ゼロパワー制御を用いた磁気軸受の構成と軸支持特性*

上條 芳武^{*1}, 伊東 弘晃^{*1}, 丸山 裕^{*2}Structure and Characteristic of Magnetic Bearing
with Zero Power Controlled Electromagnetic SuspensionYoshitake KAMIJO^{*1}, Hiroaki ITO and Yutaka MARUYAMA^{*1} Toshiba Corporation
Toshiba-Cho 1, Fuchu-Shi, Tokyo, 183-8511 Japan

This paper deals with a new magnetic bearing in order to decrease a rotor eccentricity. The proposed bearing system consists of moving frames, suspensions, permanent magnets, electromagnets and Zero Power controller. The system enables to avoid rotor touchdowns. A clearance between a rotor and our proposed bearing may be increased compared to conventional electromagnetic bearings, since permanent magnets are used in new bearings. However, if Zero Power controller is applied to magnetic bearings, a severe problem emerges. When a levitating rotor is subjected to external steady force, to keep equilibrium between external force and magnetic force, a position of levitating rotor may be changed. To overcome this difficulty, this paper proposes a new magnetic bearing structure with moving frames and suspensions. The structure enables to decrease a rotor eccentricity, and a risk of contacting touchdown bearings with fixed frames is reduced. The paper shows the experimental results to verify the system.

Key Words : Zero Power Controller, Magnetic Bearing, Suspension, Moving Frame, Magnetic Levitation, Observer

1. 緒 言

省電力で磁気浮上を実現する手段として、永久磁石と電磁石で構成された磁石ユニットを用いて、浮上体を安定した状態に保ちつつ電磁石への励磁電流をゼロに収束させるゼロパワー制御がある⁽¹⁾。このゼロパワー制御の応用展開として、回転体を非接触支持する磁気軸受に注目し、ゼロパワー制御を用いた磁気軸受の開発を目指す。ゼロパワー制御を適用することによって、省電力な磁気軸受を構成できると共に磁石ユニットと回転軸間のギャップを大きく設定することができるため、タッチダウンの可能性を低減させることができ、信頼性の向上が図れる。しかしゼロパワー制御を適用した場合、軸に定常的な外力が作用すると、外力と永久磁石による磁力をバランスさせるために、軸の浮上位置が変化する。したがって、ゼロパワー制御を磁気軸受に適用すると、外力によって軸偏心が大きくなるという問題がある。

本報告では、ゼロパワー制御を用いた軸偏心の少ない磁気軸受構成を提案し、検証実験の結果を報告する。

2. ゼロパワー制御を用いた磁気軸受

2・1 磁気軸受の構成

図1に提案する磁気軸受の基本的な構成を示す。磁石ユニットを対向させて可動枠に取り付け、浮上体(軸)を磁石ユニット間に配置する。可動枠はばね支持されており、浮上体への外力に応じて変位可能な構成としている。なお、タッチダウン用の軸受は、固定枠に設置する構成とし、可動枠の動きと連動しない。本構成の磁気支持装置を浮上体の上下方向および左右方向の2軸に対して設置することで浮上体を2軸で制御する。

* 原稿受付 2013年6月26日

^{*1} 正員, (株)東芝 電力・社会システム技術開発センター (〒183-8511 東京都府中市東芝町1)^{*2} (株)東芝 電力・社会システム技術開発センター

E-mail: yoshitake.kamijo@toshiba.co.jp

Fig.1 Magnetic bearing structure

2・2 浮上位置一定の原理

図1のように磁気浮上系とばね系の連成モデルを定義すると、浮上体および可動枠に関する運動方程式は以下のようなになる。

$$m(\Delta \ddot{z}_r + \Delta \ddot{z}_f) = \frac{\partial F_z}{\partial z_r} \Delta z_r + \frac{\partial F_z}{\partial i_z} \Delta i_z + u_r \quad (1)$$

$$M \Delta \ddot{z}_f = -\frac{\partial F_z}{\partial z_r} \Delta z_r - \frac{\partial F_z}{\partial i_z} \Delta i_z - k \Delta z_f - c \Delta \dot{z}_f + u_f \quad (2)$$

