

粒子フィルタを用いたボールスクリーシステムに対する摩擦補償

2014SC074 鈴木良彦

指導教員：高見勲

1 はじめに

ボールスクリー (BS) システムは、モータの回転運動を直線運動に変換するもので、ロボット、工作機械などに用いられている。非線形摩擦は、BS システムの位置決め精度を劣化させる主な要因である。本研究では、時間や環境によって変化する摩擦をリアルタイムで推定し、摩擦補償を行う位置決め制御の手法を提案する。計算量の多い粒子フィルタ (PF)[1] と、少ないパラメータで摩擦を表現する LuGre モデル [2] を組み合わせることで、リアルタイム性と高い推定精度を両立させることを考える。実験により、提案法の有用性を示す。

2 モデリング

本章では、BS システムと非線形摩擦のモデリングについて述べる。

2.1 ボールスクリーシステムのモデリング

BS システムは、モータの回転運動を直線運動に変換し、テーブルを動かすものである。テーブルの変位を x_p 、モータの回転角度を θ 、モータの生成トルクを T 、テーブルの質量を M 、回転系の全慣性モーメントを J_θ 、粘性摩擦係数を σ_2 、直線運動と回転運動との変換係数を R 、BS の軸方向剛性を K 、非線形摩擦を F_{nl} とする。BS の性質から $R\theta = x_p$ となる。状態変数を $x = [\theta \ \dot{\theta}]^T$ 、入力を $u = T$ として、BS システムの状態空間表現は式 (1) で表される。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu - BRF_{nl} \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{R^2\sigma_2}{J_\theta + R^2M} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0]$$

2.2 LuGre モデル

本研究では、非線形摩擦のモデル化に LuGre モデル [2] を用いる。LuGre モデルは、摺動面を剛毛の集まりとして捉え、剛毛の剛性と粘性により摩擦を表現する。非線形摩擦特性を少ないパラメータで表現できる摩擦モデルである。LuGre モデルの数式表現を式 (2), (3), (4) に示す。

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 R\dot{\theta} \quad (2)$$

$$\dot{z} = R\dot{\theta} - \sigma_0 \frac{R|\dot{\theta}|}{g(\dot{\theta})} z \quad (3)$$

$$g(\dot{\theta}) = \text{sgn}(\dot{\theta})(F_c + (F_s - F_c) \exp(-\frac{R|\dot{\theta}|}{v_s})) \quad (4)$$

ここで、 z は剛毛の変位、 σ_0 は剛毛のばね係数、 σ_1 は剛毛のダンパ係数、 F_c はクーロン摩擦、 F_s は静止摩擦、 v_s は Stribeck 速度である。式 (2) の第 1 項、第 2 項は非線形摩

擦 F_{nl} を表し、第 3 項は粘性摩擦を表している。式 (3) は剛毛のダイナミクス、関数 $g(\dot{\theta})$ は摩擦の静的特性を表す。

3 粒子フィルタを用いた摩擦補償

本章では、PF[1] を用いて非線形摩擦をリアルタイムで推定し、補償する手法について述べる。

3.1 粒子フィルタ

PF は、粒子 (実現値) と重み (尤度) によって状態の分布を近似し状態を推定する手法の 1 つである。十分な量の粒子を用いた場合、非線形カルマンフィルタの一種である unscented Kalman filter(UKF) よりも、分布の近似精度は高い [3]。この PF を用いて非線形摩擦 F_{nl} を推定する。

3.2 推定する状態変数

摩擦の推定に用いる式の導出を行う。剛毛の変位 z と、 F_s 、 F_c 、 v_s を推定することを考える。まず、式 (3) をサンプリングタイム T_s で離散化し、その結果を式 (5) に示す。

$$\begin{aligned} z(k+1) &= \exp(-\frac{\sigma_0 R|\dot{\theta}(k)|}{g(\dot{\theta}(k))} T_s) z(k) \\ &+ \{1 - \exp(-\frac{\sigma_0 R|\dot{\theta}(k)|}{g(\dot{\theta}(k))} T_s)\} \frac{g(\dot{\theta}(k))}{\sigma_0} \text{sgn}(\dot{\theta}(k)) \\ &= f_z(\dot{\theta}(k), z(k), g(\dot{\theta}(k))) \end{aligned} \quad (5)$$

