自動姿勢調整機能を持つ吸引式磁気浮上系

莊 志 忠^{*1}, 須 田 義 大^{*2}
小 峰 久 直^{*2}, 岩 佐 崇 史^{*2}

Proposal of Electro-Magnetic-Suspension System with Tilting Control

Chih-chung CHUANG, Yoshihiro SUDA^{*3},
Hisanao KOMINE and Takashi IWASA

^{*3} Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

This paper proposes a new Electro-Magnetic-Suspension (EMS) system which has the ability of banking in curve section. This new EMS system can tilt automatically corresponding to the magnitude of the centrifugal force. Four hybrid-magnets are used to guide and suspend a vehicle at the same time, that is different to a conventional EMS system getting necessary force from a guidance system when running on sharp curve. The Nearly-Zero-Power control method is applied to minimize energy consumption of the hybrid-magnets. The mode of five degrees of freedoms is considered in the simulation and experiment. The results of simulation and experiment show this new EMS system can tilt automatically corresponding to the magnitude of the centrifugal force, and cancel the constant disturbance forces in five directions only with the attraction forces of permanent magnets and the gravity of earth.

Key Words: Maglev, Suspension, Electromagnetic Suspension, Tilting Control, Banking Control, Nearly-Zero-Power Control

1. 緒 言

磁気浮上装置には、浮上機構のみならず誘導・案内機構や、振動制御、遠心力に対する姿勢制御などの仕組みが、実用的なシステムでは必要となる。従来多く提案されている磁気浮上方式は、浮上と推進を中心に検討されてきており、誘導・案内、曲線の旋回により生じる遠心力を打ち消す姿勢調整機構は、独立の装置として考慮されている例がほとんどのようである。そのため、浮上装置、案内・誘導装置、姿勢調整装置が別々に機構を持つため、構造が複雑になり、コストや信頼性の観点から、実用化への障害となる可能性がある。

本研究は、新たなメカニズムを設計することにより、吸引式磁気浮上システムにおいて、浮上機構自体に曲線を通過するときに浮上系が自動的に遠心力に応じて姿勢

調整可能な仕組みを持ち、かつ浮上と案内機能を兼用できる新しい方式を提案する。さらに、提案するシステムの特長は、エネルギー消費を考慮して、つねに複合磁石の制御電流を零に収束するような制御方法を用いること、及び、5 軸の自由度に対して、軌道に対する姿勢を自動的に調整し、常に永久磁石の吸引力と重力を利用して外乱をキャンセルすることである。シミュレーションと実験により、提案するシステムを実現することが可能であることを検証した。

2. 提案するシステム

2.1 システムの構成 本研究で提案する吸引式磁気浮上システムは、図 1 と図 2 に示すように、円筒形の軌道を走行する 4 軸の複合磁石と間隙センサを設置してある質量 m_1 で構成する。従来の吸引式磁気浮上系に対し、軌道の断面形状を円形状にすることにより、浮上体が遠心力に応じて自動的に姿勢調整をすることが考えられる。4 軸の間隙センサにより、浮上体と軌道の相対位置を検知して、フィードバック制御で浮上システムを安定化させることが可能である。さらに、エネルギー消費を低減す

* 原稿受付 2000 年 5 月 19 日.

*1 正員, 東京大学大学院.

*2 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒馬 4-6-1).

E-mail: suda@iis.u-tokyo.ac.jp

るために、永久磁石と電磁石を併用した複合磁石を採用し、永久磁石の吸引力を利用して、浮上体の重さを支える。

Fig.1 Model of proposed EMS system (Back view)

Fig.2 Structure of proposed system

2.2 システムの基本的な特性 浮上体は前進方向以外に5ヶの自由度があり、各自由度の状態変数を計測して、安定化させることが可能であるが、本研究では、センサの使用数を最小限にすることを前提とし、4ヶの間隙センサで、複合磁石と軌道の間隙を計測することによって、システムを安定に浮上させることを目標とする。

従って、あらかじめシステムの物理的な特性を検討する上で、その特性によって、座標系を設定し、運動方程式を導出する必要がある。提案するシステムの軌道は円形状であるため、浮上体を安定に浮上させれば、重力の作用により、浮上体は自然に振り子のように平衡点に戻ることができる。すなわち、4ヶの不安定なモードを安定化するだけで、軌道の接線方向は安定なモードであるため制御する必要がなくシステムを安定化できる。

本研究で用いる座標系は、図1と図2に示すように、浮上体の安定なモードである姿勢調整角度 ϕ_{p1} と、軌道に対する4ヶの不安定なモード：上下、ローリング、ピッチ、ヨーで構成する。

