動的出力フィードバックによる磁気軸受システム の出力レギュレーション

正員 松村 文夫 (金沢大)

正員 藤田 政之 (北陸先端大)

正員 畠 一尋 (金沢大)

Output Regulation in Magnetic Bearing Systems by a Dynamic Output Feedback Controller

Fumio Matsumura, Member (Kanazawa University), Masayuki Fujita, Member (JAIST,
Hokuriku), Kazuhiro Hatake, Member (Kanazawa University)

This paper deals with the problem of an unbalance vibration in magnetic bearings. Firstly, by assuming that the rotor with an unbalance is a rigid body, we develop a rigorous modeling of a magnetic bearing system in which the rotation of the rotor is (not on its geometrical axis, but) on its axis of inertia. In result, it is shown that, when the rotor rotates around its axis of inertia, sinusoidal disturbances due to the unbalance of the rotor affect the system dynamics and the measured output. These disturbances can be described as the output of the autonomous system. In this case, a part of the state variables of the system to be controlled cannot be measured. Here, our objective is to construct a controller which preserves internal stability and rejects the above-stated disturbances in a wide speed range. The problem is formulated and solved within a framework of the so-called “output regulator with internal stability” theory. The state variables which can not be available are estimated with a minimal order observer. Finally, we present a numerical example for a fixed rotation speed and a result of its experiment.

キーワード：磁気軸受，不つりあい振動，慣性中心回転，出力レギュレータ，オブザーバ

1. ま え が き

磁気軸受とは磁気力により非接触で物体を支持するシステムであり，これを回転機械の支持機構として適用した場合，従来の機械的軸受を使用した場合に比べ，数々の優れた特徴を有する⁽¹⁾。一方，磁気軸受によって支持された物体は空中での浮上という状態にあるため，回転させた場合二つの重要な問題を生ずる。一つは回転体の重心回りの2自由度の回転運動の間の相互干渉によって生じるジャイロ効果⁽²⁾⁽³⁾の問題である。これにより回転子は歳差運動を生じる。もう一つは回転子の不つりあいに起因する周期的強制力の問題である。これにより回転子において，剛性ロータでは

回転に同期した振り回し振動を，弾性ロータではたわみ振動を引起す。

本論では，これらの問題のうち後者の不つりあいの問題を剛性ロータを対象とし，その解決方法として慣性中心回転を達成する制御系の構成について述べる。この分野ではS2M社の「自動バランス」⁽⁴⁾と呼ばれる方法が有名である。この方法は回転速度に相当する周波数に対してフィルタによって軸剛性をなくすようにすることで，ロータには回転速度に同期した力がわりに働かないため慣性中心回転が実現できる。しかし，これは実用的には優れているが，制御対象を物理的直感に基づいた1入力1出力の機械モデルで考えているため，制御理論の枠組みでとらえることができない

い。そこで本論文では、現代制御理論に基づく内部安定な出力レギュレータの手法によって慣性中心回転を実現させる方法を示す。また、回転速度を固定した場合の実験結果を紹介する。

2. 磁気軸受システムの慣性中心回転のモデリング

まず、回転子に固定した慣性主軸の座標 X_r, Y_r, Z_r をとる。 X_r, Y_r, Z_r 軸方向の速度成分をそれぞれ u, v, w とする。また、回転子の各軸回りの角速度を p, q, r とする。各軸方向の外力を X, Y, Z , また外力が重心回りに作るモーメントの成分を L, M, N とする。ここで回転子は剛体であり、回転軸に対して軸対称であるとする。また、 u, v, w, q, r , は微小量であるとして線形モデルを考える。このとき、回転子の運動に対して以下の六つの式が成り立つ⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

