

外乱オブザーバを用いた非線形回転軸系の振動制御と 不つりあい推定*

井上 剛 志^{*1}, 劉 軍^{*1}
吉村 祐 亮^{*2}, 石田 幸 男^{*1}

Vibration Control and Unbalance Estimation of a Nonlinear Rotor System Using Disturbance Observer

Tsuyoshi INOUE^{*3}, Jun LIU,
Yusuke YOSHIMURA and Yukio ISHIDA

^{*3} Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

In rotating machinery, the unbalance of the rotor causes many resonances at the critical speeds corresponding to various modes. In this paper, a method of vibration control for rotor systems utilizing the disturbance observer (D.O.) is proposed. The nonlinear terms, unbalance, parameter variations and uncertain terms of a rotor system are lumped into a disturbance term, and this term is cancelled by using D.O.. As a result, the vibrations of the system are controlled to a small amplitude in all over the rotational speed range. Using the information of disturbance obtained by D.O., the unbalance of the first mode is estimated simultaneously. Moreover, the effects of some parameter errors of the control system are also investigated. The validity of the proposed method is verified through numerical simulations and experiments.

Key Words: Vibration of Rotating Body, Nonlinear Vibration, Vibration Control, Disturbance Observer, Electromagnetic Actuator, Resonance

1. ま え が き

回転機械の振動を抑制するため、これまで多くのバランスング法が考えられてきた⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。最近、能動制御とバランスングを同時に実現する研究も行われている。例えば、Markertら⁽⁸⁾は線形回転軸系の不つりあいを推定するために磁気軸受を利用して軸を支持し、軸に補償力を与えて軸の振動を起こさずに不つりあい推定を実現するため、有限要素法と伝達関数を併用した方法を提案している。また、鈴木ら⁽⁹⁾は磁気軸受で支持した回転軸系で高次曲げ危険速度を通過するために、磁気軸受を利用した制振とバランスング法の研究を行っている。

しかし、これらの方法は、いずれも系に含まれる非線形性やパラメータ誤差・変動などの影響が考慮されていない。実際の回転軸系では、玉軸受のクリアランス、ジャーナル軸受の油膜、回転軸中心線の伸びなどに起因して様々な非線形性が現れる。そして、その非線形性に起因して、共振曲線の形状変化やサドルノード分岐、ジャンプ現象、分数調波共振などが発生する可能

性がある⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾。このような非線形性やパラメータ誤差・変動がある場合には、上記の方法では制振と不つりあい推定の同時実現が困難になると予想される。

このような非線形性を持つ回転軸系のバランスングを行うために、本研究では、外乱オブザーバを用いて振動制御と不つりあい推定を同時に行うことを試みる。外乱オブザーバは、モーションコントロールの分野で発展し⁽¹³⁾、車両の状態量推定⁽¹⁴⁾や梁の構造物の座屈制御⁽¹⁵⁾など様々な制御系に利用されている。この方法では、非線形性、ノミナル系(公称値をもつ系)からのモデル化誤差、パラメータ誤差・変動などを外乱として推定し、この推定外乱を相殺制御することにより系の振動抑制が実現できる。そして同時に、その推定外乱を用いて必要な情報を抽出することも可能である⁽¹⁴⁾。

本論文では、不つりあいによる励振力を外乱とみなし、外乱オブザーバで推定・補償することにより、非線形性を持つ弾性回転軸系の振動制御を実現し、同時に得られた推定外乱から弾性1次モードの等価不つりあいの大きさと位相を求め、バランスングに用いる。また、電磁アクチュエータの電磁石の特性定数のばらつきの影響、センサ性能の影響などを数値シミュレー

* 原稿受付 2004年6月18日。

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科機械工学(☎464-8603 名古屋市千種区不老町)。

^{*2} 本田技研工業(株)(☎107-8556 東京都港区南青山2-1-1)。

E-mail: inoue@nuem.nagoya-u.ac.jp

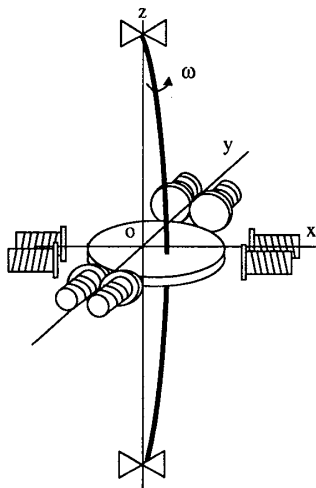


Fig. 1 The Jeffcott rotor model

ションで調べる. さらに, 実験を行い, 本研究で提案した方法の制振効果およびつりあい推定の効果を線形および非線形回転軸系において確認する.

2. 非線形回転軸モデルと運動方程式

本論文では, 図1に示すような鉛直に支持されたジェフコットロータを考える. 上下軸受の中心を結ぶ線(軸受中心線)に z 軸, 回転体がふれまわる平面内に x, y 軸をとった直交座標系 $O-xyz$ を設定する. 外乱オブザーバによる回転軸の振動制御とつりあい推定のため, 円板位置で図2のような電磁アクチュエータを設置する. このジェフコットロータが非線形性を持つとき, 電磁アクチュエータによる制御力を考慮すると, 運動方程式⁽¹⁰⁾は次式となる.

