

磁気浮上支持された二次元駆動アクチュエータ

牧野祐輔*, 古関隆章 (東京大学)

Induction Type Two-Dimensional Actuator with Magnetic Suspension

Yusuke Makino, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

Abstract

The combination of electromagnetic suspension and linear motor has been widely used in many industrial fields because of various advantages. A mover that has 3 electromagnets and 3 linear induction motors is proposed in this paper. It can control 6 degrees of freedom and stator can be simple. As posture control methods, decentralized and centralized controls are proposed and they are compared in a simulation. The centralized control gives preferable response in the levitation control of such a rigid mover.

キーワード：6自由度制御、リニア誘導モータ、磁気浮上、分散制御、集中制御

Key words: 6 degrees of freedom control, Linear induction motor, Magnetic suspension, Decentralized control, Centralized control

1. はじめに

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[1]、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。その概念図を図1に示す[2][3]。

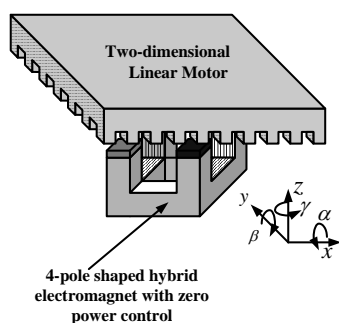


図1. 4極ヨーク結合型ハイブリッド電磁石と二次元リニアモータの協調制御

Figure 1. Coordination of 4-pole electromagnet and two-dimensional linear motor

この組み合わせによる二次元搬送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。本研究ではこれらの問題点を解決するため、図2、図3のよう

な構成を提案する。可動子に3台のU字型マグネットと3台のリニア誘導モータ(LIM)を配置することで、剛体の6自由度を制御できる構成となり、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。

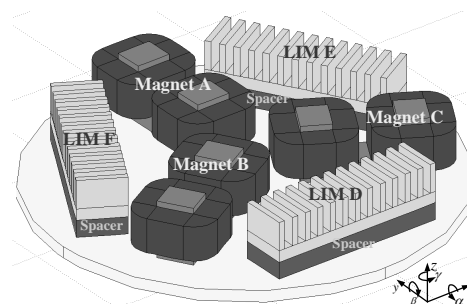


図2. 提案方式

Figure 2. Configuration of the proposed mover

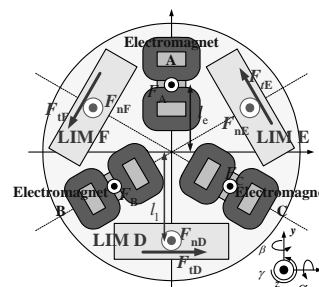


図3. 電磁石とLIMの配置

Figure 3. Location of electromagnets and LIMs

2. リニア誘導モータ(LIM)

2.1 LIMの特性

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。提案方式では可動子側に LIM と電磁石を配置した構成となっており、可動子の重量が大きくなってしまふので、LIM が発生する垂直力を可動子の重量支持に利用する。図 4 に本研究で用いる予定である LIM の形状を、図 5、図 6 には磁界解析によって得られた推力及び垂直力のギャップ長、すべり周波数依存性を示す。解析の条件としては電流振幅 i_s を 3.0[A] で一定とし、二次導体板の厚みを 2.0[mm]、抵抗率を $2.45 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m]$ 、鉄心の比透磁率を 700、ポールピッチを 36[mm]、スロット数を 12 とした。

解析結果から推力及び垂直力について近似的に次式が得られる。ただし、 sf はすべり周波数、 g_{el} は LIM の実効ギャップ長(空気ギャップ+二次導体板厚み)、 K_t 、 T_n は推力の定数、 K_n 、 T_m は垂直力の定数である。

$$F_t = \frac{K_t}{g_{el}^{1.68}} \frac{sf i_s^2}{1 + (sf T_n)^2} \quad (1)$$

$$F_n = \frac{K_n}{g_{el}^{1.85}} \frac{i_s^2}{1 + (sf T_m)^2} \quad (2)$$

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から不利になる。そこで、 x 、 y 、 γ 軸制御に十分な推力と可動子重量の 20%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。

