

剛性を考慮した能動型磁気軸受の制振制御

2015SC066 森岡直己

指導教員：陳幹

1 はじめに

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。磁気軸受は、電磁石の吸引力によって回転体を磁気浮上させることで、回転体に非接触な支持をする軸受である。そのため摩擦による部品の消耗が少なくなり、潤滑油が不必要となる利点をもつ [1]。しかし、その一方で電磁石によって発生する力が非線形な特性をもつため、ロータを浮上させる際にぶれてしまうことがある。これが回転する際に残留振動や共振を生じる原因となる。本研究では、ロータの剛性に着目して、バイアス電流を変化させる剛性切換 [2] による制振の原理を用いて、振動を制振することを目標にする。そこに新たに入力電流を抑えるために反復学習制御 (ILC)[3] を加えてシミュレーションを行い提案法の効果を確認した。

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[4] に示す。

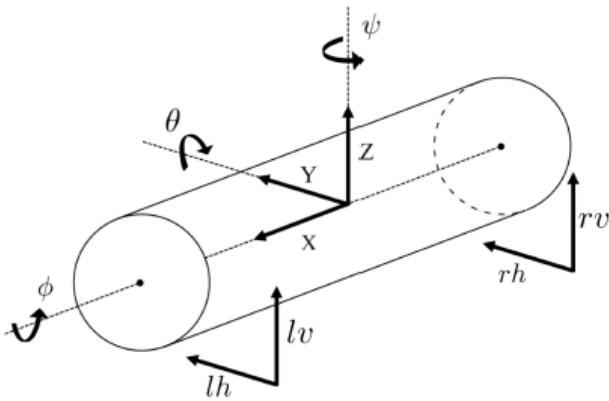


図 1 ロータの概略図

各パラメータの表を表 1 に示す。

ロータの運動方程式を式 (1)-(4) に示す。

$$m\ddot{y} = f_{lh} + f_{rh} \quad (1)$$

$$m\ddot{z} = f_{lv} + f_{rv} - mg \quad (2)$$

$$J_y\ddot{\psi} = -l_m f_{lh} + l_m f_{rh} \quad (3)$$

$$J_x\ddot{\theta} = l_m f_{lv} - l_m f_{rv} \quad (4)$$

表 1 パラメータ

パラメータ	記号
平衡からの撓動ポイント	g_j [m]
電磁石の吸引力	f_j [N]
ロータの質量	m [kg]
ロータの回転速度	ω [rad/s]
重心から端までの距離	l_m [m]
X 軸のモーメント	J_x [Nm]
Y 軸のモーメント	J_y [Nm]
センサと平衡状態のロータとの距離	G_o [Nm]
浮上力定数	k
重力加速度	g

ここで、位置センサはロータの両端に設置されているため、ロータの状態変数をそれぞれロータ両端の変位 r_j ($j = lv, rv, lh, rh$) に変形する。変形後の式を以下に示す。

$$y = \frac{1}{2}(g_{rh} + g_{lh}), z = \frac{1}{2}(g_{lv} + g_{rv}), \quad (5)$$

$$\theta \approx \frac{g_{lv} - g_{rv}}{2l_m}, \psi \approx \frac{g_{rh} - g_{lh}}{2l_m} \quad (6)$$

また、式 (1)-(4) において、電磁力 f_j は式 (7) で表現される。

$$f_j = k_m \left(\frac{(I_o + (I_j + i_j))^2}{(g_j - G_o)^2} - \frac{(I_o - (I_j + i_j))^2}{(g_j + G_o)^2} \right) \quad (7)$$

ここで、 I_o, I_j, i_j はバイアス電流、定常電流、入力電流を表す。式 (1)-(7) より状態方程式は式 (8), (9) になる。

$$\dot{x}(t) = [\dot{g}_{lv} \quad \dot{g}_{rv} \quad \dot{g}_{lh} \quad \dot{g}_{rh} \quad \dot{g}_{lv} \quad \dot{g}_{rv} \quad \dot{g}_{lh} \quad \dot{g}_{rh}]^T \quad (8)$$

$$u(t) = [i_{lv} \quad i_{rv} \quad i_{lh} \quad i_{rh}]^T \quad (9)$$

3 剛性切換制御

ここで文献 [2] が提案しており、利用した剛性切換制御器の制御式を式 (10) に示す。

$$I_b = I_o + \Delta I \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(qx\dot{x}) \quad (10)$$

ここで I_b はバイアス電流であり、 I_o は電流の中間値であり、 ΔI は切換幅を決めるパラメータ、 q は連続関数による切換関数の近似の程度を調整するパラメータである。 x はロータの変位、 \dot{x} は速度である。 $x\dot{x} > 0$ の状態はロータ