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + N_x &= mew^2 \cos \omega t + f_{mx} \\ m\ddot{y} + c\dot{y} + ky + N_y &= mew^2 \sin \omega t + f_{my} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで, m は円板の質量, c は系の減衰係数, k は弾性軸のばね定数, ω は回転速度, t は時刻である. e は円板の静つりあいであり, このつりあいによる大きさ mew^2 の励振力がロータに働く. N_x と N_y は様々な要因によって生じる回転軸系の非線形復元力を示す. 電磁アクチュエータの制御力 f_{mx} と f_{my} は次式で表される⁽¹⁶⁾.

$$\left. \begin{aligned} f_{mx} &= k_m \frac{(I_0 - i_x)^2}{(R_0 + \delta - x)^2} - k_m \frac{(I_0 + i_x)^2}{(R_0 + \delta + x)^2} \\ f_{my} &= k_m \frac{(I_0 - i_y)^2}{(R_0 + \delta - y)^2} - k_m \frac{(I_0 + i_y)^2}{(R_0 + \delta + y)^2} \end{aligned} \right\} (2)$$

ここで, R_0 は電磁アクチュエータの平衡ギャップ, I_0 はバイアス電流, i_x と i_y は x と y 方向の制御電流, k_m と δ は電磁石の特性定数⁽¹⁶⁾である.

本論文の解析および実験で用いた系のパラメータを

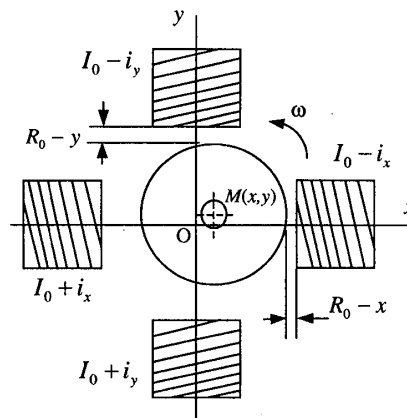


Fig. 2 Electromagnetic actuator

表1に示す. a_n と b_n は式(2)で示す電磁アクチュエータの制御力を線形化したときの係数であり, 次節で説明する. f_s は制御のサンプリング周波数, g は外乱オブザーバに挿入するローパスフィルタのカットオフ周波数である.

3. 外乱オブザーバによる振動制御とつりあい推定法

回転軸系に存在するつりあい e による励振力 mew^2 , 軸受のクリアランスなど様々な要因に起因する非線形性 N_x と N_y , 系の各パラメータ誤差・変動などをすべて外乱 f_{dis} としてまとめ, 外乱オブザーバの理論を用いて外乱の大きさを推定し, それと同じ大きさの電磁力を加えて相殺する.

3.1 構成法 運動方程式(1)を線形ノミナル系のパラメータと非線形性やパラメータ誤差・変動に区別して表わす. なお, 式(1)で表されるジェフコットロータでは x 方向と y 方向の運動は独立であるので, 以下では簡単のため x 方向についてのみ示しながら説明する.

$$\begin{aligned} (m_n + \Delta m)\ddot{x} &= -(c_n + \Delta c)\dot{x} - (k_n + \Delta k)x - N_x \\ &\quad + (m_n + \Delta m)ew^2 \cos \omega t + f_{mx} \end{aligned} (3)$$

ここで, m_n, c_n と k_n はノミナル値であり, $\Delta m, \Delta c$ と Δk は誤差・変動量である. 外乱オブザーバを用いた制御において, 式(2)の電磁アクチュエータの制御力 f_{mx} を $x=0$ 近傍でテーラー展開し, 線形制御力 $f_{mxl} = a_n x + b_n i_x$ とそれ以外の非線形制御力 $f_{m xn}$ に区別し, $f_{mx} = f_{mxl} + f_{m xn}$ と表す. そしてパラメータ誤差・変動, つりあい力, 非線形力およびこの $f_{m xn}$ を外乱 f_{disx} として整理すると次式を得る.

$$m_n \ddot{x} = -c_n \dot{x} - (k_n - a_n)x + b_n i_x + f_{disx} (4)$$

Table 1 System parameters

m	3.55 kg	c	4.03 kg/s
k	29314.0 kg/s ²	f_s	2000 Hz
$\beta^{(0)}$	16931.4 N/mm ³	$\epsilon^{(1)}$	8465.7 N/mm ²
k_m	37500.0 kgmm ³ /As ²	e	0.1 mm
a_n	67887.36 kg/s ²	k_p	1.5 A/mm
b_n	56572.8 kgmm/As ²	k_d	0.003 As/mm
R_0	1.0 mm	I_0	1.0 A
g	100 Hz	δ	0 mm

ここで,

$$a_n = 4k_m \frac{I_0^2}{R_0^3}, \quad b_n = -4k_m \frac{I_0}{R_0^2} \quad (5)$$

$$f_{disx} = -\Delta m \ddot{x} - \Delta c \dot{x} - \Delta k x + f_{mxx} + me\omega^2 \cos \omega t - N_x \quad (6)$$

この外乱 f_{disx} は式 (4) から次式のようにすべて既知の値で計算 (推定) できる。

$$f_{disx} = m_n \ddot{x} + c_n \dot{x} + (k_n - a_n)x - b_n i_x \quad (7)$$

3.2 振動制御について 推定外乱 f_{disx} と同じ大きさの制御力 f_{obsx} をフィードバックすることによって外乱 f_{disx} を相殺する。電磁アクチュエータにより、この外乱相殺制御力 f_{obsx} を出力するための外乱相殺制御電流 i_{obsx} を次のように計算する。