$$m\dot{u} = X \quad (1)$$

$$m(\dot{v} - pw) = Y \quad (2)$$

$$m(\dot{w} + pv) = Z \quad (3)$$

$$J_x \dot{p} = L \quad (4)$$

$$J_y \dot{q} + (J_x - J_y)pr = M \quad (5)$$

$$J_y \dot{r} - (J_x - J_y)pq = N \quad (6)$$

m : 回転子全質量, J_x : X_r 軸回りの慣性モーメント, J_y : Y_r 軸(Z_r 軸)回りの慣性モーメント

図1に示すように、固定子は空間に固定しているものと仮定し、固定子軸系 X_s, Y_s, Z_s を X_s 軸は電動機固定子軸に、 Z_s 軸は鉛直下方にとり、 Y_s 軸はこれらが右手系をなすようにとる。回転子は剛体と仮定しその構造は電動機回転子の両側に電磁石回転子がつき、更に、その片側に負荷質量がつく非対称構造を考える。理想的な回転状態においては、重心 G は固定子座標の原点 O に一致し、慣性主軸は電動機固定子軸

図1 固定子座標と回転子に加わる力
Fig. 1. Coordinates of stator and forces on rotor.

に一致する。電磁石回転子には固定子にある電磁石により $f_{11} \sim f_{15}, f_{r1} \sim f_{r5}$ の力が働く。また、負荷には仮想的に f_{dx}, f_{dy}, f_{dz} の定常的な力、 T_m の電動機トルク、 T_0 のクーロン摩擦、 ρp の制動摩擦トルク (p : 回転角速度) が加わるものとする。

回転子には不つりあいがあるとして、重心 G の形心 F から半径方向の偏心量を ϵ , 回転軸 X_r と回転軸方向の慣性主軸 X_r とのなす角を τ とする。回転軸方向の偏心も存在するが回転状態に影響を与えないので無視する。いま理想的な制御が働き、回転子が慣性主軸を中心に回転しているとすると、回転子の重心 G は固定子軸系の原点から微小距離離れた (x_r, y_r, z_r) の位置に移る。次に回転子は慣性主軸を中心に回転、すなわち X_r 軸の回りに ϕ の回転を行うとする。このとき形心 F は原点から (x_f, y_f, z_f) の位置に移り、重心 G と偏心 ϵ を保ちながら重心 G の回りを回転する。また慣性主軸 X_r は電動機固定子軸 X_s から水平面内で ψ_r , 垂直面内で θ_r 微小に傾き、自身を中心に回転する。回転軸 X_r は、電動機固定子軸 X_s から水平面内で ψ_f , 垂直面内で θ_f 微小に傾き、慣性主軸 X_r と相対角 τ を保ちながらその回りを回転する。従って、次の関係がある。

$$x_f = x_r + w_1 \quad (7)$$

$$x_f = \begin{bmatrix} y_f \\ z_f \\ \theta_f \end{bmatrix}, x_r = \begin{bmatrix} y_r \\ z_r \\ \theta_r \end{bmatrix}, w_1 = \begin{bmatrix} \epsilon \cos(pt + \chi) \\ \epsilon \sin(pt + \chi) \\ \tau \cos(pt + \lambda) \\ \tau \sin(pt + \lambda) \end{bmatrix}$$

ここで、 χ, λ : は初期値

X_r 軸方向の並進運動ならびに X_r 軸回りの回転運動に関しては不つりあいの影響はないので以下では割愛する。

状態方程式を導くため、入力を電磁石コイル電圧とし、入力に関する定式化を行うと、電磁石の電圧と電流の関係、吸引力と電流および変位の関係は、次式と

図2 固定子座標と回転子
Fig. 2. Coordinates of stator and rotor.

なる。

$$\frac{d}{dt}i = -\frac{R}{L}i + \frac{1}{L}e \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$f = C_{20}C_{10}x_f + C_{30}i \quad \dots\dots\dots (9)$$

