

K4-40

弾性ロータを支持する磁気軸受のための加々速度フィードバック制御器

Jerk feedback controller for Active Magnetic Bearings supporting an elastic rotor

○亀川将<sup>1</sup>, 伴野泰一<sup>1</sup>, 藤崎浩之<sup>2</sup>, 志賀雅光<sup>2</sup>, 渡辺亨<sup>3</sup>, 背戸一登<sup>4</sup>

\*Tasuku Kamekawa<sup>1</sup>, Hirokazu Tomono<sup>1</sup>, Hiroyuki Fujisaki<sup>2</sup>, Masamitsu Shiga<sup>2</sup>, Toru Watanabe<sup>3</sup>, Kazuto Seto<sup>4</sup>

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. Using previous controller, the flexible rotor can be levitated, while its stability is insufficient. By using simplified flexible rotor-Active Magnetic Bearings system model, we designed a local jerk feedback control system and stability analysis by using root locus is carried out. By using local jerk feedback controller, stable and solid levitation and significant vibration suppression effect is achieved. Using the controller, revolution experiment is succeeded in low speed revolution. 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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>が問題となっている。

その振動を抑えるために、これまでは弾性ロータの浮上に成功し、低周波数域の剛性を上げるために、位相遅れ補償器を入れて浮上の安定性を上げたが、無回転時の弾性2次モードのゲインを下げられなかった。そこで、本研究では浮上制御で用いていた加々速度フィードバック制御の性能を強化することで浮上の安定性を向上させ、低速での回転実験も行った。

最終的には実機を回転させ、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 Fig.1, Fig.2 に示す。

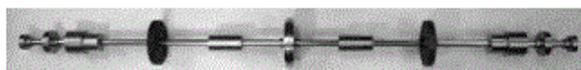


Fig.1 Schematic diagram of designed flexible rotor

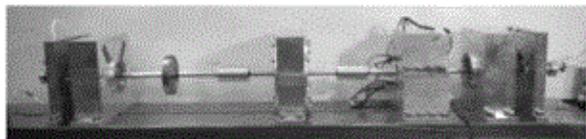


Fig.2 diagram of designed magnetic bearing device

3. 弾性ロータの固有振動数

弾性ロータの固有振動数を Tab.1 に示す。

Tab.1 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。

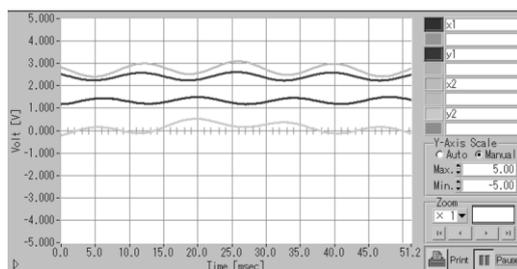


Fig.3 Time Response

4. 2 位相遅れ補償器の導入及び効果検証

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ことが実験で確認されている。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<sup>3)</sup>。この補償器の伝達関数及びボード線図を以下に示す。

$$K = \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \quad (\alpha > 1) \quad (1)$$

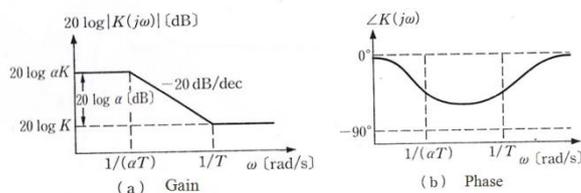


Fig.4 Bode diagram of compensator

Fig.4 から位相遅れの影響を考慮して係数  $\alpha$ , T を設定することにより、低周波数域でのゲインを  $20 \log \alpha$  [dB] 持ち上げられることが分かる。

