永久磁石反発型直動案内* (テーブルの静剛性と2自由度の制御による浮上安定化)

進 士 忠 彦^{*1}, 松 本 淳^{*3}
佐 藤 海 二^{*2}, 下 河 辺 明^{*1}

A Linear Table System Using Repulsive Forces of Permanent Magnets (Static Stiffness of Levitated Table and its Stabilization Using Two-Axis Control)

Tadahiko SHINSHI^{*4}, Jun MATSUMOTO,
Kaiji SATO and Akira SHIMOKOHBE

^{*4} Tokyo Institute of Technology, Precision and Intelligence Laboratory,
4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8503 Japan

A linear table supported by repulsive forces between permanent magnets (PMs) can not levitate stably without a feedback control system. To make the simple-structured PM linear table system which has the minimum number of actuators, sensors and controllers, the number of controlled degrees of freedom of the table system should be minimized. In this paper, first, the PM linear table mechanism which has four short PMs attached to the bottom of the table and two fixed parallel long PMs is introduced. Then a dynamic model of the linear table mechanism is derived from equivalent current lines of the PMs. The model indicates that the active control in the two degrees of freedom is indispensable for the stabilization of the linear table. A two-axis controlled PM linear table system is designed and constructed experimentally. Finally, it is clarified that the table can levitate with two-axis PD controllers for lateral and yaw motions.

Key Words: Linear Table, Magnetic Levitation, Permanent Magnet, Repulsive Force, Stability, Stiffness

1. 緒 言

半導体や液晶基板の製造プロセスでは、クリーンルームを汚染しない搬送システムが要求されている。また近い将来には、宇宙空間でのもの作りのために、真空中での動作が可能な軸受・案内も必要になると予想される。このような場合には、磁気浮上を用いたシステムが、非接触式で、真空中での利用が可能であり、摩耗や潤滑剤による汚染の問題がないため適している。

永久磁石と電磁石の吸引力を併用した直動案内は、永久磁石の吸引力で移動テーブル（以下、テーブルで略す）の自重を支え、電磁石による能動制御で永久磁石の吸引方向の不安定性を補償する。上記方式は、電磁石のみの方式と比較して、消費エネルギーや発熱が少ない。このような利点を生かした、省エネタイプの搬送装置が実用化されている^{(1), (2)}。

永久磁石を用いる別の直動案内として、反発方式も古くから提案されている。反発方式は、磁石間のギャップ方向の変位に対して復元力の働く安定系であるため、一見、制御を行わず非接触浮上を実現可能なように思われる。しかしながら、永久磁石間の反発力および横ずれ力の解析^{(3)~(5)}、永久磁石の反発力を用いた案内システムの安定性の検討^{(6)~(8)}から明らかなように、テーブルが安定浮上するためには、能動制御が不可欠である。

このような磁気反発系では、永久磁石の反発力の挙動が複雑なため、制御を行うべきテーブルの運動の自由度が明らかでない場合がある。このため、本来安定な自由度を制御する冗長なシステムを構成したり、逆に、Earnshawの定理⁽⁹⁾から、原理的に永久磁石の配置変更では安定化不可能な自由度を、安定化しようとする試みが、今でもなされているという指摘すらある⁽⁵⁾。

これに対して、Calabelliらは、永久磁石の反発力で支持されたテーブルの剛体5自由度の運動のうち、2自由度の運動のみを電磁石で制御する単純なシステム構成の永久磁石反発型案内を実現した⁽¹⁰⁾。しかしながら、永久磁石の位置を変更する、例えば、対向する永久磁石のギャップを変更したり、水平方向にずらす場合、2自由度の運動の制御によるテーブルの安定浮上が可能か、または、これ以上の制御すべき自由度を省くことは可能かは、不明である。また、案内の寸法諸元や剛性が明らかにされていない。

本研究の目的は、四隅に永久磁石を配置したテーブルと、長尺の固定永久磁石レールにより構成される永久磁石反発型案内に対して、テーブルの安定浮上に必要な最小の制御自由度数を示し、その妥当性を実証することにある。具体的には、(1)一対の永久磁石反発系の剛性に関する基礎方程式を永久磁石の等価線電流モデルから導出する、(2)基礎方程式に基づき、テーブルの安定浮上可能な最小制御自由度数を明らかにし、それを満たす永久磁石のテーブルの重心に対する位置関係を定式化する、(3)上記の妥当性を検証するため、直動案内機構を試作し、テーブルが静止した状態で安定浮上することを確認し、さらに、静剛性を実験により明らかにする。

