

# 二次元搬送装置のための三台のハイブリッド電磁石と三台のリニア誘導モータによる六自由度制御

牧野 祐輔, カディル エルカン\*, 古関 隆章 (東京大学大学院)

Six Degrees of Freedom Control through Three Hybrid Electromagnets and Three Linear Induction Motors for Two Dimensional Conveyance System

Yusuke Makino, Kadir Erkan\*, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

## Abstract

Configuration that the mover has three electromagnets and three linear induction motor (LIM) has been proposed for contactless flexible conveyance system. Hybrid electromagnet which uses permanent magnet can let power consumption converge to zero in steady state, and stator becomes simple because the combination of the LIMs is used for two dimensional drive. The normal attractive force of LIM can increase the carrying capacity of the mover, although it can be also disturbance force for the stabilization of the magnetic levitation system. We have confirmed that the proposed configuration can realize six degrees of freedom control of the mover by experiments.

キーワード：磁気浮上、ハイブリッド電磁石、リニア誘導モータ、六自由度制御

(Keywords: Magnetic Levitation, Hybrid Electromagnet, Linear Induction Motor, Six Degrees of Freedom Control)

## 1. まえがき

リニアモータは、駆動力を得るためにギアなどの仲介を必要としないダイレクトドライブという利点を持ち、磁気浮上技術は非接触で物体を支持できるという利点を持つ。これらを組み合わせた応用例として磁気浮上鉄道や非接触搬送装置があり、すでに実用段階にあるが、その駆動方向は一次元に限られており柔軟性に欠けている。

そこで、より柔軟な搬送を目的とし、我が古関研究室では4極ヨーク結合型ハイブリッド電磁石による3自由度制御と、その永久磁石を界磁として用いる二次元サーフェスマータとの組み合わせによる二次元搬送実験が行われている<sup>[1]</sup>。その概念図を図1に示す。この組み合わせによる二次元搬送装置の可能性は証明されたが、ヨーイング方向は能動制御が不可能であることと固定子側に巻線が必要という複雑さが問題となっていた。そこで本研究ではこれらの問題点を解決するため、図2に示すような可動子に3台のU字型ハイブリッド電磁石と3台のリニア誘導モータ(LIM)を配置することで、剛体の6自由度を全て能動制御できる構成を提案する。電磁石に永久磁石を併用したものをを用いることで定常状態では消費電力をゼロにできることやLIMを用いることで固定子側が導体板と鉄板のみで構成できるという利点を持つ。

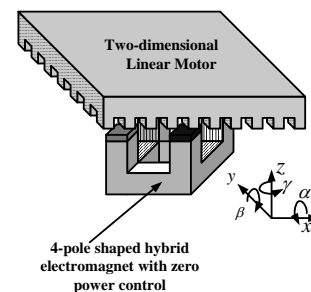


図1. 4極電磁石と二次元リニアモータの協調制御

Fig. 1 Coordination of 4-pole magnet and two-dimensional linear motor

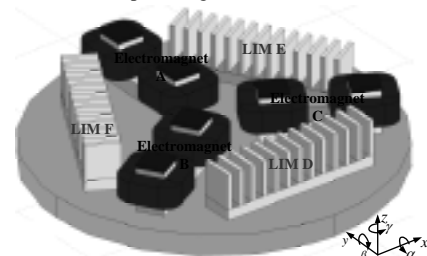


図2. 提案する可動子の構造

Fig. 2 Configuration of the proposed mover

## 2. ハイブリッド電磁石による浮上制御

### 2.1 ハイブリッド電磁石の吸引力特性

本研究では通常の電磁石の表面に永久磁石を貼り付けた

ハイブリッド電磁石が発生する吸引力によって、 $z$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 軸の位置及び姿勢を制御する。仮定磁路法を用いてハイブリッド電磁石が発生する吸引力を計算すると、次式のように表される。ただし、 $f_m$ は電磁石の吸引力、 $N$ はコイルの巻き数、 $S$ は電磁石の断面積、 $\mu_0$ は空気のと透磁率、 $\mu_m$ は永久磁石の比透磁率、 $k$ は吸引力定数、 $I_f$ はコイルに流す電流、 $L_m$ は永久磁石の厚み、 $g_e$ は電磁石の実効ギャップ長(空気ギャップ+二次導体板厚み $d$ )であり、鉄心の透磁率を無限大、磁束の漏れがないと仮定している。

$$f_m = \frac{\mu_0 S N^2}{4} \left( \frac{I_f + 2H_c L_m / N}{g_e + L_m / \mu_m} \right)^2 = k \left( \frac{I_f + I_m}{g_e + L_m / \mu_m} \right)^2 \quad (1)$$