L : 電磁石コイルのインダクタンス, R : 電磁石コイルの抵抗

ここで, 各行列要素は次のようになる。

$$i = \begin{bmatrix} i'_{11} \\ i'_{r1} \\ i'_{13} \\ i'_{r3} \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} e'_{11} \\ e'_{r1} \\ e'_{13} \\ e'_{r3} \end{bmatrix}$$

$$f = \begin{bmatrix} f_{11} - f_{12} - l_r mg / (l_l + l_r) \\ f_{r1} - f_{r2} - l_l mg / (l_l + l_r) \\ f_{13} - f_{14} \\ f_{r3} - f_{r4} \end{bmatrix}$$

$$C_{10} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -l_l & 0 \\ 0 & 1 & l_r & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -l_l \\ -1 & 0 & 0 & l_r \end{bmatrix}$$

$$C_{20} = -\frac{2}{W} \text{diag}[F_{11} + F_{12}, F_{r1} + F_{r2}, F_{13} + F_{14}, F_{r3} + F_{r4}]$$

$$C_{30} = 2 \text{diag}\left[\left(\frac{F_{11}}{I_{11}} + \frac{F_{12}}{I_{12}}\right), \left(\frac{F_{r1}}{I_{r1}} + \frac{F_{r2}}{I_{r2}}\right), \left(\frac{F_{13}}{I_{13}} + \frac{F_{14}}{I_{14}}\right), \left(\frac{F_{r3}}{I_{r3}} + \frac{F_{r4}}{I_{r4}}\right)\right]$$

i'_j : 電磁石コイル電流の定常値からのずれ,
 e'_j : 電磁石コイル電圧の定常値からのずれ,
 F_j : 電磁石の定常吸引力, I_j : 電磁石コイルの定常電流, W : 電磁石一回転子間の定常ギャップ, l_l, l_r : 重心—電磁石吸引点間の距離, $j = 11, 12, 13, 14, r1, r2, r3, r4$

(1)~(9)式をまとめて, 更に新しい状態変数として $x = [g_r^T \dot{g}_r^T i^T]^T$ とおく。その結果状態方程式は次式となる ($g_r = C_1 x_r$; g_r は慣性主軸の平衡点からのずれ)。

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ C_{10}(A_{10} + B_{10}C_{20}C_{10})C_{10}^{-1} & C_{10}A_{20}P_1C_{10}^{-1} * \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (-R/L)I \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} 0 \\ C_{10}D_{20} \\ 0 \end{bmatrix} f_d + \begin{bmatrix} 0 \\ C_{10}(A_{10} + B_{10}C_{20}C_{10}) \\ 0 \end{bmatrix} w_1 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$f_d = [f_{dy} \ f_{dz}]^T$$

また, 電磁石ギャップを出力とすると, 出力方程式は以下となる。

$$y = [I \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} g_r \\ \dot{g}_r \\ i \end{bmatrix} + C_{10}w_1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで, 各行列要素は次のようになる。

$$A_{10} = \begin{bmatrix} \alpha/m & 0 & 0 & -\alpha l_m/m \\ 0 & \alpha/m & \alpha l_m/m & 0 \\ 0 & \alpha l_m/J_y & \alpha l_m^2/J_y & 0 \\ -\alpha l_m/J_y & 0 & 0 & \alpha l_m^2/J_y \end{bmatrix}$$

$$A_{20} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_x/J_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_x/J_y \end{bmatrix}$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 & -p & 0 & 0 \\ p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p \\ 0 & 0 & p & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/m & 1/m \\ -1/m & -1/m & 0 & 0 \\ l_l/J_y & -l_r/J_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_l/J_y & -l_r/J_y \end{bmatrix}$$

$$D_{20} = \begin{bmatrix} 1/m & 0 \\ 0 & 1/m \\ 0 & -l_r/J_y \\ l_r/J_y & 0 \end{bmatrix}$$

α : 電動機回転子が半径方向に偏心したときの不平衡吸引力の係数, l_m : 重心—電動機回転子間の距離

以上で慣性中心回転の場合の磁気軸受の状態方程式, および出力方程式が求まった。ここで, 周期的外乱 w_1 およびステップ状外乱 $f_d = w_2$ は以下のように状態空間表現される。

$$w = [w_1^T \ w_2^T]^T \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\dot{w} = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = Pw \quad \dots\dots\dots (13)$$