* 原稿受付 2000年4月4日。

^{*1} 正員、東京工業大学精密工学研究所(〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)。

^{*2} 正員、東京工業大学大学院総合理工学研究科。

^{*3} 日本精工(株)(〒371-8527 群馬県前橋市鳥羽町)(元：東京工業大学大学院)。

E-mail: shinshi@pi.titech.ac.jp

Fig. 1 Simplified model for calculating repulsive force of permanent magnets

2. 永久磁石反発系の剛性の相互関係

永久磁石を質点と見なした場合に、永久磁石対(質点対)の相対変位に対して発生する力の関係は、Earnshawの定理の拡張⁽⁹⁾により、「空間の並進3自由度方向の剛性の和は零である」と表わせる。従って、少なくとも1自由度方向の剛性は負となり、この方向に質点の相対位置を安定に保持するためには、何らかの制御が必要になる。

案内テーブルのように、永久磁石を質点とみなせない一般の場合、並進3自由度に加え、回転3自由度方向の剛性も議論する必要がある、6自由度方向のうち、負の剛性を有する自由度方向を能動制御で安定にすることになる。また、質点とみなせない永久磁石の場合、ある並進自由度方向の相対変位が、他の並進自由度方向への力を発生することもよく経験する。

質点を仮定したEarnshawの定理で示される剛性の関係式のみでは、6自由度方向の全ての剛性を議論したり、自由度間の剛性の干渉項を説明することはできない。このため、本章では、永久磁石反発型直動案内の剛性を明らかにする第一歩として、その基本要素である図1-(1)に示す長尺と短尺の永久磁石間の各方向の剛性に関する基礎方程式を、永久磁石の等価線電流モデルから導出する。

固定永久磁石(以下、固定磁石)の形状中心を原点として、O-x y z座標系を図のように定める。但し、反発力の解析では、以下の仮定を設ける。

- (1) 移動永久磁石(以下、移動磁石)は、x, y, z方向の並進運動のみを行い、移動磁石と固定磁石の平

行は保たれる。

- (2) 固定磁石はx方向に無限に長く、移動磁石のx方向の運動に伴い、移動磁石に働くx, y, z方向の力の変動はない。
- (3) 移動磁石に働く電磁力の分布は均一とし、移動磁石の形状中心 G_{PM} に、y, z方向の並進力のみが働き、トルクは発生しない。

移動磁石がy, z方向に Δy , Δz 微小変位した場合、移動磁石に作用する力の変化分 Δf_y , Δf_z は、次式のように示される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta f_y &= \frac{\partial f_y}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f_y}{\partial z} \Delta z \\ \Delta f_z &= \frac{\partial f_z}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f_z}{\partial z} \Delta z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

次に、式(1)の永久磁石反発系の剛性 $(\partial f_y / \partial y)$, $(\partial f_y / \partial z)$, $(\partial f_z / \partial y)$, $(\partial f_z / \partial z)$ の関係を明らかにする。問題を簡単化するため、図1-(1)に示すように永久磁石の磁化を、 I_1 , I_2 の等価線電流にモデル化する。固定磁石の電流 I_1 による磁界により、移動磁石の電流 I_2 にローレンツ力が発生する。

ここで、固定磁石長 L_1 は無限であると仮定したので、固定磁石の P_4P_1 および P_2P_3 間の線電流の影響を無視する。また、 P_1P_2 と P_3P_4 間は無限長の線電流となり、x方向の磁界は一樣と考えることができるため、移動磁石の P_5P_8 および P_7P_6 間の線電流に働くローレンツ力は相殺される。

以上より、磁石間の反発力は、固定磁石の P_1P_2 と P_3P_4 間の電流 I_1 により発生する磁界と移動磁石の P_6P_5 と P_8P_7 間の電流 I_2 に働くローレンツ力を考慮する図1-(2)の2次元問題として考えることができる。したがって、移動磁石の形状中心 G_{PM} に働く f_y , f_z は、

$$\left. \begin{aligned} f_y &= \frac{\mu_0 I_1 I_2 L_2}{2\pi} \left(\frac{-W_1 + y + W_2}{r_1^2} + \frac{W_1 - y + W_2}{r_2^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{-W_1 - W_2 - y}{r_3^2} + \frac{W_1 + y - W_2}{r_4^2} \right) \\ f_z &= \frac{\mu_0 I_1 I_2 L_2}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_3^2} + \frac{1}{r_4^2} \right) z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

式(2)で、 (y, z) は、移動磁石の形状中心の座標値、 W_1 , W_2 , L_2 は、永久磁石の寸法、 $r_1 \sim r_4$ は、次式で表わされる線電流間の距離、 μ_0 は、真空の透磁率である。

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(W_1 - y - W_2)^2 + z^2} \\ r_2 &= \sqrt{(W_1 - y + W_2)^2 + z^2} \\ r_3 &= \sqrt{(-W_1 - W_2 - y)^2 + z^2} \\ r_4 &= \sqrt{(-W_1 + W_2 - y)^2 + z^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