ここで、 z_r は浮上体と磁石ユニット間のギャップ、 z_f は可動枠の絶対位置、 m は浮上体の質量、 M は可動枠の質量、 F_z は定常状態において上下（左右）の磁石ユニットから受ける電磁力の合力、 i_z は励磁電流、 u_r は浮上体にかかる外力、 u_f は可動枠にかかる外力、 k はばね定数、 c は減衰係数である。

$u_f = 0$ として、浮上体に外力 u_r がかかると、浮上体の絶対位置の変動は $\Delta z_r + \Delta z_f$ で表される。ゼロパワー制御を適用すると、定常状態では $i_z = 0$ となるため、式(1)より時間に関する微分項をゼロにして浮上体・可動枠の定常変位を導出すると、

$$\Delta z_r = -\frac{u_r}{\partial F_z / \partial z_r}, \quad \Delta z_f = \frac{u_r}{k} \quad (3)$$

となり、 $\Delta z_r + \Delta z_f$ は、

$$\Delta z_r + \Delta z_f = -\frac{u_r}{\partial F_z / \partial z_r} + \frac{u_r}{k} \quad (4)$$

となる。よってばね定数 k と磁気ばね定数 $|\partial F_z / \partial z_r|$ を一致させると、原理的には定常的な外力に対して浮上体の絶対位置が変動しないことになる。ただし、磁石ユニットを上下（左右）に配置することによって線形性の高い領域が広範囲に存在するが、厳密には線形とはならないため、若干の変動が生じる（図2）。

Fig.2 Suspension property

2・3 ゼロパワー制御

図3にゼロパワー制御の構成を示す. 操作量 u は, センサから検出したギャップと励磁電流, ギャップの変化速度と浮上体にかかる外力にゲイン F_d を作用させるゲイン補償ループと, 励磁電流の積分値にゲイン K を乗じてフィードバックする電流積分ループから演算され, 各ゲインを適当に設計することにより安定化させる. なお, ギャップの変化速度と外力については, 最小次元オブザーバを用いて推定した.

Fig.3 Zero Power controller

以下に, 詳細な設計手法を説明する.

電圧方程式は,

$$e_z = R\Delta i_z + N \frac{\partial \phi_z}{\partial z_r} \Delta \dot{z}_r + L\Delta \dot{i}_z \quad (5)$$

で表される. ここで, e_z は励磁電圧, R はコイル抵抗, N はコイル巻数, ϕ_z は鎖交磁束, L はインダクタンスである.

式 (1), (2), (5) より状態方程式は次式で表される.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + bu + df \\ y = cx \end{cases} \quad (6)$$

ここで,

$$x = \begin{pmatrix} \Delta z_r \\ \Delta z_f \\ \Delta \dot{z}_r \\ \Delta \dot{z}_f \\ \Delta \dot{i}_z \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 0 & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & a_{53} & 0 & a_{55} \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{51} \end{pmatrix},$$

$$c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad d = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} \\ 0 & d_{42} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad f = \begin{pmatrix} u_r \\ u_f \end{pmatrix}$$

$$a_{31} = \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{m} \right) \frac{\partial F_z}{\partial z_r}, \quad a_{32} = \frac{k}{M}, \quad a_{34} = \frac{c}{M}, \quad a_{35} = \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{m} \right) \frac{\partial F_z}{\partial i_z}, \quad a_{41} = -\frac{1}{M} \frac{\partial F_z}{\partial z_r}, \quad a_{42} = -\frac{k}{M},$$

$$a_{44} = -\frac{c}{M}, \quad a_{45} = -\frac{1}{M} \frac{\partial F_z}{\partial i_z}, \quad a_{53} = -\frac{N}{L} \frac{\partial \phi_z}{\partial z_r}, \quad a_{55} = -\frac{R}{L}, \quad b_{51} = \frac{1}{L}, \quad d_{31} = \frac{1}{m}, \quad d_{32} = -\frac{1}{M}, \quad d_{42} = \frac{1}{M}$$

