研究論文

磁気軸受系の外力に対する応答特性の解析*

——最適レギュレータ系と独立形制御系の比較——

水 野 毅** 樋 口 俊 郎*** 相 川 登†

Analysis on Response of Magnetic Bearing System to External Forces
—Comparison between Optimal Regulator System and Independently Controlled System—

Takeshi MIZUNO, Toshiro HIGUCHI and Noboru AIKAWA

One of the significant problems in designing a magnetic bearing control system is that there are gyroscopic couplings between two rotational motions of the suspended rotor. Because of these couplings the optimal regulator system related to the rotational motions needs antisymmetric cross feedback compensation in addition to usual displacement and velocity feedbacks of individual motion. It has been shown that the optimal regulator system has better transient response characteristics than the independently controlled system, that is to say, the system with no cross feedback compensation which is obtained as a result of disregard of gyroscopic effects in the process of designing the control system. In view of applications of magnetic bearings it is important to investigate the dynamic behaviour of the system disturbed by external forces besides the transient natural motion. This paper shows an analytical method to study forced motions of the gyroscopic coupled systems when static or sinusoidal varying forces are applied to the rotor and clarifies differences between the optimal regulator system and the independently controlled system. Experimental tests are carried out to verify the theoretical results.

Key words: magnetic bearing, gyroscopic effect, forced motion, optimal regulator, decentralized control, rotos dynamics

1. 緒 言

磁気力によって回転体を非接触で支持することができる磁気軸受は高速回転体あるいは真空中などにおける回転体の支持機構として優れた特徴を備えており、近年、活発に研究、開発が行われている^{1)~4)}。

回転体を支持する磁気軸受では、回転に伴って生じるジャイロ効果の影響によって2自由度の回転運動の間に相互干渉を生じることが制御系を構成する上で一つの重要な問題となる。著者らは、ジャイロ効果による相互干渉がある2自由度系では、最適レギュレータ系を実現するために、各自由度内でのフィードバック補償に加えて、2自由度間の逆対称交差フィードバックが必要であることを示し⁵⁾、このような構成の最適レギュレータ系は交差フィードバック補償を行わない

独立形制御系に比べて優れた過渡応答特性を持っていることを理論的⁶⁾、実験的⁷⁾に示した。一方、磁気軸受を実際に使用する場合を考えると、初期変位に対するレギュレータとしての過渡応答特性だけではなく、回転体に外力が作用するときの系の特性（いわゆる軸剛性）を把握しておくことは重要である。松村らは、ジャイロ効果の影響を考慮した、積分補償を含むレギュレータ系の設計法を述べ⁸⁾、設計法と諸特性との関係を明らかにしている⁹⁾が、軸剛性に関する解析は非干渉化された1自由度系のモデルに基づくものであり、ジャイロ効果の影響と軸剛性との関係については述べていない。

本論文では、ジャイロ効果による相互干渉を考慮した2自由度系のモデルに基づいて、最適レギュレータ系および独立形制御系の外力に対する応答特性を解析する方法を示し、制御系の内部構造と応答特性との関係を明確にし、開発した磁気軸受制御系試験装置⁷⁾を用いて、導出した理論的な結果を実験的に確認する。

* 原稿受付 昭和61年5月8日、昭和58年度精機学会春季大会学術講演会（昭和58年3月27日）にて発表

** 正 会 員 職業訓練大学校（相模原市相原1960）

*** 正 会 員 東京大学生産技術研究所（東京都港区六本木7-22-1）

† 新日本製鉄（株）（川崎市中原区井田1618）

2. 磁気軸受制御系の構成

2.1 基本モデル

対象とする磁気軸受は、回転体の回転軸周りの回転を除く5自由度の運動を、直流電磁石の吸引力を利用して、すべて能動的に制御する形式の磁気軸受(5自由度制御形磁気軸受)である。この形式の磁気軸受では、回転軸方向の並進運動(1自由度)、半径方向の並進運動(2自由度)および重心周りの回転運動(2自由度)に関する制御をそれぞれ独立に行うことができる⁵⁾。本論文は、回転体の運動に固有の現象であるジャイロ効果の影響に着目したものであるため、以下では、重心周りの2自由度の回転運動だけを扱う。