2.3 記号の定義

- ϕ_{p1} r_{m1} と垂直線の交角(姿勢調整角度)
- r_{m1} 軌道の中心から浮上体重心までの距離
- Δr_{m1} 軌道に対する浮上体の上下変位(平衡点: $\Delta r_{m1}=0$)
- ϕ_{b1} 軌道に対する浮上体のローリング角(x_1 軸のまわり)
- θ_{b1} 軌道に対する浮上体のピッチ角(y_1 軸のまわり)
- ψ_{b1} 軌道に対する浮上体のヨー角(z_1 軸のまわり)

i_n 複合磁石の制御電流($n=1,2,3,4$)

2.4 運動方程式と状態方程式 線形化された運動方程式は、式(1)のようになる。

$$M\ddot{X} = (K_p + K_g)X + K_i U + W \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし

$$X = [\phi_{p1} \quad \Delta r_{m1} \quad \phi_{b1} \quad \theta_{b1} \quad \psi_{b1}]^T$$

$$U = [i_1 \quad i_2 \quad i_3 \quad i_4]^T$$

K_p 永久磁石のみによる力とモーメントの係数行列

K_g 重力による力とモーメントの係数行列

K_i 制御電流による力とモーメントの係数行列

W 外乱行列

両辺に M^{-1} をかけると、次の方程式が得られる。

$$\ddot{X} = M^{-1}(K_p + K_g)X + M^{-1}K_i U + M^{-1}W \quad \dots\dots\dots (2)$$

さらに、 $\dot{X} = [X \quad \dot{X}]^T$ とおくと、次のようなシステムの状態方程式が得られる。

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + B\hat{U} + \hat{W} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$$A_{(10 \times 10)} = \begin{bmatrix} 0_{(5 \times 5)} & I_{(5 \times 5)} \\ M^{-1}(K_p + K_g)_{(5 \times 5)} & 0_{(5 \times 5)} \end{bmatrix}$$

$$B_{(10 \times 4)} = \begin{bmatrix} 0_{(5 \times 4)} \\ M^{-1}K_i_{(5 \times 4)} \end{bmatrix}$$

$$\hat{U} = U \quad \hat{W} = \begin{bmatrix} 0_{(5 \times 1)} \\ M^{-1}W \end{bmatrix}$$

浮上システムの挙動をシミュレーションする際に、状態方程式(3)を用いて模擬する。

2.5 不安定モードの分離 センサの数を最小化するために、状態方程式(3)から浮上システムの不安定なモード：軌道に対する上下、ローリング、ピッチ、ヨーを抽出すると、次の状態方程式が得られる。

$$\dot{\hat{X}}_s = A_s \hat{X}_s + B_s \hat{U}_s \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし

$$\hat{X}_s = \begin{bmatrix} X_s \\ \dot{X}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X}_{(2,5,1)} \\ \hat{X}_{(7,10,1)} \end{bmatrix} \quad A_s = \begin{bmatrix} A_{(2,5,2,5)} & A_{(2,5,7,10)} \\ A_{(7,10,2,5)} & A_{(7,10,7,10)} \end{bmatrix}$$

$$B_s = \begin{bmatrix} B_{(2,5,1,4)} \\ B_{(7,10,1,4)} \end{bmatrix} \quad \hat{U}_s = \hat{U}$$

2.6 制御方法 制御手法は、浮上システムを安定化することを目的とし、さらに消費エネルギーを最小化する

ることを考慮して、最適制御を用いることに決定する。具体的には、式(4)の状態ベクトル $\hat{X}_s$ をフィードバックし、さらに消費エネルギーを低減するために、常に各電磁石の電流を零に収束するように、電流値を一回積分してフィードバックする。従って、式(5)の評価関数を用いて、最適制御の方法で状態フィードバックゲイン K_b とゼロパワーフィードバックゲイン K_z を求める。MATLAB を利用する際に、図 3 に示すように各複合磁石の電流値の一回積分を状態変数に加えた拡大系に対して、フィードバックゲインを求める。

$$J = E \left(\hat{X}_s' Q \hat{X}_s + \sum_{n=1}^4 q_n \left(\int_0^t i_n dt \right)^2 + \hat{U}_s' R \hat{U}_s \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{ただし } \hat{U}_s = -K_b \hat{X}_s - K_z \begin{bmatrix} \int_0^t i_1 dt \\ \int_0^t i_2 dt \\ \int_0^t i_3 dt \\ \int_0^t i_4 dt \end{bmatrix}$$

