

水平移動も可能な非接触駆動鉛直輸送システムの提案

立石大輔*, 古関隆章 (東京大学)

Proposal of Contactless Vertical Transportation System, which can also move in Horizontal Direction
Daisuke Tateishi, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

Abstract

We propose a new contactless vertical transportation system, which has coreless linear synchronous motor (LSM) with Halbach magnet array for hoisting at each side and four electromagnets with permanent magnet for levitation control. These electromagnets work also as field magnets of LSM for horizontal movement. This system can be able to achieve 5 degrees of freedom active levitation control. In this paper, first, characteristics of linear Halbach magnet array used for hoisting LSM are analyzed. Then levitation control method is examined by simulation.

キーワード：エレベータ，ハルバツハ磁石配列，リニア同期モータ，電磁石，姿勢制御
(elevator, Halbach magnet array, linear synchronous motor, electromagnet, levitation control)

1. はじめに

都市空間の高度利用のために、上下方向の輸送機関の高性能化が重要な課題の一つとなっている。しかし、現在のロープ式エレベータでは、一つのシャフトに1個のかごしか運行できないため、建物内においてエレベータの占める面積が大きくなるという問題があった。このため、「ロープレスエレベータ」の提案がなされており、必要とされる性能について定量的な評価が行われている⁽¹⁾。その結果、最高速度は必ずしも大きくとる必要はないが、輸送力を向上するには、折り返しのための水平移動を素早く行う必要があることが示されている。一方、ハードウェアとしては、地上一次方式のリニアモータが有力とされており、1996年には、日本エンジニアリング振興協会 (ENNA) の地下利用に関する研究の一環として、試作機の製作が行われている⁽²⁾。しかし、分岐機構が走行路切替方式であるなど、大変複雑な構成となっている。また、リニアモータの垂直力を用いて非接触化したもの⁽³⁾もあるが、分岐については考慮されていない。

そこで、本論文では、推進用ハルバツハ形磁石配列リニア同期モータと、姿勢制御用の永久磁石つきU字型電磁石の組み合わせによる、水平移動も可能な完全非接触の鉛直輸送システムを提案し、推進用モータの特性解析と、姿勢制御手法の検討を行う。

2. 提案する鉛直輸送システム

<2.1> 提案システムの構成 提案システムの構成を図1に示す。可動子の両側に、一对の推進用リニア同期モータ(LSM)を配置する。推進用LSMは地上一次の構成とし、界磁には、空心でも片側だけに大きな磁界を発生できるハ

ルバツハ配列永久磁石を用いることにより、電機子巻線がコアレス化でき、トルク脈動の抑制が期待できるだけでなく、可動子への送電量を減らすことができる。なお、電機子巻線の裏側に鉄板を貼り付けることにより適度な吸引力を発生させ、y軸方向及びヨーイング方向に復元力として作用させることが可能である。また、可動子に8つある頂点の内4箇所に、姿勢制御用のU字型電磁石(永久磁石つき)を配置する。この電磁石は、水平移動用LSM(鉄心つき)の界磁と兼用となっている。