式(3)を式(2)に代入し、 f_y 、 f_z を y 、 z で偏微分することで、永久磁石反発系の各方向の剛性が導出できる。詳細は省略するが、式を整理することで、次式(4)、(5)が導出される。

$$\frac{\partial f_y}{\partial y} + \frac{\partial f_z}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial f_z}{\partial y} - \frac{\partial f_y}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、式(4)は、 x 方向の剛性が零の場合のEarnshawの定理⁽⁹⁾を示している。また、式(5)は、 y 方向の変位による z 方向の力の変化と、 z 方向の変位による y 方向の力の変化が等しいことを示している。特に、式(5)は、固定磁石と移動磁石をオフセット配置($y \neq 0$)した場合に発生する項であり、オフセットが零($y = 0$)の場合には、 $(\partial f_z / \partial y) = (\partial f_y / \partial z) = 0$ となる。

式(1)、(4)、(5)から、永久磁石反発系の磁石の微小変位に対する電磁力の変化分は、次式のように表すことができる。

$$\begin{cases} \Delta f_y = K_1 \Delta y + K_2 \Delta z \\ \Delta f_z = K_2 \Delta y - K_1 \Delta z \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 K_1 、 K_2 は、次式で表わされる平行永久磁石対の剛性である。

$$\begin{cases} K_1 = \frac{\partial f_y}{\partial y} = -\frac{\partial f_z}{\partial z} \\ K_2 = \frac{\partial f_y}{\partial z} = \frac{\partial f_z}{\partial y} \end{cases}$$

3. 永久磁石反発型直動案内の静剛性と安定性

3.1 永久磁石の配置 本章では、第2章で得られた基礎方程式から、永久磁石反発型直動案内(以下、反発型案内と略す)のテーブルを支持する各自由度方向の磁気ばねの剛性を導出し、剛性が負となる自由度、すなわち制御による安定化が必要な自由度を明らかにする。図2に、本論文で検討する反発型案内の永久磁石配置を示す。この案内内では、テーブルの四隅に配置された移動磁石1～4と駆動方向に十分長い固定磁石5～6が図のように反発系を構成するように対向している。静止しているテーブルの重心を原点に定め、テーブルの案内方向を x 軸とする座標系 $O-x y z$ を図のように定める。移動磁石および固定磁石は、 $x z$ 面に対して対称に配置されている。永久磁石は、直方体で、対向する永久磁石の面は互いに平行とする。

固定磁石は、移動磁石に対して y 方向にオフセットを与え配置し、 z と y 方向の剛性の調整を行う。 y 方向にオフ

Fig. 2 Position of permanent magnets

セットが大きいくほど、 z 方向の剛性は低下するが、逆に、 y 方向の負の剛性の絶対値を小さくすることが可能であることが知られている^{(3),(4)}。

3.2 各自由度方向の剛性 図2のテーブルを剛体、その各自由度方向がばねで支持されていると仮定した場合の剛性を導出する。テーブルの重心の y 、 z 方向の微小変位を Δy 、 Δz 、各軸回りの微小回転をローリング方向; $\Delta \theta$ 、ピッチング方向; $\Delta \phi$ 、ヨーイング方向; $\Delta \psi$ とする。移動磁石1の y 、 z 方向の微小変位を Δy_1 、 Δz_1 とすると、

$$\begin{cases} \Delta y_1 = \Delta y + C \Delta \theta + A \Delta \psi \\ \Delta z_1 = \Delta z + B \Delta \theta - A \Delta \phi \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで、 $(A, B, -C)$ は、テーブル静止時の移動磁石1の形状中心の座標値である。移動磁石2～4の形状中心の微小変位に関しても、同様な関係が成立する。

テーブルの回転運動により、永久磁石間の平行は厳密には保たれないが、微小回転時は、その影響は小さく、前章で示した剛性の関係式は成り立つと考える。式(6)、(7)などから、テーブルの微小変位、微小回転により、磁気ばねに作用する並進力の変化分 ΔF_{Gy} 、 ΔF_{Gz} 、トルクの変化分 $\Delta T_{G\theta}$ 、 $\Delta T_{G\phi}$ 、 $\Delta T_{G\psi}$ は、次式で導出される。

$$\begin{cases} \Delta F_{Gx} = 0 \\ \Delta F_{Gy} = -4K_1 \Delta y + 4(CK_1 - BK_2) \Delta \theta \\ \Delta F_{Gz} = 4K_1 \Delta z \\ \Delta T_{G\theta} = 4(CK_1 - BK_2) \Delta y \\ \quad - 4\{(C^2 - B^2)K_1 - 2BCK_2\} \Delta \theta \\ \Delta T_{G\phi} = 4A^2 K_1 \Delta \phi \\ \Delta T_{G\psi} = -4A^2 K_1 \Delta \psi \end{cases} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(8)の力およびトルクの変動から、各自由度の方向の剛性が次のように導出される。

