

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

Vibration Control in Electro-magnetic Suspension System Using Concept of Skyhook Spring

莊 志 忠*・須 田 義 大*・中 代 重 幸*・大 野 進 一*

Chih-chung CHUANG, Yoshihiro SUDA, Shigeyuki NAKADAI and Shinichi OHNO

1. 緒 言

吸引式磁気浮上系における浮上搬送システムでは、エネルギー消費を低減しながら低周波領域では軌道に追従し、高周波領域では防振することが理想的である。永久磁石と電磁石を組み合わせた複合磁石による吸引力が、浮上総質量と等しくなるように浮上ギャップを自動的に調整し、電磁石電流を常に零に収束する制御（以下電流零収束制御と略記）はエネルギー消費を低減した¹⁾。本研究では、浮上体の絶対変位に作用する等価ばねと等価減衰を配置するスカイフックスプリング概念²⁾を導入することにより、浮上のための電流零収束制御と振動制御を結合した制御手法を提案する。これにより低周波領域では電磁石電流を零に収束させ、浮上体の運動特性に関しては低周波領域で軌道に追従し、高周波領域では防振する電流零収束制御が実現する。

また、電磁石の電流を制御するには、直接に目標電流値を指令値として与える電流制御方式と、目標電流値を達成するように電磁石コイル両端の電圧を制御する電圧制御方式がある。本研究では提案する高周波領域防振の電流零収束制御方法に対して電流制御方式と電圧制御方式を比較して検討する。

2. 理 論 解 析

2.1 解析モデルと等価ばねの概念

本研究で用いるモデルは図1のように、総質量を m と

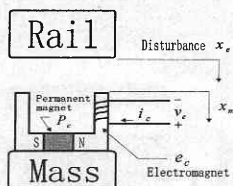


Fig. 1 Model of proposed system

する浮上体、軌道、電磁石と永久磁石併用の複合磁石で構成する。モデルの運動方程式は次のようになる。

$$m\ddot{x}_m = -k_p(x_m - x_e) - c_{pr}(\dot{x}_m - \dot{x}_e) - c_{pa}\dot{x}_m - k_l \cdot i_c + F_d \dots (1)$$

ただし、平衡点は $(x_m - x_e) = \Delta z = 0$ とする。

永久磁石のみを用いる浮上系は図2のように、永久磁石の等価磁気ばね定数 k_p が負となるため、不安定である。以下、このように浮上体に作用する等価的なばねでシステムを記述することを考える。これが「等価ばね配置」の概念である。

2.2 従来の電流零収束制御

従来の電流零収束制御は図3のように、浮上体と軌道間に、正のばね定数の相対ばねを加えることによって、浮上系を安定化する。理論的には、浮上体と軌道間の正の等価相対ばねが固くすれば浮上体が安定になる。しかし、軌道外乱が入力されると、力が浮上体に伝達する。よって、軌道の不整による振動が問題となる。

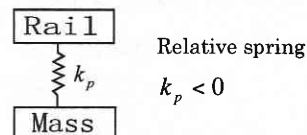


Fig. 2 Unstable system

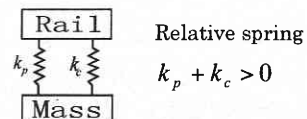


Fig. 3 Stabilized system with zero-power control

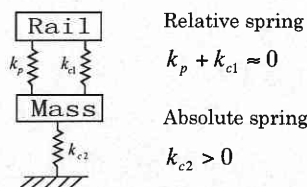


Fig. 4 Stabilized system with Skyhook zero-power control

* 東京大学生産技術研究所 第2部

** 東京大学名誉教授

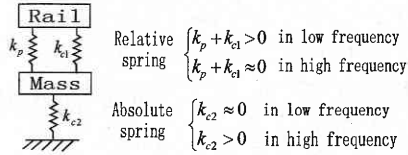


Fig. 5 Stabilized system with Skyhook zero-power control (Using accelerometer to measure absolute position)

2.3 スカイフックスプリングによる防振制御

軌道の不整による外乱を浮上体に伝達させないようにするために、図4のように制御により浮上体と軌道との間ばねを配置して相殺すると、軌道外乱が入力されても、浮上体に伝達しない。さらに浮上体と絶対位置の間に等価絶対ばねを配置すると、スカイフックスプリングを加えると、浮上体を防振しながら安定に浮上させることが可能になる。システムの安定性を確保できる範囲内に電流の積分値をフィードバックして電流零収束制御を加えると、浮上体の挙動は低周波領域において電流を零に収束するように浮上できる。

