

K4-58 弾性ロータの高速回転を目指す多機能磁気軸受の研究

Research of Multi-function Magnetic Bearings aiming high-speed rotation of a flexible rotor

渡辺研究室 ○桑野悠佑¹, 志賀雅光¹, 岡田幸人², 舟越大輔², 渡辺亨³, 背戸一登⁴
 Watanabe Lab. * Yusuke Kuwano¹, Masamitsu Shiga¹, Sachito Okada², Daisuke Funakoshi², 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 let the rotor rotate passing over the 1st and the 2nd critical speeds caused by flexible modes. To achieve this, it is necessary to control motion and vibration of the flexible rotor simultaneously. The new modeling method named as Extended Reduced Order Physical Model is presented to express its motion and vibration uniformly. By using transfer function of flexible rotor-active magnetic bearings system, we designed a local jerk feedback control system and conducted stability discrimination with root locus. In order to evaluate this modeling and control method, levitation experimentation is conducted.

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 改良点

これまでセンサとアクチュエータが離れた位置にあったが、今回は接近させコロケーションを成立させた。また、アクチュエータ電磁石 2 組の配置を鉛直・水平対向から X 字状の斜め対向に配置変更した。

2.2 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 に示す。



Fig.1 Schematic diagram of designed flexible rotor

2.3 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。

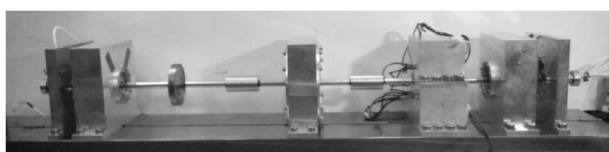


Fig.2 diagram of designed magnetic bearing device

3. 弾性ロータのモード形

弾性ロータの 1～3 次のモード形を Fig.3 に示す。

表 1 弾性ロータの固有振動数

1st mode	24.8[Hz]	2nd mode	73.2[Hz]
3rd mode	127[Hz]		

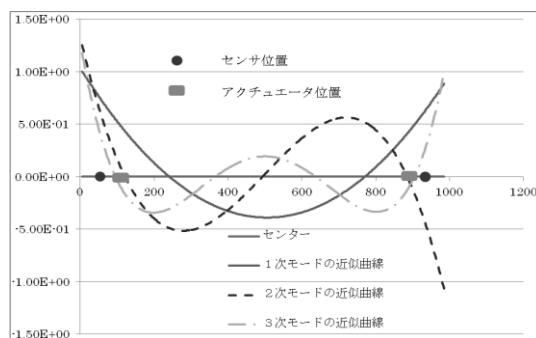


Fig.3 Vibration mode shapes of a flexible rotor

4. 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.4 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。

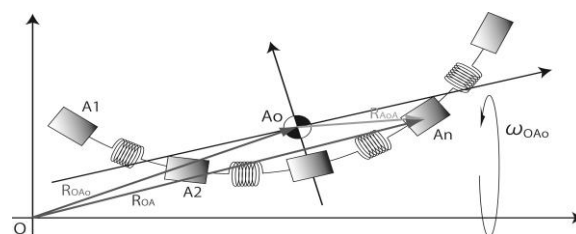


Fig.4 Schematic diagram of an extended reduced-order physical model and motion equation

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 A_o と呼ぶ。慣性座標 O から見た A_o により弾性ロータの

運動を表現し、弾性振動は A_o 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モード質量など様々な保存則 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し、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。

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。入力が変位であるため、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。

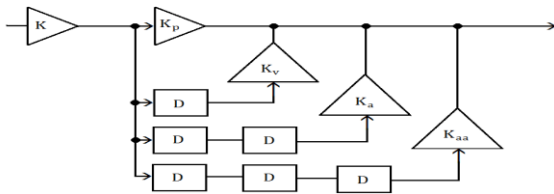


Fig.5 Block diagram

ブロック線図から伝達関数を求めると次式となる。

$$G = \frac{-K_m \omega_n^2 (K_{aaa} S^3 + K_{aa} S^2 + K_v S + K_p)}{L [(mS^2 - K_s)(S + pt)] (S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2)} \quad (1)$$

6. 安定判別

加々速度フィードバック制御を用いた磁気軸受系の伝達関数より、根軌跡を求め、系の安定判別を行う。

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。

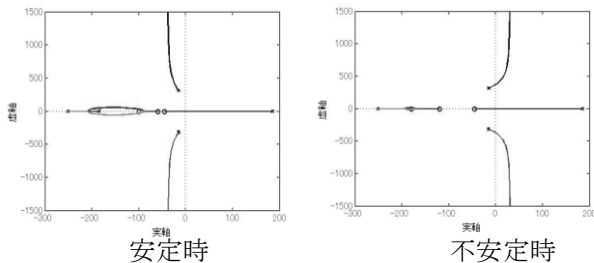


Fig.6 Root tracks

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が絶対条件となる。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。また、制御時と非制御時の周波数応答を Fig.8 に示す。

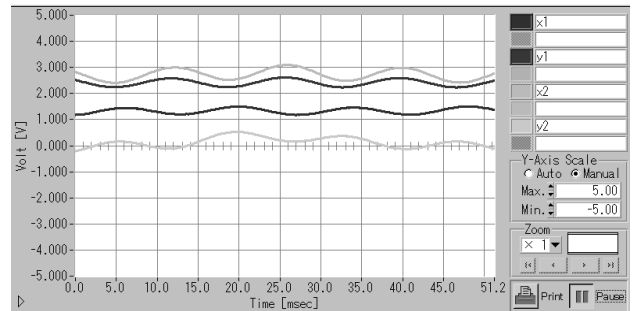


Fig.7 Time Response

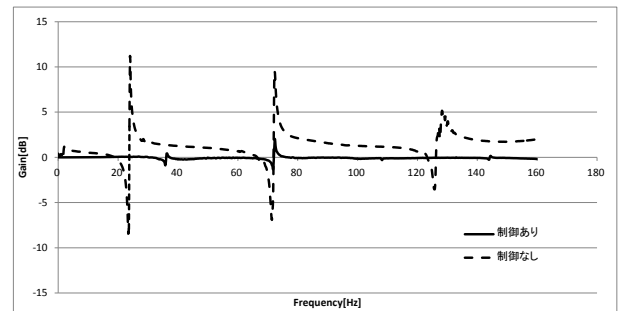


Fig.8 Frequency Response

Fig.7 より、ラジアル方向に磁気軸受系を安定化できていることがわかる。

8. 結論

改良した弾性ロータはコロケーションを確立させ、アクチュエータとセンサの角度を変えたことにより、浮上実験においてラジアル方向での安定浮上に成功した。

シミュレーションでは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。

9. 今後の展望

ラジアル方向の中立点での安定浮上を成功させ、さらに回転を加えた状態での安定化を目指す。

10. 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)