$$\left. \begin{aligned} K_{Gxx} &= \frac{\Delta F_{Gx}}{\Delta x} = 0 \\ K_{Gyy} &= \frac{\Delta F_{Gy}}{\Delta y} = -4K_1 \\ K_{Gzz} &= \frac{\Delta F_{Gz}}{\Delta z} = 4K_1 \\ K_{G\theta\theta} &= \frac{\Delta T_{G\theta}}{\Delta \theta} = -4\{(C^2 - B^2)K_1 - 2BCK_2\} \cdots \cdots (9) \\ K_{G\phi\phi} &= \frac{\Delta T_{G\phi}}{\Delta \phi} = 4A^2K_1 \\ K_{G\psi\psi} &= \frac{\Delta T_{G\psi}}{\Delta \psi} = -4A^2K_1 \\ K_{Gy\theta} &= \frac{\Delta F_{Gy}}{\Delta \theta} = \frac{\Delta T_{G\theta}}{\Delta y} = 4(CK_1 - BK_2) \end{aligned} \right\}$$

式(9)から、各自由度方向の剛性に関して、下記の点が明らかになる。

- (1) y 方向の剛性 K_{Gyy} と z 方向の剛性 K_{Gzz} は、大きさが等しく、符号が逆である。すなわち y 方向と z 方向の剛性について、一方は正であると、他方が必ず負となる。
- (2) ϕ 方向の剛性 $K_{G\phi\phi}$ と ψ 方向の剛性 $K_{G\psi\psi}$ は、大きさが等しく、符号が逆である。すなわち ϕ 方向と ψ 方向の剛性について、一方が正であると、他方が必ず負となる。
- (3) θ 方向の剛性 $K_{G\theta\theta}$ は、永久磁石間の剛性 K_1 , K_2 、およびテーブル重心に対する移動磁石の位置に依存する。すなわち、 θ 方向の剛性は、移動磁石の配置で正にも負にも設計可能である。
- (4) (1) ~ (3) から、 θ 方向の剛性 $K_{G\theta\theta}$ を磁石配置で正にできれば、 K_1 が正の場合、剛性 K_{Gyy} , $K_{G\psi\psi}$ が負となるため、y と ψ 方向の 2 自由度の制御で安定浮上を実現できる。一方、 K_1 が負の場合、剛性 K_{Gzz} , $K_{G\phi\phi}$ が負となるため、z と ϕ 方向の 2 自由度の制御がテーブルの安定浮上に不可欠である。また、詳細は省略するが、 K_1 が負の場合、剛性 K_{Gyy} , $K_{G\theta\theta}$ が正となる y と θ 方向に対しても、運動を連成させる剛性 $K_{Gy\theta}$ により系が不安定になる。y と θ 方向安定化のためには、少なくとも y と θ 方向いずれか 1 自由度の制御が必要となる。よって、 K_1 が負の場合には、最小 3 自由度の制御が必要である。

4. 永久磁石反発型直動案内の試作

4.1 永久磁石対の剛性 本章では、第3章での知見を基礎に、テーブルの 2 自由度の方向の運動を制御することで、テーブルの案内方向を除く 5 自由度が安定な反発型

Fig. 3 Simulated repulsive forces of a pair of permanent magnets (2D FEM)

案内を設計する。はじめに、永久磁石対の剛性 K_1 , K_2 の具体的な数値を、有限要素法を用いた汎用磁場解析ソフト(アンソフト社製, Maxwell 2D)を用いて求める。

本研究で用いる永久磁石は、図1のように配置され、磁石の寸法は、x, y, z 方向、移動磁石: $30 \times 30 \times 10$ mm, 固定磁石: $300 \times 30 \times 10$ mm とし、いずれの磁石も残留磁束密度 1.36 T, 保磁力 8.8×10^5 A/m で、直線状の減磁曲線を有する理想的永久磁石を仮定する。 K_1 , K_2 を求める永久磁石間のギャップは 10 mm, オフセットは 5 mm とし、これを初期状態とする。磁場解析では、固定磁石は、x 方向に十分長いと仮定し、y z 面の 2 次元問題として計算している。

図1で示した移動磁石を初期状態から y および z 方向に移動させた場合の、移動磁石に働く反発力および横ずれ力の関係を、図3に示す。図より、式(6)の各係数 $K_1 = 3.25 \times 10^3$ N/m, $K_2 = 2.07 \times 10^3$ N/m を得た。

4.2 テーブルの θ 方向の安定化条件 前節の結果と式(9)から明らかのように、案内に前節の永久磁石対を用いた場合、 K_1 は正であるため、移動テーブルの z と ϕ 方向の剛性が正、y と ψ 方向の剛性が負になる。次に、 θ 方向を安定化するためには、 $K_{G\theta\theta} > 0$ とする必要がある。図2における移動磁石の位置を $A = 55$ mm, $B = 145$ mm とした場合、各移動磁石の形状中心を z 方向 -79.7 mm $< C < 263.8$ mm の範囲に設定すると、 θ 方向も安定化できることが、式(9)から導出される。