2.4 加速度検出によるスカイフックスプリングの実現

スカイフックスプリングを実現するには、絶対変位の測定が必要であるが、走行している車両の絶対位置をギャップセンサ等で測定することができない。本研究では、検出した加速度を二回積分し、ハイパスフィルタによって、高周波領域のスカイフックスプリングを実現する。ハイパスフィルタの遮断周波数の近くの位相ずれの問題と低周波領域の安定性は浮上体と軌道のギャップ信号をローパスフィルタに通して、低周波領域では相対ばねを実現することによって解決する。提案するシステムの概念は図5に示す。

3. 制御系の設計

3.1 スカイフックスプリングの実現

スカイフックスプリングを実現する制御則として、式(2)を提案する。

$$i_c = f_{c1} \cdot (x_m - x_e) + f_{c2} \cdot \dot{x}_m + f_{v1} \cdot (\dot{x}_m - \dot{x}_e) + f_{v2} \cdot \ddot{x}_m + f_{i0} \cdot \int_0^t i_c dt \dots (2)$$

(従来の制御則: $i_c = f_{c1} \cdot (x_m - x_e) + f_{c2} \cdot \dot{x}_m + f_v \cdot (\dot{x}_m - \dot{x}_e) + f_{i0} \cdot \int_0^t i_c dt$)
ただし、

- f_{z1} : 等価相対ばねを配置するフィードバックゲイン
- f_{z2} : 等価絶対ばねを配置するフィードバックゲイン
- f_{v1} : 等価相対減衰を配置するフィードバックゲイン
- f_{v2} : 等価絶対減衰を配置するフィードバックゲイン
- f_{i0} : 電流を零に収束するフィードバックゲイン

式(1), 式(2)により次の伝達関数が得られる。

$$\text{変位加振の応答: } \frac{x_m}{x_e} = \frac{b_{hc2}s^2 + b_{hc1}s + b_{hc0}}{s^3 + a_{hc2}s^2 + a_{hc1}s + a_{hc0}} \dots (3)$$

$$\text{ただし, } a_{hc2} = (c_{pr} + c_{pa} + k_i f_{v1} - k_i f_{v2} - m f_{i0}) / m \dots (3.1)$$

$$a_{hc1} = (k_p + k_i f_{z1} + k_i f_{v2} - f_{i0} c_{pa} - f_{i0} c_{pr}) / m \dots (3.2)$$

$$a_{hc0} = -(f_{i0} k_p) / m \dots (3.3)$$

$$b_{hc2} = (c_{pr} + f_{v1} k_i) / m \dots (3.4)$$

$$b_{hc1} = (k_p + k_i f_{z1} - f_{i0} c_{pr}) / m \dots (3.5)$$

$$b_{hc0} = a_{hc0} \dots (3.6)$$

f_{z1} を調整することによって、等価相対ばね定数を零にすると、式(3)の分子の s^2 の係数 b_{hc2} は零になる。 f_{v1} を調整することによって、等価相対減衰係数を零にすると、式(3)の分子の s の係数 b_{hc1} は零になる。 b_{hc2} と b_{hc1} を小

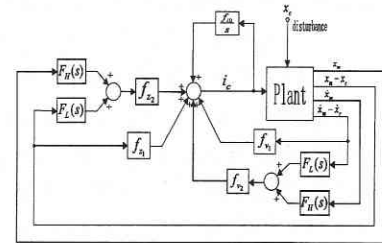


Fig. 6 Block diagram of Skyhook zero-power control (Using accelerometer to measure absolute position)

表 1 Specifications of Experimental Model

Symbol	Value	Unit	Description
m	1.2	Kg	Mass
k_p	-4672.0	N/m	Stiffness
k_i	4.866	N/A	Current coefficient
c_{pr}	-12.17 current control -9.3 voltage control	N-s/m	Relative damping
c_{pa}	0.0	N-s/m	Absolute damping
L	0.0252	H	Inductance
R	5.6	Ω	Resistance of coil
gap	2.74	mm	Balance gap
Ps. k_p, k_i, c_{pr} are found by experiment			