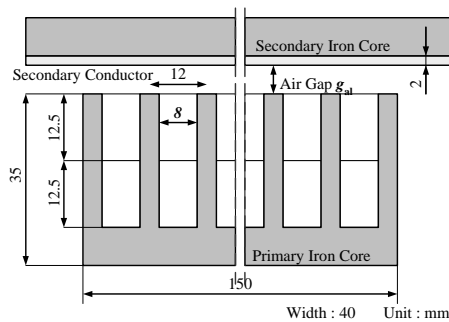


図4. LIMの形状

Figure 4. Configuration of a LIM

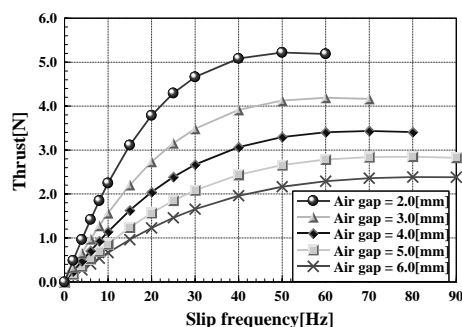


図5. すべり周波数、ギャップ長 - 推力特性

Figure 5. Characteristics of slip frequency, gap length – thrust

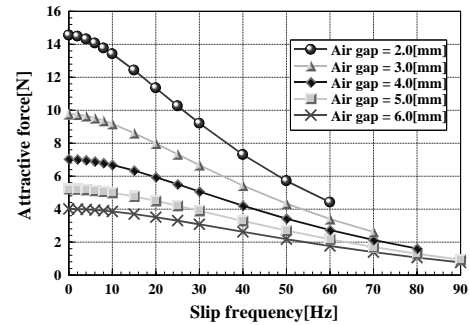


図6. すべり周波数、ギャップ長 - 垂直力特性

Figure 6. Characteristics of slip frequency, gap length – normal force

2.2 LIMによる x 、 y 、 γ 軸の位置決め制御手法

図 5 から分かるとおり、すべり周波数が小さい領域では推力はすべり周波数に比例する。実験室レベルではせいぜい 0.20[m/s]程度の速度しか発生しないことから、この関係が常に成立していると仮定して推力はすべり周波数制御を行う。この関係は次式のように表される。

$$F_t \approx \frac{K_t}{g_{el}^{1.68}} i_s^2 sf = K sf \quad (3)$$

LIM の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ければならない。そこで後述する集中制御と同様に座標変換を用いる。LIM の配置を考慮して、LIMD~F の推力から x 、 y 、 γ 軸方向への力及びトルクの変換は(4)式のように、 x 、 y 、 γ 軸上の速度から LIMD~F の速度への変換は(5)式のように現される。ただし l_1 は可動子の中心から LIM までの距離である。

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ T_\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ l_1 & l_1 & l_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{tD} \\ F_{tE} \\ F_{tF} \end{pmatrix} = L \begin{pmatrix} F_{tD} \\ F_{tE} \\ F_{tF} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} v_D \\ v_E \\ v_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & l_1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & l_1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & l_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_\gamma \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_\gamma \end{pmatrix} \quad (5)$$

また、運動方程式は次式となる。ただし、 M は可動子の質量、 J_γ は γ 方向の慣性モーメントである。

$$\begin{aligned} M \frac{d^2}{dt^2} x &= F_x \\ M \frac{d^2}{dt^2} y &= F_y \\ J_\gamma \frac{d^2}{dt^2} \gamma &= T_\gamma \end{aligned} \quad (6)$$

x 、 y 、 γ 軸の位置決めには図 7 に示したようなカスケード制御を行う。電流制御器では電流振幅 3.0[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。