4.3 反発型案内の試作 機構の概略を図4に示す。テーブルおよび固定部の構造材は、永久磁石が吸着しないように、アルミニウム合金を用いる。移動および固定磁石の寸法、残留磁束密度、保磁力は前節の設定と同一で、ネオジム系永久磁石(住友特殊金属製, NEOMAX48)を用いる。但し、着磁装置の限界から、300mmの長尺永久磁石を同時着磁できないため、分割して着磁した $75 \times 30 \times 10$ mm の磁石を直列に4個並べ、1本の固定磁石としている。

実機では、永久磁石間のオフセット量を 5 mm とした場合、ギャップが 10 mm になるようにテーブルの重量 balan

Fig. 4 Configuration of magnetic linear table system using repulsive forces of permanent magnets

スを調整する。テーブル全体の質量は、16.2 kgである。試作した移動磁石のz方向の座標値は、 $C = 23.2$ mmであり、前節で示した θ 方向の安定条件を満たす。

4.4 電磁石 設計上、剛性が負となるy方向と ψ 方向の不安定性を補償するため、テーブルには、水平向きに、図4の $E_1 \sim E_4$ で示される4個の電磁石(E型コア、ケイ素鋼板厚0.2 mm積層、直径0.6 mmの銅線440回巻)を配置した。電磁石のターゲットにも、積層鋼板(ケイ素鋼板厚み0.3 mm)を用いた。電磁石とターゲット間のギャップは、1mm、コイルには、定常電流として0.5 Aを流している。各電磁石から発生する電磁力 $f_1 \sim f_4$ は、各電磁石でのオフ

セット電流からの変動電流 $i_1 \sim i_4$ 、テーブルの運動に伴うギャップ変化を考慮すると、次式になる。

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= F_0 + K_i i_1 + K_d(y + H_a \theta + A_a \psi) \\ f_2 &= -F_0 - K_i i_2 + K_d(y + H_a \theta + A_a \psi) \\ f_3 &= F_0 + K_i i_3 + K_d(y + H_a \theta - A_a \psi) \\ f_4 &= -F_0 - K_i i_4 + K_d(y + H_a \theta - A_a \psi) \end{aligned} \right\} \dots\dots (10)$$

実験で同定した電流から力の係数 $K_i = 14.5$ N/A, ギャップ変動と力の係数(電磁石の磁気ばね) $K_d = 7.1 \times 10^3$ N/m, コイルのインダクタンス $L = 5.81 \times 10^{-2}$ H, 抵抗 $R = 5.93$ Ω , 電磁石駆動用アンプのゲイン $K_a = 8.89$ (V/V)である。また、アクチュエータが力を発生する中心位置は、 $H_a = 57.2$ mm, $A_a = 60$ mmである。

4.5 動的モデル 図5に、電磁石 $E_1 \sim E_4$ をそれぞれ励磁するためのアンプへの入力電圧 $U_1 \sim U_4$ から、テーブルの重心の変位 Y, Z , 回転角 θ, ϕ, ψ までのブロック線図を示す。ここで、 M はテーブルの質量、 J_θ, J_ϕ, J_ψ は、各軸周りの慣性モーメント、 $C_y, C_z, C_\theta, C_\phi, C_\psi$ は、永久磁石およびテーブルの各軸方向、各軸周りの運動に対して、同軸方向、同軸周りにそれぞれ働く磁気ダンピングと空気粘性抵抗の影響をあらわす減衰係数である。 $F_{dy}, F_{dz}, T_{d\theta}, T_{d\phi}, T_{d\psi}$ は、テーブルの重心に働く外乱力と外乱トルクである。 V_0 は、各電磁石にオフセット電圧を与えるためのオフセット電圧である。

4.6 電磁石の吸引力を考慮したローリング方向の剛性 図5から明らかなようにテーブルのローリング方向の運動に関して、電磁石の磁気ばね K_d と、テーブル重心から電磁石の中心までの距離 H_a を考慮した剛性 $K_{\theta\theta}$ は、式(11)となる。

$$K_{\theta\theta} = K_{G\theta\theta} - 4K_d H_a^2 \dots\dots\dots (11)$$

Fig. 5 Block diagram of magnetic linear table mechanism

Fig. 6 Block diagram of control system

K_d , H_a が大きい場合, $K_{\theta\theta}$ が負となり, テーブルの θ 方向の剛性は負になる. このため, 2自由度方向の制御による安定化が実現できない. よって, H_a を小さく, かつ電磁石のバイアス電流を抑制し K_d を小さくする必要がある. 試作機では, θ 方向の剛性は正($K_{\theta\theta} = 1.18 \times 10^2 \text{ Nm/rad} > 0$)となるように設計している.

