

Modeling and Vibration control of a flexible rotor by using Magnetic Bearings

渡辺研究室

○岡田幸人¹, 横井英亮¹, 舟越大輔², 野本卓弥², 渡辺亨³, 背戸一登⁴

Watanabe Lab. *Sachito Okada¹, Hideaki Yokoi¹, Daisuke Funakoshi², Takuya Nomoto², Toru Watanabe³, Kazuto Seto⁴

This paper presents a new modeling method and a control system design procedure for a flexible rotor with many elastic modes using active magnetic bearings. The purpose of our research is to rotate the rotor for passing through critical speeds caused by flexible modes. We apply an extended reduced-order physical model (EROM) method to a flexible rotor. The obtained model is confirmed to be able to model can express gyroscopic effect that denotes interaction between rotation and vibration. Besides, to levitate the stable rotor, jerk local feedback controller is introduced to active magnetic bearings (AMB).

1. 序論

磁気軸受とは電磁石の磁気力により非接触でロータを浮上支持する軸受である¹⁾。利点は、高速で軸を回転させられることや、高温・真空等の特殊な環境での使用が可能なことである。本研究では、その磁気軸受に対して、高速で運転するときの問題となる弾性体としての振動およびジャイロ効果²⁾による影響を考慮したモデリング方法と制御方法を提案し、それらの有効性を検証する。

2. 実験装置

2.1 弾性ロータ

本研究で製作した弾性ロータの概略図を Fig.1 示し、そのパラメータを Table.1 に示す。ここで、弾性ロータの座標系はスラスト方向を X 軸に、ラジアル方向の垂直方向を Y 軸に、水平方向を Z 軸とした。また、ロータは左右対称の形に設計した。

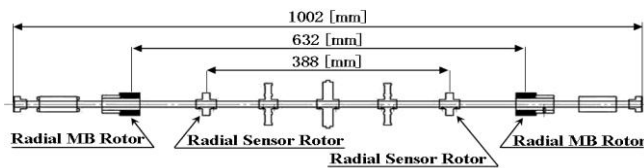


Fig.1 Schematic diagram of designed flexible rotor

Table.1 Parameter of flexible rotor

mass	4.53[kg]	moment of	0.0018[kgm ²]
diameter	12[mm]	moment of	0.3373[kgm ²]

2.2 磁気軸受装置

製作した磁気軸受装置の概略図を Fig.2 に示す。装置は横置き方になっている。

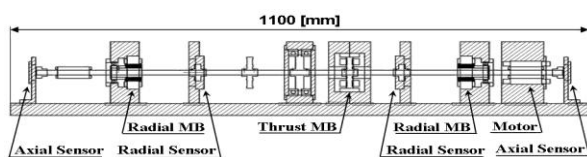


Fig.2 diagram of designed magnetic bearing device

3. 拡張低次元化物理モデルによるモデリング

拡張低次元化物理モデル³⁾(以下、拡張モデル)は制御対象物のモード情報と質量、慣性モーメントなどの情報より作成することができ、回転運動と振動の相互作用を表現することができるモデルである。拡張モデルは Fig.3 のようにいくつかの剛体要素とばね要素から成り、各剛体要素はそれぞれ互いにばね要素でつながれている。

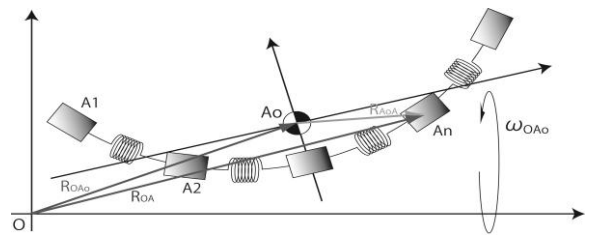


Fig.3 Schematic diagram of an extended reduced-order physical model and motion equation

ここで、弾性ロータの運動を参照するための座標を弾性ロータの重心位置に設置した。これを参照座標 Ao と呼ぶ。慣性座標 O から見た Ao により弾性ロータの運動を表現し、弾性振動は Ao から見た各剛体要素 A で表現する。これより、慣性座標 O から見た各剛体要素 A の応答を得る。

モデル化対象物とモデルとで以下の条件⁴⁾が一致するように剛体要素の質量と慣性モーメントを計算する。これにより、このモデルが運動と振動を同時に表現することができるようになる。

- ・総質量の一致
 - ・総慣性モーメントの一致
 - ・総慣性乗積の一致
 - ・重心位置の一致
- } 運動特性
- ・モード質量の一致
 - ・直交性の保持
- } 振動特性
- ・モード運動量の一致
 - ・モード角運動量の一致
- } 運動と振動の連成

