

K4-45 弾性軸の浮上制御と制振制御とを行う磁気軸受システムの機械的改良

Mechanical Improvement of Active Magnetic Bearing system Controlling levitation and vibration of an elastic rotor

○松下拓哉¹, 陳博太¹, 伴野泰一², 藤崎浩之², 渡辺亨³, 背戸一登⁴

*Takuya Matsushita, Botai Chen, Hirokazu Tomono, Hiroyuki Fujisaki, Toru Watanabe, Kazuto Seto

This paper presents a novel modeling method and a control system design procedure for a flexible rotor with many elastic modes using active magnetic bearings. Stable levitation of the rotor is achieved by using simplified flexible rotor-Active Magnetic Bearings system model, a designed local jerk feedback control system, and a phase-lag compensator. But the 2nd mode was not enough suppressed. In order to suppress the 2nd mode, change of the shape of the rotor and verification of its effectiveness are carried out. The target of our research is to let the rotor rotate passing over the 1st and the 2nd critical speeds caused by flexible modes.

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。しかし、高速回転するとき弾性体としての振動²⁾が問題となっている。

その振動を抑えるために、本研究では加々速度フィードバック制御により無回転時における安定浮上及びロータの弾性 2 次モードに対する制振性能を確保している。また、位相遅れ補償器を導入することにより系のサーボ剛性を向上させている。

本年度は弾性 2 次モードに対する制振性能を更に強化するためにロータの構造の改良を行い、その有効性を検証した。

最終的には回転させ、弾性ロータの危険速度通過を目指す。

2. 実験装置

製作した弾性ロータと磁気軸受装置をそれぞれ Fig1, Fig 2 に示す。ここでセンサとアクチュエータはコロケーションが確立するように、近くに配置されている。

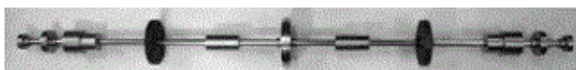


Fig.1 Schematic diagram of designed flexible rotor



Fig.2 diagram of designed magnetic bearing device

3. 弾性ロータの固有振動数

弾性ロータの固有振動数を Table1 に示す。

Table1 Parameter of flexible rotor

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

4. これまでの研究成果

4.1 浮上実験

これまでの研究で、弾性軸の浮上には成功している。その時の時刻歴応答を Fig.3 に示す。これより、ラジアル方向にロータが安定して浮上していることがわかる。

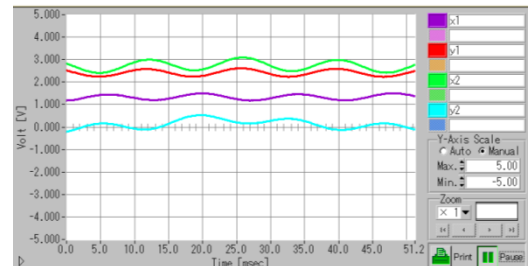


Fig.3 Time Response

4.2 位相遅れ補償器

実機での浮上には成功したが、低周波領域でのサーボ剛性が弱い、そこで位相遅れ補償器 (Phase Lag Compensator, PLC) を導入し、サーボ剛性の向上を目指した³⁾。

4.3 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 (Local Jerk Feedback Control, JFB)⁴⁾のブロック線図を Fig.4 に示す。

変位センサから得られる変位を入力とし、電磁石のアンブ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。なお、伝達関数は式(1)に示す。

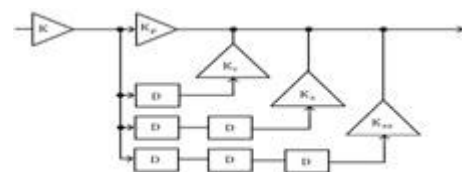


Fig.4 Block diagram of control system

$$G_C = K_{aa}s^3 + K_a s^2 + K_v s + K_p \quad (1)$$

実験装置の電磁石部分とロータ部分をモデル化して、求めた伝達関数を式(2)に示す。また、式(1)、(2)を含めた実験装置全体の伝達関数を式(3)、実験装置全体のブロック線図を Fig.5 に示す。

$$G_m G_p = \frac{K_s \omega_n^2}{(Ms^2 - K_m)(Ls + R)(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (2)$$

$$G = \frac{K G_C G_m G_p}{1 + K G_C G_m G_p} \quad (3)$$

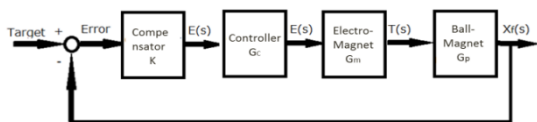


Fig.5 Block diagram of the closed-loop system among experimental system

式(2)における加々速度 FB 制御の伝達関数を式 (2) の分母第 3 項と同じになるように因数分解する。

$$G_c = K(s + \alpha)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \quad (4)$$