5. 制御実験

5.1 制御系 制御系のブロック線図を図6に示す. 図中のMLTMのブロックは, 図5と同一である. デジタルPDコントローラにより, y と ψ 方向の2自由度の制御を行う. 微分は後退差分で実現している. 各電磁石への操作量 $U_1 \sim U_4$ は, PDコントローラ出力 U_y , U_ψ から, 電磁石 E_1 と E_2 , E_3 と E_4 をそれぞれ一組としてプッシュ・プルに駆動するように計算され, アンプ入力として与えられる. コントローラのサンプリング周期は 0.2 ms で, 信号の入出力は, 12ビットのA/DとD/Aボードで, センサ信号の処理と操作量の演算は, CPU (Pentium Pro 200 MHz)で行う. 実験的に決定したコントロールパラメータは, $\beta_y = 2.5 \times 10^3 \text{ V/m}$, $\alpha_y = 30.0 \text{ Vs/m}$, $\beta_\psi = 3.0 \times 10^2 \text{ V/rad}$, $\alpha_\psi = 6.0 \text{ Vs/rad}$, $T_a = 2.0 \times 10^{-4} \text{ s}$ である.

5.2 変位計測 テーブルの重心の変位, 回転角は, 図4に示す6本の渦電流型変位計(電子応用製, AEC-5505型, 測定範囲 2 mm , 分解能 $2 \mu\text{m}$) $S_1 \sim S_6$ の出力 $s_1 \sim s_6$ を用いて, 式(12)から算出する.

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{s_1 - s_2}{2K_s} + H_s \frac{s_3 - s_4 + s_5 - s_6}{4K_s A_s} \\ z &= \frac{s_3 + s_4 + s_5 + s_6}{4K_s} \\ \theta &= \frac{s_3 - s_4 + s_5 - s_6}{4K_s A_s} \\ \phi &= \frac{-s_3 - s_4 + s_5 + s_6}{4K_s A_s} \\ \psi &= \frac{s_1 - s_2}{2K_s A_s} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ここで, $K_s = 5.0 \times 10^3 \text{ V/m}$, $A_s = 100 \text{ mm}$, $H_s = 31.8 \text{ mm}$ である.

(1) Start-up transition

(2) Vibration

Fig. 7 Levitational stability

5.3 浮上開始時のテーブルの挙動と浮上精度 浮上開始時の x 方向を除くテーブル5自由度方向の挙動を図7-(1)に, 制御開始20秒後のテーブルの定常振動の拡大図を図7-(2)に示す. y , ψ 方向の2自由度の制御により, テーブルの安定浮上が可能であることが確認できる.

フィードバック制御が行われているテーブルの y , ψ 方向は, 短時間で浮上開始時の振動が収束しているが, 制御が行われていない z 方向と ϕ 方向は, 残留振動が10秒程度持続しており, 減衰が小さいことが明らかである. また, θ 方向は, 非制御な自由度であるが, 制御が行われている y 方向と干渉しているため, 浮上開始時に, 立ち上がり急峻となっている.

テーブルの定常時の振動幅は, 変位計の分解能 $2 \mu\text{m}$ (並進方向), $2 \times 10^{-5} \text{ rad}$ (回転方向)に対して, 各方向2~3倍以内である. 非制御である z , ϕ , θ 方向の定常時における原点位置からのずれは, 永久磁石の取付誤差や磁化のばらつきによる不釣り合い力に起因していると考えられる. また, 制御された y , ψ 方向は, 非制御方向と同様な理由から不釣り合い力が生じ, 外乱力に対して0型の制御系であるため, 定

常偏差が零に収束しなかったと考えている。

また、案内の設計段階では、x方向の剛性は零のため、実験において、x方向の運動を拘束する必要があると考えていた。しかしながら、実験では、テーブルはx方向に關して、安定した位置に静止したため、x方向に特別な拘束はしていない。テーブルがx方向に留まった原因に関しては、5.5節にて検討する。

5.4 静剛性 テーブルの重心に対して既知の静的外乱力 f_{dx} , f_{dz} , 静的外乱トルク $\tau_{d\theta}$, $\tau_{d\psi}$, $\tau_{d\phi}$ を与え、同時にテーブル重心の変位、回転角を計測し、制御時の各自由度の方向の静剛性を算出する。また、各方向の外乱力、外乱トルクと変位、回転角の静的釣合式は、式(9)の各自由度の剛性、フィードバックゲイン β_y , β_ψ , 電磁石の係数 K_a , K_i , R , K_d とテーブルの重心から電磁石の中心までの距離 H_a を考慮し、以下のように導出できる。

y方向の外乱力 f_{dy} および θ 方向の外乱トルク $\tau_{d\theta}$ と変位 y および回転角 θ の関係は、干渉項を有する剛性行列により、式(13)で示される。