回転速度によってパラメータが変化することも考慮して, 状態方程式, 出力方程式を次のように簡単に書く。

$$\dot{x} = A(p)x + Bu + Ew \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\dot{w} = P(p)w \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$y = C_1x + C_2(p)w \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$z = D_1x \quad \dots\dots\dots (17)$$

以上が慣性中心回転を平衡状態としたときの制御対象の状態方程式および出力方程式である。このように、制御対象には回転速度に同期した周期的外乱が加わり、また出力にもその影響が現れる。

3. 慣性中心回転を実現する磁気軸受制御系の設計

磁気軸受において任意の回転速度で慣性中心回転を達成するという事は、回転子を安定に浮上させかつ慣性主軸を電動機回転中心線に一致させることである。これは制御理論的には任意の回転速度において、(i)閉ループ系が安定、(ii)制御量が任意の初期状態に対して0に近づく、という二つの条件を満足する制御系を構成することである。前記の制御目的を達成することを幾何学的手法を用いて取扱ったのが、Wonham⁽⁷⁾の内部安定な出力レギュレータの構成法であり、本論文ではその構成法⁽⁸⁾を使用する。

制御対象は次のような微分方程式で表されるものとする。

$$\dot{x} = Ax + Bu + E_1 w_1 + E_2 w_2 \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$y_1 = C_1 x \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$z_1 = D_1 x \quad \dots\dots\dots (20)$$

x : 制御対象の状態ベクトル, u : 制御入力ベクトル, w_1 : 測定不能な外乱ベクトル, w_2 : 測定可能な外乱ベクトル, y_1 : 観測出力ベクトル, z_1 : 制御量ベクトル

制御の目的は、(i)閉ループ系が安定、(ii) $z_1(t) \rightarrow z_r(t) (t \rightarrow \infty)$ となるように、 u を y_1 と w_2 から決定することである。ただし、 z_r は設定値である。

以上のように記述される系に対して

$$u = K_1 x + K_2 w \quad \dots\dots\dots (21)$$

という制御入力によって、制御目的を達成するレギュレータを構成する。ここで、制御入力 u は、閉ループ系を安定(内部安定)にする入力 $K_1 x$ と、外乱の影響を打消す(出力レギュレーション)フィードフォワード入力 $K_2 w$ の和として表される。

実際に内部安定な出力レギュレータを磁気軸受に適用する場合、 K_1, K_2 は以下のようにして決定される。

<step 1> 任意の回転速度において、閉ループ系が安定であるようなフィードバック係数 K_1 を二次安定化⁽⁹⁾の手法などを用いて求める。

$$A_K = A(p) + BK_1 \quad \dots\dots\dots (22)$$

<step 2> 外乱と平衡するフィードフォワード入力 $K_2 w$ を求める。実際には、 K_2 は回転速度に対して一意に求まるので、 K_2 を回転速度 p の関数として

表す。具体的には、外乱 $w(0)$ から制御量 $Z(s)$ への伝達関数を $T(s, p)$ とすると、

$$T(s, p) = D_1 [sI - \{A(p) + BK_1\}]^{-1} \times (E + BK_2) [sI - P(p)]^{-1} \quad \dots\dots (23)$$

となり、上式を0とするような $K_2(p)$ を求める。

<step 3> 上で求めた $K_1, K_2(p)$ を用いて制御入力をつくる。ただし、 x, w は直接検出不可能なので外乱を含めた以下の拡大系に対して、最小次元オブザーバ⁽¹⁰⁾を構成して推定する。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(p) & E \\ 0 & P(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u \\ = A_c(p)x_c + B_c u \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$y = \begin{bmatrix} C_1 & C_2(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} = c_c x_c \quad \dots\dots\dots (25)$$

この拡大系 $[C_c(p), A_c(p)]$ の可観測性は $p=0$ のとき成立しない。しかし、低い回転速度では慣性中心回転させる必要はないので、実用的に問題はないと思われる。従って、 $p \in [p_0, p_m]$, $p_0 > 0$ とし、適当な回転速度 p_0 から目標回転速度 p_m までの範囲について以下考えることにする。