1;日大理工・学部・機械 2;日大理工・院(前)・機械 3;日大理工・教員・機械 4;背戸振動制御研究所

4. モデルの検証

拡張低次元化物理モデルより得られた状態方程式より、無回転時および 10rps で回転させた際のシミュレーション結果を Fig.4 に示す。

Fig.4 より、無回転時には 2 つしかない共振ピークが 4 つに分割しており、作成したモデルがジャイロ効果を示している。

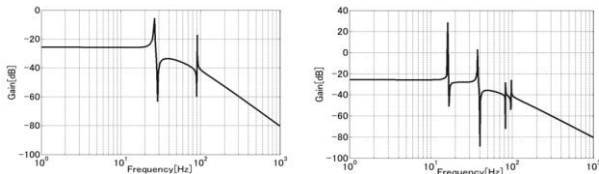


Fig.4 Harmonic response

5. 加々速度ローカルフィードバック制御

加々速度ローカルフィードバック制御のブロック線図を Fig.5 に示す。

変位センサから得られる変位を入力とし、電磁石のアンプに流す電流を出力とする。入力を変位であるため、一回微分により速度、二回微分により加速度、三回微分により加々速度を得る。

そして、変位と計算によって得られる各値にそれぞれ制御ゲインをかけたシステムの制御を行う。

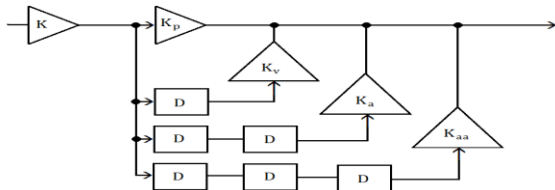


Fig.5 Block diagram

ブロック線図から伝達関数を求めると次式となる。

$$G = \frac{K_m (K_{aa} S^3 + K_a S^2 + K_v S + K_p)}{(m S^2 - K_s)(S + pt)(S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2)} \dots (1)$$

ここで、 K_m はアンプゲイン定数、 K_s は磁気軸受の剛性でそれぞれ一定とし、 pt はロータの時定数の逆数を示す。

6. 安定判別

(1)式の伝達関数より、分子の係数の値を変化させて、根軌跡の安定化を行う。

伝達関数から求めた根軌跡の結果を fig.6 に示す。左側が安定時の根軌跡、右側が不安定時の根軌跡である。

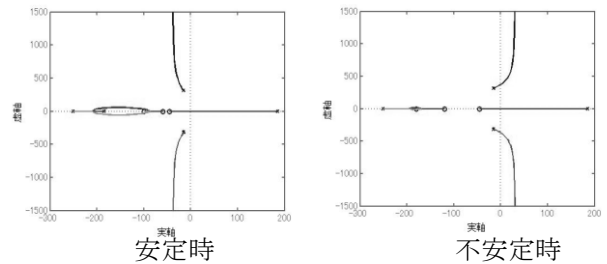


Fig.6 Root tracks

7. 浮上実験

前章から、安定となった時の制御ゲインを用いて浮上実験を行う。磁気軸受として、完全に機能するためにはロータの安定した浮上絶対条件となる。そのため、磁気軸受系に加々速度ローカルフィードバック制御を適応し、ラジアル水平方向にて浮上実験を行う。その時の時刻歴応答を fig.7 に示す。ここで、センサ領域は $\pm 4[V]$ とする。

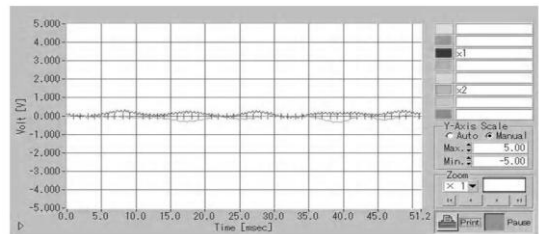


Fig.7 Time Response

Fig.7 より、ラジアル水平方向には磁気軸受系を安定化できていることがわかる。

8. 結論

提案するモデルは、ジャイロ効果を示せた。また、根軌跡法によりシステムの安定判別を行うことで、加々速度ローカルフィードバック制御で安定制御が行えることが分かった。さらに、浮上実験において、ラジアル水平方向での安定浮上に成功した。

9. 今後の展望

実験装置の改良と実験解析のデータを取り、完全なラジアル水平方向でのコロケーションの確立によって安定浮上を目指す。

9. 参考文献

- 1) 社団法人電気学会, 磁気浮上と磁気軸受, コロナ社(1993)
- 2) 松下修己他, 回転機械設計者のための磁気軸受ガイドブック, 日本工業出版, (2004)
- 3) 相根, 柔軟マルチボディシステムのモデリングと制御, 日本大学博士論文, (2005)
- 4) 安芸, 弾性体における運動と振動の連成問題のためのモデリングと制御技術に関する研究, 日本大学博士論文, (2009)