研 究

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*

樋 口 俊 郎** 水 野 毅** 相 川 登***

Experimental Study of Magnetic Bearing
Control Systems by an Instrument
with Gyro MechanismToshiro HIGUCHI, Takeshi MIZUNO
and Noboru AIKAWA

A totally active magnetic bearing system is composed of four subsystems: three with one degree of freedom related to translational motion and one with two degrees of freedom related to rotational motion. One of the major problems associated with the design of magnetic bearing control systems is that the two rotational motions interact on each other by gyroscopic effects caused by spinning of the rotor, which need not be considered in designing electromagnetic levitation systems. Therefore

an instrument for experimenting on controls of the gyroscopic coupled system is developed in this paper. The mechanism of the instrument resembles the mechanism of the two-axis gyroscope; a feature of the instrument is that the motions of the gyro are controlled by attractive forces of the electromagnets. Thus the instrument has the same dynamics as the subsystem related to the rotational motions of the magnetic bearing systems. The control system of the instrument is designed by utilizing the optimal regulator theory. The effectiveness of the optimal regulator is experimentally studied.

Key words: magnetic bearing, gyro, optimal regulator, gyroscopic coupling, electromagnetic levitation.

1. 緒 言

磁気力によって回転体を無接触で支持することができる磁気軸受は、高速回転体の支持機構として優れた特徴を持っている。磁気軸受には様々な形式のものがある¹⁾。そのうちで、直流電磁石の吸引力を利用して回転体の5自由度の運動をすべて能動的に制御する形式の磁気軸受は、軸方向、半径方向の剛性をそれぞれ比較的自由に設定できることなどから応用範囲が広く、真空分子ポンプ、工作機械用スピンドルなどに利用され始めている²⁾³⁾。

磁気軸受の制御系を設計するときの重要な問題の一つは、ジャイロ効果の影響によって、回転体の重心周りの2自由度の回転運動に相互干渉を生じることである。著者らは、5自由度制御形磁気軸受制御系の設計問題を最適レギュレータ問題として定式化し、系の対称性を考慮することによって、ジャイロ効果による相互干渉がある系の最適レギュレータの構造を明らかにした⁴⁾。

本研究では、2自由度ジャイロの機構を利用して、支持する物体の運動を磁気吸引力によって制御するという磁気軸受と同じ動作原理を持つ実験装置の試作を行い、理論的に導いた最適レギュレータの有効性を実験的に検討する。

2. 5自由度制御形磁気軸受の制御系設計について

5自由度制御形磁気軸受制御系の最適レギュレータ問題は、並進運動についての3個の独立した1自由度系の最適レギュレータ問題と回転運動についての2自由度系の最適レギュレータ問題とに分解できる⁴⁾。それぞれの問題は、適当な規格化を行うことによって、次のように表すことができる⁴⁾。

〔S-I〕 並進運動の制御についての問題

制御対象の動特性が

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1(i) \\ x_2(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(i) \\ x_2(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v(i) \quad (1)$$

と表されるとき、評価関数

$$J = \int_0^{\infty} (\hat{q}_a x_1^2 + \hat{q}_v x_2^2 + v^2) d\hat{t} \quad (2)$$

$$(\hat{q}_a > 0, \hat{q}_v \geq 0)$$

を最小にする $v(i)$ を求める。

〔S-II〕 回転運動の制御についての問題

制御対象の動特性が

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1(\hat{t}) \\ x_2(\hat{t}) \\ x_3(\hat{t}) \\ x_4(\hat{t}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & k & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(\hat{t}) \\ x_2(\hat{t}) \\ x_3(\hat{t}) \\ x_4(\hat{t}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(\hat{t}) \\ u_2(\hat{t}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

と表されるとき、評価関数

* 原稿受付 昭和58年10月29日。昭和57年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和57年10月20日)にて発表。

** 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)(君津市君津1)

$$\bar{J} = \int_0^{\infty} \{q_d(x_1^2 + x_3^2) + q_v(x_2^2 + x_4^2) + u_1^2 + u_2^2\} dt \quad (4)$$

$$(q_d > 0, q_v \geq 0)$$

を最小にする $u_1(t)$, $u_2(t)$ を求める. ここで k は, ジャイロ効果による相互干渉の大きさを表すパラメータで, 回転体の回転速度に比例する値をとる⁴⁾.