まず、

$$S = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ 0 & I \end{bmatrix}$$

とする。次に、 $S(p)A_c(p)S^{-1}(p)$, $S(p)B_c$ を計算する。

$$S(p)A_c(p)S^{-1}(p) = \begin{bmatrix} A(p) & E'(p) \\ 0 & P(p) \end{bmatrix}$$

$$S(p)B_c = B_c$$

次に、すべての回転速度内($p_0 \sim p_m$)で、(26)式の $\hat{A}(p)$ が安定であるような L を求める。

$$\hat{A}(p) = P(p) - LE'(p) \quad \dots\dots\dots (26)$$

更に、 $K_o(p), B, D(p), H(p)$ を以下のように計算する。

$$K_o = \hat{A}(p)L - LA(p), B = -LB = 0$$

$$D(p) = S^{-1}(p) \begin{bmatrix} 0_{12 \times 8} \\ I_8 \end{bmatrix}, H(p) = S^{-1}(p) \begin{bmatrix} I_{12} \\ L \end{bmatrix}$$

最小次元オブザーバは以下の式で表される。

$$\dot{\xi} = \hat{A}(p)\xi + K_o(p)y \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$\dot{x}_c = D(p)\xi + H(p)y \quad \dots\dots\dots (28)$$

このオブザーバの出力を用いて入力は

$$u = K(p)\hat{x}_c = K_1 \hat{x} + K_2(p)\hat{w} \quad \dots\dots\dots (29)$$

となる。

以上のように設計されたコントローラを用いたとき、実際に構成される閉ループ系が制御目的を達成するものであるかどうかを考察する。(24), (27)~(29)

を用い、推定誤差ベクトルを e とし

$$e = \hat{x} - Mx \quad \dots\dots\dots (30)$$

なる変換を施すとオブザーバを併合したシステムは以下になる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(p) + BK_1 & -BK_1 C_2(p) + BK_2(p) C_1 \\ 0 & \hat{A}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E + BK_2(p) \\ 0 \end{bmatrix} w \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$\dot{w} = P(p)w \quad \dots\dots\dots (32)$$

上式において外乱 $w=0$ とすると、 $A(p) + BK_1$, $\hat{A}(p)$ が安定であるので、システムは漸近的に安定(内部安定)である。

また、(31), (32), (17) 式をラプラス変換すると、制御量は

$$\begin{aligned} Z(s) &= D_1 X(s) \\ &= D_1 [sI - \{A(p) + BK_1\}]^{-1} x(0) \\ &\quad + D_1 [sI - \{A(p) + BK_1\}]^{-1} \\ &\quad \times \{-BK_1 C_2(p) + BK_2(p)\} \\ &\quad \times [sI - \hat{A}(p)]^{-1} e(0) \\ &\quad + D_1 [sI - \{A(p) + BK_1\}]^{-1} \\ &\quad \times \{E + BK_2(p)\} [sI - P(p)]^{-1} w(0) \\ &\quad \dots\dots\dots (33) \end{aligned}$$

と表される。ただし、 $x(0)$, $e(0)$, $w(0)$ は各々の初期値を表している。 $A + BK_1$, $\hat{A}$ が安定であるので右辺第1項、第2項は $t \rightarrow \infty$ で0である。また、 K_2 は第3項を0とするように選ばれるので制御量は

$$z(\infty) = 0$$

となり、出力レギュレーションが達成される。

このように、内部安定な出力レギュレータを構成することにより設計回転速度で制御目的は達成される。この方法は自動バランス法とは異なり、制御対象を各軸間の干渉を考慮した多入力多出力系として扱っている。また本方法はモデリングによって得られた数式モデル(10), (11)式に基づいて系統的に制御系の設計を行っている点に特徴がある。

4. 設計例、実験結果

ここでは以上に述べたことを基に、4軸制御形磁気軸受(表1参照)において振回りが顕著に現れる回転速度1,000 rpm(一定速度)での慣性中心回転を達成するための設計例と実験結果を示す。ただし周期外乱 w_i に対してのみである。さきに述べた手順に従い設計した数値を以下に示す。

<step 1> ここでは実験機において、実際に安定に浮上している(最適レギュレータ)フィードバック

表 1 回転子のパラメータ

Table 1. Parameters of rotor.

