

カルマンフィルタを用いた 能動型磁気軸受の不釣り合い振動抑制

2014SC098 芳野和茂

指導教員：高見勲

1 はじめに

本研究ではロータが不釣り合いをもつ能動型磁気軸受に対して非定常カルマンフィルタを用いた振動抑制の手法を提案する。ロータの振動の原因の一つにロータの不釣り合いによって発生する周期外乱があげられる。本研究では周期外乱の推定値とその一階微分の項を状態変数に加えることで、周期外乱のダイナミクスをモデルに組み込み、回転数が増える場合でも位相遅れなく推定できる推定器を構築し補償する。このとき、モデルの中に変動パラメータが含まれる場合でも適用可能な非定常カルマンフィルタを用いて推定を行う。また、磁気軸受は本質的に不安定なシステムであるため、常にフィードバック制御を必要とする。本研究では、観測出来ない状態に対してはカルマンフィルタの推定値を利用してフィードバック制御を行う。提案法の有用性をシミュレーションと実験で検証する。

2 モデリング

本研究では制御対象として、電磁石の吸引力を利用しロータを支持する能動型磁気軸受を扱う。本研究で扱う磁気軸受はアクチュエータである4組の電磁石と4個の位置センサから構成されており、ラジアル2方向の位置制御を行うことが出来る。ロータの概略図を図1に示す。

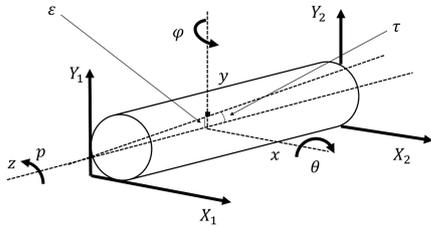


図1 ロータの概略図

本研究ではロータの不釣り合い力を推定し、不釣り合い力を打ち消すような入力を加えることにより、ロータの振動を抑制する。外乱項 $d_i (i = y, x, \theta, \phi)$ を用いて、ロータの運動方程式を式(1)-(4)で定義する。

$$m\ddot{x} = f_{X1} + f_{X2} + d_x \quad (1)$$

$$m\ddot{y} = f_{Y1} + f_{Y2} - mg + d_y \quad (2)$$

$$J_x\ddot{\theta} = f_{Y1}l - f_{Y2}l + d_\theta \quad (3)$$

$$J_x\ddot{\phi} = f_{X1}l - f_{X2}l + d_\phi \quad (4)$$

通常、カルマンフィルタを用いて外乱を推定する場合、

$$\frac{d}{dt}d_i(t) = 0$$

とすることが多い[1]。しかし、このまま拡大系を導出し推定を行うと真値に対して推定値が遅れてしまい補償が限定的になる。そこで本研究では、周期外乱のダイナミクスを考慮して

$$\frac{d^2}{dt^2}d_i = -p^2d_i(t) \quad (5)$$

をモデルに加える。これにより、回転速度 p で変動する周期外乱に対しては位相遅れなく推定が可能となる[2]。

状態変数を式(8)、入力を式(9)とすると、式(1)-(5)よりシステムの状態空間表現は式(6)(7)で得られる。ただし、入力は各電磁石への操作電流、出力はロータの両端に設置されているホールセンサによって計測されるロータ両端の変位である。 A_0, B_0 は電磁力を線形化することで得られる 4×4 の定数行列であり、 A_1 は外乱項に関する 4×4 の定数行列、 I は 4×4 の単位行列である。また p は変動するため、ここでは明示的に行列 A を $A(p)$ としている。

$$\dot{x}(t) = A(p)x(t) + Bu(t) \quad (6)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (7)$$

$$A(p) = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 \\ A_0 & 0 & A_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & -p^2 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [I \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$x(t) = [\xi \ \dot{\xi} \ d \ \dot{d}]^T \quad (8)$$

$$\xi = [X_1 \ Y_1 \ X_2 \ Y_2]^T$$

$$d = [d_{X1} \ d_{Y1} \ d_{X2} \ d_{Y2}]^T$$

$$u(t) = [i_{X1} \ i_{Y1} \ i_{X2} \ i_{Y2}]^T \quad (9)$$

3 非定常カルマンフィルタ

本研究では行列の要素が逐次変化する場合でも適用可能な非定常カルマンフィルタを用いて外乱推定を行う。時変係数 $A(k), B(k)$ をもつ離散時間状態方程式で記述される非定常時系列 $y(k)$ に対するカルマンフィルタは以下のように与えられる[3]。