Fig.3 Block diagram

2.7 制御前後の極と制御則 吸引式磁気浮上システムは、安定化制御を行なう前に、不安定なシステムであるため、その極の中には正の実部を持っている不安定極を含んでいる。本研究に提案された自動傾斜調整機能を持つ磁気浮上システムも吸引式であるため、安定化制御を行なう前には不安定である。提案された吸引式磁気浮上システムの安定化制御を行なう前の極を表 1 に示す。極 p1 と p2 が円形状の軌道により生じる振動モードであり、p3~p10 が永久磁石の吸引力により生じる極であるため、いずれも不安定な極を含んでいる。

本研究は、多変数システムに対応できる現代制御の最適制御を利用して、制御則を求めて、磁気浮上システムの安定化制御を行なう。求めた制御則を表 2 に示す。表 2 に示すような制御則を用いて、安定化制御を行い、その安定化した磁気浮上システムの極を表 3 に示す。表 3 の極 p1 と p2 は、円形状のレールにより生じる振り子のような振動モードである。その振動モードの周波数は、振り子のように、浮上模型車両の重心から円形状レールの断面形中心までの距離により決まっている。この周波

数を安定化制御する前の周波数と比較すると、やや小さくなるのがわかる。原因は、安定化制御を行った後、僅かな減衰効果を生じることにより振動周波数が小さくなることである。

Table 1 Poles without Control

No.	Value	No.	Value
p1	0.00+12.34i	p2	0.00-12.34i
p3	60.73	p4	-60.73
p5	64.30	p6	-64.30
p7	56.65	p8	-56.65
p9	15.35	p10	-15.35

Table.2 Stabilizing Control Rule

Kb								Kz			
745.05	-15.45	33.14	6.35	16.21	-0.33	0.67	0.44	-1.00	0.00	0.00	0.00
745.05	15.45	33.14	-6.35	16.21	0.33	0.67	-0.44	0.00	-1.00	0.00	0.00
745.05	15.45	-33.14	6.35	16.21	0.33	-0.67	0.44	0.00	0.00	-1.00	0.00
745.05	-15.45	-33.14	-6.35	16.21	-0.33	-0.67	-0.44	0.00	0.00	0.00	-1.00
								0.00	0.00	0.00	0.00

Table 3 Poles with Stabilizing Control

No.	Value	No.	Value
p1	-0.08+11.83i	p2	-0.08-11.83i
p3	-137.57	p4	-128.55
p5	-112.09	p6	-30.05
p7	-28.63	p8	-28.47
p9	-21.97	p10	-10.72
p11	-1.10	p12	-1.00
p13	-1.00	p14	-1.00

3. 実験装置

実験に用いた吸引式磁気浮上システムの諸元を表 4 に示す。制御回路の構成を図 4 に示す。用いた浮上模型の写真を図 5 と図 6 に示す。

実験する際には、変換式(6)を利用して、間隙の情報から次の状態量を求める。ただし、間隙の微分値はパーソナルコンピュータにより計算する。

$$\begin{aligned} \hat{X}_s &= [\Delta r_{m1} \quad \Delta \phi_{b1} \quad \Delta \theta_{b1} \quad \Delta \psi_{b1} \quad \Delta r_{m1} \quad \Delta \phi_{b1} \quad \Delta \theta_{b1} \quad \Delta \psi_{b1}]^T \\ &= \begin{bmatrix} T_c & 0 \\ 0 & T_c \end{bmatrix}^{-1} [\Delta gap_{n(n=1,2,3,4)} \quad \Delta gap_{n(n=1,2,3,4)}]^T \end{aligned} \quad (6)$$

ただし T_c 変換行列

Fig.4 Control System

Table.4 Specifications of Experimental Model

Symbol	Value	Unit	Description
D_r	1.02×10^{-1}	m	Diameter of rail
r_{c0}	1.00	m	Radius of curve
$2 \cdot x_{hm} $	8.91×10^{-2}	m	Distance between HMs in x direction (n=1,2,3,4)
$2 \cdot y_{hm} $	3.55×10^{-2}	m	Distance between HMs in y direction (n=1,2,3,4)
$-z_{hm}$	1.15×10^{-2}	m	HM's position above upper mass center
m_1	2.24×10^{-1}	kg	Upper mass
I_{1x}	9.12×10^{-5}	kg-m ²	Moment of upper mass around x axis
I_{1y}	3.45×10^{-4}	kg-m ²	Moment of upper mass around y axis
I_{1z}	3.72×10^{-4}	kg-m ²	Moment of upper mass around z axis
$-k_{pn}$	-2.01×10^2	N/m	Stiffness of magnetic force (n=1,2,3,4)
k_m	5.20×10^{-1}	N/A	Force coefficient of HMs (n=1,2,3,4)
gap	5.00×10^{-3}	m	Balance gap between HM and rail