$$\begin{bmatrix} f_{dy} \\ \tau_{d\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{yy} & K_{y\theta} \\ K_{\theta y} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \theta \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、剛性行列の各係数 K_{yy} , $K_{y\theta}$, $K_{\theta y}$, $K_{\theta\theta}$ は、次のようになる。

$$\begin{aligned} K_{yy} &= K_{Gyy} - 4K_d + \frac{4\beta_y K_a K_i}{R} \\ K_{y\theta} &= K_{Gy\theta} - 4K_d H_a \\ K_{\theta y} &= K_{G\theta y} - 4K_d H_a + \frac{4\beta_y K_a K_i H_a}{R} \\ K_{\theta\theta} &= K_{G\theta\theta} - 4K_d H_a^2 \end{aligned}$$

また、 ψ , z , ϕ 方向の外乱力 f_z および外乱トルク $\tau_{d\phi}$ と、変位 z および回転角 ψ , ϕ の関係は、式(14)～(15)で示される。

$$\tau_{d\psi} = K_{\psi\psi} \psi \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$f_{dz} = K_{zz} z \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\tau_{d\phi} = K_{\phi\phi} \phi \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで、各係数は、以下のようになる。

$$\begin{aligned} K_{\psi\psi} &= K_{G\psi\psi} - 4K_d H_a^2 + \frac{4\beta_\psi K_a K_i H_a}{R} \\ K_{zz} &= K_{Gzz}, \quad K_{\phi\phi} = K_{G\phi\phi} \end{aligned}$$

表1に、実測値と、式(13)～(16)より導出した計算値を示す(Simulation 1)。干渉項 $K_{y\theta}$, $K_{\theta y}$ を無視し、並進

Table 1 Static stiffness

	Experiment	Simulation 1 (Error =100× (Exp.-Sim.)/Sim.)	Simulation 2 (Error =100× (Exp.-Sim.)/Sim.)	Unit
K_{yy}	1.63×10^5	1.76×10^5 (-7.4%)	1.79×10^5 (-8.9%)	N/m
$K_{y\theta}$	-2.7×10^3	-3.1×10^3 (-12.9%)	-2.7×10^3 (0.0%)	N/rad
$K_{\theta y}$	8.3×10^3	9.3×10^3 (-10.8%)	9.7×10^3 (-14.4%)	Nm/m
$K_{\theta\theta}$	6.0×10	1.18×10^2 (-49.1%)	6.2×10 (-3.2%)	Nm/rad
$K_{\psi\psi}$	1.40×10^3	1.31×10^3 (+6.8%)	1.37×10^3 (+2.2%)	Nm/rad
K_{zz}	1.00×10^4	1.30×10^4 (-23.0%)	9.6×10^3 (-4.2%)	N/m
$K_{\phi\phi}$	2.4×10	3.9×10 (-38.4%)	2.9×10 (-17.2%)	Nm/rad

及び回転の実測値を比較すると、並進方向の剛性は、 $10^4 \sim 10^5$ N/m のオーダーで、制御された y 方向の剛性 K_{yy} が、制御しない z 方向の剛性 K_{zz} と比較して 1 桁高くなっている。また、回転の剛性は、 $10 \sim 10^3$ Nm/rad のオーダーで、制御された ψ 方向、y 方向と干渉する θ 方向、非制御の ϕ 方向の順で低くなっている。計算値に対する実測値の誤差は、-49.1～+6.8% の範囲にあり、ほぼ設計通りの剛性が得られている。但し、 $K_{\theta\theta}$, $K_{\phi\phi}$ に関しては、誤差が大きくなっている。

このため、誤差の原因の一つを永久磁石の減磁と考え、実験に使用後の永久磁石の表面磁束密度と、同じロットから取り出した未使用の永久磁石の磁束密度を計測した。その結果、使用後の固定、移動磁石の表面磁束密度の平均値は、それぞれ 0.21, 0.31T、未使用の固定、移動磁石の表面磁束密度は、0.26, 0.34T で、固定磁石で 19.2%、移動磁石で 8.8% の表面磁束密度の減少が確認された。

永久磁石反発系の剛性 K_1 , K_2 は、永久磁石の表面磁束密度の積に比例するので、上記より予想される K_1 , K_2 の減少は、26.3% となる。これを考慮して再計算したテーブル各自由度方向の剛性を、表1に示す(Simulation 2)。実験値と、補正した理論値の差は、-17.2～4.2% の範囲となり、誤差が減少し、減磁の影響が大きいたことが明らかになった。また、減磁を考慮した後も残存する誤差の原因は、永久磁石の磁化のばらつき、機構の組み立て誤差によるギャップのばらつきが考えられ、今後詳細に、これら誤差要因の剛性に対する影響を検討する必要がある。