<2.2> 分岐部分の構造 鉛直方向の走行路と水平方向の走行路の分岐部分では、図2でもわかるように、姿勢制御用電磁石に対向する鉄心と、推進用LSMの電機子巻線の

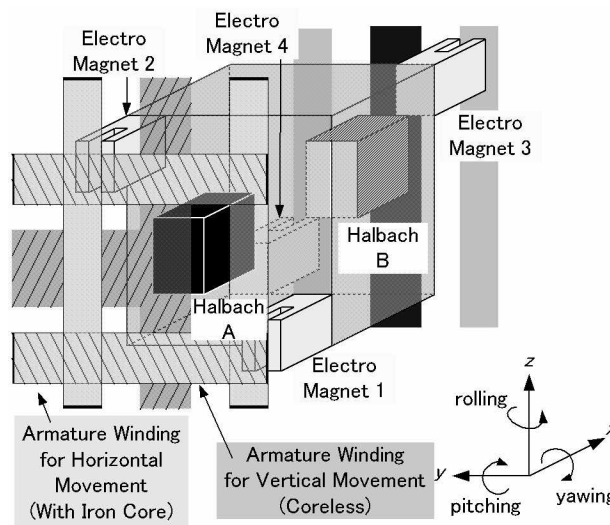


図1 提案する鉛直輸送システムの構成

Fig. 1 Structure of Proposed Vertical Transport System

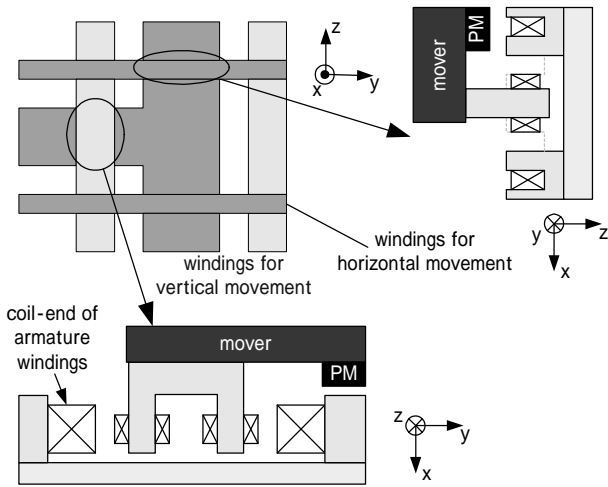


図2 分岐部の構造
Fig. 2 Structure at Shunting Place

位置が干渉する。そこで、図3に示すように、姿勢制御用電磁石対向鉄心と、推進用LSMの電機子巻線の裏に貼り付ける鉄板の表面位置を合わせて、地上側からは推進用LSMの電機子巻線が可動子側に飛び出し、可動子側からは姿勢制御用電磁石が地上側に飛び出す構造を取る。この構造により、分岐部であっても姿勢制御が可能となる。但し、分岐部では推進用LSMの電機子巻線が途切れてしまうため、可動子側に設ける界磁永久磁石は、この電機子巻線のギャップを跨ぐだけの大きさでなければならない。

3. 推進用空心リニア同期モータ

<3.1> リニア状ハルバツハ磁石配列の発生磁界 推進用モータには、かごの自重を支えられるだけの大推力が求められる。そこで、本システムでは、推進用モータとして、界磁側にハルバツハ形配列永久磁石を用いた空心形リニア

同期モータを採用する。

ハルバツハ形配列は、永久磁石を磁化の向きを少しずつ変えて並べた配列であり、空心でも片側だけに強い正弦波状の磁界を発生できること、磁石の分割を細かくするほどより強い磁界が得られることが知られている。

ハルバツハ形配列をリニアモータの界磁に応用した場合の発生磁界の大きさを、2次元磁界解析により調べた。磁石の厚さを20mm、ポールピッチを40mm、残留磁束密度 $B_r = 1.24\text{T}$ 、保磁力 $H_c = 9 \times 10^5\text{A/m}$ とした場合の、磁極中央における磁束密度の大きさと磁石からの距離の関係を図3に示す。磁石の分割を細かくするほどより強い磁界が得られるが、巻線から遠ざかるほど、その効果が薄まることわかる。よって、以降の議論では、磁石の分割数を4とする。

次に、ポールピッチや磁石の厚みを変化させた場合の磁束密度の変化を図4に示す。この図から、どの範囲まで磁束が届くかはポールピッチに依存していること、ある程度以上磁石の厚みを増しても、磁束は殆ど増えないことがわかる。

<3.2> 磁石端面形状の検討 これまでの解析は、無限長のリニアモータ（周期境界条件）を仮定して行ってきた。しかし、実際のリニアモータには端面があるため、磁束分布が理想的な正弦波状ではなくなり、トルクの脈動を生じたり、空心では本来生じないはずの吸引力を発生したりしてしまうことが懸念される。そこで、図5に示す5種の磁石配列について、巻線との相対位置を変化させて、推力の脈動や吸引力の評価を行った。解析モデルは図6の通りであり、巻線は24スロット分を設定し、この周りに十分広い空気領域を設定して、固定境界条件で行った。ここで、空心設計であることから、本来はスロットは不要であり、巻線だけで電機子を構成することも可能であるが、今回は、工作性を考慮して、非磁性材料でスロットを作り、その中に巻線を収める構造を仮定している。なお、磁石の厚さは、磁石を厚くすることによる推力の増加分と磁石重量の増加