$$i_{obsx} = f_{obsx} / b_n \quad (8)$$

外乱オブザーバは一般的にフィードバック制御とは独立に設定できる⁽¹³⁾ため、本論文では、電磁アクチュエータのもつ不安定性を改善するため、PD 制御を併用して PD 制御電流 i_{PDx} を加え、全制御電流を $i_x = i_{PDx} - i_{obsx}$ として外乱を相殺する。この PD 制御電流は $i_{PDx} = k_p x + k_d \dot{x}$ とし、 k_p と k_d は最適レギュレータ設計から求める。図 3 に x 方向に関する制御系のブロック線図を示す。なお、 \ddot{x} 、 \dot{x} の計算時に行う位置信号 x の差分演算操作により発生する高周波数成分の影響を低減するために、一次のローパスフィルタ $g/(s+g)$ を挿入している⁽¹⁵⁾。以上のことを考慮すると、式 (4) は以下のように変形できる。

$$\begin{aligned} m_n \ddot{x} &= -c_n \dot{x} - (k_n - a_n)x + b_n i_x + f_{disx} \\ &= -c_n \dot{x} - (k_n - a_n)x + b_n (i_{PDx} - i_{obsx}) + f_{disx} \\ &= (b_n k_d - c_n) \dot{x} - (k_n - a_n + b_n k_p)x - b_n i_{obsx} + f_{disx} \\ &= (b_n k_d - c_n) \dot{x} - (k_n - a_n - b_n k_p)x \end{aligned} \quad (9)$$

この式から、外乱オブザーバにより外乱 f_{disx} は相殺され、その結果、不つりあいの影響がなくなり、振

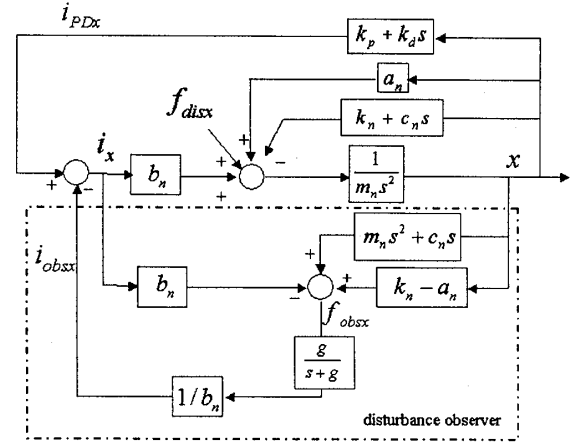


Fig. 3 Block diagram in the x-direction

動が抑えられることがわかる。

3.3 不つりあい推定について 式 (6) に示すように、 f_{disx} には不つりあい力 $me\omega^2$ 以外にも、非線形力 N_x 、パラメータ誤差 Δm 、 Δc 、 Δk による力や制御力の非線形部分 f_{mxx} なども合わせて外乱として推定されるため、それらが不つりあい推定の精度に対してどれほど影響しているかを考察する。

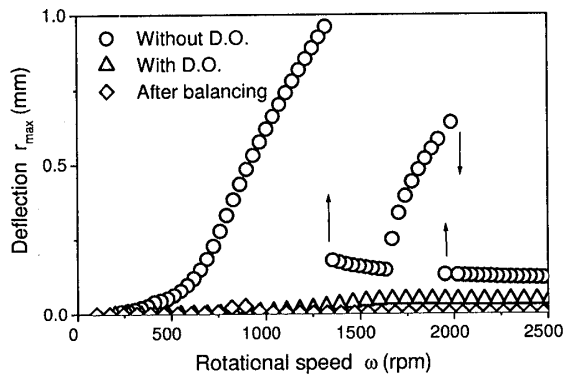
外乱相殺制御力 f_{obs} を用いて外乱 f_{dis} を相殺すると、先ほど示した式 (9) のように外乱 f_{disx} からの影響が全く無い系になり、変位 $x = 0$ 付近に抑えられる。 $x = 0$ 付近では非線形制御力 f_{mxx} や系の非線形成分 N_x は小さい。また、 \ddot{x} 、 \dot{x} もほぼ零となると予想される。したがって、式 (6) 中の不つりあい力以外の誤差・変動の項はほぼ零になり、無視することができる。そして、 $x = 0$ 付近で制御されている時の外乱相殺制御力 f_{obsx} の値は不つりあい力による励振力が支配的であると考えられ、以下のように扱う。

$$f_{obsx} \approx me\omega^2 \cos \omega t \quad (10)$$

すなわち、この外乱相殺制御力 f_{obs} の ω 成分を調べることにより、不つりあいに関する量 me の大きさと位相が推定でき、この量 me を修正面の半径 R_d で除した修正アンバランス量を取り除くことによりバランスが可能になる。

4. 数値シミュレーション

非線形回転軸系の振動制御と不つりあい推定に対して本論文で提案する外乱オブザーバによる方法の有効性を検証する。本論文における回転軸系の非線形性は、玉軸受のクリアランスに起因して生じる 3 乗までの非線形性を考え、 $N_x = 4\beta^{(0)}(x^2 + y^2)x + 3\epsilon^{(1)}x^2$ 、 $N_y = 4\beta^{(0)}(x^2 + y^2)y + 2\epsilon^{(1)}xy$ とおく⁽¹⁰⁾。ここで、 $\beta^{(0)}$ は 3 乗の等方性非線形性の大きさを表す係数、 $\epsilon^{(1)}$



(a) Resonance curve

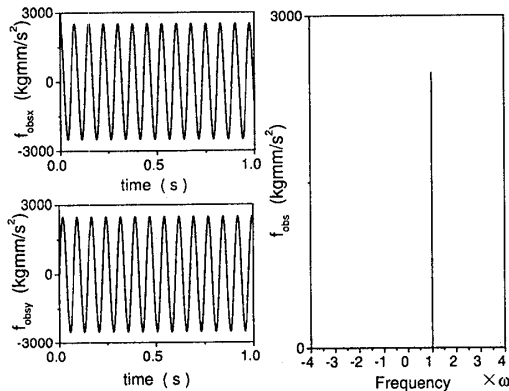
(b) Time history and spectrum of f_{obs} ($\omega=800\text{rpm}$)