パラメータ	記号	数値	単位
回転子全質量	m	1.39×10^{-1}	kg
x軸慣性モーメント	J_x	1.348×10^{-2}	kg·m ²
y軸慣性モーメント	J_y	2.326×10^{-1}	kg·m ²
重心-吸引点間距離	l	1.3×10^{-1}	m

表 2 吸引電磁石のパラメータ

Table 2. Parameters of electromagnet.

パラメータ	記号	数値	単位
定常吸引力	F_{11}	9.09×10	N
	$F_{12} \sim 4$	2.20×10	N
	F_{r1}	9.09×10	N
	$F_{r2} \sim 4$	2.20×10	N
定常コイル電流	I_{11}	6.3×10^{-1}	A
	$I_{12} \sim 4$	3.1×10^{-1}	A
	I_{r1}	6.3×10^{-1}	A
	$I_{r2} \sim 4$	3.1×10^{-1}	A
定常ギャップ	W	5.5×10^{-4}	m
電磁石コイル抵抗	R	1.47×10	Ω
電磁石コイルインダクタンス	L	2.85×10^{-1}	H

ク係数を用いることにする。そのゲインを以下に示す。(eN は $\times 10^N$ を示す。以下同様)

$$K_1 = \begin{bmatrix} 2.90e5 & -3.62e2 & 8.85e2 \\ -3.62e2 & 2.90e5 & -8.85e2 \\ -6.69e2 & 6.69e2 & 1.89e5 \\ 6.69e2 & -6.69e2 & -1.52e2 \\ -8.85e2 & 1.12e3 & 1.18e0 \\ 8.85e2 & 1.18e0 & 1.12e3 \\ * & -1.52e2 & 4.59e0 & -4.59e0 \\ 1.89e5 & -4.59e0 & 4.59e0 \\ -3.18e0 & 3.18e0 & -1.89e2 \\ 3.18e0 & -3.18e0 & 3.87e-1 \\ * & 1.05e3 & 1.42e0 & -1.24e-1 \\ 1.42e0 & 1.05e3 & 1.24e-1 \\ 3.87e-1 & -1.24e-1 & 1.24e-1 \\ -1.89e2 & 1.24e-1 & -1.24e-1 \\ * & 1.24e-1 & 1.47e2 & 2.81e-1 \\ -1.24e-1 & 2.81e-1 & 1.47e2 \end{bmatrix}$$

<step 2> <step 1>で用いた K_1 のときの K_2 を示す。

$$K_2 = \begin{bmatrix} 2.846e41.901e5-2.481e4 \\ 2.846e41.901e5 & 2.481e4 \\ -8.853e41.682e4-2.156e3 \\ -8.853e41.682e4 & 2.156e3 \\ 3.718e3 \\ -3.718e3 \\ * & -1.155e4 \\ 1.155e4 \end{bmatrix}$$

図3 ギャップ変位 (センサ出力)
Fig.3. Displacement of gap (gap sensor output).

<step 3> 最小次元オブザーバを構成する。

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -10 - p & 0 & 0 \\ p & -10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -10 - p \\ 0 & 0 & p & -10 \end{bmatrix}$$

$$p = 104.72 \text{ rad/s} \quad (1,000 \text{ rpm})$$

となるような L を計算すると次のようになる。

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4.626e-4 & -4.626e-4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.781e-3 & -3.781e-3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4.560e-4 & 4.560e-4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3.723e-3 & -3.723e-3 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

以上の設計値を基にオペアンプを用いたアナログ回路で制御系を作製し、実験を行った。まず図3はギャップセンサの出力のリサージュをとったもので回転子

図4 慣性主軸の変位 (オブザーバ出力)
Fig.4. Displacement of axis of inertia (observer output).