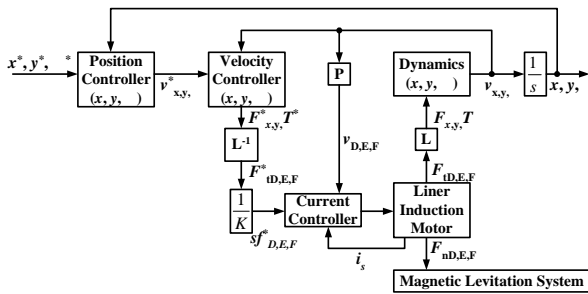


図7. x、y、z 軸制御のブロック線図
Figure 7. Block diagram of x, y, z control

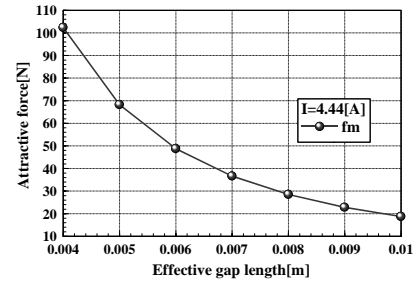


図10. 実効ギャップ長 - 吸引力特性
Figure 10. Characteristic of gap length - attractive force

3. 電磁石の吸引力特性

本研究では電磁石が発生する吸引力を用いて z、x、y 軸の位置及び姿勢を制御する。本研究で用いる予定の電磁石の形状を図 8 に示す。仮定磁路法を用いた時の吸引力は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、 μ_0 は空気の透磁率、 k は吸引力定数、 i はコイルに流す電流、 g_{ee} 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)である。

$$f_m = \frac{\mu_0 N^2 S}{4} \left(\frac{i}{g_{ee}} \right)^2 = k \left(\frac{i}{g_{ee}} \right)^2 \quad (7)$$

静磁界解析によりギャップ長及び電流に対する電磁石が発生する吸引力の特性を調べた結果をそれぞれ図 9、10 に示す。これらの結果から k は $9.23 \times 10^{-5} [\text{Nm}^2/\text{A}^2]$ と算出される。また、式(7)や図 9、10 から分かるとおり吸引力は電流とギャップ長に対して非線形性を持っていることが分かる。線形制御理論を適用するためには電流、ギャップ長それぞれに平衡点(I_0, g_0)を設定し、その回りでテイラー展開を行うことで吸引力を線形化する。

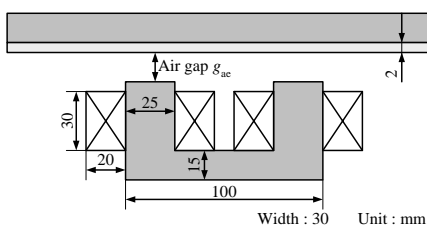


図8. 電磁石の形状
Figure 8. Configuration of an electromagnet

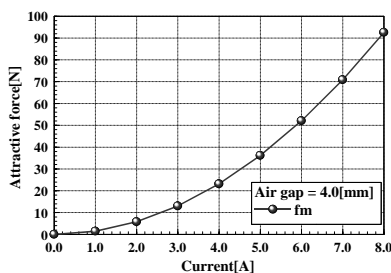


図9. 電流 - 吸引力特性
Figure 9. Characteristic of current - attractive force

4. 電磁石による浮上制御手法

ここでは z、x、y 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、x、y 軸の位置及び姿勢へ、各電磁石に流す電流から仮想電流($i_{c,i}$, i)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。

4.1 分散制御

それぞれの電磁石が全重量の三分の一を支えている時の、LIM の垂直力の影響を含めた運動方程式及び電気回路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。

$$\frac{M}{3} \frac{d^2 g_A}{dt^2} = \frac{Mg}{3} - k \left(\frac{i_A}{g_A} \right)^2 - F_n + f_d \quad (8)$$

$$e_A = \frac{d(Li_A)}{dt} + R_0 i_A \quad (9)$$

これらの式を平衡点回りで線形化すると次式で表される。

$$k \left(\frac{I_0}{g_0} \right)^2 = \frac{Mg}{3} \quad (10)$$

$$\frac{M}{3} s^2 \Delta g_A = -K_A \Delta i_A + (K_B + K_C) \Delta g_A \quad (11)$$

$$K_A = \frac{\partial f_m}{\partial i} \Big|_{(I_0, g_0)}, K_B = -\frac{\partial f_m}{\partial g_{ee}} \Big|_{(I_0, g_0)}, K_C = -\frac{\partial f_n}{\partial g_{el}}$$

$$\Delta e_A = R_0 \Delta i_A + L_0 s \Delta i_A - V_{e0} I_0 v_{g_A} \quad (12)$$

$$V_{e0} = \frac{\mu_0 N^2 S}{2g_0^2}$$

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。

$$\Delta e_A = -K_{pg} \Delta g_A - K_{dg} s \Delta g_A - K_{lig} \Delta i_A + K_{ig} (\Delta g_A^* - \Delta g_A) / s \quad (13)$$