Fig. 4 Case with no parameter error

は2乗の異方性非線形性 (x, y 平面において半径一定で方向が 2π 変化する間にその大きさが1回変化する成分)の大きさを表す係数である。また、ローパスフィルタのカットオフ周波数 g は差分演算により生じる高周波数成分を除去するために $g=100\text{Hz}$ とする。

4.1 パラメータ誤差がない場合の振動制御と不つりあい推定 非線形性の影響を調べるため、回転軸系のパラメータ m, k, c の誤差がなく、センサの分解能が十分に高く、電磁石の特性定数のばらつきはないと仮定した場合の共振曲線を図4(a)に示す。横軸は回転速度 ω を示し、縦軸はふれまわり半径 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ の最大値を示している。

この共振曲線はつぎの特徴をもつ。(1) \circ で示す非制御の場合には、 $\omega=850\text{rpm}$ 付近で主共振が発生し、復元力の3乗の非線形項の影響で漸硬形になり、ジャンプ現象が発生している。また、 $\omega=1650\text{rpm}$ 付近で2乗の非線形性の影響により1/2次分数調波共振が発生する。(2) 外乱オブザーバを用いた制御時の振動を \triangle で示す。線形化した制御電流 i_{obsx} の影響により、 ω の増加とともに振動がわずかに増大するが、主共振のピークと分数調波共振のピークが消え、良好な制振効果を得る。不つりあい推定のために、回転軸のふれ

まわり方向も区別できるように x および y 方向の外乱相殺制御力 f_{obsx} と f_{obsy} の時刻歴を取得し、そこから複素スペクトル⁽¹⁰⁾を求める。図4(b)に回転速度 $\omega=800\text{rpm}$ における x と y の両方向の時刻歴およびその複素スペクトルを示す。複素スペクトルの横軸は、正符号が前向きふれ回り方向の力成分、負符号が後向きふれ回り方向の力成分を表す。図4(b)の場合は ω 成分のみ現れており、その大きさから不つりあい力は $m\omega^2=2486\text{kgmm/s}^2$ と読みとれる。一方、実際の不つりあい力は表1のパラメータから $m\omega^2=2492\text{kgmm/s}^2$ であり、推定精度は99.7%である。このことから不つりあい力が推定できることが確認できる。(3) 得られた推定不つりあい量 me をバランスし、制御せずに回転させた時の数値シミュレーション結果を図4(a)に \diamond で示す。振動が全回転速度領域でほぼ零に抑えられていることが確認できる。以上から、非線形性を有する回転軸系でも良好な振動制御と不つりあい推定を同時に実現することができる。

4.2 パラメータ誤差がある場合の振動制御と不つりあい推定

実際のパラメータ m, k, c のそれぞれが、ノミナル値 m_n, k_n, c_n に対し比較的大きな20%の誤差をもつ場合の共振曲線を図5(a)に示す。この共振曲線は以下の特徴をもつ。(1) \circ で示す非制御時の共振曲線は図4(a)の共振曲線と定性的な違いは無く、共振振幅や共振位置がわずかに変化するだけである。(2) \triangle で示した外乱オブザーバを用いて制御した場合は図4(a)の場合と同様、 ω の増加とともに振動が少しずつ増大するが、良好な制振効果が得られる。(3) 図5(b)から推定される不つりあい力は 2486kgmm/s^2 、実際の不つりあい力は表1のパラメータ値から $m\omega^2=2492\text{kgmm/s}^2$ であり、推定精度は99.7%となる。推定不つりあい値 me を用いてバランスし、制御せずに回転させたときの振動を図5(a)に \diamond で示す。図4(a)の場合と同様、振幅が十分抑えられている。

以上から、パラメータ誤差・変動の影響はほとんどないことがわかる。

4.3 電磁石の特性定数 k_m のばらつきによる影響

これまで式(2)で表す電磁アクチュエータの x 方向と y 方向の吸引力は等しい吸引力特性を持っていると仮定してきた。しかし、実際の電磁石には、コイルの巻きむらや材料の磁性特性の不均一などによる若干の差異が存在する。本研究で製作した実験装置の電磁石の特性定数 k_m および δ を測定した結果を表2に示す。表2中の添字の1は x 軸と y 軸それぞれの正側に配置された磁石を示し、2は負側に配置された磁石を示

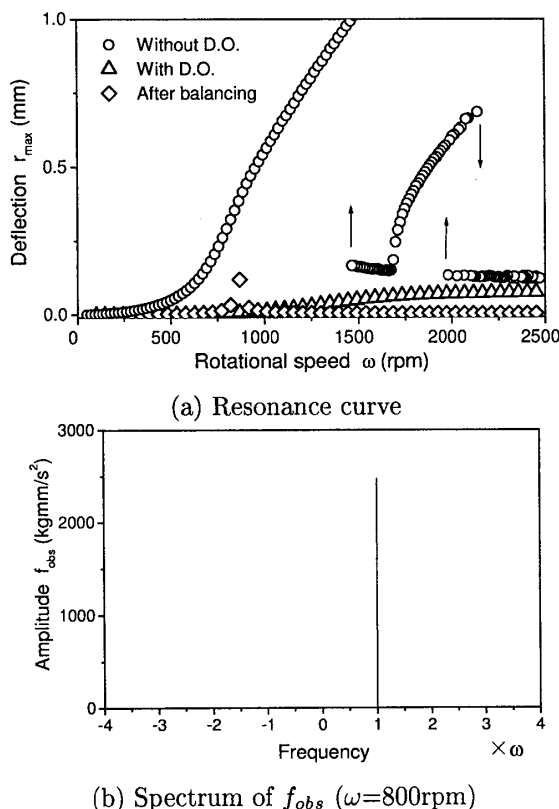


Fig. 5 Case with some parameter errors

す。以後の数値シミュレーションは表2の電磁石の特性定数を用いて計算する。

電磁石の特性定数に微小なばらつきを考慮したときの吸引力 f_{mx} について、式(2)から次式を得る。なお、式(2)の k_m と δ の代わりに、表2に示した k_{mx1} , k_{mx2} , δ_{x1} と δ_{x2} を用いる。