が軸に垂直な平面内で描く軌跡を表し、軸が振回っている様子を示している。(a)図は最適レギュレータ、(b)図は内部安定な出力レギュレータの場合である。この図から内部安定な出力レギュレータによって振回りが小さく抑えられていることがわかる。ただし、理想的には真円を描くはずであり、制御目的が完全に達成されていないと考えられる。また、図4は同様にオブザーバによって推定した慣性主軸の変位のリサージュをとったものである。この図より内部安定な出力レギュレータによって慣性主軸の変位はほぼ0となり慣性中心回転が実現されているように思われる。しかしながら、これはオブザーバの推定値であり、制御目的が達成しているとは断言できない。以上のことから慣性中心回転が完全に得られていないことがわかる。この原因はパラメータの誤差などによるゲインの誤差などが考えられ、更に考察してみる必要がある。

5. む す び

磁気軸受において回転子につりあいがある場合に慣性中心回転を実現する制御系の構成について提案し

た。まず、慣性中心回転を平衡状態とした磁気軸受系の状態方程式、出力方程式を導出した。そして、得られた式をもとに制御目的を達成する制御系として内部安定な出力レギュレータを動的出力フィードバック形態で実現することによって、広い回転速度の変化で慣性中心回転を実現できることを示し、その設計法を示した。そしてこの設計法に従い、一定の回転速度での設計を行って実験したところ、まだ完全ではないがその効果がみられた。

今後は回転速度の変化に対応した動的なコントローラを、ディジタルコントローラを用いることによって構成し、以上に述べてきたことを実験で確認してゆきたい。更に、モデルの不確かさを考慮したロバストな制御系の構成についても考えてゆきたい。また、慣性中心回転が実現できているかどうかを判別する方法を考える必要がある。

最後に、本研究を行うにあたり多大な御協力をいただいた本学大学院修了生 大河賢司氏(現、東芝)に深く感謝いたします。(平成3年9月4日受付)

文 献

- (1) 松村：「磁気軸受の最近の発展」、システムと制御、26, 29 (昭57-4)
- (2) 井上：「磁気軸受ホイールの回転試験とジャイロ運動の安定性」：計測自動制御学論、23, 294 (昭62-3)
- (3) 秋下：「磁気支持系と振動制御」、第31回自動制御連合講演会、13 (昭63)
- (4) H. Habermann & M. Brunet: "The Active Magnetic Bearing Enables Optimum Damping of Flexible Rotor", ASME paper, 84-GT-117 (1984)
- (5) 松村・小林・秋山：「横軸形磁気軸受の基本方程式と制御系設計」：電学論C, 101, 137 (昭56-6)
- (6) 松村：「吸引制御横軸形磁気軸受の基本方程式(非対称の場合)」, 昭57年電気学会全大, 804
- (7) O. A. Sebakhy & W. M. Wonham: "A Design Procedure for Linear Multivariable Regulators", Automatica, 12, 467 (1976)
- (8) 木村・井上：「多変数制御系の理論と応用—VII—」, システムと制御, 22, 683 (昭53-11)

- (9) 松村・藤田・寺西：「横軸形磁気軸受への2次安定化の適用」, 平2電気学会全大
- (10) 美多・小郷：システム制御理論入門(昭61)実教出版

松 村 文 夫 (正員)

昭和10年7月27日生。33年金沢大学工学部電気工学科卒業。同年同大学助手。現在、電気・情報工学科教授。工学博士。吸引力制御形磁気浮上の研究に従事。磁気浮上応用技術調査専門委員会委員長。計測自動制御学会、システム制御情報学会、日本機械学会、IEEE会員。

藤 田 政 之 (正員)

昭和59年早稲田大学大学院博士前期課程修了。60年同博士後期課程中退。同年金沢大学工学部助手、講師、助教授を経て、平成4年北陸先端科学技術大学院大学助教授。工学博士。 H_∞/μ 制御理論とその応用に関する研究に従事。

畠 一 尋 (正員)

昭和43年2月6日生。平成4年3月金沢大学大学院工学研究科電気・情報工学専攻修了。現在、同大学工学部電気・情報工学科助手。吸引力制御磁気軸受の制御に関する研究に従事。計測自動制御学会会員。