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。

$$\frac{\Delta g_A}{\Delta g_A^*} = \frac{a_{g0}}{a_{g4}s^4 + a_{g3}s^3 + a_{g2}s^2 + a_{g1}s + a_{g0}} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} a_{g4} &= ML_0, a_{g3} = M(R_0 + K_{ig}), \\ a_{g2} &= -3K_A(K_{dg} - V_{e0}I_0) - 3(K_B + K_C)L_0, \\ a_{g1} &= -3K_A K_{pg} - 3(K_B + K_C)(R_0 + K_{ig}), a_{g0} = -3K_A K_{ig} \end{aligned}$$

制御ゲインはケスラー標準形に従って決定する。ただし、は設計上の時定数である。

$$\frac{a_{g1}}{a_{g0}} = \tau, \frac{a_{g3}^2}{a_{g4}a_{g2}} = \frac{a_{g2}^2}{a_{g3}a_{g1}} = \frac{a_{g1}^2}{a_{g2}a_{g0}} = 2 \quad (15)$$

分散制御時のブロック線図は図 11 のようになる。

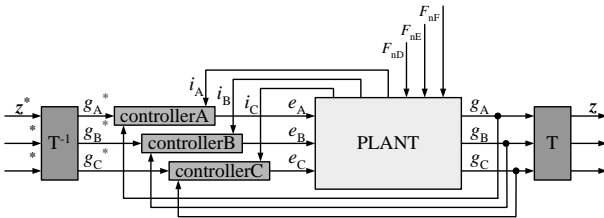


図11. 分散制御のブロック線図

Figure 11. Block diagram of decentralized control

4.2 集中制御

先にも述べたが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。

$$\begin{pmatrix} \Delta z \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/3 & -1/3 & -1/3 \\ -2/3l_e & 1/3l_e & 1/3l_e \\ 0 & -1/\sqrt{3}l_e & 1/\sqrt{3}l_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta g_A \\ \Delta g_B \\ \Delta g_C \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} \Delta g_A \\ \Delta g_B \\ \Delta g_C \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta i_z \\ \Delta i_\alpha \\ \Delta i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta i_A \\ \Delta i_B \\ \Delta i_C \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} \Delta i_A \\ \Delta i_B \\ \Delta i_C \end{pmatrix} \quad (17)$$

これらの姿勢および仮想電流を用いると各方向の運動方程式及び回路方程式は次式のように表される。ただし、 J は 方向の慣性モーメント、 J は 方向の慣性モーメントである。

$$\begin{aligned} M \frac{d^2}{dt^2} z &= F_A + F_B + F_C + F_{nD} + F_{nE} + F_{nF} - Mg - F_{dz} \\ J_\alpha \frac{d^2}{dt^2} \alpha &= l_e F_A - \frac{l_e}{2}(F_B + F_C) - l_l F_{nD} + \frac{l_l}{2}(F_{nE} + F_{nF}) - T_{d\alpha} \quad (18) \\ J_\beta \frac{d^2}{dt^2} \beta &= \frac{\sqrt{3}}{2} l_e (F_B - F_C) + \frac{\sqrt{3}}{2} l_l (F_{nF} - F_{nE}) - T_{d\beta} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta e_z &= R_0 \Delta i_z + L_0 s \Delta i_z + 3V_{e0} I_0 v_z \\ \Delta e_\alpha &= R_0 \Delta i_\alpha + L_0 s \Delta i_\alpha + \frac{3}{2} l_e V_{e0} I_0 \omega_\alpha \end{aligned} \quad (19)$$

$$\Delta e_\beta = R_0 \Delta i_\beta + L_0 s \Delta i_\beta + \frac{3}{2} l_e V_{e0} I_0 \omega_\beta$$