Fig.5 Photo of experimental Maglev under Iron pipe

Fig.6 Photo of experimental Maglev (Upper view)

間隙センサは、小型・軽量・安価で、かつ磁界の影響を受けないフォトレフレクターを用いて自作し、複合磁石の中央に配置した。浮上体の傾斜角度は、ジャイロセンサにより計測する。

4. シミュレーション及び実験の結果と考察

提案する姿勢制御機能を持つ磁気浮上システムの特性を調べるため、図 2 に示すように 5 ケの自由度に対して、それぞれ定常力外乱($F_n = 0.2N$)を浮上体に加えて、実験とシミュレーションによりシステムの特性を検討した。

4.1 軌道の接線方向の力外乱による影響 図 2 に示すように、横方向の定常力外乱($F_1 = 0.2N$)を浮上体

に加えて、システムの挙動についてシミュレーションと実験を行なった。結果を図 7 に示す。浮上体は振り子のように、横方向の力に応じて、姿勢角 ϕ_{p1} が振動しながら平衡点 -0.09 rad に収束する。振動持続の原因は、浮上体に対する軌道の接線方向の減衰が非常に小さいことである。複合磁石の電流は、姿勢角 ϕ_{p1} と共に振動しながら零に収束する。横方向の力に応じて、浮上体の姿勢角は調整され、常に重力と永久磁石の吸引力を利用して横方向の力をキャンセルする。複合磁石の制御電流は、単にシステムの安定性を維持するために流れる。

Fig.7 Response with step force in y direction

4.2 上下方向の力外乱による影響 図 2 に示すように、軌道に対する上下方向の定常力外乱($F_2 = 0.2N$)を浮上体に加えて、システムの挙動についてシミュレーションと実験を行なった。結果を図 8 に示す。浮上体は、振動せずに上下変位を $-0.28mm$ に収束する。複合磁石の電流は、これに伴い零に収束する。すなわち、浮上に必要な上下方向の力を永久磁石の吸引力で得られるように軌道との距離を調整し、常に永久磁石の吸引力を利用して荷重をキャンセルする。複合磁石の制御電流は、単にシステムの安定性を維持するために流れる。

Fig.8 Response with step force in z direction

4.3 ローリング方向の力外乱による影響 図 2 に示すように、定常力外乱($F_3 = 0.2N$)を浮上体に加えて、システムの挙動についてシミュレーションと実験を行

なった。 F_3 が浮上体の重心から y_1 方向に 32mm ずれているので、換算すると、上下方向に荷重 0.2N とローリング方向に $6.4 \times 10^{-3} \text{Nm}$ のトルクを加えることに相当する。実験と計算の結果を図 9 に示す。

浮上体は、4.2 節に述べたように軌道に対する上下方向の力に応じて、軌道に対する距離(-0.28mm)を調整し、永久磁石の吸引力を利用して、荷重をキャンセルする。ローリング方向の $6.4 \times 10^{-3} \text{Nm}$ トルクに対して、浮上体はマイナス方向にローリング(-0.02 rad)して、付加されたローリング方向のトルクを永久磁石の力でキャンセルする。上下変位、ローリング角、制御電流には、2Hz の変動が生じているが、これは、4.1 節で説明した姿勢角 ϕ_{p1} の振動により発生するものである。複合磁石の電流は、最終的に零に収束する。つまり、浮上体は、上下方向の力とローリング方向のトルクに応じて、上下方向の位置とローリング角を調整し、常に永久磁石の吸引力を利用して、加えた上下方向の力とローリング方向のトルクをキャンセルする。この場合も複合磁石の制御電流は、単にシステムの安定性を維持するために流れる。

Fig.9 Response with step torque in Rolling

4.4 ピッチ方向の力外乱による影響 図 2 に示すように、定常力外乱($F_4 = 0.2 \text{N}$)を浮上体に加えて、システムの挙動についてシミュレーションと実験を行なった。 F_4 が浮上体の重心から x_1 方向に 60mm をずれているので、換算すると、上下方向に荷重 0.2N とピッチ方向に $12 \times 10^{-3} \text{Nm}$ のトルクを加えることに相当する。