である。また u : 制御入力 (励磁電圧 = e_z) である。

このとき、図 3 の制御則は次式で表される。

$$u = -F_d \hat{x} - K \int y dt \quad (7)$$

ここで、

$$F_d = (F_1 \quad F_2 \quad F_3 \quad F_4 \quad F_5 \quad F_6 \quad F_7), \quad \hat{x} = \begin{pmatrix} \Delta z_r \\ \Delta z_f \\ \Delta \dot{z}_{rh} \\ \Delta \dot{z}_{fh} \\ \Delta \dot{i}_z \\ u_{rh} \\ u_{fh} \end{pmatrix}, \quad K = (0 \quad 0 \quad K_3)$$

である。なお $\hat{x}$ は最小次元オブザーバの出力であり、以下のように定義する。ここでは、ゴピナスの方法を用い

ており、正則変換行列は、
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
 としている。

$$\begin{cases} \dot{z}_{ob} = \hat{A}z_{ob} + \hat{B}y + \hat{E}u \\ \hat{x} = \hat{C}z_{ob} + \hat{D}y \end{cases} \quad (8)$$

ここで,

$$z_{ob} = \begin{pmatrix} \Delta \dot{z}_{roh} \\ \Delta \dot{z}_{foh} \\ u_{roh} \\ u_{foh} \end{pmatrix}, \quad \hat{A} = \begin{pmatrix} -\alpha_1 & a_{34} & d_{31} & d_{32} \\ 0 & a_{44} - \alpha_2 & 0 & d_{42} \\ -\alpha_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_4 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\hat{B} = \begin{pmatrix} a_{31} - \alpha_1^2 + d_{31}\alpha_3 & a_{32} + a_{34}\alpha_2 + d_{32}\alpha_4 & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} + (a_{44} - \alpha_2)\alpha_2 + d_{42}\alpha_4 & a_{45} \\ -\alpha_1\alpha_3 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_2\alpha_4 & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\hat{D} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \alpha_3 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_4 & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{E} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

であり, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ はオブザーバの極を決定するパラメータである.

式 (6), (7), (8) をそれぞれラプラス変換して, 状態変数について解くと,

$$X(s) = \left(sI - A + bF_d\hat{C}(sI - \hat{A})^{-1}\hat{B}c + b\left(F_d\hat{D} + \frac{K}{s}\right)c \right)^{-1} (x_0 - bF_d\hat{C}(sI - A)^{-1}z_0 + dF(s)) \quad (9)$$

となる.

$$\Phi(s) \stackrel{\text{def}}{=} \left(sI - A + bF_d\hat{C}(sI - \hat{A})^{-1}\hat{B}c + b\left(F_d\hat{D} + \frac{K}{s}\right)c \right)^{-1}$$

とすると,

$$\Phi(s) = \frac{1}{\Gamma(s)\Gamma_{rob}(s)\Gamma_{foh}(s)} \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} & \phi_{14} & \phi_{15} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \phi_{23} & \phi_{24} & \phi_{25} \\ \phi_{31} & \phi_{32} & \phi_{33} & \phi_{34} & \phi_{35} \\ \phi_{41} & \phi_{42} & \phi_{43} & \phi_{44} & \phi_{45} \\ \phi_{51} & \phi_{52} & \phi_{53} & \phi_{54} & \phi_{55} \end{pmatrix} \quad (10)$$

と表すことができる.