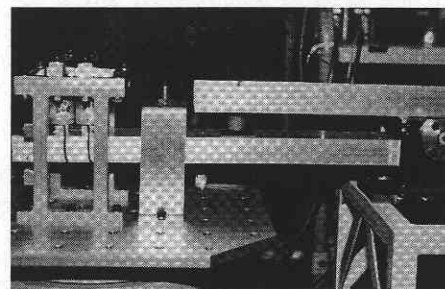


Fig. 7 Experimental equipment

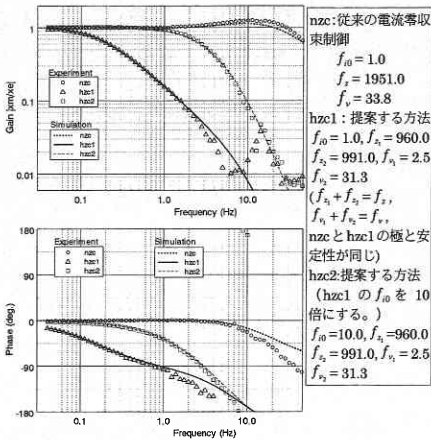


Fig. 8 Frequency response of current control
 さくすると、高周波の応答を小さくできる。

スカイフックスプリングは f_{z2} を調整することによって、得られる。式 (3) の分母の S の係数 a_{hcl} は自由に設計でき、 f_{v2} を調整すること（等価絶対減衰を配置する）によって、式 (3) の分母の S^2 の係数 a_{hc2} 自由に設計できる。そのため、高周波領域の防振、低周波領域の追従、システムの安定性の確保、周波数応答特性の設計が同時に実現できる。電圧制御の原理は電流制御と同様であるため、ここでは省略する。

3.2 加速度検出によるスカイフックスプリングの実現

本研究では加速度信号の偏差値による絶対変位のドリフトを取除くため、式 (4) のように3次のハイパスフィルタを設計する。ローパスフィルタは式 (5) のように1次のものを設定する。

$$F_H(s) = \{s^3 / (s - P_{H0})(s - P_{H1})(s - P_{H2})\} \dots \dots \dots (4)$$

$$F_L(s) = s / (s - P_{L0}) \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 $F_L(s)$ の遮断周波数は $F_H(s)$ の遮断周波数より大きく設定することが必要である。ブロック線図は図6に示す。

4. 制御結果と考察

実験の諸元値は表1に示す。表1の諸元を持つ試作した磁気浮上システムの外観を図7に示す。

4.1 ギャップセンサによるスカイフックスプリング

4.1.1 実験結果とシミュレーション結果の比較

図8は、電流制御を行った際の変位加振に対する浮上体の絶対変位の周波数応答および位相を示す。図9は、電磁石電流の周波数応答を示す。図中、点は実験結果を、線はシミュレーション結果を表す。

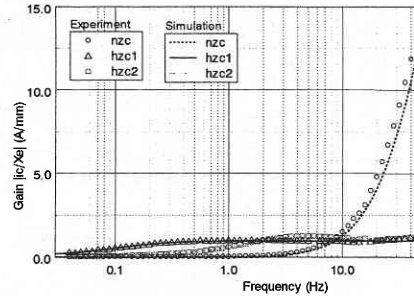


Fig. 9 Current of coil

実験結果はシミュレーション結果とほぼ一致する。しかし、浮上体の絶対変位の周波数応答は、理論的には相対減衰を完全に相殺すれば、ピークが現れないが、実験結果では14 Hzのところに電流制御の場合ゲイン約0.04のピークがある。この原因としては相対減衰が少し残っているためである。

4.1.2 低周波領域における電流零収束の浮上特性

制御電流の単位変位加振に対する制御電流の応答は、図9に示すように、従来の電流零収束制御と同様に高周波領域防振の電流零収束制御は低周波数領域で制御電流の応答は零に接近して、電流零収束での浮上を達成している。電流制御の hzc2 を hzc1 と比較すると、電流を零に収束するフィードバックゲイン f_{i0} を大きくすることによって低周波領域では電流零収束制御の性能は改善される。図8によって、低周波領域では周波数応答のゲインが1に位相が0になることによって、浮上体の挙動は低周波領域で平衡のギャップに追従することが明らかである。また、電流を零に収束するフィードバックゲインを大きくすると平衡時のギャップへの追従性がよくなる。

また、図9により、nzc を hzc1 と比較すると、9 Hz より低い周波数では、提案する高周波領域防振の電流零収束制御では防振するように、ギャップの変化によって永久磁石による吸引力の変化量を補償するため、電流零収束制御より大きい電流を流す。

4.1.3 高周波領域の防振特性

図8に示すように、従来の電流制御の電流零収束制御 (nzc) は低周波領域では軌道に追従して、浮上体の周波数応答はゲイン1である。しかし、周波数応答の最大値が14 Hzまでに現れ、軌道の不整による外乱がそのまま浮上体に伝達し、防振性能が悪い。提案する電流制御の高周波領域防振の電流零収束制御 hzc1 の極は電流零収束制御 nzc の極と同じである。よってもとの電流零収束制御の安定性を保持しながら、相対ばねと相対減衰を相殺することによって、電流零収束制御は高周波領域防振の周波数応答特性を大幅に改良したことがわかる。