(1)式から分かるとおり吸引力は電流とギャップ長に対し非線形性を持っている。線形制御理論を適用するためには電流、ギャップ長に平衡点を設定し、その回りでテイラー展開を行うことで吸引力の線形化を行う。ここでは定常状態では電磁石に電流を流さないとし、平衡点の電流値を0[A]、ギャップ長を $g_0$ [m]とした。

## 2.2 電磁石による浮上制御手法

ここでは $z$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 軸の位置及び姿勢を制御する手法として分散制御と集中制御を説明する。前者は各電磁石がそれぞれのギャップ長を一定にするように電流を制御する手法であり、後者は座標変換を用いて、ギャップ長から $z$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 軸の位置及び姿勢へ、各電磁石に流す電流から仮想電流( $i_z$ 、 $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ )への変換を行い、これらの仮想的な変数を用いて制御を行う手法である。

### 2.2.1 分散制御

3台の電磁石が全重量の三分の一を支えている時の運動方程式は次式のように表される。ただし、 $f_d$ は外乱力である。ここでは例として電磁石Aの場合を紹介するが電磁石B、Cの場合でも同様である。

$$M \frac{d^2 g_A}{dt^2} = Mg - 3k \left( \frac{i_A + I_m}{g_A + L_m / \mu_m} \right)^2 + f_d \quad (2)$$

この式を平衡点回りで線形化すると次式で表される。ただし $K_A$ は平衡点における電流に対する吸引力の変分係数、 $K_B$ はギャップ長に対する吸引力の変分係数である。

$$M \frac{d^2 \Delta g_A}{dt^2} = -3K_A \Delta i_A + 3K_B \Delta g_A \quad (3)$$

$$K_A = \left. \frac{\partial f_m}{\partial i} \right|_{(0, g_0)}, K_B = - \left. \frac{\partial f_m}{\partial g_e} \right|_{(0, g_0)}$$

本研究では電磁石に流す電流は直流チョップパによって制御されている。制御系を組む上では電流の応答は機械系のダイナミクスよりも十分に速いと考え、指令した電流が時間遅れなく電磁石に流れると仮定して浮上制御系を設計する。この場合位置制御器の出力は電磁石の電流となり、以下の式で表される。制御器としてはギャップ長の積分を含めた状態フィードバックを採用する。

$$i_A = - \begin{bmatrix} Kp_{gA} & Kd_{gA} & Ki_{gA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta g_A \\ \dot{\Delta g}_A \\ \int (\Delta g_A - \Delta g_A^*) dt \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(3)と式(4)からギャップ長の指令値からギャップ長までの伝達関数は次式で表される。

$$\frac{\Delta g_A}{\Delta g_A^*} = \frac{a_{g0}}{a_{g3}s^3 + a_{g2}s^2 + a_{g1}s + a_{g0}} \quad (5)$$

$$a_{g3} = M, a_{g2} = -3K_A Kd_{gA}, a_{g1} = -3K_A Kp_{gA} - 3K_B, a_{g0} = -3K_A Ki_{gA}$$

制御ゲインは(5)式をケスラー標準形にあてはめて決定する。ただし、 $\tau$ は閉ループ系の設計時定数である。分散制御のブロック線図は図3のようになる。

$$\frac{a_{g1}}{a_{g0}} = \tau, \frac{a_{g3}^2}{a_{g4}a_{g2}} = \frac{a_{g2}^2}{a_{g3}a_{g1}} = \frac{a_{g1}^2}{a_{g2}a_{g0}} = 2 \quad (6)$$

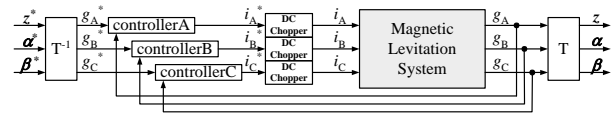


図3. 分散制御のブロック線図

Fig. 3 Block diagram of decentralized control

### 2.2.2 集中制御

集中制御ではギャップ長から姿勢へ、電磁石へ流す電流から仮想電流への座標変換を用いることで可動子全体の姿勢を考慮した制御が可能となる。ここで用いる座標変換は可動子上の電磁石配置を考慮して次式で表される。ただし、 $l_e$ は可動子の中心から電磁石までの距離である。

$$\begin{pmatrix} \Delta z \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/3 & -1/3 & -1/3 \\ -2/3l_e & 1/3l_e & 1/3l_e \\ 0 & -1/\sqrt{3}l_e & 1/\sqrt{3}l_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta g_A \\ \Delta g_B \\ \Delta g_C \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} \Delta g_A \\ \Delta g_B \\ \Delta g_C \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} i_z \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta i_A \\ \Delta i_B \\ \Delta i_C \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} \quad (8)$$

