

# 外乱オブザーバを用いたボールスクリーシステムの摩擦補償

2006MI083 近藤忠文

指導教員：高見勲

## 1 はじめに

工作機械に代表されるメカトロニクス機器では、位置決め制御の高速高精度化は今なお進められている。近年の精度認識では、超精密位置決め精度の基準を  $10^{-7}m$  以下とする調査結果が出ている。しかし、摩擦などの影響により位置決め性能が劣化してしまう。また、企業においては、高速化、高精度化と並んで重要と考えられるものが低コスト化である [1]。ボールスクリーシステムは効率のいい位置決め駆動系として広く利用されている。しかし、摩擦の影響により、位置決め精度の劣化が問題となり、それを補償することが精密位置決め鍵であると考えられる。PID 制御は、比例ゲイン、微分時間、積分時間の3つを調整するだけで十分な制御性能を得られる制御手法として広く使われている [2]。

本研究の目的は、I-P 制御を用いたボールスクリーシステムの制御系設計を行う。その後、非線形摩擦を補償するために外乱オブザーバを用いることで、さらに高速高精度の制御を目指す。

## 2 制御対象のモデリング

### 2.1 ボールスクリー

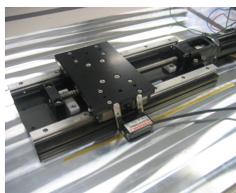


図1 ボールスクリーシステム

本研究では、図1のボールスクリーシステムを制御対象として制御系設計を行う。このシステムは、モータに繋がれたスクリーが回転することにより回転運動を直進運動に変換し、テーブルの位置を動かすものである。ボールスクリーシステムの力学モデルは図2である。 $K_t$ をモータのトルク定数 [Nm/A]、 $J$ を回転系全慣性モーメント [Nms<sup>2</sup>]、 $K$ を直線系ばね定数 [N/m]、 $C$ を直線系粘性係数 [Ns/m]、 $M$ をテーブル質量 [kg]、 $R$ をボールねじ定数 [m/rad] とする。モータへの入力電流  $i$  を操作量とし、テーブルの位置を制御量とする。また、テーブル周りの摩擦を  $F$  で与える [N・m]。モータ角を  $\theta$ 、テーブルの変位を  $x$  とする。モータに関する運動方程式は以下のように表わされる。

$$J\ddot{\theta} = K_t i - RK(R\theta - x) \quad (1)$$

また、テーブルに関する運動方程式は以下に表される。

$$M\ddot{x} = K(R\theta - x) - C\dot{x} - F \quad (2)$$

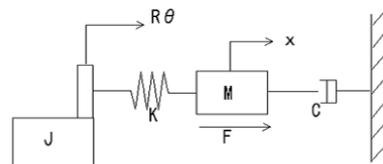


図2 簡易モデル

### 2.2 非線形摩擦

摩擦トルクは静止摩擦  $F_{static}$ 、クーロン摩擦  $F_{dynamic}$ 、粘性摩擦  $F_{viscous}$  からなる。最大静止摩擦力を  $f_s$ 、クーロン摩擦力を  $f_d$ 、粘性摩擦力を  $f_v$ 、符号関数を  $sgn(\cdot)$  とする。摩擦力と速度には図3の関係が成り立つ。 $u$  を制

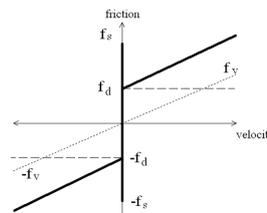


図3 摩擦モデル

御入力、 $v$  をテーブル速度とおく。摩擦  $F$  は以下の式で表わされる。

$$F = F_{static} + F_{dynamic} + F_{viscous} \quad (3)$$

$F_{static}$ 、 $F_{dynamic}$ 、 $F_{viscous}$  はそれぞれ以下の式で与えられる。

$$F_{static} = \begin{cases} \min(|u|, f_s) & v = 0 \\ 0 & v \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{dynamic} = f_d sgn(v) \quad (5)$$