$$\begin{aligned}
 f_{mx} &= k_{mx1} \frac{(I_0 - i_x)^2}{(R_0 + \delta_{x1} - x)^2} - k_{mx2} \frac{(I_0 + i_x)^2}{(R_0 + \delta_{x2} + x)^2} \\
 &= 2(k_{mx1} + k_{mx2}) \frac{I_0^2}{R_0^3} x - 2(k_{mx1} + k_{mx2}) \frac{I_0}{R_0^2} i_x \\
 &\quad + (k_{mx1} - k_{mx2}) \frac{I_0^2}{R_0^2} + 2(k_{mx2} \delta_{x2} - k_{mx1} \delta_{x1}) \frac{I_0^2}{R_0^3} + f_{non} \\
 &= a_n x + b_n i_x + C + f_{non}
 \end{aligned} \tag{11}$$

ここで、 a_n , b_n は式(5)で表すものと対応し、 f_{non} は吸引力の非線形部分である。また、電磁石の特性定数のばらつきの影響で定数成分 C が生じていることがわかる。

まず、電磁石のばらつきが制振効果に及ぼす影響を調べる。比較のため、広く用いられている PD 制御でばらつきの影響をみる。系のパラメータ誤差がない図4の系で電磁石の特性定数のばらつきがある場合に、1秒間 PD 制御のみを行なった後、外乱オブザーバを用いた制御を併用した時の x 方向の変位の時刻歴を図6(a)に示す。PD 制御時には、定数成分 C の

Table 2 Parameters of magnetic characteristics

k_{my1}	39400.0 kgmm ³ /As ²	δ_{y1}	0.47mm
k_{my2}	38800.0 kgmm ³ /As ²	δ_{y2}	0.29mm
k_{mx1}	37500.0 kgmm ³ /As ²	δ_{x1}	0.42mm
k_{mx2}	37500.0 kgmm ³ /As ²	δ_{x2}	0.32mm

影響によって振動中心が平衡点 $x = 0$ から少しずれ $x = 0.005\text{mm}$ の位置を中心に振動している。一方、外乱オブザーバを用いた制御では、制御力 f_{mx} の定数成分 C も外乱として外乱相殺制御力 f_{obsx} により相殺される。その結果、図6(a)の外乱オブザーバ作動時 ($t > 1.0\text{s}$) には制振と共に振動中心位置も制御されている。したがって、外乱オブザーバでは制振に対してばらつきは影響しないことがわかる。

次に、不つりあい推定の精度について調べる。図6(b)に $\omega = 793\text{rpm}$ 時の外乱相殺制御力 f_{obs} の時刻歴を示す。また、外乱オブザーバ作動時 ($t > 1.0\text{s}$) の外乱相殺制御力 f_{obs} の複素スペクトルを図6(c)に示す。電磁石の特性定数のばらつきがない場合の図4(b)とは異なり、スペクトルに定数成分が現れるが、 ω 成分から得られる不つりあいの大きさ me の推定値は電磁石の特性定数のばらつきが無い場合の図4と同様に $mew^2 = 2439\text{kgmm/s}^2$ となり、実際の $mew^2 = 2445\text{kgmm/s}^2$ とほぼ一致する (推定精度 99.7%)。したがって、電磁石のばらつきがあっても不つりあいは正確に推定できる。

4.4 センサ分解能の影響 外乱相殺制御力 f_{obs} の精度に与えるセンサ分解能の影響を調べる。センサ分解能が、 $0\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ の3つの場合を数値シミュレーションで確認する。

それぞれの分解能で数値シミュレーションを行った場合の外乱相殺制御力 f_{obs} の時刻歴と複素スペクトルを図7に示す。センサ分解能が低くなると、不つりあい推定に用いる f_{obs} は変化し、例えば、図7(c)に示すセンサ分解能が $10\mu\text{m}$ の場合には、 ω 以外にも非常に多くの小さな成分が生じる。また、外乱相殺制御力 f_{obs} の大きさは図7(a)(b)に比べて大きくなる。それぞれのセンサ分解能の場合の共振曲線を図8(a)に示す。センサ分解能が $10\mu\text{m}$ の場合は、□で示すように高い分解能の場合 (▲で示す分解能 $1\mu\text{m}$ の場合) より振動振幅が若干大きくなるが、ほぼ良好に制振されている。しかし、不つりあい推定の結果を用いてバランシングした場合の効果に関しては、図8(b)に□で示す $10\mu\text{m}$ の場合は不十分であり、振幅が大きくなり、また主共振と $1/2$ 分数調波共振も発生している。センサ分解能が $1\mu\text{m}$ と高くなった場合は、図8(a)(b)に▲で示すように振動制振と不つりあい推定を同時に実現