平衡状態における回転体の重心の位置を原点Oとし、回転軸とz軸とが一致するように固定座標系O-xyzを定める。回転体が完全釣合い状態にある場合、重心周りの2自由度の回転運動の動特性は、適当な無次元化変数を用いて、次のように表すことができる⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta}_x + k\ddot{\theta}_y - \bar{\theta}_x &= \bar{u}_x \\ \ddot{\theta}_y - k\ddot{\theta}_x - \bar{\theta}_y &= \bar{u}_y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

$\bar{\theta}_x, \bar{\theta}_y$: 回転体のx軸, y軸周りの角変位

$\bar{u}_x, \bar{u}_y$: 電磁石の吸引力によるx軸, y軸周りのモーメントに対応する制御入力(各電磁石の励磁電流の変動分の線形結合で表される)

$k = \frac{I_a}{I_r} \bar{\omega}$: ジャイロ効果の影響の大きさを表すパラメータ

$\bar{\omega}$: 回転体のz軸周りの回転角速度

I_a : 回転体の回転軸周りの慣性モーメント

I_r : 回転体の重心をとおり回転軸に垂直な軸の周りの慣性モーメント

また、 $\bar{\cdot}$ は無次元化された時間変数 $\bar{t}$ による微分を表している。

2.2 最適レギュレータ系

式(1)で動特性が記述される制御対象において、系の対称性などを考慮して選定される二次形式評価関数

$$J = \int_0^\infty \{ q_\theta (\bar{\theta}_x^2 + \bar{\theta}_y^2) + q_\omega (\dot{\bar{\theta}}_x^2 + \dot{\bar{\theta}}_y^2) + \bar{u}_x^2 + \bar{u}_y^2 \} d\bar{t} \quad (2)$$

$(q_\theta > 0, q_\omega \geq 0)$

を最小にする最適入力は次式のように求められる⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_x^* &= -p_{12}^* \bar{\theta}_x - p_{22}^* \dot{\bar{\theta}}_x - p_{23}^* \dot{\bar{\theta}}_y \\ \bar{u}_y^* &= -p_{12}^* \bar{\theta}_y - p_{22}^* \dot{\bar{\theta}}_y + p_{23}^* \dot{\bar{\theta}}_x \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 p_{12}^* は次の3次方程式の唯一の正根である。

$$2p_{12}^3 + (k^2 + q_\omega - 4)p_{12}^2 - 2(q_\theta + q_\omega)p_{12} - q_\theta q_\omega = 0 \quad (4)$$

また、 p_{22}^*, p_{23}^* は次式によって定められる。

$$p_{22}^* = \sqrt{2p_{12}^* + q_\omega} \quad (5)$$

$$p_{23}^* = kp_{12}^* / p_{22}^* \quad (6)$$

$$= \text{sgn}(k) \sqrt{2p_{12}^* - p_{12}^{*2} + q_\theta} \quad (7)$$

式(3)から、制御対象においてジャイロ効果による相互干渉があるのに対応して、最適レギュレータを実現するには、補償器の伝達特性が $p_{12}^* + p_{22}^* s$ で表される各自由度内でのフィードバックに加えて、逆対称交差フィードバック(そのゲインは p_{23}^* で与えられる)が必要であることがわかる。

2.3 独立形制御系

式(1)において、ジャイロ効果の影響を無視すると制御対象の動特性は、次のような1自由度系として表すことができる。

$$\ddot{\bar{\theta}}_\alpha - \bar{\theta}_\alpha = \bar{u}_\alpha \quad (\alpha = x \text{ または } y) \quad (8)$$

式(8)で記述される系において、評価関数

$$\bar{J} = \int_0^\infty (\hat{q}_\theta \bar{\theta}_\alpha^2 + \hat{q}_\omega \dot{\bar{\theta}}_\alpha^2 + \bar{u}_\alpha^2) d\bar{t} \quad (9)$$

を最小にする制御入力は次式で与えられる。

$$\bar{u}_\alpha = -\hat{p}_{12} \bar{\theta}_\alpha - \hat{p}_{22} \dot{\bar{\theta}}_\alpha \quad (\alpha = x \text{ または } y) \quad (10)$$

ここで、

$$\hat{p}_{12} = 1 + \sqrt{1 + \hat{q}_\theta} \quad (11)$$

$$\hat{p}_{22} = \sqrt{2\hat{p}_{12} + \hat{q}_\omega} \quad (12)$$

式(1)で表される系において、式(10)のように制御入力を定めると、各自由度内でのフィードバック補償しか行わない制御系(独立形制御系⁶⁾)が得られる。

3. 外力に対する応答特性の解析

複素変数 $\bar{\theta}(\bar{t})$ を次のように定義する。

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_x + j\bar{\theta}_y \quad (13)$$