Fig.5 より、位相遅れ補償器の導入により、全周波数帯においてゲインが下がり、サーボ剛性が向上したことがわかる。

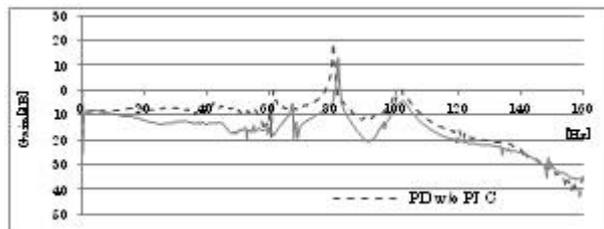


Fig.5 Frequency response of PLC

5. 昨年度の研究

Fig. 5 に明らかなように、これまでの PD 制御器では弾性 2 次モードの応答倍率がほとんど減少しておらず、制振性能が不十分であった。そこで、制御器として加々速度フィードバック制御を導入し、かつ弾性 2 次モードを考慮したチューニングを施すことで、2 次モードへの制振性能向上を目指す。

5. 1 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)<sup>4)</sup> のブロック線図を Fig.6 に示す。変位センサから得られる変位を入力とし、電磁石のアンペア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。なお、伝達関数は式(2)に示す。

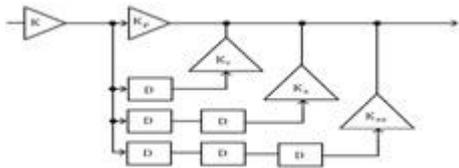


Fig.6 Block diagram of control system

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

5. 2 実験装置全体の伝達関数

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(3)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(4), 実験装置全体のブロック線図を Fig.7 に示す。

$$G_m G_p = \frac{K_s \omega_n^2}{(Ms^2 - K_m)(Ls + R)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3)$$

$$G = \frac{KG_C G_m G_p}{1 + KG_C G_m G_p} \quad (4)$$

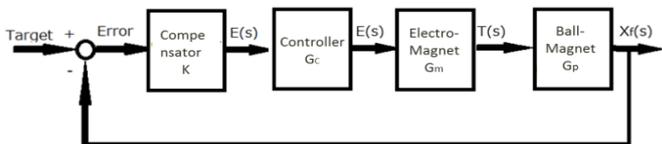


Fig.7 Block diagram of the closed-loop system among experimental system

5. 3 加々速度 FB 制御 と PD 制御との比較

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

$$G_C = (s + \alpha)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \quad (5)$$

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.8 にそれぞれ「PD 制御のみ」「加々速度 FB 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。

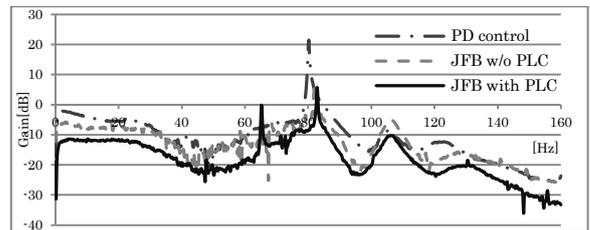


Fig.8 Frequency response in levitation

Fig.8 から、80Hz のピークを反共振により約 12dB 上げることに成功した。

6. 回転実験

無回転時の安定浮上は確立されたので、回転実験を今回行った。Fig.9 に 180[rpm]で回転させたときの周波数応答を示す。入出力は Fig.8 と同様である。

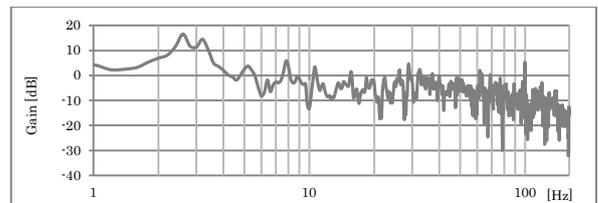


Fig.9 frequency response in revolution

実験の結果、浮上状態を保ったまま回転させることには成功した。しかし Fig.9 から明らかなように、静止時には見られなかった振動が 3[Hz]付近に生じている。この振動が生じる原因、振動モード形状は不明であるが、このように回転に伴って生じる振動の抑制が、次の課題である。

7. 結論及び今後の展望

弾性軸の浮上に成功した。そして、安定浮上の課題であったサーボ剛性の低さが、加々速度 FB と位相遅れ補償器の導入により、改善され向上したことが確認できた。しかし 80Hz のピークは減少したが完全には打ち消していない。また浮上時の回転も不安定である。

これらの問題に対して今年度は、アクチュエータ等の位置の見直しや伝達マトリクスによるモデル、制御システムの再検討により解決を目指す。

8. 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, 日本大学博士論文(2012)