これらの姿勢および仮想電流を用いて $z$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 軸の運動方程式を導き、電流およびギャップ長に平衡点を設定して各軸について線形化を行う。たとえば $z$ 軸方向の線形化された運動方程式は次式のようになる。

$$Ms^2 \Delta z = K_A \Delta i_z + 3K_B \Delta z \quad (9)$$

各軸の方程式が独立に成立していると仮定して、各軸の制御器を設計する。制御ゲインの決め方は分散制御と同様である。集中制御時のブロック線図を図4に示す。

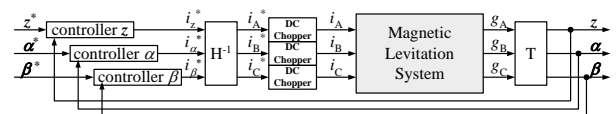


図4. 集中制御のブロック図

Fig. 4 Block diagram of centralized control

### 3. リニア誘導モータによる駆動制御

リニアモータの特徴として、推力を発生すると同時に垂直力(推進方向と垂直方向、つまり二次側の導体と鉄板を引き付けるもしくは遠ざける方向の力)を発生する点がある。本研究では LIM が発生する垂直力を可動子の重量支持に利用する。ギャップ長を小さくすれば発生する推力、垂直力は大きくなるが、その分装置の可動域が小さくなるため浮上制御の面で不利になる。そこで、 $x$ 、 $y$ 、 $\gamma$  軸制御に十分な推力と可動子重量の 10%程度を支えられる垂直力を発生させ、ある程度の可動域を確保するために定常時の LIM の空気ギャップは 4.0[mm]とした。

LIM の推力  $F_i$  はすべり周波数  $sf$  によって制御する。これは すべり周波数が小さい領域では推力はすべり周波数にほぼ比例するという特性を利用している。実験室レベルではせいぜい 0.05[m/s]程度の速度しか発生しないことから、式(10)の関係が常に成立していると仮定できる。

$$F_i \approx K sf \quad (10)$$

すべり周波数制御を行う場合には各 LIM の速度が測定されていないとできない。そこで前述した集中制御と同様に座標変換を用いて各 LIM の速度を測定する。LIM の配置を考慮して、LIMD、E、F の推力から  $x$ 、 $y$ 、 $\gamma$  軸方向への力及びトルクの変換は(11)式のように、 $x$ 、 $y$ 、 $\gamma$  軸上の速度から LIMD、E、F の速度への変換は(12)式のように表される。ただし  $l_i$  は可動子の中心から LIM までの距離である。

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ T_\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ l_i & l_i & l_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{iD} \\ F_{iE} \\ F_{iF} \end{pmatrix} = L \begin{pmatrix} F_{iD} \\ F_{iE} \\ F_{iF} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} v_D \\ v_E \\ v_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & l_i \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & l_i \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & l_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_\gamma \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_\gamma \end{pmatrix} \quad (12)$$

これらの座標変換を用いて各軸の運動方程式を導き、制御系を設計する。 $x$ 、 $y$ 、 $\gamma$  軸の位置決めには図 5 に示したようなカスケード制御を行う。つまり、位置制御器からは速度の指令値が出力され、速度制御器からは各軸への力及びトルクの指令値が出力される。また、位置および速度の制御器は PI 制御を行うこととし、電流制御器では電流振幅  $i_i$  は 2.0[A]で一定とし、指令されたすべり周波数が実現されるように電流の周波数を調整するような制御を行う。

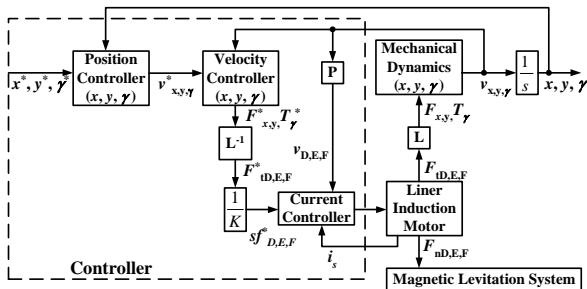


図5  $x$ 、 $y$ 、 $\gamma$ 軸制御のブロック線図

Fig. 5 Block diagram of  $x$ ,  $y$ ,  $\gamma$  control

### 4. 実験機による検証

本章では、提案した磁気浮上制御手法の比較を行った実験結果と 2 台の LIM による一次元駆動実験を行い、駆動系が浮上系に与える影響について調べた結果を報告する。