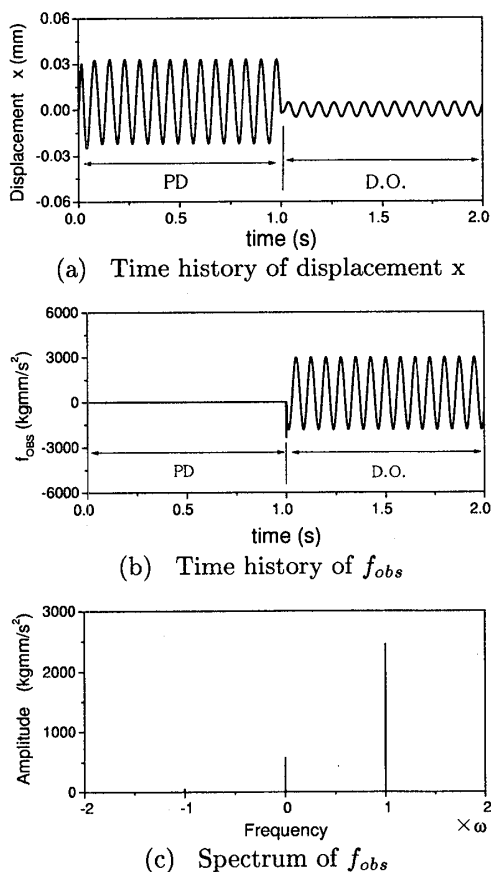


Fig. 6 Case with discrepancy in magnetic characteristics

できる。なお、分解能 $10\mu\text{m}$ と $1\mu\text{m}$ の場合のこれらの差は、不つりあいを推定した $\omega=810\text{rpm}$ 付近で後者は振幅がほぼ零となっているのに対し、前者ではある程度の振幅が残っていることによるものである。

5. 実験装置

実験装置の概要を図9に示す。長さ 700mm 、直径 12mm の弾性軸の中央に直径 150mm 、厚さ 25mm の円板を取り付け、両端を玉軸受で支持する。上下端を複列自動調心玉軸受で支持した場合には線形系、上端を複列自動調心玉軸受で支持し、下端を単列深みぞ玉軸受で支持した場合には非線形系となる。

この回転軸系の円板位置で図10のような電磁アクチュエータを設置する。電磁石の鉄心およびロータ部は、電磁ステンレス(山陽特殊製鋼 QMR1L)を用いた。バランスのために、円板の半径 $R_d=100\text{mm}$ の位置に修正面を設置した。円板の下 8mm の位置に直径 62mm 、厚さ 44mm の測定用円板を取り付け、分解能 $0.8\mu\text{m}$ の渦電流式センサを用いて変位を計測する。そして、式(7)、(8)と $i_x = i_{PDx} - i_{obsx}$ を用いて

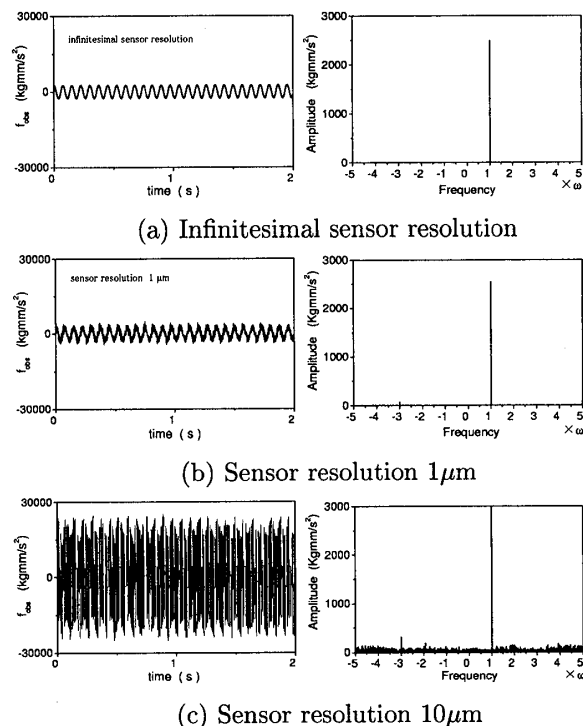


Fig. 7 Effect of sensor resolution on time history and spectrum of f_{obs} ($\omega=810\text{rpm}$)

得られる制御電流 i_x によって電磁アクチュエータを制御する。また、不つりあい推定のためにロータリーエンコーダからの回転パルス信号も計測する。さらに、装置保全のため測定用円板の下側にギャップ 0.6mm で補助軸受を設置する。

6. 実験結果

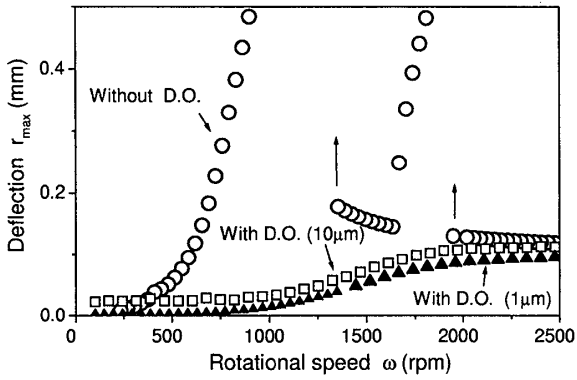
6.1 振動制御について

6.1.1 線形回転軸系の場合 得られた共振曲線を図11(a)に示す。非制御時に関する軸変位の最大値の共振曲線を○で示し、外乱オブザーバを用いた制御時の共振曲線を▲で示す。なお、本装置では、補助軸受のギャップは 0.6mm であるため、振幅が約 0.6mm となったとき実験を中止した。