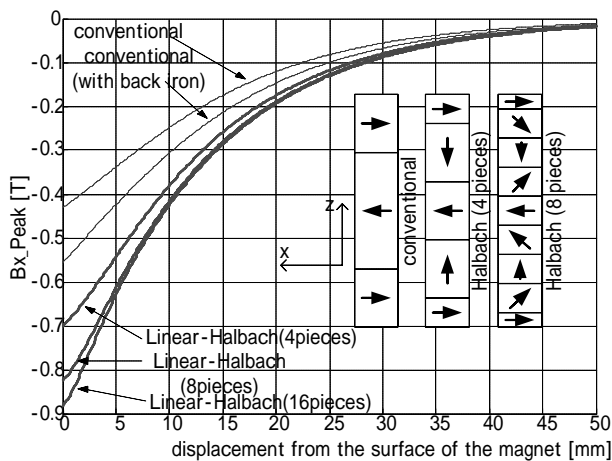


図3 磁石分割数の発生磁界への影響

Fig. 3 Influence of the number of pieces to Magnetic Flux

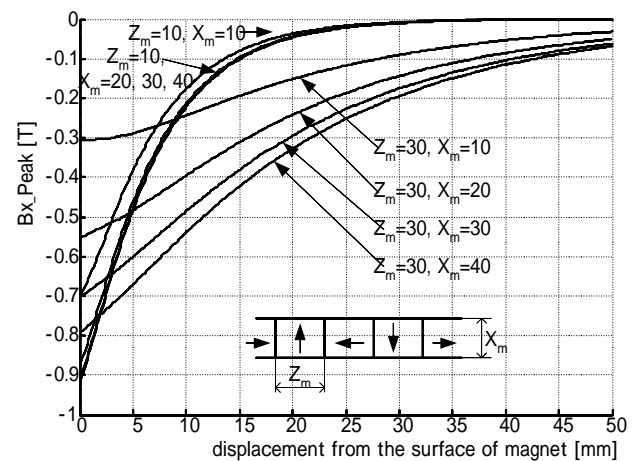


図4 磁石サイズの発生磁界への影響

Fig. 4 Influence of the magnet size to Magnetic Flux

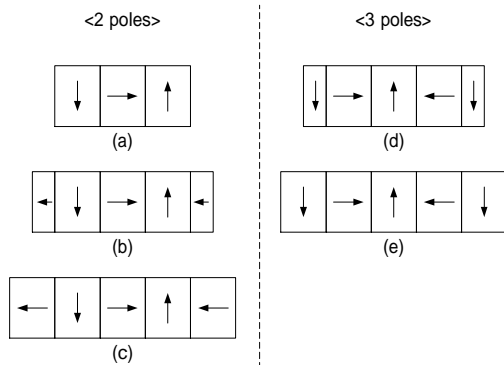


図5 種々のハルバツハ磁石配列端部形状
Fig. 5 Variants of Linear Halbach Magnet Array

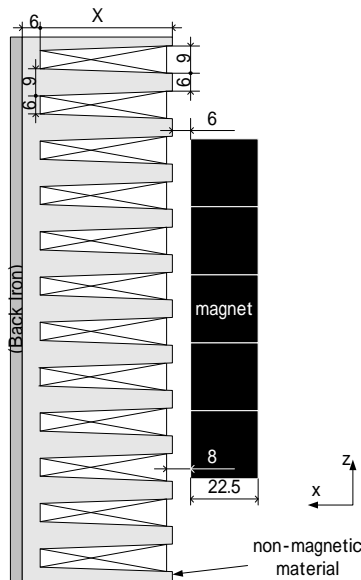


図6 リニア同期モータの解析モデル

Fig. 6 Model of LSM for Computation of Magnetic Flux Distribution

分のバランスを勘案して22.5mm、奥行きは45mm、ポールピッチは45mmとした。従って、図7の(a)の可動子は長さ67.5mm、(b)及び(d)は90mm、(c)及び(e)は112.5mmである。また、電流密度の振幅は $5 \times 10^6 [A/m^2]$ とした。

スロット深さを42mmとした場合の、d軸電流ゼロ制御時における推力(1スロット内の各個所での値の平均)を表1に示す。どの可動子形状でも、自重の5倍以上の重量を支持することができ、推進用モータとして十分な性能を持っていると考えられる。また、可動子(a)~(e)いずれの場合も、脈動は1%以内に収まった。