回転体に外力が作用しているとき、前章で述べた制御系の動特性は次式のように表すことができる。

$$\ddot{\bar{\theta}} + (p_v - jk)\dot{\bar{\theta}} + (p_d - 1 - jp_c)\bar{\theta} = \bar{n} \quad (14)$$

ここで、 $\bar{n}(\bar{t})$ は外力による重心周りのモーメントの影響を表す。また、各フィードバック係数 p_d, p_v, p_c の値は、最適レギュレータ系においては

$$p_d = p_{12}^*, \quad p_v = p_{22}^*, \quad p_c = p_{23}^* \quad (15)$$

となり、独立形制御系においては

$$p_d = \hat{p}_{12}, \quad p_v = \hat{p}_{22}, \quad p_c = 0 \quad (16)$$

となる。

3.1 一定外力に対する応答

回転体に一定の外力が作用しているときには、 $\bar{n}(\bar{t})$ は次のように表される。

$$\bar{n}(\bar{t}) = \bar{n}_0 \quad (\bar{n}_0; \text{complex constant}) \quad (17)$$

式(14)、(17)から、定常状態では次式が成立する。

Fig. 1 Direction of the tilt of the rotor axis in the optimal regulator system, when force acting on the rotor is static ($k=1.9$)

$$\frac{\bar{\theta}}{\bar{n}_0} = \frac{1}{p_d - 1 - jp_c} \quad (18)$$

式(18)の左辺を

$$\frac{\bar{\theta}}{\bar{n}_0} = \frac{1}{\rho} e^{ja} \quad (\rho, a: \text{real}) \quad (19)$$

と表すと、 ρ, a は次のように定められる。

$$\rho = \sqrt{(p_d - 1)^2 + p_c^2} \quad (20)$$

$$a = \arg(p_d - 1 + jp_c) \quad (21)$$

式(21)から、逆対称交差フィードバック補償を行っている($p_c \neq 0$)ときには、回転軸が外力によるモーメントの方向から角度 a だけ偏って傾くことがわかる。

最適レギュレータ系では、式(7)、(15)から ρ の値は次のように表すことができる。

$$\rho = \sqrt{1 + q_\theta} \quad (22)$$

式(22)から、最適レギュレータ系では、一定外力のため生じる回転軸の傾きの大きさは、ジャイロ効果の影響の大きさ k や評価関数における速度に関する重み係数 q_ω によらず、変位に関する重み係数 q_θ だけから決まることがわかる。偏角については、 $r = q_\theta / q_\omega$ の値をパラメータとして、 q_θ と a との関係を求めたものの一例を図1に示す。 k の値は1.9とした。図から、 q_θ を大きく選ぶほど偏角の大きさは小さくなり、同一の q_θ に対しては、 q_ω を大きく選ぶほど偏角の大きさは小さくなることわかる。

独立形制御系においても、式(11)、(16)から、 ρ は変位に関する重み係数 $\hat{q}_\theta$ だけの関数として次のように表すことができる。

$$\rho = \sqrt{1 + \hat{q}_\theta} \quad (23)$$

また、偏角 a は0となり、回転軸は必ず外力によるモーメントの方向に傾くことがわかる。

3.2 一定方向周期外力に対する応答

回転体に方向が一定で大きさが正弦波状に変化する外力が作用している場合には、 $\bar{n}(\bar{t})$ を次のように表すことができる。

$$\bar{n}(\bar{t}) = \bar{n}_0 \cos(\bar{\omega}_d \bar{t}) \quad (24)$$

ここで、 $\bar{n}_0$ は外力によるモーメントの方向および大きさから定まる複素定数で、 $\bar{\omega}_d$ は外力の角振動数を表している。ここでは、 $\bar{\omega}_d$ の符号は回転角速度 $\bar{\omega}$ と同符号になるように定める。

定常解を求めるために、 $\bar{\theta}$ を次のようにおく。

$$\frac{\bar{\theta}}{\bar{n}_0} = A e^{j\bar{\omega}_d \bar{t}} + B e^{-j\bar{\omega}_d \bar{t}} \quad (25)$$