〔S-I〕と〔S-II〕とを比較すると, $k=0$ の場合には, 〔S-II〕は2個の独立したサブシステムの最適レギュレータ問題に分解でき, 分解された問題は〔S-I〕と同じ形になっている. このことから, 〔S-II〕は〔S-I〕を特殊な場合として含む, より一般的な問題であると言える.

〔S-II〕の解は, 制御対象の内部構造の対称性に着目することによって, 次のように求められる⁴⁾.

$$\begin{cases} u_1 = -p_d x_1 - p_v x_2 - p_c x_3 \\ u_2 = -p_d x_3 - p_v x_4 + p_c x_1 \end{cases} \quad (5)$$

ここで, p_d は3次方程式

$$2p_d^3 + (k^2 + q_d - 4)p_d^2 - 2(q_d + q_v)p_d - q_d q_v = 0 \quad (6)$$

のもつ唯一の正根であり, p_v , p_c は次式のように求められる.

$$p_v = \sqrt{2p_d + q_v} \quad (7)$$

$$p_c = \frac{k p_d}{p_v} (= \text{sgn}(k) \sqrt{2p_d - p_d^2 + q_d}) \quad (8)$$

式(5)から最適レギュレータには, $-p_c x_3$, $p_c x_1$ で表される逆対称交差フィードバックが必要であることがわかる.

〔S-I〕の解は, 〔S-II〕の解で $k=0$ と置くことによって次のように求められる.

$$v = -\hat{p}_d x_1 - \hat{p}_v x_2 \quad (9)$$

ここで,

$$\hat{p}_d = 1 + \sqrt{1 + q_d} \quad (10)$$

$$\hat{p}_v = \sqrt{2\hat{p}_d + q_v} \quad (11)$$

3. 基礎実験装置

3.1 実験装置の原理

前章では, 5自由度制御形磁気軸受制御系の設計問題が, 並進運動に関する制御の問題と回転運動に関する制御の問題とに分解でき, 後者が前者を含むより一般的な問題であることを述べた. 本研究では, このことに着目して, 制御系の試験機として図1に示すような機構の実験装置の試作を行った.

図1で, 箱の形をした可動体 a の中にはモータが装着されており, モータ軸には円板 b が取り付けられている(これらをまとめてジャイロ体と呼ぶことにする). ジャイロ体は, ジンバル機構に据え付けられており, ジンバル機構の二つの軸の周りを回転することができる. この

Fig. 1 Mechanism of the experimental instrument

2自由度の回転運動は, 円板が回転することによって生じるジャイロ効果のため互いに干渉する. そして, この運動の制御は, 水平面上に置かれた4個の電磁石1~4の吸引力によって行う.

本研究の主な目的は, ジャイロ効果による相互干渉がある系における最適レギュレータの有効性を実験的に検証することにある. 本実験装置は,

- (1) 回転部 b の半径方向の慣性モーメントを比較的大きくできるので, 回転部の回転数が小さくてもジャイロ効果の影響が顕著に現れる. そのため, 不釣り合いによる振り回り振動や弾性振動の影響をあまり受けずに, ジャイロ効果による諸現象を純粋な形で観察することができる.
- (2) 可動体 a の半径方向の変位速度を比較的容易に検出することができるので, 最適レギュレータを構成するのに必要な状態フィードバックを簡単に実現することができる.

などの特徴を持っており, ジャイロ効果による相互干渉がある系における制御系の検討が実際の磁気軸受装置より行いやすい構造となっている.

3.2 実験装置の基本方程式

以下の解析では次のような仮定を置く.

- (i) 円板は対称な回転体で不釣り合いがない.
- (ii) ジャイロ体の中心軸は円板の回転軸と一致する.
- (iii) ジャイロ体の慣性主軸の一つは中心軸と一致し, ほかの二つの慣性主軸の周りの慣性モーメントは等しい.
- (iv) ジンバル機構の二つの軸は直交し, ジャイロ体の中心軸と一点 O で交わる.
- (v) ジンバル機構の内側の枠 c の質量, 慣性モーメントは無視できる.
- (vi) ジンバル機構のベアリングは理想的なもので, その粘性抵抗, 摩擦などは無視できる.
- (vii) 円板は, モータによって一定角速度 ω で回転す