#### 4.1 実験機の構成

浮上および駆動制御は DSP により行う。DSP を用いることで制御周期を一定にすることができる。浮上制御の流れとしては可動子に取り付けられている LED 変位センサで各電磁石のギャップ長を測定し、AD 変換ボードを通してギャップセンサの情報を DSP に取り込む。そのギャップセンサの情報に基づいて電磁石に流す電流指令値が演算され、その指令された電流値が電磁石に流れるようにインバータボードからインバータユニットにゲート信号が送られる。駆動制御も同様で、可動子の位置情報を超音波センサによって測定し、その情報に基づいて各 LIM に与える電流値を演算し、インバータボードによってインバータユニットへゲート信号が送られる。ギャップセンサもしくは位置センサの情報は 500[ $\mu$ s]で取り込まれ、電流の指令値が更新される。浮上制御系では電流制御を 50[ $\mu$ s]で行い、指令された電流値が電磁石に流れるようにゲート信号を出力する。駆動制御系はキャリア周波数が 500[Hz]の三角波変調によって三相電圧が各 LIM に与えられる。固定子は鉄板と銅板を張り合わせたものをアングル材で固定して用いた。固定子の表面積は 500 × 500[mm<sup>2</sup>]である。実験機の定数を表 1 に、可動子と固定子の概観写真を図 6 に示す。ただし、 $J_\alpha$ 、 $J_\beta$ 、 $J_\gamma$  はそれぞれ  $\alpha$  軸方向、 $\beta$  軸方向、 $\gamma$  軸方向の慣性モーメントである。

表1 実験機の定数

Table 1 Coefficients of the facility

$M$	14.2[kg]	$k$	$1.57 \times 10^{-5}$ [Nm <sup>2</sup> /A <sup>2</sup> ]
$g_0$	5.70[mm]	$I_m$	15.0[A]
$L_m$	3.00[mm]	$d$	2.00[m]
$J_\alpha$	0.0569[kgm <sup>2</sup> ]	$J_\beta$	0.0621[kgm <sup>2</sup> ]
$J_\gamma$	0.1431[kgm <sup>2</sup> ]	$l_e$	0.0850[m]
$l_i$	0.100[m]	$\tau$	0.0700[s]



図6 可動子と固定子の概観写真

Fig. 6 Photograph of the facility

#### 4.2 分散制御と集中制御の比較

本節では定姿勢制御時の目標値応答で分散制御と集中制御の比較を行う。図 7、図 8 には  $z$  軸方向の位置指令値を浮上開始から 1.5 秒の時点で 0[mm] から 0.5[mm] に変更したときの姿勢の応答を示す。同様に図 9、図 10 には  $\beta$  軸方向の姿勢の指令値を浮上開始から 1.5 秒の時点で 0[rad] から 0.588[rad] に変更したときの姿勢の応答を示す。これらの結果から分散制御、集中制御では  $z$  軸方向の応答はほぼ同じであるが、回転方向については集中制御のほうが指令値への収束が速いことがわかる。これは分散制御ではギャップ長の方向、つまり  $z$  軸方向のダイナミクスのみから制御系を設計しているが、集中制御ではそれに加えて回転方向のダイナミクスを制御系に考慮できることが原因であると考えられる。

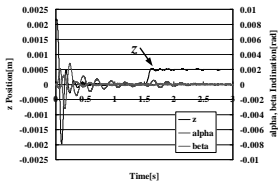


図7 目標値応答  
( $z$ 軸方向、分散制御)  
Fig. 7 Command response  
( $z$  direction, decentralized)

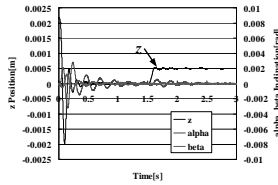


図8 目標値応答  
( $z$ 軸方向、集中制御)  
Fig. 8 Command response  
( $z$  direction, centralized)