PF の特徴として、推定する状態の次元が増加するとともに、計算量が指数関数的に増加する。摩擦の変動による不確定性を有する F_s 、 F_c 、 v_s をそれぞれ推定するのではなく、式 (4) の $g(\dot{\theta})$ を未知パラメータ g_p として扱い推定することで計算量の削減を図る [4]。式 (1)、式 (5) から、推定に用いる式 (6) が得られる。状態変数は $\hat{x}_L(k) = [\hat{x}_1(k) \ \hat{x}_2(k) \ \hat{x}_3(k) \ \hat{x}_4(k)]^T = [\hat{\theta}(k) \ \hat{\dot{\theta}}(k) \ \hat{z}(k) \ \hat{g}_p(k)]^T$ 、 $u(k)$ は入力、 $\hat{y}_L(k)$ は出力、 $\tilde{w}(k) \sim N(0, \tilde{Q})$ 、 $\tilde{v}(k) \sim N(0, \tilde{R})$ はそれぞれ仮定したシステムノイズ、観測ノイズである。

$$\begin{cases} \hat{x}_L(k+1) = f(\hat{x}_L(k), u(k)) + \tilde{w}(k) \\ \hat{y}_L(k) = h(\hat{x}_L(k)) + \tilde{v}(k) \end{cases} \quad (6)$$

$$f(\hat{x}_L(k), u(k)) = \begin{bmatrix} A_d \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \end{bmatrix} + B_d(u(k) - R\hat{F}_{nl}) \\ f_z(\hat{x}_2(k), \hat{x}_3(k), \hat{x}_4(k)) \\ \hat{x}_4(k) \end{bmatrix}$$

$$h(\hat{x}_L(k)) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \hat{x}_L(k)$$

$$A_d = e^{AT_s}, B_d = \int_0^{T_s} e^{A\tau} B d\tau$$

$$\hat{F}_{nl} = \sigma_1 R \hat{x}_2(k) + (\sigma_0 - \sigma_1 \frac{\sigma_0 R |\hat{x}_2(k)|}{\hat{x}_4(k)}) \hat{x}_3(k)$$

PF を用いて状態 x_L と非線形摩擦 F_{nl} を推定する。

3.3 制御系

制御偏差の積分を状態変数に追加した拡大系に対し、離散時間最適レギュレータ (DLQ) を構築し位置決め制御を行う。PF を用いて推定した非線形摩擦 \hat{F}_{nl} によって、BS システムに加わる非線形摩擦 F_{nl} をキャンセルする。

4 実験結果

直径 0.1[mm] の円軌道を描く実験を行った。DLQ のみで制御した場合を“DLQ”，DLQ に加えて UKF による摩擦補償をした場合を“DLQ と UKF”，PF による摩擦補償をした場合を“DLQ と PF”と表記する。図 1 に実験結果を示す。水平軸は A 軸方向のテーブルの変位、鉛直軸は