のように駆動されている。

次に、ジャイロ体の運動を記述するため、座標系を定義する。Oを原点とし、 x 軸、 y 軸がそれぞれジンバル機構の外側の軸、内側の軸と一致するように固定座標系O-xyzを定める。ジャイロ体の中心軸の傾きを x 軸周りの角変位 θ_x 、 y 軸周りの角変位 θ_y で表す。

ジャイロ体の中心軸と z 軸とが一致している状態を平衡状態と呼ぶ。以下では、

(viii) 平衡状態からの変動は微小で、 θ_x, θ_y の2次以上の項は無視できる。

とする。また、

(ix) ジャイロ体の重心Gは、Oから z 軸の負方向に l_0 だけ離れた点にある。

とする。

ジャイロ体に働く各電磁石の吸引力を $F_1, \dots, F_4$ と表す。各吸引力は、Oから z 軸の正方向に距離 l だけ離れた点に働き、 F_1 は x 軸の正方向、 F_2 は y 軸の正方向、 F_3 は x 軸の負方向、 F_4 は y 軸の負方向の力であるとする。4個の電磁石の特性、動作条件が同一であるとする。仮定(viii)から各電磁石の吸引力の大きさは次のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= F_0 + K_i i_1 + K_d \theta_y \\ F_2 &= F_0 + K_i i_2 - K_d \theta_x \\ F_3 &= F_0 + K_i i_3 - K_d \theta_y \\ F_4 &= F_0 + K_i i_4 + K_d \theta_x \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここで、 F_0 : 平衡状態における電磁石の吸引力、 K_i, K_d : 電磁石の特性、動作条件から決まる定数、 i_k : 電磁石 k の励磁電流の変動分($k=1, \dots, 4$)。

これらの条件の下で、本装置に関する基本方程式は次のように求められる。ただし、 t による微分を $'$ で表す。

$$\left. \begin{aligned} I_r \theta_x'' + I_a \omega \theta_y' - (2K_d l^2 - mgl_0) \theta_x \\ = K_d l (-i_2 + i_4) \\ I_r \theta_y'' - I_a \omega \theta_x' - (2K_d l^2 - mgl_0) \theta_y \\ = K_d l (i_1 - i_3) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここで、 I_r : Oを通り中心軸に垂直な軸の周りのジャイロ体の慣性モーメント、 I_a : 円板の回転軸周りの慣性モーメント、 m : ジャイロ体の質量、 g : 重力加速度。

なお、以下では対向する電磁石の励磁電流の変動分は次のような関係を満たすように調整されるとする。

$$\left. \begin{aligned} i_4 &= -i_2 (\triangle i_x) \\ i_1 &= -i_3 (\triangle i_y) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

3.3 基本方程式の規格化

基準量 t_0, θ_0, i_0 によって無次元化変数 $\bar{t} (\triangleq t/t_0)$ 、 $\bar{\theta}_x (\triangleq \theta_x/\theta_0)$ 、 $\bar{\theta}_y (\triangleq \theta_y/\theta_0)$ 、 $\bar{i}_x (\triangleq i_x/i_0)$ 、 $\bar{i}_y (\triangleq i_y/i_0)$ を定義する。ただし、 t_0, θ_0, i_0 は次の諸量を表す。

$$\left. \begin{aligned} t_0 &= \sqrt{\frac{I_r}{2K_d l^2 - mgl_0}}^* \\ \theta_0 &= \frac{d_0}{l} \\ i_0 &= \frac{2K_d l^2 - mgl_0}{2K_d l} \frac{d_0}{l} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ここで、 d_0 : 平衡状態における各電磁石とジャイロ体との間の空隙の大きさ。

これらを用いて式(13)を書き直すと次のようになる。ただし、 $\bar{t}$ による微分を $\cdot$ で表す。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\bar{\theta}}_x + k \dot{\bar{\theta}}_y - \bar{\theta}_x &= \bar{i}_x \\ \ddot{\bar{\theta}}_y - k \dot{\bar{\theta}}_x - \bar{\theta}_y &= \bar{i}_y \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ここで、 k はジャイロ効果の影響の大きさを表すパラメータで次のように定義される。

$$k = \omega t_0 \frac{I_a}{I_r} \quad (17)$$

式(16)は、5自由度制御形磁気軸受の回転運動に関する基本方程式(3)において

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \bar{\theta}_x \quad (x_2 = \dot{\bar{\theta}}_x) \\ x_3 &= \bar{\theta}_y \quad (x_4 = \dot{\bar{\theta}}_y) \\ u_1 &= \bar{i}_x \\ u_2 &= \bar{i}_y \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