次に、d軸電流ゼロ制御時の吸引力を図7に示す。ここで、横軸は、図6のように巻線の中心と永久磁石の中心が合った状態を位置の原点とし、そこからのz方向への変位を示す。可動子(a), (b), (c)に比べて、(d), (e)は位置によっては大きな吸引力が発生していることがわかる。ここで、(a), (b), (c)

表1 推進用リニアモータの平均推力

Table 1 Average Hoisting Force of LSM

type of mover	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
(A) hoisting force [N]	29.59	39.44	49.74	39.71	49.33
(B) mass of magnet [kg]	0.513	0.683	0.854	0.683	1.022
(A) ÷ 9.8(B)	5.89	5.94	5.94	5.93	5.89

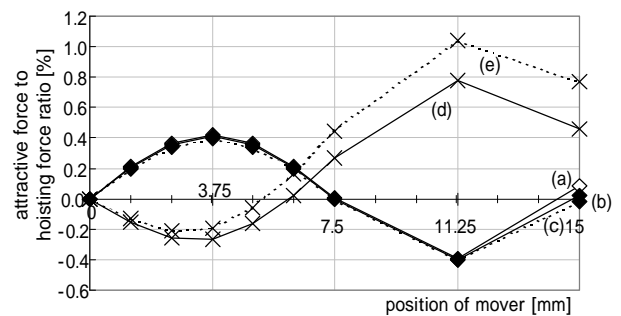


図7 可動子位置による吸引力/推力比の変化
Fig. 7 Attractive Force to Hoisting Force Ratio

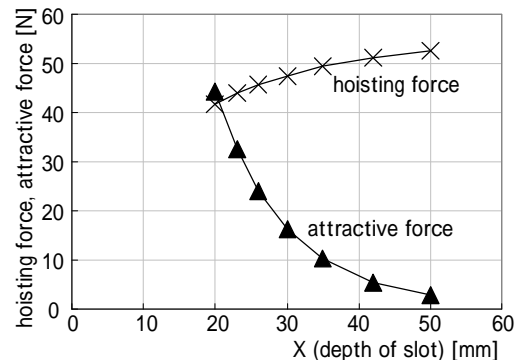


図8 スロット深さによる推力・吸引力の変化
Fig. 8 Hoisting Force and Attractive Force of the LSM

は磁極数が2であるのに対し、(d), (e)は磁極が3つある。これらの結果から、界磁用リニア形ハルバツハ配列永久磁石の条件としては、

1. 磁極の数は偶数でなければならない
2. 端部の磁石の磁化の向きには特に制約はない
3. 端部の磁石のサイズについても制約はない

ということが言える。本研究では、分岐部分の電機子巻線のギャップを考慮して、(c)の磁石配列を採用する。

<3.3> 電機子巻線裏への鉄板貼り付けによって生じる吸引力 電機子巻線を空心とすることにより、通常のリニアモータで問題となる吸引力は基本的には発生しない。しかし、提案する可動子は、これだけではx軸方向及びヨーイング方向を支持する要素を持っていないため、推進用LSMに適度な吸引力を持たせて、これを案内に用いることを考える。

電機子巻線の裏側に鉄板を貼り付けた場合の、推力及び吸引力のスロット深さに対する変化を図8に示す。この図から、スロット深さを変えても推力は殆ど変化しないが、吸引力の値は大きく変化することがわかる。よって、鉄板の位置を調節することにより、望みの吸引力を得ることが出来ることわかる。

4. 姿勢制御手法

<4.1> 提案可動子の姿勢保持機構 図1で示した可動子では、2基の推進用LSMによってz軸方向の姿勢制御を、4個の姿勢制御用U字型電磁石によってx軸方向・ピッチング方向・ローリング方向の3自由度の姿勢制御を行う。また、推進用LSMの電機子巻線の裏側に鉄板を貼り付け、適度な吸引力を持たせることにより、y軸方向・ローリング方向に対する復元力を発生させ、受動的な安定性を確保する。U字型電磁石及び推進用LSMのd軸電流の制御により、y軸方向についても能動制御が可能になる可能性があるが、本節では、x軸方向・ピッチング方向・ローリング方向の3自由度の姿勢制御について論じる。