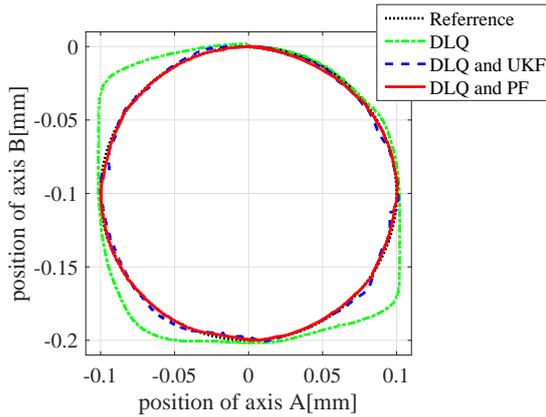


図 1 experiment results

B 軸方向のテーブルの変位である。点線が目標とする円軌道、一点鎖線が“DLQ”，破線が“DLQ と UKF”，実線が“DLQ と PF”のテーブルの軌道を表している。“DLQ”では象限突起が発生している。“DLQ と UKF”では、象限突起は解消されているが円の一部が欠けた軌道を描く。“DLQ と PF”では、より真円に近い軌道を描いている。目標とする円軌道との誤差を図 2 に示す。水平軸は時間、鉛直軸はテーブルが描く軌道と、目標とする円軌道との誤差である。位置決め精度は、“DLQ と PF”が一番高いことが分かる。“DLQ と UKF”，“DLQ と PF”の非線形摩擦の推定値 \hat{F}_{nl} を、図 3 に示す。水平軸は時間、鉛直軸は非線形摩擦の推定値である。摩擦の正負反転時において、UKF による推定値にはオーバーシュートが見られるが、PF の推定値には見られない。この正負反転時の推定精度の高さが、位置決め精度の高さに影響していると考えられる。

5 まとめ

本研究では、BS システムに対する、PF を用いたリアルタイム状態推定、摩擦推定の手法を提案した。LuGre モデルを用いて摩擦をモデル化し、少ないパラメータによって非線形摩擦を表現することで、PF の計算量の削減、推定精度の向上を図った。PF をリアルタイムで用いることで、不確実性を有する非線形摩擦を正確に推定し補償する手法を提案した。実験を行い、提案法の有用性を検証した。

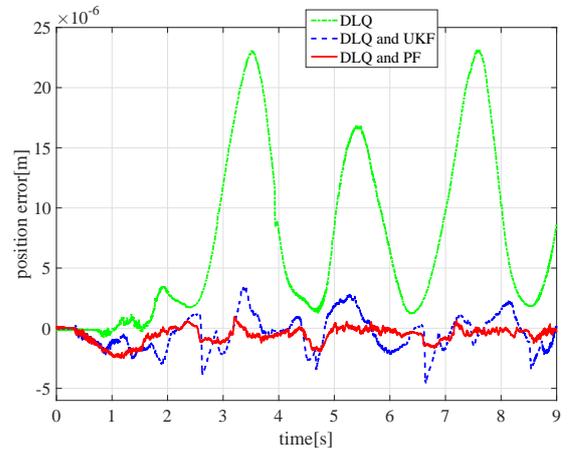


図 2 Tracking error

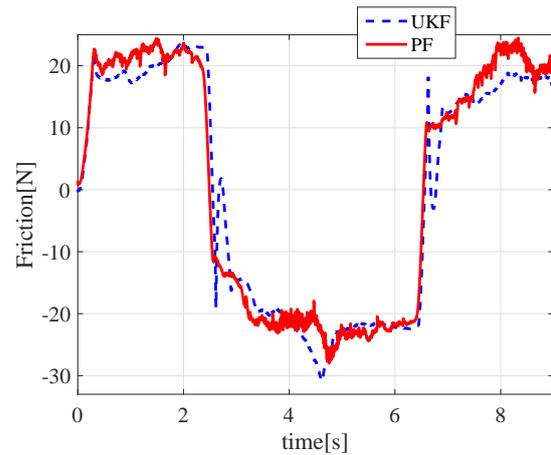


図 3 Nonlinear Friction

参考文献

- [1] G. Kitagawa, “A Monte Carlo Filtering and Smoothing Method for Non-Gaussian Nonlinear State Space Models”, Proceedings of the 2nd U.S.-Japan Joint Seminar on Statistical Time Series Analysis, pp. 25-29 (1993)
- [2] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K.J. Åström and P. Lischinsky, “A New Model for Control of Systems with Friction”, IEEE Transactions on Automatic and Control, Vol. 40, No. 3, pp. 419-425 (1995)
- [3] Nevena Stevanović, Peter L Green, Keith Worden and Poul Henning Kirkegaard, Friction estimation in wind turbine blade bearings, Structural Control and Health Monitoring, Vol. 23, pp. 103-122 (2016)
- [4] Jun'ya Fukui, Takayuki Yamamoto, Gan Chen and Isao Takami, “Real-time Identification and Compensation of Asymmetric Friction Using Unscented Kalman Filter”, IEEE Conference on Control Technology and Applications, pp. 1085-1090 (2017)