式 (3) により、理論的には電流を収束するフィードバ

研 究 速 報

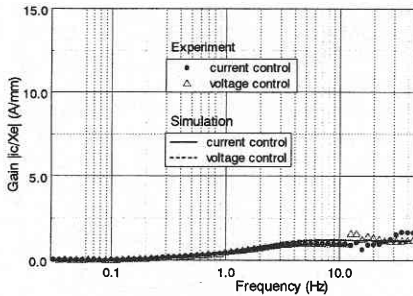


Fig. 10 Current of coil

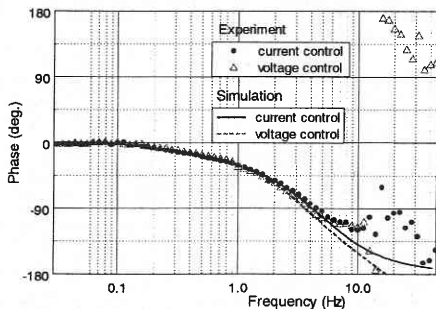
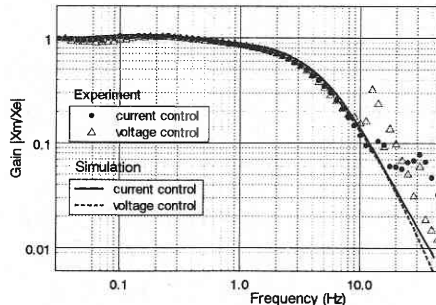


Fig. 11 Frequency response

ックゲイン f_{i0} の値を大きくすると、振動を遮断する周波数も大きくなる。実験結果は理論の通りに、図 8 の hzc1 を 10 倍の f_{i0} にする hzc2 と比較すると、hzc2 の方が振動を遮断する周波数が大きくなる単位変位加振に対する制御電流の応答を図 9 に示す。9 Hz 以上の高周波数領域に従来の電流零収束制御は余計な電流をシステムに与えて、浮上体を加振することになった。提案の高周波領域防振の電流零収束制御でその欠点を改良している。

4.2 加速度検出によるスカイフックスプリング

現実的なシステムとするため、絶対変位の検出のために、ギャップセンサを使わずに、図 7 のように制御システムを構成して実験をした。ただし、ハイパスフィルタの 3 つの極を -0.3 に設定する。ローパスフィルタの極を -6.0 に設定する。電流制御のフィードバックゲンは hzc2 のフィードバックゲンと同じである。

4.2.1 実験結果とシミュレーション結果の比較

図 10 は、電磁石電流の周波数応答を示す。図 11 は、変

位加振に対する浮上体の絶対変位の周波数応答および位相を示す。図中、点は実験結果を、線はシミュレーション結果を表す。

実験結果はシミュレーション結果とほぼ一致する。しかし、浮上体の絶対位置変化の周波数応答は、理論的には相対減衰を完全に相殺すれば、ピークが現れないが、実験結果では 14 Hz のところにピークがある。この原因としては 4.1.1 項と同様で、相対減衰が少し残っているためである。

4.2.2 ギャップセンサによるスカイフックスプリングと比較

単位変位加振に対して、浮上体の絶対位置変化の周波数応答と位相は図 11 に示すように、4.1 節の hzc2 (図 8) の結果とよく一致している。電磁石電流の周波数応答も図 10 に示すように 4.1 節の hzc2 の結果とよく一致している。

加速度検出によるスカイフックスプリングの浮上特性と防振特性はギャップセンサによるスカイフックスプリングと一致しているので、4.1 節の考察は適用できる。従って、加速度計を用いて、設計した周波数応答特性を実現することは可能である。

5. 結 論

本研究は、吸引式磁気浮上系のエネルギー消費低減、振動制御同時に達成することを目標とし、スカイフックスプリングの概念を導入した。従来のエネルギー消費低減の電流を零に収束する制御を改良して、低周波領域では平衡ギャップに追従し、高周波領域では防振する新たな電流零収束制御理論を提案し、その有用性を実験により検証し、以下の結果を得た。

- (1) 安定性の確保、高周波領域の防振、エネルギー消費の低減が同時に実現できる新たな高周波領域の防振を考慮した吸引式磁気浮上系の電流零収束制御を提案した。
- (2) 提案した制御手法は、スカイフックスプリングの概念で説明出来る。
- (3) 実用性を考慮して加速度計を用いたスカイフックスプリングを実現し、実験により有用性を示した。
- (4) 新たな制御方法は、定常浮上状態での電磁石電流を零に収束して、安定性を保ちながら浮上体の周波数応答特性を設計することができる。

(1998年6月9日受理)

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) 竹原, 則次: 仮想ダイナミックダンパを用いたサスペンション制御, 機論, 62-603, C(1996), 4168.