<4.2> U字型電磁石による3自由度姿勢制御 U字型電磁石は、反発力を出すことができないため、姿勢制御には複数の電磁石の協調制御が必要となる。提案する鉛直輸送システムでは、4つの電磁石の出す力と各自由度に対する制御力の関係は、

$$\begin{aligned} F_x &= -F_1 - F_2 + F_3 + F_4 \\ T_p / L_z &= +F_1 - F_2 + F_3 - F_4 \\ T_r / L_y &= -F_1 + F_2 + F_3 - F_4 \end{aligned} \quad (1)$$

但し、 F_1, F_2, F_3, F_4 : U字型電磁石1~4の吸引力、

F_{max} : アクチュエータの出す最大の吸引力、

F_n : x軸方向の制御力、

T_p, T_r : ピッチング・ローリング方向の制御トルク、

L_y, L_z : 電磁石の可動子重心からのy, z軸方向偏倚量

となる。そこで、各電磁石に対して

$$\begin{aligned} F_1 &= 0.5F_{max} - F_x / 4 + T_p / 4L_z - T_r / 4L_y \\ F_2 &= 0.5F_{max} - F_x / 4 - T_p / 4L_z + T_r / 4L_y \\ F_3 &= 0.5F_{max} + F_x / 4 + T_p / 4L_z + T_r / 4L_y \\ F_4 &= 0.5F_{max} + F_x / 4 - T_p / 4L_z - T_r / 4L_y \end{aligned} \quad (2)$$

と力を割り振ることにより、x軸方向・ピッチング方向・ローリング方向の3自由度の姿勢制御を行う。ここで、U字型電磁石に永久磁石を組み込んで、制御電流を流さない状態で $0.5F_{max}$ の吸引力を発生するような設計とすることにより、電力消費を大幅に低減することができる。

<4.3> U字型電磁石の形状と特性 U字型電磁石の構造を図9に示す。永久磁石を中央に配置することにより、体積はやや大きくなるが、永久磁石は退磁に強くなる。

この電磁石の吸引力特性を2次元の有限要素法解析により求めると、鉄板と対向する場合は

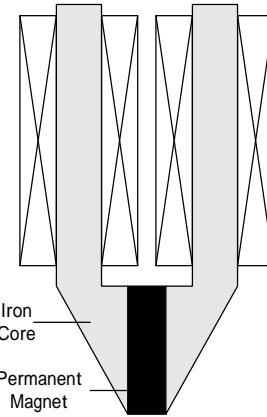


図9 姿勢制御用U字型電磁石

Fig. 9 U-type Electromagnet for Levitation Control

$$F = \frac{3.88(i + 4.96)^2 + 2.75}{(g + g_M)^{1.94}} 10^{-5} \quad (3)$$

水平移動用のリニアモータと対向する場合は

$$F = \frac{7.06(i + 4.79)^2 + 6.07}{(g + g_M)^{1.79}} 10^{-5} \quad (4)$$

が得られ、ノミナルギャップ長(6mm)においては、リニアモータと対向させた場合は吸引力は約2割低下する。但し、 g_M は、永久磁石の厚さをギャップ長に換算した値(0.0015m)である。

<4.4> 制御器の設計 ここでは、水平移動用リニアモータのスロットの影響による吸引力の低下は無視して、(2)式に基づいてプラントの線形化を行う。

(3)式を、ノミナル点(i_0, g_0) = (0, 0.006)の周りでテーラー展開すると、

$$F \cong F_0 - A\Delta g + Bi \quad (5)$$

但し、 $F_0 = F|_{i=0, g=0.006} = 13.0$ 、 $\Delta g = g - g_0$ 、

$$A = -\left. \frac{\partial F}{\partial g} \right|_{i=i_0} = 3348、B = \left. \frac{\partial F}{\partial i} \right|_{g=g_0} = 5.076$$

となる。この線形化プラントにおいては、各自由度間の相互干渉の項は打ち消され、x軸方向の運動方程式は

$$m \frac{d^2}{dt^2} x = 4Ax + Bi_x - F_{dx} \quad (6)$$

但し、 m : 可動子質量、 F_{dx} : 外乱力

となる。また、電磁石巻線電圧から電流への伝達関数は、

巻線抵抗・インダクタンスをそれぞれ R, L とすると $\frac{1}{R + sL}$

で与えられるので、x軸方向に関するプラントの状態方程式は

$$\dot{x} = Ax + Be_x, y = Cx \quad (7)$$

$$\text{但し } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 4A/m & 0 & B/m & -1/m \\ 0 & 0 & -R/L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ i_x \\ F_{dx} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B} = (0 \ 0 \ 1/L \ 0)^T, \mathbf{C} = (1 \ 0 \ 0 \ 0)$$