これによって反共振を発生させ、約 80Hz で発生する浮上時の二次モードを抑える効果が期待できる。

Fig.6 に加々速度 FB 制御器の係数のチューニングを行なった上での実験装置全体の根軌跡を示す。

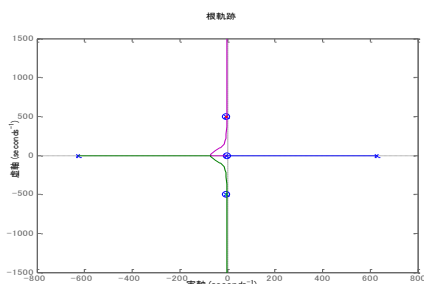


Fig. 6 Steady root locus plot

Fig.7 にそれぞれ「PD 制御のみ」「加々速度 FB 制御に位相遅れ補償器加えた状態」で浮上させた時の閉ループ系の周波数応答を示す。ここで、入力をハンマでのインパルスとし、出力はセンサからの出力を読み取った。

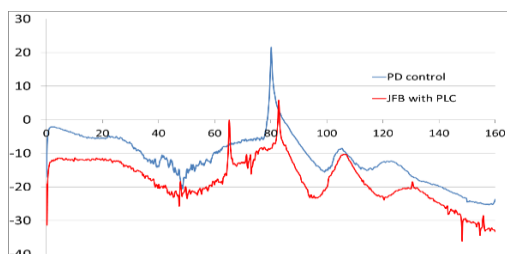


Fig.7 Frequency response in levitation

Fig.7 から、80Hz のピークを反共振により約 12dB 下げることに成功した。

5. 昨年度の成果一軸形状の再検討

Fig.7 では 80Hz のピークはまだ 5dB ほどあり十分に抑えられたとはいえない。これはアクチュエータが弾性 2 次モード(Fig.8)の節に近い、等価質量が非常に大きくなってしまい可制御性の問題⁵⁾が存在するためだと考えられる。

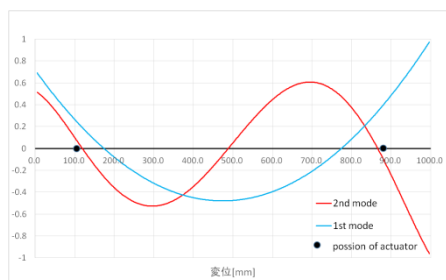


Fig. 8 Modal shape

そこでアクチュエータを外側へ移動させることで弾性 2 次モードの節からアクチュエータを遠ざけた。Fig.9 にそれぞれのパターンの軸形状を示す。

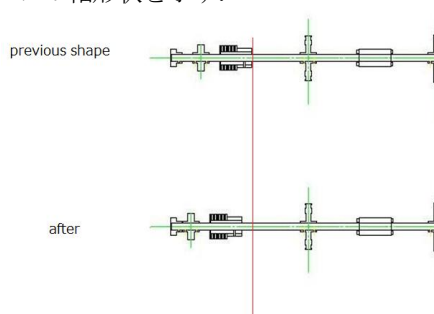


Fig. 9 Pattern of changing rotor shape

構造変更によるモード形とアクチュエータ位置の変化を Fig.10 に示す。この図より構造変更によりアクチュエータが節から離れることが確認できる。

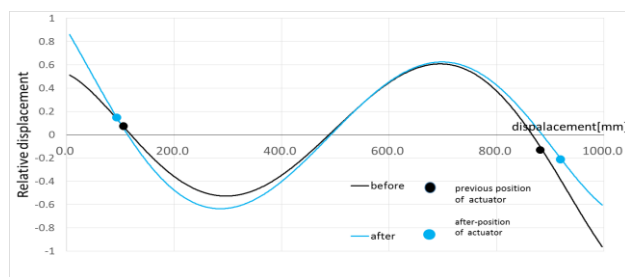


Fig. 10 Modal shape of 2nd-mode

6. 結論及び今年度の検討

本研究では、ロータ浮上のために加々速度ローカルフィードバック制御を導入している。この伝達関数の各係数をチューニングすることで、弾性 2 次モードに対する制振性能を持たせることができることを明らかにした。

しかし今回、ロータの弾性 2 次モードの節付近にアクチュエータが存在しており、可制御性の問題によって制振性能が十分に得られないことがわかった。

そこで今年度は、センサ、アクチュエータを共に極力軸端部に近づけることによって可制御性、可観測性の改善を試みる。そして、浮上実験および周波数応答の測定を行い制振性能を確認し、回転浮上を目指す。

7. 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) 山本敏男, 石田幸男, 回転機械の力学, コロナ社 (2001)
- 3) 背戸一登, 渡辺亨, フィードバック制御の基礎と応用, コロナ社 (2013)
- 4) 舟越大輔, 弾性ロータに対する磁気軸受の浮上・制振制御システム, 日本大学修士論文 (2012)
- 5) 野波健蔵, 小林伸一郎, 弾性ロータ・磁気軸受系の可制御・可観測性, JSME, Vol.54 Num.507C, pp.2661-2668, 1988.