式(14)、(24)、(25)から、 A, B は次のように求められる。

$$A = \frac{1}{2\{-\bar{\omega}_d^2 + \bar{\omega}_d k + p_d - 1 - j(p_c - \bar{\omega}_d p_v)\}} \quad (26)$$

$$B = \frac{1}{2\{-\bar{\omega}_d^2 - \bar{\omega}_d k + p_d - 1 - j(p_c + \bar{\omega}_d p_v)\}} \quad (27)$$

ここで、 a, b, β を次式で定義しておく。

$$a \triangleq |A| + |B| \quad (28)$$

$$b \triangleq |A| - |B| \quad (29)$$

$$\beta \triangleq \frac{\arg(A) - \arg(B)}{2} \quad (30)$$

式(25)から、回転軸は $(\bar{\theta}_x, \bar{\theta}_y)$ 平面上で楕円軌道を描いて振れ回り、 a は楕円の長軸の長さ、 $|b|$ は短軸の長さ、 β は長軸と $\bar{\theta}_x$ 軸との角度に等しくなる¹⁰⁾。また、 b の符号は楕円軌道上での移動方向を定め、

(i) $b > 0$ ならば、回転体の回転方向と同じ方向に移動する(順方向に振れ回る)。

(ii) $b = 0$ ならば、楕円運動は縮退して直線往復運動をする。

(iii) $b < 0$ ならば、回転体の回転方向と逆の方向に移動する(逆方向に振れ回る)。

b の符号を調べるために、 b と同符号を持つ Δ を

$$\Delta \triangleq \frac{1}{2} \left(\frac{1}{|B|^2} - \frac{1}{|A|^2} \right) \quad (31)$$

と定義し、 Δ の値を計算する。式(26)、(27)から、

$$\Delta = 4\bar{\omega}_d \{k(\bar{\omega}_d^2 + 1) - kp_d + p_v p_c\} \quad (32)$$

最適レギュレータ系では、式(6)の関係から

$$\Delta = 4\bar{\omega}_d k(\bar{\omega}_d^2 + 1) \quad (32)$$

式(32)から、外力の角振動数が零のとき、またはジャイロ効果の影響がないときを除いて、一般には

$$b > 0 \quad (33)$$

が成立する。したがって、最適レギュレータ系では、重み係数 q_θ, q_ω の選び方や外力の角振動数によらず、順方向の振れ回り運動が現れることがわかる。

独立形制御系では、式(11)から

$$\Delta = 4\bar{\omega}_d k(\bar{\omega}_d^2 - \sqrt{1 + \hat{q}_\theta}) \quad (34)$$

Fig. 2 Orbit of the rotor oscillated by sinusoidal force in the optimal regulator system ($k=1.9$; q_θ is fixed to 1)

Fig. 3 Orbit of the rotor oscillated by sinusoidal force in the optimal regulator system ($k=1.9$; q_ω is fixed to 0)

が成立する。したがって

- (i) $|\omega_d| < (1 + \hat{q}_\theta)^{1/4}$ のときには逆方向の振れ回り運動が現れる。
- (ii) $|\omega_d| = (1 + \hat{q}_\theta)^{1/4}$ のときには直線往復運動が現れる。
- (iii) $|\omega_d| > (1 + \hat{q}_\theta)^{1/4}$ のときには順方向の振れ回り運動が現れる。

Fig. 4 Orbit of the rotor oscillated by sinusoidal force in the independently controlled system ($k=1.9$; $\hat{q}_\theta$ is fixed to 1)

Fig. 5 Orbit of the rotor oscillated by sinusoidal force in the independently controlled system ($k=1.9$; $\hat{q}_\omega$ is fixed to 0)

a, b, β を解析的に簡単な形で表すことは困難であるので、数値計算によって具体的な値を求めたものの一例を図2～図5に示す。ジャイロ効果の影響を表す

Fig. 6 Mechanism of the experimental instrument

パラメータ k の値はいずれの場合も 1.9 である。図 2, 図 3 は、最適レギュレータ系における $\bar{\omega}_d$ と a, b, β との関係を示した図で、制御系を設計するときの評価関数は次のように選定されている。

- (1) $q_\theta = 1$; $q_\omega = 0, 1, 10$ (図 2)
- (2) $q_\theta = 0, 10, 100$; $q_\omega = 0$ (図 3)