が外側にぶれているときであり、この場合はバイアス電流を大きくして、逆の場合は小さくして振動を抑制する。

4 反復学習制御

ILC は前のサイクルの入力電流の情報をとりいれて現在のサイクルの入力電流を抑えるために用いる。今研究では文献 [3] を参考にして制御則の式を

$$u = Kx + i_{ALC}$$

とした。ここで u は入力電流、 K は LQ 最適制御の制御ゲイン、 x は状態変数であるロータの変位、 i_{ALC} は反復学習制御則の式である i_{ALC} を式 (11) に示す。

$$i_{ALC,j+1}(n) = (1 - \alpha)i_j(n) + \Phi \cdot e_j(n) \quad (11)$$

ここで j はサイクルの番号を表しており、 n は刻み幅の値、 Φ はスカラーの学習ゲイン、 α は AMB のモデリングではシステムのパラメータが考慮されない場合が多々あるのでロバスト性を高めるための忘却因子である。 $e_j(n)$ はシステムの目標値と出力の差を表しており y_d は目標値、 y_j は出力の値で式 (12) と求められる。

$$e_j(n) = y_d(n) - y_j(n) \quad (12)$$

5 シミュレーション

LQ 最適制御、剛性切換制御、反復学習制御と組み合わせてシミュレーションを行った。ロータが左鉛直成分に 0.0001 m 下降しており、右鉛直成分に 0.0001 m 上昇しており、左水平成分が 0.0002 m 左にずれて、右水平成分が 0.0002 m 右にずれて停止した状態から行った。代表して g_{rv}, g_{lh} の 2 つの成分の結果を図 2,3 に示す。緑線が LQ 制御単体、赤線が剛性切換制御、青線が反復学習制御の結果である。青線が緑、赤線に比べて早く平衡になっているとわかる。

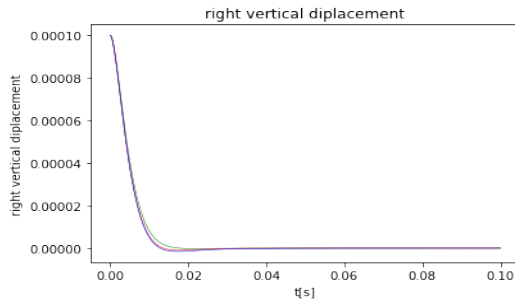


図 2 右鉛直成分の変位のグラフ

6 おわりに

制御性能は LQ 最適制御単体よりも僅かながら早く制御できており効果を確認できた。今後の課題としてモデルが鉛直成分と水平成分の力が独立してしまっているため電磁

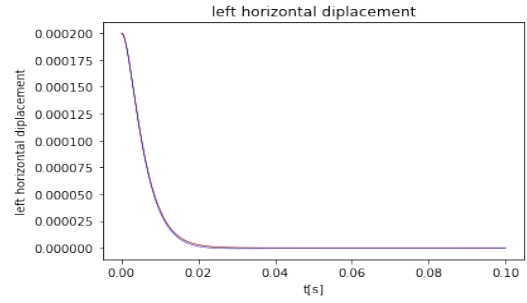


図 3 左水平成分の変位のグラフ

力の吸引力を sin, cos で分解した以下の式 (13),(14) を用いて有効性を検証したい。

$$f_v = k_m \left(\frac{g_v - G_o}{\sqrt{(g_v - G_o)^2 + g_h^2}} \frac{(I_o + (I_v + i_v))^2}{\sqrt{(g_v - G_o)^2 + g_h^2}} - \frac{g_v + G_o}{\sqrt{(g_v + G_o)^2 + g_h^2}} \frac{(I_o - (I_v + i_v))^2}{\sqrt{(g_v + G_o)^2 + g_h^2}} + \frac{g_v}{\sqrt{g_v^2 + (g_h - G_o)^2}} \frac{(I_o + (I_h + i_h))^2}{\sqrt{g_v^2 + (g_h - G_o)^2}} + \frac{g_v}{\sqrt{g_v^2 + (g_h + G_o)^2}} \frac{(I_o - (I_h + i_h))^2}{\sqrt{g_v^2 + (g_h + G_o)^2}} \right) \quad (13)$$

$$f_h = k_m \left(\frac{g_h}{\sqrt{(g_v - G_o)^2 + g_h^2}} \frac{(I_o + (I_v + i_v))^2}{\sqrt{(g_v - G_o)^2 + g_h^2}} + \frac{g_h}{\sqrt{(g_v + G_o)^2 + g_h^2}} \frac{(I_o - (I_v + i_v))^2}{\sqrt{(g_v + G_o)^2 + g_h^2}} + \frac{g_h - G_o}{\sqrt{g_v^2 + (g_h - G_o)^2}} \frac{(I_o + (I_h + i_h))^2}{\sqrt{g_v^2 + (g_h - G_o)^2}} - \frac{g_h + G_o}{\sqrt{g_v^2 + (g_h + G_o)^2}} \frac{(I_o - (I_h + i_h))^2}{\sqrt{g_v^2 + (g_h + G_o)^2}} \right) \quad (14)$$

参考文献

- [1] 電気学会編, "磁気浮上と磁気軸受," コロナ社, 1993.
- [2] 水野 毅, Asief JAVED, 石野 裕二, 高崎 正也, "吸引式磁気浮上系における横ずれ方向の制振制御," 日本機械学会論文集, 83 巻, 854 号, p.17-00217, 2017.
- [3] Chao Bi, Dezheng Wu, Quan Jiang and Zhejie Liu, "Automatic learning control for unbalance compensation in active magnetic bearings," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 7, pp. 2270-2280, 2005.
- [4] Masanori NARITA, "Gain-Scheduled Control of Active Magnetic Bearing System via Parameter Dependent Lyapunov Function," 南山大学大学院 理工学研究科 2015 年度 修士論文要旨集, 機械電子制御工学専攻.