5.5 駆動方向の剛性 5.3節で述べたように、テーブルは、x方向に拘束することなく、静止していた。テーブルをx方向に移動したところ、図8の黒丸で示すよ

Fig. 8 Restoring forces in the x direction

うに、18 mmの移動で復元力約8 Nが発生した。

まず、この原因を固定磁石のx方向の長さが有限であるためと仮定し、汎用磁場解析ソフトを用いた3次元解析により、固定磁石の長さの影響を考慮して、x方向の復元力を算出した。磁石の形状、材質、配置は、第4章の設計値と同一である。その結果、駆動方向20 mmの移動に対して、復元力は図8の白丸で示すように1 N以下で、復元力に対する固定磁石が有限長である影響は小さいことが明らかになった。

次に、固定磁石の磁化の不均一性の影響に関して検討した。4分割の永久磁石から構成される1本の固定磁石のうち、移動磁石の逆磁界の影響を大きく受けた中央2つの磁石の残留磁束密度が15%減磁によって低下したと仮定し、他の条件は白丸の計算と同様に復元力を求めた。その結果、図8の白四角で示す実験と同程度の復元力が算出された。復元力は、円滑なテーブルの移動には好ましくなく、固定磁石の磁化のばらつきをなくす必要があると考えられる。

6. 結 言

四隅に永久磁石を配置したテーブルと、長尺の固定永久磁石レールにより構成される永久磁石反発型直動案内に対して、テーブルの安定浮上に必要な最小の制御自由度数を明らかにし、その妥当性を実証し、以下の結論を得た。

- (1) 永久磁石の等価線電流モデルから、長尺と短尺の永久磁石反発系における磁気ばねの剛性には、 $(\partial f_y / \partial z) = (\partial f_z / \partial y)$ の関係が成り立つことを示した。
- (2) Earnshawの定理および(1)の結果を基に、テーブルを支持する各自由度方向のばねの剛性を導出し、テーブルの安定浮上のために、最小2自由度の運動方向の制御が不可欠であることを明らかにした。
- (3) 2自由度方向の制御でテーブルが安定浮上するための、テーブルの重心に対する永久磁石の配置を明らかにした。

- (4) 試作案内システムにおいて、2自由度方向の制御でのテーブルの安定浮上を確認し、さらに、計測した静剛性が、設計値にほぼ近いことを確認した。

今後の予定として、永久磁石の減磁を発生させない案内設計、静剛性の計算値と実験値の差の原因に関して検討する必要がある。また、さらなるシステムの単純化のため、駆動方向を含め2自由度、もしくは1自由度の制御で、テーブルが安定浮上する永久磁石反発型案内の実現の可能性を検討する。

最後に、本研究を始めるにあたり、御討論頂いた武蔵工業大学の海老原大樹教授および海老原研究室の皆様へ感謝するとともに、本研究の一部が、平成10年度科学研究費補助金基盤(A)(2)課題番号10305013によって実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- (1) 搬送用リニアメカニズム調査専門委員会, 搬送用リニアメカニズムの実用化動向と将来展望, 電気学会技術報告 第657号 (1997), 23-25.
- (2) 森下明平, 明石征邦, 常伝導吸引式磁気浮上系の浮上案内干渉制御, 電学論D, 119-10 (1999), 1259-1268.
- (3) 海老原大樹, 今川和彦, 渡部満, 永久磁石反発形磁気浮上方式の浮上力と横ずれ力の解析, 電学論B, 106-11 (1986), 977-984.
- (4) 海老原大樹, 鈴木利斉, PM形磁気浮上装置の斥力特性, 電学論D, 108-5 (1988), 455-461.
- (5) 村上力, 永久磁石間の磁気力の剛性に関する基礎的検討, 電学論D, 113-4 (1993), 519-524.
- (6) 川口尚士, 海老原大樹, 野口政弘, 和多田雅哉, 平成4年電気学会全国大会講演論文集, 7-115 (1992).
- (7) 檜脇英治, 和多田雅哉, 鳥居肅, 海老原大樹, 空心リニア同期モータを使用した永久磁石反発浮上システムの安定化, 第8回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, No. 96-252 (1996-5), 121-126.
- (8) 川勝英樹, レーザ光や結晶格子を基準に用いた直動案内機構, 精密工学会第238回講習会資料 (これで使える軸受・案内 一軸受・案内の基礎と最新技術動向一, (1997), 27.
- (9) Jayawnt, B. V., Electromagnet suspension and levitation, Proc. R. Soc. Lond. A, 416 (1988), 245-320.
- (10) Carabelli, S., Cerruti, F., Delprete, C., Di Majo, F., Genta, G. and Zanolli, S., A Two Active-axes Suspension for Maglev Vehicles, Proc. 5th Int. Symposium on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan (1996-8), 357-362.