としたものと全く同じ形をしている。したがって、本実験装置を磁気軸受制御系のシミュレータとして用いることができる。

3.4 実験装置の構成

設計した制御系を実現するための実験装置の構成を図2に示す。また、試作した装置の外観を図3に示す。

次に、装置の各部について説明する。

1) 円板を回転させるモータには、永久磁石界磁型直流モータ(日本サーボ社製DM60S)を用いた。

2) 円板は、直径150 mm、厚さ15 mm、質量2.22 kgの黄銅製で、厚さの割には径が大きくなっており、回転速度が小さくてもジャイロ効果の影響が顕著に現れるようにしている。

3) ジャイロ体の運動制御用の電磁石は、厚さ0.35 mmのE型けい素鋼板を54枚重ねたものを鉄心とし、直径0.5 mmのエナメル線を350回巻いたものを使用した。

4) ジャイロ体の角変位 θ_x, θ_y を検出する変位センサは渦電流効果を利用したインダクタンス型非接触変位計(新日本測器社製503-FW型)を2個用いた。各センサは、Oから z 軸の正方向に l_0 だけ離れた水平面上の x 軸、 y 軸方向に取り付けられている。

* $2K_d l^2 - mgl_0 > 0$ であるとする。4章で述べる実験においては、この条件は満たされている。

Fig. 2 Outline of the experimental system

x_s, y_s : outputs of the displacement sensors, v_x, v_y : outputs of the velocity sensors

Fig. 3 Photograph of the instrument

5) ジャイロ体の角速度 θ_x', θ_y' を検出する速度センサはコイルが磁界の中を動くとき電磁誘導によってコイルの両端に誘起電圧が生じることを利用したものを作製した。

6) 各センサの出力信号から、電磁石の励磁回路の入力電圧を得るための演算回路には、アナログ計算機(安藤電気社製 ADAC L-100)を用いた。

7) 励磁回路は、トランジスタ直流増幅器を各電磁石ごとに作製した。励磁回路の周波数特性を図4に示す。これは、入力電圧を $V(t) = V_0 + v(t)$, 出力電流を $I(t) = I_0 + i(t)$ と表したとき、変動分 $v(t)$ と $i(t)$ との関係を示したものである。ここで、 V_0 は電磁石のバイアス電流 I_0 を決める一定電圧で、 $V_0 = 3.00 \text{ V}$ ($I_0 = 0.721 \text{ A}$) とした。また、周波数特性を求めるときの $v(t)$ の振幅は 0.863 V とした。図4から、信号周波数が 1 kHz 以内であれば、入力信号と出力電流との間に位相の遅れがほとんどないので、電磁石の励磁電流を入力変数に選んで制御系の設計を行ってもよいことがわかる。

4. 実験結果および考察

4.1 最適レギュレータ系の過渡応答

実験装置の諸定数の値を表1に示す。これらのうち、 K_i と K_d の値は次のように測定した。円板が回転していない時、 θ_α ($\alpha = x$ または y) については次式が成立する。

$$I_r \theta_\alpha'' - (2K_d l^2 - mgl_G) \theta_\alpha = 2K_i l i_\alpha \quad (19)$$

ここで、 i_α として

$$i_\alpha = -p_d \theta_\alpha \quad (20)$$

という変位のフィードバックを与えると、式(19)は

$$I_r \theta_\alpha'' + (2K_i l p_d - 2K_d l^2 + mgl_G) \theta_\alpha = 0 \quad (21)$$

となる。これは、振動数 ω_0 の単振動を表す。ただし、

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2K_i l p_d - 2K_d l^2 + mgl_G}{I_r}} \quad (22)$$