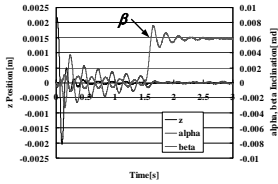


図9 目標値応答  
( $\beta$ 軸方向、分散制御)  
Fig. 9 Command response  
( $\beta$  rotation, decentralized)

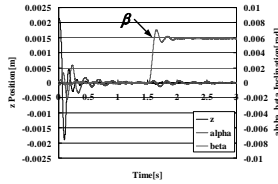


図10 目標値応答  
( $\beta$ 軸方向、集中制御)  
Fig. 10 Command response  
( $\beta$  rotation, centralized)

#### 4.3 二台のLIMによる一次元駆動実験

本節ではLIMEとLIMFを用いて  $y$  軸方向に一次元駆動を行った場合の浮上系に対する応答について説明する。図 11 には  $z$  軸方向の振動の様子を、図 12 には  $\alpha$  軸に起きる振動の様子を、図 13 には  $\beta$  軸に起きる振動の様子を示す。駆動時には  $z$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  軸全てが静止時よりも振動的になっている。これはLIMの垂直力がギャップ長に依存性を持っていることが原因である。また、図 11 と図 12 を見ると  $y$  軸の位置指令値が変更する瞬間に  $z$ 、 $\alpha$  軸に対して大きな振動が発生していることがわかる。これはLIMに推力を発生させるためにはすべり周波数を与える必要があるが、これによって垂直力が小さくなるのが原因である。一方、図 13 を見ると  $\beta$  軸にはこのような振動が観測されていないことからLIMEとLIMFが等しい垂直力を発生していることがわかる。

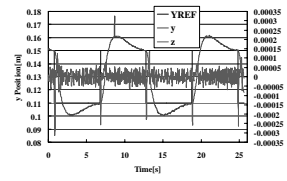


図11  $z$  軸方向の振動  
( $y$ 軸方向への駆動時)  
Fig. 11 Vibration of  $z$  direction  
( $y$  axis direction driving)

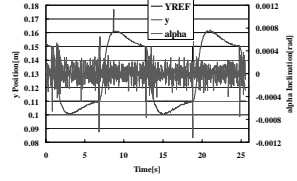


図12  $\alpha$  軸方向の振動  
( $y$ 軸方向への駆動時)  
Fig. 12 Vibration of  $\alpha$  rotation  
( $y$  axis direction driving)

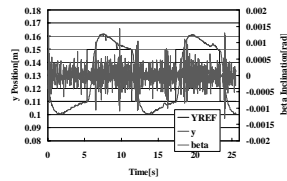


図13  $\beta$  軸の振動  
( $y$ 軸方向への駆動時)  
Fig. 13 Vibration of  $\beta$  rotation  
( $y$  axis direction driving)

#### 5. まとめ

本研究では、柔軟な非接触搬送を目的として可動子に3台のハイブリッド電磁石と3台のLIMを持つ構成を提案した。この電磁石を3台用いた浮上制御方法として、分散制御と集中制御を提案し、磁気浮上実験を通してそれらの比較を行った。また、LIMについても発生する推力と垂直力のすべり周波数とギャップ長に対する特性を調べ、3台のLIMを協調させて用いた駆動系の制御方法を提案した。実験では二次元駆動には至らなかったが、一次元駆動実験を通して駆動時にも浮上制御系が破綻せず、提案したシステムが実現可能であることが証明された。

今回、実験で二次元駆動ができなかった理由は二次元平面上の位置を測定することが困難であったことである。これを解決する方法として、デジタルカメラで撮影された画像から位置を測定するビジュアルセンシングの技術を導入する予定である<sup>[2]</sup>。一般的なデジタルカメラは一秒間に約30フレームという遅いサンプリング周期しか持っておらず、さらに大きな観測雑音が入る可能性がある。この影響を低減するためには異なる二種類のサンプリングレートを持つデジタルオブザーバを定常カルマンフィルタとして設計し状態推定を行うことが有効であると考えられる<sup>[3]</sup>。

#### 参考文献

- [1] 劉江桁, 古関隆章, 乾成里, 大平鷹一: “4極3自由度浮上制御電磁石を界磁とする二次元LSM駆動実験”, 電気学会リニアドライブ研究会, LD-02-83
- [2] 出口光一郎: “ロボットビジョンの基礎”, コロナ社, 2000
- [3] L. Kovudhikulrungsri: “Discrete-Time Observer with Dual Sampling Rates and its Applications to Drive Control with Wide Speed Range”, 東京大学博士論文, 2004