分散制御の時と同様に電流およびギャップ長に平衡点を設定し、各軸について線形化を行うとこれらの式は、

$$\begin{aligned} Ms^2 \Delta z &= K_A \Delta i_z + 3(K_B + K_C) \Delta z \\ J_\alpha s^2 \Delta \alpha &= l_e K_A \Delta i_\alpha + \frac{3}{2} (l_e^2 K_B + l_l^2 K_C) \Delta \alpha \end{aligned} \quad (20)$$

$$J_\beta s^2 \Delta \beta = l_e K_A \Delta i_\beta + \frac{3}{2} (l_e^2 K_B + l_l^2 K_C) \Delta \beta$$

$$\begin{aligned} \Delta e_z &= R_0 \Delta i_z + L_0 s \Delta i_z + 3V_{e0} I_0 v_z \\ \Delta e_\alpha &= R_0 \Delta i_\alpha + L_0 s \Delta i_\alpha + \frac{3}{2} l_e V_{e0} I_0 \omega_\alpha \end{aligned} \quad (21)$$

$$\Delta e_\beta = R_0 \Delta i_\beta + L_0 s \Delta i_\beta + \frac{3}{2} l_e V_{e0} I_0 \omega_\beta$$

と表せる。相互干渉を無視して各軸の方程式が独立に成立していると仮定して、各軸についての制御器を線形化された式に基づいて設計する。制御ゲインの決め方は分散制御のときと同様である。集中制御時のブロック線図を図 12 に示す。

$$\begin{aligned} \Delta e_z &= -K_{pz} \Delta z - K_{dz} s \Delta z - K_{iz} \Delta i_z + K_{iz} (\Delta z^* - \Delta z) / s \\ \Delta e_\alpha &= -K_{p\alpha} \Delta \alpha - K_{d\alpha} s \Delta \alpha - K_{i\alpha} \Delta i_\alpha + K_{i\alpha} (\Delta \alpha^* - \Delta \alpha) / s \quad (22) \\ \Delta e_\beta &= -K_{p\beta} \Delta \beta - K_{d\beta} s \Delta \beta - K_{i\beta} \Delta i_\beta + K_{i\beta} (\Delta \beta^* - \Delta \beta) / s \end{aligned}$$

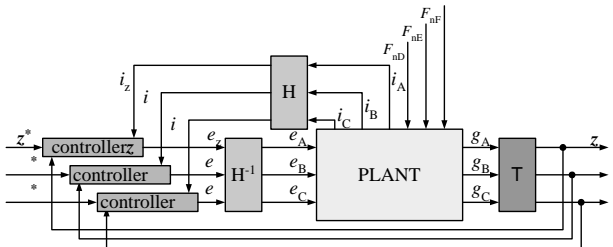


図12. 集中制御のブロック線図

Figure 12. Block diagram of centralized control

5.6 自由度制御のシミュレーション

5.1 シミュレーションの条件

Simulink 上で 6 自由度制御のシミュレーションを行った。表 1 にシミュレーションで用いた定数を示す。時間軸上の条件は以下のようになっている。

Time = 0[s]: 初期位置(z_0, θ_0, ϕ_0) = (-0.003, 0, 0)から浮上開始

Time = 1[s]: LIMを励磁、垂直力発生

Time = 2[s]: 軸方向の外乱1.28[Nm]発生

Time = 3[s]: 位置指令値($x_{ref}, y_{ref}, z_{ref}$)が(0.1, 0.2, 0)へ変化

Time = 8[s]: シミュレーション終了

表1. シミュレーションの条件

TABLE 1. SIMULATION CONDITIONS

M	10.4[kg]	k	$9.23 \times 10^{-5}[\text{Nm}^2/\text{A}^2]$
J	0.0726[kgm ²]	J	0.0712[kgm ²]
l_e	0.090[m]	l_1	0.125[m]
g_0	8.00[mm]	I_0	4.44[A]
L_0	0.0208[H]	R_0	2.00[]
J	0.134[kgm ²]		0.0400[s]

5.2 シミュレーション結果

分散制御を行った場合の6自由度制御のシミュレーション結果を図13、図14に、集中制御を行った場合の結果を図15、図16に示す。これらの結果から、どちらの制御方法でも6自由度制御は可能であるといえる。図14と図16を比較すると浮上開始から2秒の時点までは両方の応答波形はほぼ同じになっている。これはギャップ長とz軸の方向が一致していることに起因する。しかし、2秒の時点で軸方向の外乱が発生すると、回転方向のダイナミクスを制御系設計時に考慮していない分散制御では比較的不安定になっていることが分かる。また、3秒の時点でx、y、軸の位置決め制御が開始するため、各LIMはすべり周波数を持つことになり垂直力が変化するが、その変化が浮上系に与える影響は非常に小さいことが分かった。