Fig. 4 Frequency characteristics of the amplifier circuits

Table 1 Values of the coefficients of the instrument

I_r	$1.14 \times 10^{-2} \text{ kgm}^2$	K_i	7.48 N/A
I_a	$6.26 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	K_d	$3.87 \times 10^3 \text{ N/m}$
m	3.70 kg	d_0	$1.32 \times 10^{-3} \text{ m}$
l	0.03 m	t_0	$4.23 \times 10^{-2} \text{ s}$
l_G	0.016 m	θ_0	$4.40 \times 10^{-2} \text{ rad}$
l_s	0.06 m	i_0	0.624 A
F_0	3.06 N		

したがって、複数の p_d について振動数 ω_0 を求めることによって、 K_i, K_d の値は決定できる。

以上のように諸定数を定めたうえで、円板の回転数を 13 Hz ($\omega = 81.7 \text{ rad/s}$) として実験を行った。このとき、ジャイロ効果の影響の大きさを表すパラメータ k の値は 1.90 である。

式(5), (14), (16), (18) の関係から、実験装置において各電磁石の励磁電流の変動分を次のように調整すれば最適レギュレータ系が実現できる。

$$\left. \begin{aligned} i_4 = -i_2 = -\frac{i_0}{\theta_0} (p_d \theta_x + t_0 p_v \theta_x' + p_c \theta_y) \\ i_1 = -i_3 = -\frac{i_0}{\theta_0} (p_d \theta_y + t_0 p_v \theta_y' - p_c \theta_x) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

ここで、 p_d, p_v, p_c は式(6)~(8)から定められる。

実験装置に最適レギュレータ系を構成したとき、初期状態においてある方向に傾いていたジャイロ体が平衡状態に復帰するときに観察される波形を図5に示す。図で x_d, y_d は変位センサの位置におけるジャイロ体の変位の大きさを表しており、

$$\left. \begin{aligned} x_d &= l_s \theta_y \\ y_d &= -l_s \theta_x \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

という関係が成立する。初期変位は基準時 ($t=0$) まで一定外力をジャイロ体に作用させることによって生じさせ、その大きさは $x_d = 300 \mu\text{m}$, $y_d = 0$ ($\theta_x = 0$, $\theta_y = 5.00 \times 10^{-3} \text{ rad}$) で、各フィードバック係数を定める重み係数 q_d, q_v は

Fig. 5 Transient responses of the optimal regulator system

- (a) $q_d=10, q_v=0$
(b) $q_d=50, q_v=0$

とした。ジャイロ効果の影響のため、平衡状態に戻るときのジャイロ体の中心軸の運動は回転運動となるが、図 5 から最適レギュレータ系では円板の回転方向と同じ向きの回転運動が主に観察されることがわかる。また、平衡状態に戻るまでの整定時間 t_s は

- (a) $t_s=0.16$ s
(b) $t_s=0.09$ s

で、変位の重み q_a を大きく選定した制御系ほど速く平衡状態に復帰する。

4.2 独立型制御系との比較

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特徴は、逆対称交差フィードバック補償機構を備えていることである。本節では、そのような交差フィードバック補償機構を持たない制御系との比較を行う。

式 (10) において、ジャイロ効果の影響を考慮しないで $k=0$ とすると、 $\bar{\theta}_x$ についての制御と $\bar{\theta}_y$ についての制御とは独立に扱うことができる。そのときの最適レギュレータ問題は 2 章で述べた [S-I] と同じ形になるので各電磁石の励磁電流の変動分は次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} i_4 &= -i_2 = -\frac{i_0}{\theta_0} (\hat{p}_d \theta_x + t_0 \hat{p}_v \theta_x') \\ i_1 &= -i_3 = -\frac{i_0}{\theta_0} (\hat{p}_d \theta_y + t_0 \hat{p}_v \theta_y') \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

ここで、 $\hat{p}_d, \hat{p}_v$ は式 (10), (11) から定められる。

式 (25) で表される状態フィードバックを行った系は、 θ_x の制御には θ_x の情報だけを、 θ_y の制御には θ_y の情報

Fig. 6 Transient responses of the independently controlled system

だけを用いるという構成になっており、以下では独立型制御系と呼ぶことにする⁵⁾。

独立型制御系において、最適レギュレータ系と同じ初期変位を与えたときに観察される波形を図 6 に示す。各フィードバック係数を定める重み係数は

- (a) $\hat{q}_d=10, \hat{q}_v=0$
(b) $\hat{q}_d=50, \hat{q}_v=0$

とした。図 6 から、独立型制御系では、ジャイロ体の中心軸は円板の回転方向と逆向きの回転運動をして平衡状態に復帰することがわかる。これは、最適レギュレータ系との対照的な現象である。また、平衡状態に戻るまでの整定時間 t_s は