また、図 4, 図 5 は独立形制御系に関する図で、評価関数は次のように選定されている。

- (3) $\hat{q}_\theta = 1$; $\hat{q}_\omega = 0, 1, 10$ (図 4)
- (4) $\hat{q}_\theta = 1, 10, 100$; $\hat{q}_\omega = 0$ (図 5)

図 2~図 5 から、最適レギュレータ系と独立形制御系とでは、特に b, β の値に顕著な違いがあることがわかる。ただし、両制御系に共通に成立することとして、次のことが挙げられる。

- (a) $\bar{\omega}_d$ を零に漸近させると、 a は ρ^{-1} , b は 0, β は α に漸近する。したがって、 $\bar{\omega}_d$ が小さいときには楕円の長軸の長さは $q_\omega(\hat{q}_\omega)$ によらない。 $\bar{\omega}_d$ がある程度 (≥ 0.1) より大きい範囲では、 $q_\omega(\hat{q}_\omega)$ を大きく選定するほど、 a は小さくなる。
- (b) $q_\theta(\hat{q}_\theta)$ を大きく選定するほど、 a は小さくなる。
- (c) $\bar{\omega}_d$ が大きいとき (これらの例では $\bar{\omega}_d$ が 10 以上のとき)、回転体は外力の影響を受けてもほとんど振動しない。

4. 実 験

3.2 節で述べたように、一定外力に対する応答特性は、周期外力に対する応答特性において外力の角振動数を零に漸近させていけば得られるので、ここでは後

Fig. 7 Experimental results of response of the optimal regulator system to sinusoidal force ($q_\theta = 1$, $q_\omega = 1$; $p_{12}^* = 1.39$, $p_{22}^* = 1.94$, $p_{23}^* = 1.36$)

者に関する実験について述べる。

実験には、開発した磁気軸受制御系試験装置を用いた⁷⁾。装置の概略を図 6 に示す。これは 2 自由度ジャイロの機構を利用したもので、ジンバル機構によって支持されるジャイロ体 (a 部) の姿勢を水平面上に置かれた 4 個の電磁石 (1, ..., 4) の吸引力によって制御するものである。本装置は、5 自由度制御形磁気軸受の 2 自由度の回転運動に関するサブシステムと等価な動特性を持っている⁷⁾。

本実験では、制御用の電磁石の吸引力を利用して、ジャイロ体に正弦波状の外力を作用させた。具体的には、電磁石 3 の励磁電流の変動分 i_3 を次のように定めた。

$$i_3 = i_{3u} + i_a \cos \omega_d t \quad (35)$$

ここで、 i_{3u} は設計した制御系を実現するため制御入力分の電流を表し、 i_a, ω_d はそれぞれ外力の振幅、角

Fig. 8 Experimental results of response of the independently controlled system to sinusoidal force ($\hat{q}_\theta=1, \hat{q}_\omega=1$; $\hat{p}_{12}=2.41, \hat{p}_{22}=2.41$)

振動数を定めるパラメータである。他の電磁石の励磁電流の変動分は、制御入力分だけで表される。

以下に示す実験結果は、ジャイロ体の回転部の回転周波数を 13 Hz, i_a を 0.15 A と定めたときのものである。このとき、ジャイロ効果を表すパラメータ k の値は 1.9, ジャイロ体に作用するモーメントの振幅の大きさは 0.033 Nm となる。また、図中 x_d, y_d はジャイロ体の運動を検出するために、電磁石 1, 2 と同じ方向に取り付けられた非接触変位計の位置におけるジャイロ体の変位を表している。なお、実験装置の諸定数の値などは文献 7) に示されている。

実験装置において最適レギュレータ系を実現したときの周期外力に対する応答の一例を図 7 に示す。最適レギュレータ系を設計するときの重み係数は

$$q_\theta=1, \quad q_\omega=1$$

と選定した。

Fig. 9 Orbit of the moving part oscillated by sinusoidal force in the optimal regulator system

外力の周波数が低いときにはジャイロ体の中心軸は外力によるモーメントの方向から約 75° 偏った方向に直線往復運動をし((a)), 周波数が高くなるにつれて短軸方向の振動成分が現れ楕円軌道がふくらんでいき((b), (c)), さらに高くなるとこの楕円軌道が小さくなっていき((d), (e)), ついには外力に対応する振動成分が見えなくなる((f)). そして、楕円軌道上の移動方向は、いずれの場合も順方向となっている。

同様に、実験装置において独立形制御系を実現したときの応答の一例を図 8 に示す。制御系を設計するときの重み係数は次のように選定した。

$$\hat{q}_\theta=1, \quad \hat{q}_\omega=1$$

外力の周波数が低いときにはジャイロ体と中心軸は外力によるモーメントの方向に直線運動をし((a)), 周波数が高くなるにつれて、まず逆方向の楕円運動が現れ((b), (c)), それが直線往復運動に縮退し((d)), 次に順方向の楕円運動が現れ((e)), ついには外力に対応する振動成分が見えなくなる((f)).

