャップは新たに4隅に取り付けた横方向の図2に示すギャップセンサで計測する。

実験もシミュレーションと同様に、初期エアギャップ長はいずれも0.5mmに調整し、キャリア本体を横方向にそれぞれ1.4mm(実験Ⅰ)、2.4mm(実験Ⅱ)だけ負の方向に変位させた初期状態から、約5秒間の浮上開始実験を行った。なお、本実験では横方向運動は自由で制御は行っていない。

<4・4> シミュレーションおよび結果の考察 図8～15に実験結果およびシミュレーション結果を示す。まず、図8, 9, 12, 13(a)から、エアギャップ長 $\delta_1 \sim \delta_4$ については、いずれもシミュレーション結果、実験結果ともに軽いオーバーシュートがあり、約1秒後には目標エアギャップ長にほぼ収束している。理論と実験の波形はよく一致している。

図8, 9, 12, 13(b)の制御電流 $I_{21} \sim I_{24}$ について、キャリア本体を固定子軌道から切り離す電流として-40A弱の電流が流れる。しかし、シミュレーション結果と実験結果ともに軽いオーバーシュートを示した後で、電力最小化制御に従って約1秒後には零電流にほぼ収束していることが判る。

図10, 14(a)の横変位 Δy は、初期変位 Δy_0 にも若干影響されるが、比較的ゆるやかな減衰振動を示す。すなわち、このシステムは案内動作に対して弱いダンピング特性をもっている。図10, 11, 14, 15(a)のシミュレーションによる横変位の減衰振動波形と周波数は実験とほぼ一致しており、推定したダンピング係数はほぼ妥当なものである。

また、8個のギャップセンサから得られる情報を上下、ピッチ、ロール、横、ヨーの5つの運動モードに変換した図10, 11, 14, 15(b)より、横変位運動があるときでもピッチング角 ϕ 、ローリング角 θ 、ヨーイング角 ψ はそれぞれ 10^{-3}deg 、 10^{-4}deg 、 10^{-2}deg のオーダーで非常に小さく、回転運動に関しても極めて高い制御精度が得られたことを示している。このように非常によく安定浮上していることが判る。

5. むすび

横運動、ヨーイング運動を考慮した5自由度を持つキャリアの剛体モデルは、浮上開始実験によって検証され、実験機のモデル化が妥当であることが確認された。これまでの研究で、推進運動についても実験機のモデル化を確認しており、実験機の6自由度の剛体モデルが得られたことになる。また3D-FEAによる浮上力と案内力の計算およびそれに基づく三次元補間法の有用性も確認された。

今後は、さらに推進運動を含む6自由度の運動をシミュレーションと実験から検討し、案内制御の可能性についても

研究する予定である。

(平成8年6月4日受付、平成8年11月6日再受付)

文 献

- (1) 吉田・山下・城崎:「制御PM LSM Maglev キャリアのダイナミクス」第4回シンポジウム電磁力関連ダイナミクス, 招待講演5-①, pp. 93-99 (1992)
- (2) 吉田・藤野・平川・園田:「制御PM LSM Maglev キャリアの浮上推進制御」リニアドライブ研究会資料LD-92-70 (1992)
- (3) 吉田・藤野・平川・園田:「制御PM LSM 4点支持キャリアの運動モード別ロバスト磁気浮上制御」システム・制御研究会資料SC-93-5 (1993)
- (4) K.Yoshida, H.Takami, A.Hasuie, T.Hirakawa, J.Lee, T.Omura & A.Sonoda: "Levitation and propulsion motion control of controlled-PM LSM Maglev carrier", Proc. ICEM '94, pp.21-26 (1994-9)
- (5) K.Yoshida, T.Omura & J.Lee: "3-D FEM Analysis of Guidance and Levitation Forces in Controlled-PM LSM Maglev Carrier", Proc.'94 ISEM-Seoul, pp.395-398 (1994-6)
- (6) 吉田・李・松本:「3D-FEA 補間法による制御PM LSM Maglev キャリアの浮上開始時の横運動解析」平8電気学会全大No.1113
- (7) K.Yoshida, J.Lee & S.Matsumoto: "3-D Finite Element Analysis of Controlled-PM LSM Maglev Carrier with Lateral Displacement", Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol. 55, pp. 257-278 (1995)

吉田 欣二郎 (正員) 1943年12月27日生。1971年3月九州大学大学院工学研究科博士課程修了。1987年9月九州大学工学部教授、1996年4月同大学大学院システム情報科学研究科教授、現在に至る。主として、新しいリニアモータMaglevシステムの基礎理論、とその産業応用に関する研究開発に従事。工博。

李 柱 (学生員) 1963年8月30日生。1988年8月漢陽大学大学院工学研究科修士課程卒業、1994年4月九州大学大学院システム情報科学研究科博士課程入学、現在に至る。主として、リニアモータの有限要素解析に関する研究に従事。

松本 章吾 (学生員) 1972年12月27日生。1995年3月九州大学工学部電気工学科卒業。同年4月同大学大学院システム情報科学研究科修士課程入学、現在に至る。Maglev キャリアのシミュレーションと実験に関する研究に従事。