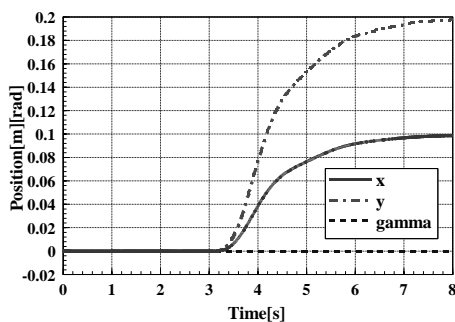


図13. 分散制御時のx, y, γ

Figure 13. Position (x, y, γ) (Decentralized control)

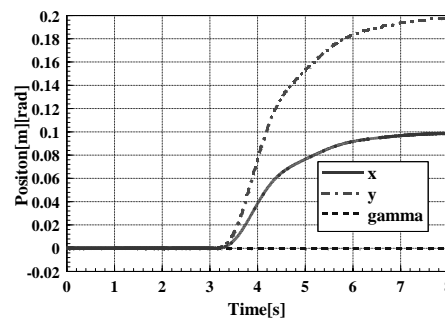


図15. 集中制御時のx, y, γ

Figure 15. Position (x, y, γ) (Centralized control)

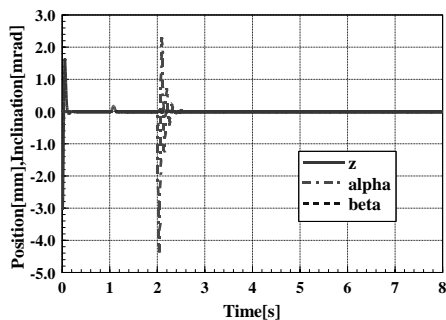


図14. 分散制御時のz, α , β

Figure 14. Posture (z, α , β) (Decentralized control)

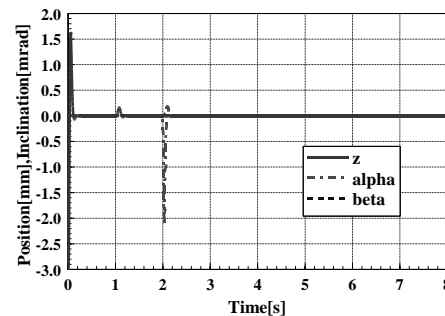


図16. 集中制御時のz, α , β

Figure 16. Posture (z, α , β) (Centralized control)

次に l_e を変えた時の軸方向の外乱に対する応答で、分散制御の場合を図17-19に、集中制御の場合を図20-22に示す。 l_e が大きいくほど慣性モーメントも大きくなり、回転方向の外乱に対して安定になる。両制御方法を比較すると、分散制御では l_e が小さい値では発散してしまうが、 l_e の大きさを考慮して制御系を組んでいる集中制御ではどの l_e に対してもほぼ同じ応答を示していることが分かる。

6. まとめと今後の課題

今回の報告では、6自由度制御が可能な、可動子に3台のLIMと3台の電磁石をもつ構成を提案した。LIMが発生する推力と垂直力のすべり周波数及びギャップ長依存性を磁界解析によって調べ、この垂直力によって可動子重量の約20%を支えるように定常ギャップ長を決定し、推力によってx、y、軸を制御する方法を提案した。電磁石についても磁界解析によりその特性を調べ、さらに電磁石による浮上制御の方法として分散制御と集中制御を提案した。提案した構成で6自由度制御が可能であることをシミュレーションによって示し、さらに可動子中心から電磁石までの距離 l_e が変化した時の回転方向外乱に対する応答を分散制御と集中制御を行った場合で比較した。比較の結果、分散制御では l_e によってその安定性が変化するが、集中制御ではほぼ一定の応答が得られることが分かった。