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k) + Q(k)$$

$$y(k) = Cx(k) + R(k)$$

予測ステップ

$$\hat{x}^-(k) = A(k-1)\hat{x}(k-1) + B(k-1)u(k-1)$$

$$P^-(k) = A(k-1)P(k-1)A^T(k-1) + Q(k-1)$$

フィルタリングステップ

$$G(k) = \frac{P^-(k)C^T}{CP^-(k)C^T + R(k)}$$

$$\hat{x}(k) = \hat{x}^-(k) + G(k)(y(k) - C(k)\hat{x}^-(k))$$

$$P(k) = (I - G(k)C(k))P^-(k)$$

4 制御器設計

図2にカルマンフィルタを用いた制御ブロック図を示す。

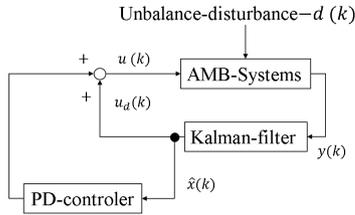


図2 制御ブロック図

制御対象である能動型磁気軸受は不安定系であるためロータが回転していない場合であっても常にフィードバック制御を必要とする。本研究ではPD制御により安定化を行い、観測出来ない状態に関してはカルマンフィルタの推定値を用いてフィードバック制御を行う。また、周期外乱の推定値 $\hat{d}(k)$ を用い、

$$u_d(k) = -B_0^{-1}A_1\hat{d}(k)$$

という入力を制御入力に加え周期外乱の影響を打ち消す。

5 シミュレーション・実験結果

シミュレーション上でロータの回転数を変化させたときの外乱の推定値を、定常カルマンフィルタを用いた場合と、適応型の非定常カルマンフィルタを用いた場合で比較を行う。シミュレーション結果を図3, 4に示す。図3は1000[rpm]付近、図4は2000[rpm]付近における外乱である。図3より1000[rpm]付近では定常カルマンフィルタと非定常カルマンフィルタの推定値にあまり違いがみられないが、図4より2000[rpm]付近では周期外乱を考慮した非定常カルマンフィルタのほうが推定値の遅れが小さくなっていることがわかる。またロータの回転速度が1500[rpm]の状態では、外乱補償を行った場合と行わなかった場合で比較を行う。シミュレーション結果を図5に、実験結果を図6に示す。図5では0.5[s]に、図6では10[s]に補償入力を加えている。図5および図6より、補償入力を加えることによって振幅が小さくなり、周期外乱が抑制されていることがわかる。

6 おわりに

本研究では不釣り合いをもつロータに対して、周期外乱のダイナミクスを組み込んだモデルと非定常カルマンフィルタを用いることで、回転数が変動する場合でも、周期外

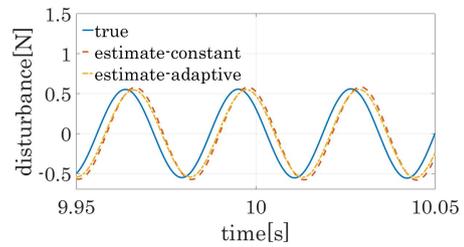


図3 シミュレーション結果

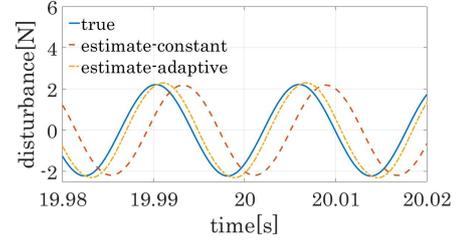


図4 シミュレーション結果

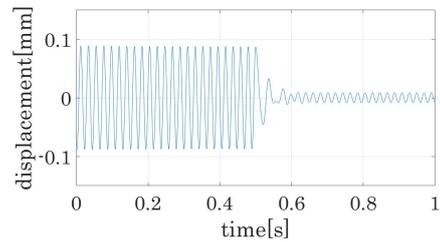


図5 シミュレーション結果

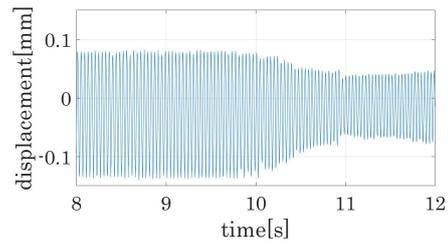


図6 実験結果

乱力を正確に推定できることを示した。シミュレーション、実験を行うことで提案手法の有用性を検証した。今後の課題として、PD制御ではなくLQ制御によるフィードバック制御が挙げられる。

参考文献

- [1] Thomas Schuman ほか: “Improving Operational Performance of Active Magnetic Bearing Using Kalman filter and State Feedback Control”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS 2012
- [2] 井上芳英ほか: “溶接ロボットのウィーピング動作制御”, 神戸製鋼技報, 2004
- [3] 足立修一ほか: “カルマンフィルタの基礎”, 東京電機大学出版局, 2012.