と求められる。

このプラントに対して、状態フィードバックによる姿勢制御を行う。定常偏差をなくすため、(7)式に変位の積分を状態変数に加えた拡大系

$$\dot{\mathbf{x}}' = \mathbf{A}'\mathbf{x}' + \mathbf{B}'e_x \quad (8)$$

$$\text{但し } \mathbf{A}' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 4A/m & 0 & B/m & 0 \\ 0 & 0 & -R/L & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{x}' = \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ i_x \\ \int x dt \end{pmatrix}, \mathbf{B}' = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L \\ 0 \end{pmatrix}$$

に基づき、図10のようなフィードバック制御を行うとき、フィードバックゲイン行列 \mathbf{F} を $(F_{1x}, F_{2x}, F_{3x}, F_{4x})$ とすると、システムの極は

$$|s\mathbf{I} - (\mathbf{A} + \mathbf{BF})| = 0 \quad (9)$$

の解で指定できる。この式と真鍋多項式

$$s^4 + 10/t \cdot s^3 + 50/t^2 \cdot s^2 + 125/t^3 \cdot s + 125/t^4 \quad (10)$$

但し、 : 等価時定数

$$\text{を比較して、 } F_{1x} = -\frac{40AL}{Bt} - \frac{125mL}{Bt^3}, F_{2x} = -\frac{4AL}{B} - \frac{50mL}{t^2 B},$$

$$F_{3x} = R - \frac{10L}{t}, F_{4x} = -\frac{125mL}{Bt^4} \text{ を得る。}$$

<4.5> オブザーバによるギャップ速度・電流・外乱力の推定 状態フィードバックで用いるギャップ速度や電流の情報は、直接計測しないので、オブザーバにより推定する必要がある。また、外乱力を推定してフィードフォワード補償することにより、制御性の改善を図ることができるので、外乱力も合わせて推定することにする。

ギャップ長は計測するので、残りの3変数だけ推定する最小次元オブザーバを構成するために、(7)式を

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\mathbf{x}}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \mathbf{x}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{pmatrix} e_x \quad (11)$$

$$\text{但し、 } \mathbf{A}_{11} = 0, \mathbf{A}_{12} = (1 \ 0 \ 0),$$

$$\mathbf{A}_{21} = \begin{pmatrix} 4A/m \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{A}_{22} = \begin{pmatrix} 0 & B/m & -1/m \\ 0 & -R/L & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{x}_2 = (\dot{x} \ i_x \ F_{dx})^T, \mathbf{B}_1 = 0, \mathbf{B}_2 = (0 \ 1/L \ 0)^T$$

と書き直す。このとき、オブザーバの方程式は、

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_2 = \mathbf{A}_{21}x + \mathbf{A}_{22}\hat{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{B}_2e_x + \mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}}_1 - \hat{\mathbf{x}}_1) \quad (12)$$

である。ここで、 $\mathbf{K} = (k_{1x}, k_{2x}, k_{3x})$ は推定誤差修正フィードバックゲインである。このとき、オブザーバの推定誤差 $e = \hat{\mathbf{x}}_2 - \mathbf{x}_2$ の特性は

$$\dot{e} = (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{K}\mathbf{A}_{12})e \quad (13)$$

で与えられるので、3次の真鍋多項式

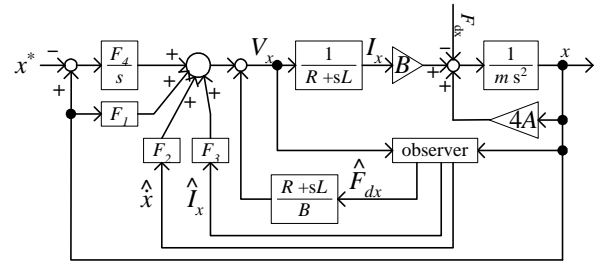


図10 x軸方向姿勢制御器

Fig. 10 Block diagram of x-axis Levitation Controller

$$s^3 + 5/t \cdot s^2 + 12.5/t^2 \cdot s + 12.5/t^3 \quad (14)$$

に基づいて極配置を行えば、 $k_{1x} = \frac{5}{t} - \frac{R}{L}$, $k_{3x} = -\frac{12.5mL}{t^3 R}$,

$$k_{2x} = \frac{1}{B} \left(\frac{12.5m}{t^2} - \frac{k_{1x} R m}{L} + k_{3x} \right) \text{ を得る。}$$

