

1 はじめに

磁気軸受は、磁力によってロータを非接触で支持できるシステムである。この磁気軸受は、本来、不安定なシステムであり、高速回転時にジャイロ効果や不釣り合い振動などの困難な制御問題も存在する。磁気軸受に対する代表的な制御手法である H_∞ 制御が、応用された様々な結果が報告されている。一方で、最近の機械工作や精密加工分野では制御系のロバスト安定性だけでなく良好な目標値追従特性も求められている。しかし、従来の H_∞ 制御の枠組みでは過渡応答特性を確保することが困難であった。

この問題に対して、提案した外乱と初期状態の不確かさの混合減衰 H_∞ 制御 [1] が、従来の H_∞ 制御に比較して良好な過渡応答特性を持つことを磁気軸受に適用することで確認している [2] が、ロータは回転させず静止状態を扱っていた。しかし、この磁気軸受を工作機械用主軸等に適用する場合、ロバスト安定性や過渡応答特性だけでなく、回転時の不釣り合い振動に対する効果的な減衰性能も必要とされるが、この H_∞ DIA 制御は、不釣り合い振動を考慮しておらず回転性能としては不十分である。

本論文では、不釣り合い振動を考慮した制御系設計により良好な回転性能を付加した H_∞ DIA 制御系設計手法を提案し、その有効性を制御実験により検証する。これにより、良好な過渡応答特性と回転性能を有する H_∞ DIA 補償器の設計が可能となる。

2 H_∞ DIA 制御系設計

2.1 磁気軸受の数学モデル

様々な仮定の下で回転周波数に同期したロータの不釣り合いによる周期的外乱を考慮した数学モデルを導出し、鉛直・水平方向にまとめた状態空間表現は (1) 式の様になる。

$$\begin{aligned} \dot{x}_g &= A_g x_g + B_g u_g + D_g v_0 + E_g v_u \\ y_g &= C_g x_g + w_0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで $x_g := [x_v^T \ x_h^T]^T$, $u_g := [u_v^T \ u_h^T]^T$, $v_0 := [v_v^T \ v_h^T]^T$, $v_u := [v_{uv}^T \ v_{uh}^T]^T$, $w_0 = [w_v^T \ w_h^T]^T$ とし、 A_g, B_g, C_g, D_g, E_g は、適当な次元を持つ定数行列である。

2.2 一般化プラントの構築

本節では、 H_∞ DIA 制御に回転性能を付加するための一般化プラントの構成と H_∞ DIA 補償器の特徴について示す。

まず、システムへの外乱 v_0, w_0 について考える。外乱 w_0, v_0 は、周波数重み関数 $W_w(s), W_{v1}(s)$ を適切に設定することで (2) 式に示す様に定量的に特徴付けられる。

$$w_0 = W_w(s)w_1, \quad v_0 = W_{v1}(s)v_2 \quad (2)$$

最後に、本論文で新たに導入した不釣り合い振動による周期的外乱 v_u について考える。これは、ロータ質量の不釣り合いによる不確かさの影響を表している。この外乱 v_u のために、磁気軸受は回転周波数に同期した振動を引き起こす。外乱 v_u に対しても同様に周波数重み関数 $W_{v2}(s)$ により (3) 式のように特徴付けることが出来る。

$$v_u = W_{v2}(s)w_3 \quad (3)$$

このとき、周波数重み関数 $W_{v2}(s)$ は、指定した周波数でピークを持つような重み関数を選ぶ。これにより、指定した周波数成分をもつ不釣り合い振動を減衰させることが出来る。さらに、変位と速度および制御入力のリギュレーションのために θ と ρ の重み行列と係数を導入する。

これらの重み関数により構成される一般化プラントと設計された H_∞ DIA 補償器を Figure 1 に示す。この補償器のゲイン線図上にピークが現れており、その周波数の不釣り合い振動を抑制することが期待される。

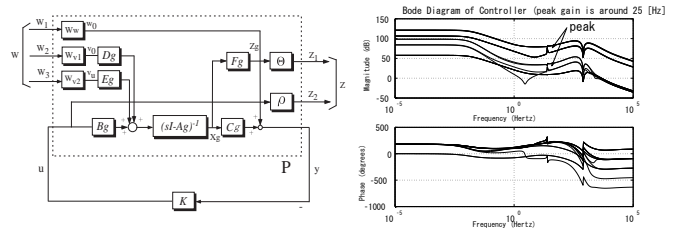


Figure 1: Generalized Plant & Bode Diagram

3 制御実験による検証

本節では、設計された H_∞ DIA 補償器の回転性能の検証を行う。実験結果を Figure 2 に示す。回転実験として、回転数が 3000[rpm] から 0[rpm] へ減少していくときの応答を取得し比較する。具体的には、不釣り合い振動を考慮した H_∞ DIA 補償器と不釣り合い振動を考慮していない H_∞ DIA 補償器を用いて比較する。結果としては、不釣り合い振動を考慮した H_∞ DIA 補償器が、指定した周波数における振動振幅を抑えていることがわかる。

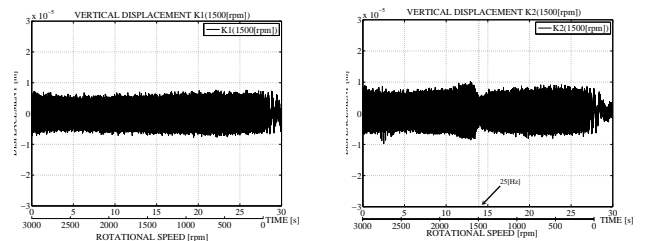


Figure 2: Displacement of Vertical Axis

4 おわりに

不釣り合い振動を考慮した制御系設計により良好な回転性能を付加した H_∞ DIA 制御系設計手法を提案し、その有効性を実験的に検証した。これにより、良好な過渡応答特性と回転性能を有する H_∞ DIA 補償器の設計が可能となった。

References

- [1] T. Namerikawa, M. Fujita, R. S. Smith and K. Uchida, "On the H_∞ Control System Design Attenuating Initial State Uncertainties," *Trans. on SICE*, vol.40, no.3, pp.307-314, 2004.
- [2] W. Shinozuka, T. Namerikawa, "Improving the Transient Response of Magnetic Bearings by the H_∞ DIA Control," *Proc. of CCA*, pp.1130-1135, Taipei, 2004.