実験と計算の結果を図 10 に示す。浮上体は、4.2 節に述べたように上下方向の力に応じて、軌道に対する距離(-0.28mm)を調整し、永久磁石の吸引力を利用して、荷重をキャンセルする。ピッチ方向の $12 \times 10^{-3} \text{Nm}$ トルクに対して浮上体はプラスのピッチ角(0.009 rad)となり、永久磁石の力で付加ピッチ方向のトルクをキャンセルする。複合磁石の電流は、法線方向の位置とピッチを平衡点に近

づくことと伴って、零に収束する。浮上体は、上下方向の力とピッチ方向のトルクに応じて、上下方向の位置とピッチ角を調整し、常に永久磁石の吸引力を利用して、加えた上下方向の力とピッチ方向のトルクをキャンセルする。複合磁石の制御電流は、単にシステムの安定性を維持するために流れる。

Fig.10 Response with step torque in Pitch

4.5 ヨー方向の力外乱による影響 図 2 に示すように、定常力外乱($F_5 = 0.2 \text{N}$)を浮上体に加えて、システムの挙動についてシミュレーションと実験を行なった。 F_5 が浮上体の重心から x_1 方向に 60mm をずれているので、換算すると、上下方向に荷重 0.2N とヨー方向に $12 \times 10^{-3} \text{Nm}$ のトルクを加えることに相当する。実験と計算の結果を図 11 に示す。ヨー方向の $12 \times 10^{-3} \text{Nm}$ トルクに対して、浮上体はマイナスのヨー角(-0.13 rad)をして、永久磁石の力で付加されたヨー方向のトルクをキャンセルする。複合磁石の電流は、ヨー角を平衡点に近づくことと伴って零に収束する。浮上体は、接線方向の力とヨー方向のトルクに応じて、姿勢角とヨー角を調整し、常に重力と永久磁石の吸引力を利用して、加えた横方向の力とヨー方向のトルクをキャンセルする。複合磁石の制御電流は、単にシステムの安定性を維持するために流れる。

Fig.11 Response with step torque in Yaw

4.6 曲線を走行する時の姿勢角 図 12 に示すような曲線半径 1m の軌道を用いて、左旋回の走行実験を行なった結果を図 13 に示す。曲線に進入する直前の浮上体の速度は、約 1m/sec である。車両が曲線を走行する時に生じる遠心力は横方向の定常力を加えることに相当するので、図 13 に示すように、4.1 節と同様、浮上体の姿勢角は 0.1 rad を平衡点として振動しながら前進する。浮上体は、曲線に入ると、自動的に姿勢を調整し、複合磁石の吸引力と重力を利用して、旋回するための向心力を生み出す。

Fig.12 Photo of Rail (view from terminal)

曲線旋回時には、さらに、浮上体の上下変位、ローリング角、ピッチ角、ヨー角も適切に調整され、これらを制御する電流も零に収束し、エネルギー消費を抑制できることがわかる。

5. 結論

本研究は、吸引式磁気浮上系の傾斜制御、エネルギー消費の低減、案内と浮上機能を兼用することを目標とし、新たなメカニズムを設計することにより、新しい吸引式磁気浮上システムを提案した。本システムの実現可能性はシミュレーションと実験により検証し、次の結果を得た。

- (1) 軌道の断面形状を円形にすることにより、浮上体が遠心力に応じて自動的に姿勢制御できるシステムを提案した。
- (2) 浮上システムは、外乱が生じて、軌道に対する 5 自由度において姿勢を自動的に調整し、常に永久磁石の吸引力と重力が釣り合うように電磁石の電流を制御することにより、外乱をキャンセルする。
- (3) 複合磁石による浮上系は案内機能を兼用できるため、専用の案内システムがなくても急曲線を通過できる。
- (4) 浮上体の姿勢制御、安定化制御を達成しながら、浮上に必要な制御電流を零に収束することによりエネルギー消費を抑制できる。

参考文献

- [1] 森下、小豆沢：常電導吸引式磁気浮上のゼロパワー制御、電学論 D,108,5,pp.447(1988)。
- [2] 荘、須田、中代、大野：スカイフックスプリングによる吸引式磁気浮上系の振動制御、日本機械学会論文集、65-636, C(1999), pp.3096-3101。
- [3] 荘、須田：姿勢制御機能を持つ吸引式磁気浮上系の提案、日本機械学会[No.99-7], D&D'99 講演論文集(Vol.A), pp.547-550。
- [4] 荘、須田、小峰、岩佐：姿勢制御機能を持つ吸引式磁気浮上系第 8 回交通・物流部門大会講演論文集(1999), p237-240。

Fig.13 Displacements and Currents in Curving Experiments