なお、以上の議論は、質量 m を慣性モーメント J_p (J_r), A を $L_y L_z A$, B を $L_z B$ ($L_y B$) と置き換えれば、ピッチング方向・ローリング方向についても同様に成り立つ。

<4.6> 外乱抑圧性能の評価 姿勢制御系の性能を、計算機シミュレーションによって確認する。各定数は、可動子質量 $M = 8\text{kg}$, ピッチング方向慣性モーメント $J_p = 0.06\text{kg} \cdot \text{m}^2$, ローリング方向慣性モーメント $J_r = 0.07\text{kg} \cdot \text{m}^2$, $R = 1.11$, $L = 22.2\text{mH}$, $L_y = 140\text{mm}$, $L_z = 95\text{mm}$, オブザーバの等価時定数を 20ms , 姿勢制御系の等価時定数を 50ms , 外乱フィードフォワード補償部の擬似微分の時定数を 2ms と設定した。また、ギャップ長のフィードバック信号には、観測雑音として、振幅が 0.03mm 程度の白色雑音を重畳している。

時刻 1.0s で x 方向に 30N (自重の約 40% に相当), 2.0s でピッチング方向に 1Nm , 3.0s でローリング方向に 1Nm , 5.0s で x 方向に -30N の外乱力がいずれもステップ状に印加される場合のギャップ長及び電流の応答を図11に示す。観測雑音の影響により、電流波形はやや振動的であるが、浮上系全体の安定性は損なわれていないことがわかる。

続いて、浮上開始時の位置が x 方向に 2mm , ピッチング方向・ローリング方向にそれぞれ 0.003rad ずれていた場合の応答を図12に示す。浮上制御開始時には瞬時的にかなりの過電流が流れているが、 0.15秒 程度で所定の位置まで戻せていることがわかる。また、時刻 0.5s において、 x 方向に 30N , ピッチング方向・ローリング方向に 1Nm の外乱力を一斉に印加しているが、その場合でも安定した姿勢制御を実現できている。

5. まとめ

本論文では、完全非接触で水平移動をも実現できる鉛直輸送システムの概念を提唱した。まず、界磁にハルバツハ配列永久磁石を用いた空心リニア同期モータの推力について解析を行い、磁石重量の5倍以上の推力が発生できるた