図 9, 図 10 は、最適レギュレータ系と独立形制御系のそれぞれについて、実験の応答波形から求めた楕円運動の諸定数 a, b, β の値と理論値とを比較したものである。これらの図から、実験値と理論値とはよく一致しており、前章で示した理論的な解析方法が有効であることがわかる。

Fig. 10 Orbit of the moving part oscillated by sinusoidal force in the independently controlled system

5. 結 言

本論文は、5自由度制御形磁気軸受において、回転体に外力によるモーメントが作用しているときに生じる回転軸の傾き運動と制御系の内部構造との関係を明らかにしたもので、主な結果は次のとおりである。

- (1) 回転体に一定外力が作用しているときに生じる変位の大きさは、最適レギュレータ系においても独立形制御系においても、制御系を設計するときの評価関数の速度に関する重み係数によらず、変位に関する重み係数によって決まる。また、回転軸の傾く方向は、独立形制御系では外力によるモーメントの方向と一致するのに対し、逆対称交差フィードバックのある最適レギュレータ系ではモーメントの方向から偏っている。
- (2) 回転体に周期外力が作用するときには、ジャイロ効果あるいは逆対称交差フィードバック補償の

ため、回転軸は楕円軌道を描きながら傾き運動をする。最適レギュレータ系では、重み係数や外力の周波数によらず必ず順方向の楕円運動が現れる。独立形制御系では、変位に関する重み係数から決まる周波数より低い周波数の外力に対しては逆方向、それより高い周波数の外力に対しては順方向の楕円運動が現れる。

- (3) 開発した磁気軸受制御系試験装置を用いて、周期外力が作用する場合の応答特性を調べ、理論的な結果を実験によって確認した。

本論文では、最適レギュレータ系と独立形制御系だけを扱ったが、フィードバック補償回路の構成の仕方によっては様々な応答特性を持つ系が実現できると考えられる。本論文で示した解析の方法は、そのような場合にも適用できると考えられる。

文 献

- 1) H. Habermann & G. Liard: Practical Magnetic Bearings, IEEE Spectrum, Sept. (1979) 26.
- 2) 松村文夫：磁気軸受の最近の発展，システムと制御，**26**，4 (1982) 209.
- 3) 樋口俊郎：磁気軸受の制御系，精密機械，**50**，5 (1984) 802.
- 4) 新宮悉太：制御形磁気軸受の応用開発，機械の研究，**37**，4 (1985) 467.
- 5) 樋口俊郎，水野 毅：5自由度制御形磁気軸受制御系の研究——ジャイロ効果による相互干渉のある系の最適レギュレータの構成，計測自動制御学会論文集，**18**，5 (1982) 507.
- 6) 水野 毅，樋口俊郎，相川 登：5自由度制御形磁気軸受制御系の研究——フィードバック補償機構の構造と閉ループ系の動特性，計測自動制御学会論文集，**19**，12 (1983) 1004.
- 7) 樋口俊郎，水野 毅，相川 登：ジャイロ機構を備えた磁気軸受制御系試験装置の試作と制御系の検討，精密機械，**50**，9 (1984) 1439.
- 8) 松村文夫，小林英彦，秋山勇治：横軸形磁気軸受の基本方程式と制御系設計，電気学会論文誌C，**101**，6 (1981) 137.
- 9) 松村文夫，木戸 守，田中好巳，武田常広：吸引制御横軸形磁気軸受の設計法と得られる特性の関係，電気学会論文誌C，**103**，6 (1983) 145.
- 10) R. ガッシュ，H. ビュッツナー：回転体の力学，森北出版 (1978) 20.

【訂 正】

53巻3号，p. 397の図3とp. 400の図12の写真を入れ替え，説明はそのまま。