本システムの特性格方程式は,

$$\Gamma(s)\Gamma_{rob}(s)\Gamma_{job}(s)=0 \quad (11)$$

である. ここで, $\Gamma(s)=0$ は磁気浮上制御系の特性格方程式である. $\Gamma_{rob}(s)=0$ は浮上体のオブザーバの特性格方程式であり, $\Gamma_{job}(s)=0$ は可動枠のオブザーバの特性格方程式である. また, $\phi_{mn}(m, n=1 \sim 5)$ はそれぞれ s の多項式である. 式 (11) から得られる特性根が s 平面の左半面にあるように $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ およびフィードバックゲイン $F_1 \sim F_7$ を決定することによって, システムの安定を図る.

3. 検証実験

3・1 浮上位置一定の原理の検証実験

浮上位置一定の原理を検証するため, 1 軸原理検証装置を用いて浮上実験および定常外力印加実験を行った. 1 軸原理検証装置の概略図を図 4, 主な仕様を表 1 に示す. 本来の磁気軸受では, 上下・左右方向の 2 軸で支持する必要があるが, 原理検証として単純化するために, 片側を球面軸受で支持し, 制御側は上下方向のみの 1 軸制御系として構成した. 図 5 に浮上開始時の挙動および励磁電流の応答を示す. 横軸には時間をとっており, 時刻 3.7(s) で磁気浮上制御を開始し, 時刻 5.2(s) で浮上位置が安定してゼロ近傍に収束していることがわかる. 浮上開始直後は, 変位目標値と現状値に差があるために, 定常偏差ゼロを目指して, 電磁石にある程度の電流を流す必要があるが, 浮上位置が安定すると, ゼロパワー制御によって, 永久磁石の磁力によってのみ浮上体を支持するため, 励磁電流がゼロに収束していることがわかる. 浮上開始してから安定するまでの間に多少オーバーシュートがみられている. これは浮上/吸着における変位目標値の設定に起因している. 浮上/吸着においてそれぞれ目標値が異なっており, 吸着状態から浮上状態に移行する際に目標値が変化する. そのため目標値設定の仕方によって, 浮上の仕方が異なる. たとえば, 目標値が線形的に変化するように設定すれば, オーバーシュートを抑制することができる. ただし, 細かな制御を要するため, 消費電流は若干増加し, 浮上が安定するまでの時間は多少長くなる. 図 6 に 50(N) の定常外力印加時の挙動および励磁電流の応答を示す. 安定浮上状態から時刻 2.9(s) で定常的な外力をかけている. 外力をかけた瞬間は衝撃力となるため浮上位置が変化しているが, 定常状態では浮上位置がゼロ近傍に収束していることがわかる. また外力が印加された状態でも励磁電流がゼロに収束していることがわかる.

Fig.4 Verification magnetic bearing (1-axis)

Table 1 Specifications (1-axis)

Magnet unit	Outside dimension	152 mm×172 mm×85 mm
	Magnet material	Nd-Fe-B
	Coil resistance	4.0 Ω
	Coil turns	400 turn
	Nominal gap	10 mm
Mechanical parts	Constant of spring	29.6 N/mm
	Levitation mass	5.7 kg

Fig.5 System responses at the start of levitation

Fig.6 System responses with external force

3・2 回転特性の検証実験

ゼロパワー制御を用いた磁気軸受の回転特性を検証するために、2軸制御型の原理検証装置を製作した。1軸原理検証装置の構成を用いて、磁気軸受として回転軸を上下／左右の2軸制御で非接触支持する場合には、各軸の制御および挙動が連成するのを避けるために、それぞれの軸方向の磁石ユニットおよび可動枠を独立に動作するように配置する必要がある。その際、互いの動作が干渉しないように設置位置をずらす必要があり、装置が軸方向に大型化する。また、設置位置をずらすことによって、軸に作用する磁力の作用点が異なり、場合によっては設置位置によって異なる制御パラメータを設定する必要が生じ、制御系設計の複雑化、安定性の低下を引き起こす可能性がある。そこで2軸制御を実現するに当たり、可動枠をコの字型として上下／左右方向を同一平面上に配置した。図7に2軸原理検証装置の外観を示し、表2に設計仕様を示す。この構成によって、軸に作用する磁力の作用点が同一となり、上下／左右の制御系設計を同一にすることができる。