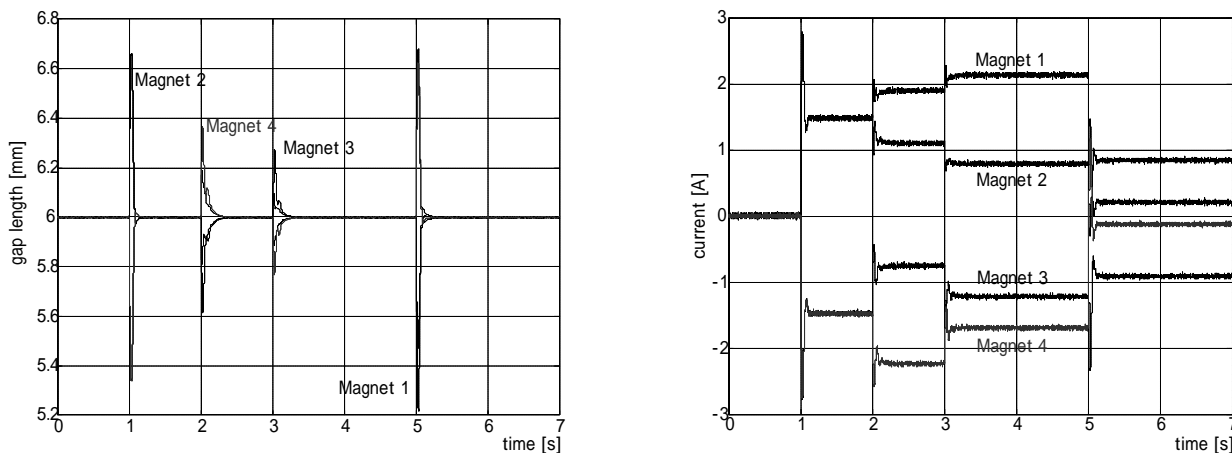


図11 外乱補償のシミュレーション結果
Fig. 11 Simulation Result of Disturbance Compensation

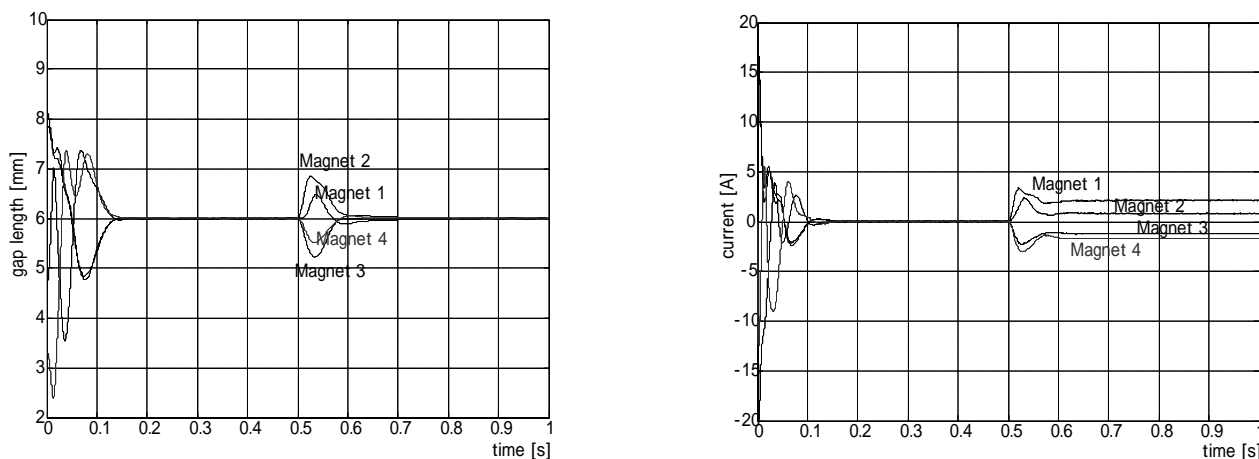


図12 姿勢制御への初期位置の影響
Fig. 12 Influence of Initial Value on Levitation Control

め鉛直駆動用として十分な性能を持つこと、推力の脈動が1%以内であること、d軸電流ゼロ制御時に垂直力を殆ど発生しないことを示した。また、4つのU字型電磁石により、x軸方向・ピッチング・ローリングの3自由度の姿勢制御を行う手法を提案し、その有効性をシミュレーションにより示した。

6. 今後の課題

姿勢制御に関しては、y軸方向については、受動的な安定性は確保しているが、その能動制御は未検討である。この方向にもハードウェアの構造としては制御の自由度を持っているので、その具体的手法についてこれから検討が必要である。また、推進に関しては、電機子巻線の途切れる分岐部分での制御手法及び、位置センシング手法について検討が必要である。これらの課題を解消した後に、実験機を製作して提案手法を実証する予定である。

参考文献

- (1) M. Miyatake, T. Koseki, S. Sone: "Evaluation of Operational Performance in Ropeless Elevator Systems", Journal of The Japan Society of Applied Electromagnetic and Mechanics, Vol. 5, No. 3, pp. 49-55 (1997) (in Japanese)
宮武昌史・古関隆章・曾根 悟:「ロープレスエレベータの運行特性評価」, 日本AEM学会誌, 5, 3, pp. 49-55(1997)
- (2) "Linear-Motor-Driven Vertical Transportation System", Elevator World, pp. 66-72 (1996)
- (3) K. Yoshida, S. Moriyama, X. Zhang: "Contactless Elevator Motion Control in Ropeless Linear Elevator", 2003 National Convention Record, IEE Japan, 5-084, pp. 130 (2003) (in Japanese)
吉田欣二郎, 森山修司, 張 先海:「ロープレスリニアエレベータのコンタクトレス上昇下降制御」, 平成15年電気学会全国大会講演論文集, 5-084, pp. 130 (2003)