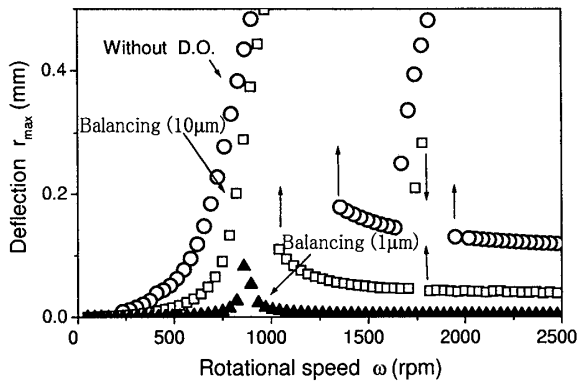
非制御時には、主危険速度 $\omega=850\text{rpm}$ 付近で主共振による大きな振動が発生している。外乱オブザーバを用いて制御した時、回転速度 $\omega=1500\text{rpm}$ までの全回転速度領域で振動が低振幅に抑えられている。

6.1.2 非線形回転軸系の場合 実験結果を図11(b)に示す。非制御時には、主危険速度 $\omega=850\text{rpm}$ 付近で大きな振動が発生している。また、共振曲線の高速度側から回転速度を低下させると軸受クリアランスによる非線形性の影響が現れ、 $\omega=1020\text{rpm}$ でジャンプ現象が発生し、共振曲線が漸硬形となっている。

外乱オブザーバを用いて制御した時、回転速度 $\omega=$



(a) Resonance curve with D.O.



(b) Resonance curve after balancing

Fig. 8 Effect of sensor resolution on accuracy of unbalance estimation

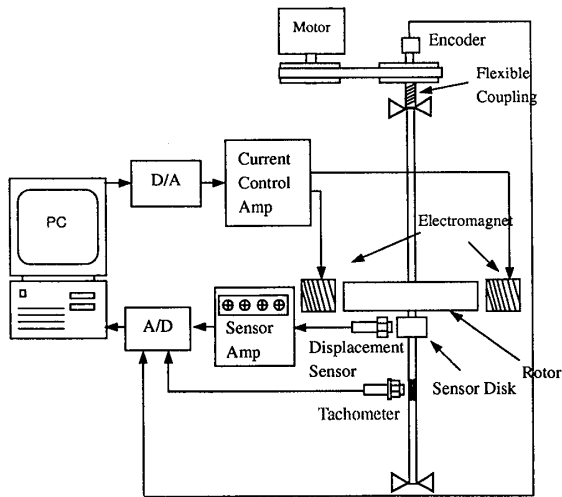


Fig. 9 Experimental setup

1500rpm までの全回転速度領域で振動をよく抑えられている。以上の結果は、数値シミュレーション結果の図 4, 5 の結果と定性的によく一致している。

6.2 不つりあい推定について 不つりあいの大きさと位相を、実験中に記録した外乱相殺制御力 f_{obs} の時刻歴とロータリーエンコーダの 1 パルス/1 回転

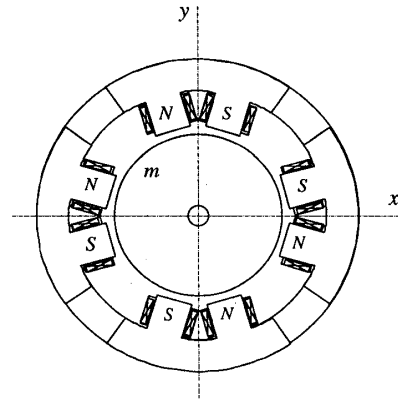
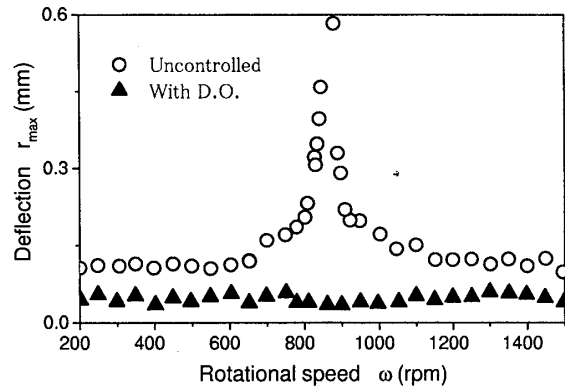
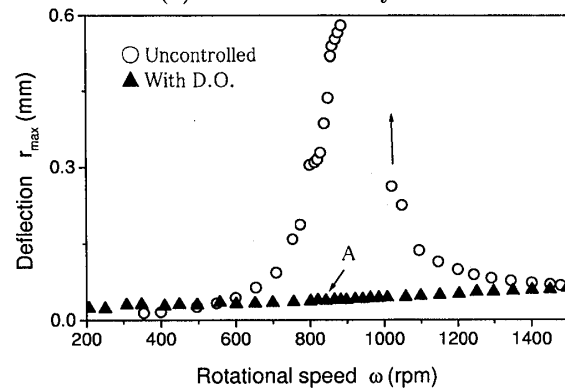


Fig. 10 Structure of electromagnetic actuator



(a) Linear rotor system



(b) Nonlinear rotor system

Fig. 11 Resonance curve (experiment)

のパルス信号から求める。図 11(b) の非線形回転軸系の場合で、図中の A 点の回転速度 $\omega=833$ rpm において測定した外乱相殺制御力 f_{obs} の複素スペクトルを図 12(a) に示す。このスペクトル中の回転速度 ω 付近の信号のみを抽出して逆 FFT 変換することにより、外乱相殺制御力 f_{obs} の ω 成分を図 12(b) に示すように得る。この外乱相殺制御力 f_{obs} の ω 成分を用いて式 (10) により m_e を求め、修正面半径 R_d で割ることにより、本装置の回転軸系の等価不つりあい重り 3.65g を得る。また、不つりあいの位相を調べるために、ロータリー