Fig.7 Verification magnetic bearing (2-axis)

Table 2 Specifications (2-axis)

Magnet unit	Outside dimension	87 mm×87 mm×40 mm
	Magnet material	Nd-Fe-B
	Coil resistance	1.3 Ω
	Coil turns	250 turn
	Nominal gap	4 mm
Mechanical parts	Constant of spring	39.8 N/mm
	Levitation mass	5.8 kg

上記のように構成された2軸原理検証装置を用いて、回転特性の検証実験を行った。実験は軸を $-x$ 方向、 $-y$ 方向に移動させた状態（正面から見て左下）で磁石ユニットに吸着させた状態を初期状態とし、その状態から磁気浮上制御を開始し、磁気浮上を行った。安定浮上させた後、モータによって軸を回転させた。回転数は、0(rpm)～1000(rpm)の範囲でスweepさせている。ここでは x 方向のみに着目し、図8に軸と可動枠の相対変位の挙動を、図9に可動枠の挙動を、図10に軸の絶対位置の挙動を、図11に励磁電流の応答を示す。

図8～図10を見てわかるように、軸と可動枠の相対位置および可動枠の位置はそれぞれ変動しても、その釣合いで決定される軸の絶対位置変動は小さく、最大0.4(mm)である。本装置のノミナルギャップは4(mm)に設定されているため、ノミナルギャップに対する軸の絶対位置変動の割合を表す軸偏心割合は10(%)になる。したがって本装置では、0(rpm)～1000(rpm)の範囲で軸偏心割合が10(%)以下を達成していることがわかる。挙動の特徴として、まず700(rpm)近傍で軸の絶対位置変動が増加しているのがわかる。これは、磁気浮上系の固有振動数によるピークである。磁気浮上系の固有振動数は、制御の応答性によって決定される。制御ゲインを高く設定すると、応答性が上がり、固有振動数は高くなる。本制御系は、応答性と安定性を考慮して固有振動数が11Hz近傍になるように設計を行った。したがって、ほぼ設計どおりの特性である。本軸受は一般的な磁気軸受と違い、固定枠の中に可動枠を配置した2重構造となっている。原理上、軸受剛性を上げることなく軸位置変動を抑制できるが、2重構造のため可動枠の共振が存在する。図9を見てみると、800(rpm)～900(rpm)の間で若干ではあるが可動枠の位置変動が大きくなっており、これが可動枠の共振である。図11より、0(rpm)～1000(rpm)の範囲で励磁電流は最大2(A)である。励磁電流は可動枠の動きに依存するため、可動枠の動きが活発な領域で励磁電流が大きくなっている。

Fig.8 Behavior of displacement between axis and moving frame

Fig.9 Behavior of moving frame

Fig.10 Behavior of axis

Fig.11 Behavior of exciting current

4. 結 言

ゼロパワー制御を適用した上で軸偏心を低減可能な磁気軸受の基本構成を提案し，原理検証装置を用いて，浮上位置一定の原理および回転特性の検証実験を行った．その結果，安定浮上を実現し，定常的な外力に対して軸位置変動が少ないことを確認した．また，0(rpm)～1000(rpm)の運転範囲内で回転時の軸偏心割合が 10(%)以下となることがわかった．本磁気軸受システムは，その構造上，地震波のような外部の振動を回転軸に伝達しづらい構造となるため，タッチダウンの可能性を低減できると考える．今後は，更なる高速回転領域における検証を進めていく．

文 献

- (1) 森下明平, 小豆沢照男, “常電導吸引式磁気浮上系のゼロパワー制御”, 電気学会論文誌, Vol. 108-D, No. 5 (1988), pp. 447-454.