- (a) $t_s=0.27$ s
(b) $t_s=0.18$ s

で、 $\hat{q}_a$ を大きく選定して設計した制御系ほど速く平衡状態に復帰するが、重み係数を等しく選定した場合 ($q_a=\hat{q}_a, q_v=\hat{q}_v$) の最適レギュレータ系と比較すると、最適レギュレータ系より整定時間が大きい傾向がある。

以上で述べた最適レギュレータ系と独立型制御系との過渡応答特性の相違点は、系の特性を複素変数で記述することによって理論的に説明することができるが、この点については文献 5) で詳しく論じている。

4.3 シミュレーション結果との比較

本節では、規格化された基本方程式に基づいて制御系の過渡応答を数値計算によって求めたものの例を示し、実験結果との比較を行う。

ジャイロ効果の影響の大きさを表すパラメータ k の値は 1.90、初期条件は $[\bar{\theta}_x, \bar{\theta}_x', \bar{\theta}_y, \bar{\theta}_y'] = [0, 0, 0.114, 0]$

Fig. 7 Simulation results of the transient responses of the optimal regulator system

とする。最適レギュレータ系の応答の例を図7、独立型制御系の応答の例を図8に示す。ただし、シミュレーション結果は、実験結果との比較のため規格化された値ではなく、実際の物理量に換算した値で示されている。また、平衡状態に戻るまでの整定時間*の計算値は、最適レギュレータ系では

- (a) $t_s = 0.16 \text{ s}$ ($\bar{t}_s = 3.8$)
 (b) $t_s = 0.11 \text{ s}$ ($\bar{t}_s = 2.5$)

独立型制御系では

- (a) $t_s = 0.30 \text{ s}$ ($\bar{t}_s = 7.2$)
 (b) $t_s = 0.17 \text{ s}$ ($\bar{t}_s = 4.0$)

である。

実験結果とシミュレーション結果とを比較すると、最適レギュレータ系と独立型制御系とのそれぞれについて、平衡状態に戻る時の回転運動の方向や整定時間などはよく一致していることがわかる。このことから、実験装置の動特性は基本方程式(16)によって正確に表されており、本装置は5自由度制御形磁気軸受の回転運動に関する2自由度系の制御系試験機として十分使用できることが確認できる。

5. 結 論

本研究は、磁気軸受制御系におけるジャイロ効果の影響に関するもので、主な結果は次のとおりである。

* $\sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}$ の値が、初期状態のときの値の1%以下におさまるまでの時間を整定時間とする。

** $\bar{t}_s$ は、規格化された時間で測った整定時間を表し、 t_s とは $t_s = t_0 \bar{t}_s$ の関係が成立する。

Fig. 8 Simulation results of the transient responses of the independently controlled system

- (1) 2自由度ジャイロの機構を利用した、磁気軸受と同じ動作原理を持つ実験装置の試作を行った。
- (2) 試作した実験装置が、5自由度制御形磁気軸受の回転運動に関する2自由度系と等価な動特性を持つことを理論的に示し、実験によって確認した。
- (3) ジャイロ効果を考慮して設計した最適レギュレータ系とジャイロ効果を考慮しないで設計した独立型制御系との動特性の違いを実験によって示した。そして、平衡状態からの変動が生じた場合、最適レギュレータ系の方が独立系制御系に比べて敏速に平衡状態に復帰する傾向があることを示した。

なお、本研究の一部は昭和57年度文部省科学研究費補助金(奨励研究(A)57750189)の助成を受けて行った。

終わりに、実験装置を試作するにあたって、ご協力をいただいた第二精工舎の石澤資男氏(現在、セイコー精機社勤務)、涌井伸二氏、三木正晴氏(現在、セイコー精機社勤務)に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 清水久二, 谷口 修: 磁気軸受, 潤滑, 14, 4 (1969) 189.
- 2) H. Habermann & G. L. Liard: Practical Magnetic Bearings, IEEE Spectrum, Sept. (1979) 26.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.