これからは、さらに効率よく可動子の重量を支えるため

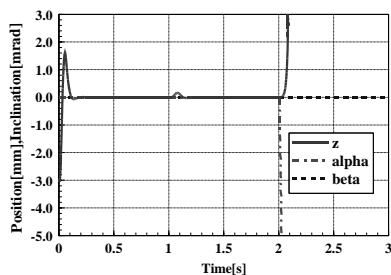


図17. 分散制御時の z , α , β 、 $l_c=0.045$

Figure 17. Posture (z , α , β) (Decentralized control) $l_c=0.045$

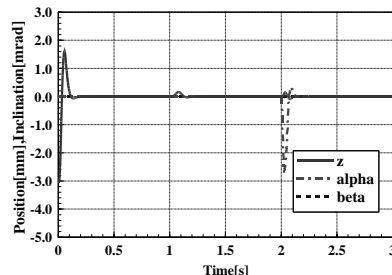


図20. 集中制御時の z , α , β 、 $l_c=0.045$

Figure 20. Posture (z , α , β) (Centralized control) $l_c=0.045$

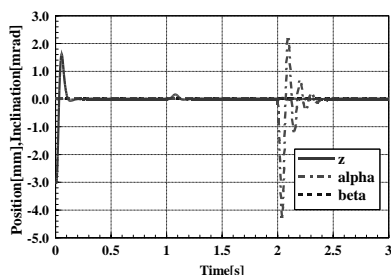


図18. 分散制御時の z , α , β 、 $l_c=0.090$

Figure 18. Posture (z , α , β) (Decentralized control) $l_c=0.090$

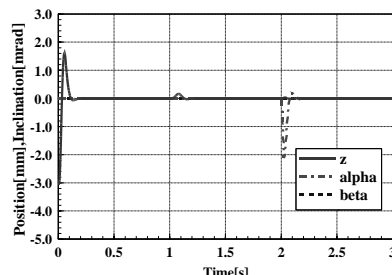


図21. 集中制御時の z , α , β 、 $l_c=0.090$

Figure 21. Posture (z , α , β) (Centralized control) $l_c=0.090$

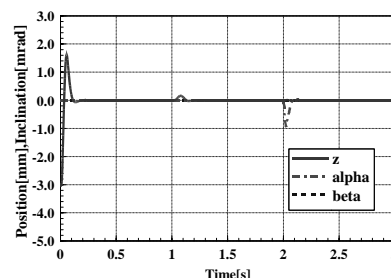


図19. 分散制御時の z , α , β 、 $l_c=0.180$

Figure 19. Posture (z , α , β) (Decentralized control) $l_c=0.180$

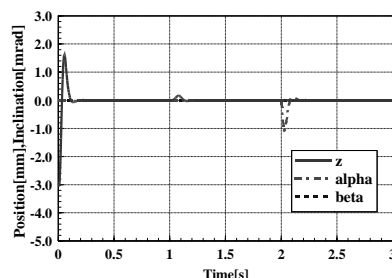


図22. 集中制御時の z , α , β 、 $l_c=0.180$

Figure 22. Posture (z , α , β) (Centralized control) $l_c=0.180$

の工夫として電磁石に永久磁石を貼り付け、ゼロパワー制御を行った場合について検討する予定である。その上で実験機を作成し、提案した構成で6自由度制御が可能であることを証明する。二次元駆動を目的とする研究の共通の問題点として、二次元平面上の位置測定の困難さがあるが、本研究ではその解決策として、カメラをもちいたビジュアルセンシングの技術を応用するつもりである。一般的なデジタルカメラは一秒間に30フレーム程度の遅いサンプリング時間しか持たないが、そこにマルチレートサンプリングオブザーバ[4]を利用して、比較的粗いサンプリング時刻の間を補間し高精度の位置決め制御を行う予定である。

参考文献

- [1] 電気学会:「磁気浮上と磁気軸受」, コロナ社, 1993
- [2] J. Liu, K. Yakushi, T. Koseki: "Robust Control of a 4-Pole Electromagnet in Semi-Zero-Power Levitation Scheme with a Disturbance Observer", Trans. IEE of Japan, Vol.122-D, No.1, pp.7-15, January, 2002
- [3] J. Liu, T. Koseki, S. Inui, Y. Ohira: "The 2-Dimensional LSM Drive Experiments with 4-Pole 3 Degree-of-Freedom Maglev Control Electromagnet", IEEJ Technical Meeting on Linear Drives, LD-02-83.
劉 江彬、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
- [4] L. Kovudhikulrungsri, T. Koseki, "Precise Speed and torque control for AC traction Pure electric Braking system in low speed Range", Trans. IEE of Japan, Vol.122-D, No.11, pp.1027-1033, November, 2002