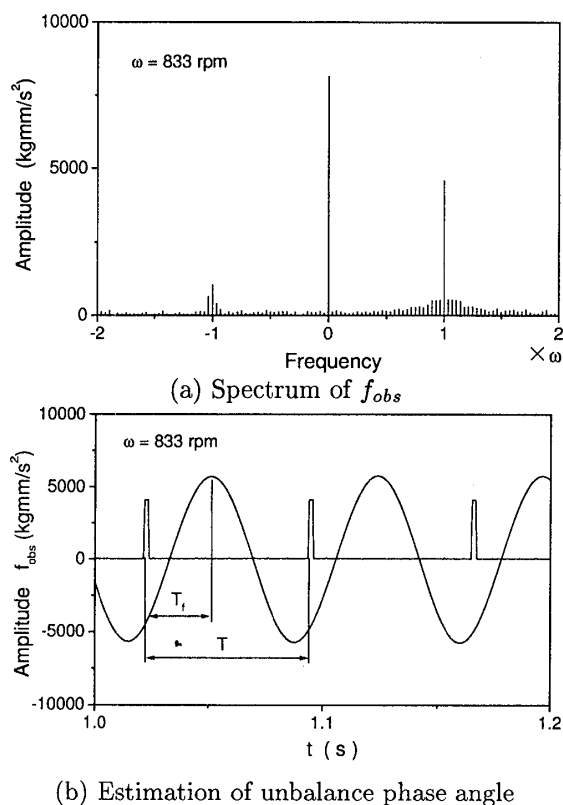


Fig. 12 Unbalance estimation of nonlinear system (experiment)

エンコーダのパルス信号を外乱相殺制御力 f_{obs} の ω 成分の時刻歴に重ねて図 12(b) に示す。ここで、 T は回転軸の回転周期、 T_f はパルス信号と f_{obs} のピーク間の時間である。不つりあいの位相 ϕ はつぎの式 (12) で表される。

$$\phi = 2\pi \frac{T_f}{T} \quad (12)$$

推定した回転軸系の不つりあいの位相はパルスから $\phi = 2.39\text{rad}$ 遅れている。図 13 にこれらの推定値を用いて実際にバランスングを行った場合のつりあわせ前とつりあわせ後の実験結果を \circ と \blacklozenge で示す。主危険速度付近における振動が低振幅に抑制されており、良好にバランスングされたことがわかる。

7. 結 論

本研究では、非線形性を持ち、パラメータ誤差・変動を含むジェフコットロータにおける不つりあい振動の振動制御と不つりあい推定の同時実現を外乱オブザーバを用いて行った。そして以下の結論を得た。

(1) 外乱オブザーバを用いて、不つりあい力、非線形性や各パラメータ誤差・変動などを外乱として推定・相殺することにより、良好な制振効果を得た。

(2) 外乱オブザーバを用いた制御により、振動制振

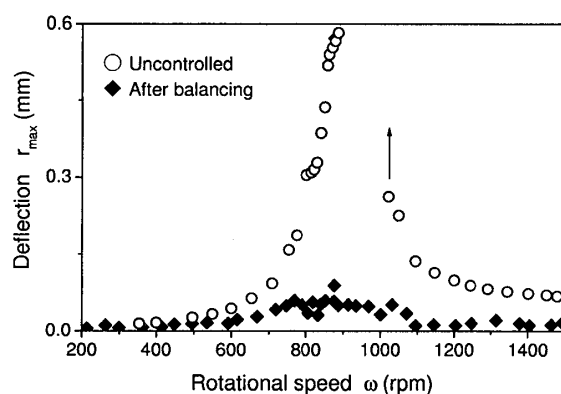


Fig. 13 Verification of unbalance estimation by D.O. (experiment)

と同時に、非線形性を有しパラメータ誤差・変動がある回転軸系の不つりあいの大きさや位相の推定ができることを示した。

(3) 系に含まれる電磁石の特性定数のばらつきの影響やセンサ分解能の影響などを数値シミュレーションにより調べ、本提案手法の有効性を示した。

(4) 実験により、実際に上記の提案した手法の有効性を確認した。

文 献

- (1) Tallian, T.E. and Gustafsson, O.G., ASME Trans., Vol.8(1965), pp.195-203
- (2) 伊藤, 機械設計, 6,12(1962), pp.30-36
- (3) Kirk, R.G. and Gunter, E.J., J. Engineering for Industry, 2(1972), pp.221-232
- (4) 神吉, 日本機械学会 研究会 A-TS10-4, ロータダイナミクスセミナー資料, (1999)
- (5) 三輪, 中井, 機論, 38-305, C(1972), pp.72-82
- (6) Tessarzik, J.M. and Badgley, R.H., J. Engineering for Industry, 5(1974), pp.633-643
- (7) 神吉ら, 機論, 65-634, C(1999), pp.2218-2225
- (8) Markert, R., Skricka, N. and Zhang, X., Int. Conf. Magnetic Bearing, 2002, pp.417-422
- (9) 鈴木ら, 機論, 59-557, C(1993), pp.58-64
- (10) 山本, 石田, 回転機械の力学, コロナ社, 2001
- (11) 山本, 機論, 21-111, C(1955), pp.853-858
- (12) Ehrich, F.F., ASME paper 66-MD-1(1966), pp.1-7
- (13) 堀, 外乱推定型ロバストメカニカル制御, システム制御情報チュートリアル講座'94
- (14) 梅野, 豊田中央研究所 R&D レビュー Vol.32 No.4
- (15) Yabuno, H., Ando, K. and Aoshima, N., J. Vib. and Control, Vol.9(2003), pp.449-473
- (16) 日本機械学会, 磁気軸受の基礎と応用, 養賢堂