$$F_{viscous} = f_v v \quad (6)$$

$F_{static}$  は  $u$  が  $f_s$  を超えて動き出すまではトルクと摩擦力が釣り合っていることを意味する。

## 3 位置決め制御系設計

### 3.1 I-P コントローラ

はじめにPID コントローラを用いて制御系設計を行ったが、微分項の影響やセットポイントキックなどを考慮し、I-P コントローラを用いて制御系設計を行う。I-P 制御は積分を直接制御量に施し、比例を制御偏差に施すものである。これにより、目標値にステップ入力を加えた場合に発生するセットポイントキックを抑えることがで

きる。さらに、このことは安定性や外乱抑制に影響がないという利点がある [2]。

### 3.2 外乱オブザーバ

精密位置決め制御を行う上で最も重要だと言えるのが摩擦の補償である。そこで、摩擦を補償する外乱オブザーバを設計する。状態空間表現に摩擦を追加した拡大系を用いて摩擦を推定し、補償入力を制御入力に付加することで摩擦補償を行う。システムの逆システムを利用する手法なども存在するが、逆システムには多くの微分項が存在することになり、安定性に与える影響が大きいと考えられる [3]。テーブルの状態空間表現より、以下の行列が得られる。

$$X = \begin{bmatrix} x & \dot{x} & \hat{F} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{C}{M} & -\frac{1}{M} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_t}{RM} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & g_3 \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

オブザーバゲインの決定はアッカーマンの極配置の双対問題である  $(A - GC)$  を解くことで得られる。システムの極を  $q_1, q_2, q_3$  とおく。計算すると、以下の数式が得られる。

$$g_1 = -(q_1 + q_2 + q_3) - \frac{C}{M} \quad (12)$$

$$g_2 = q_1 q_2 + q_2 q_3 + q_3 q_1 - g_1 \frac{C}{M} \quad (13)$$

$$g_3 = M q_1 q_2 q_3 \quad (14)$$

シミュレーションを通して特性を調べた結果、極を原点から遠くすることで遅れの少ない推定を行うことができるが、遠すぎるとノイズなどの変動に弱くなってしまうことが分かった。よって、 $q_1 = q_2 = q_3 = -150$  と定める。外乱オブザーバの構成を図 4 に表す。さらに、フィ

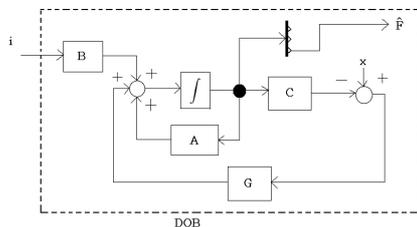


図 4 外乱オブザーバ

ルタ  $Q(s)$  を用いて遅れを緩和する。フィルタの次元は低次元であることが望ましいので [3]、1次元での設計を行う。実験を通してパラメータを調整し、 $Q(s)$  を以下に設定する。

$$Q(s) = \frac{0.011s + 1}{0.005s + 1} \quad (15)$$

シミュレーションによる推定摩擦と摩擦モデルの出力を図 5 に表す。不規則に振動する摩擦を推定している。ま

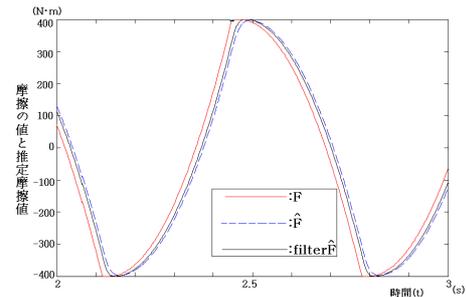


図 5 摩擦波形

た、フィルタにより遅れが緩和されていることが分かる。

## 4 実験

目標値を  $10^{-5}m$  として実験を行う。比例ゲイン  $K_p$  を 120000、微分ゲイン  $K_i$  を 1000000 とする。実験結果を図 6、7 に表す。オーバーシュートがなくなり、制御性

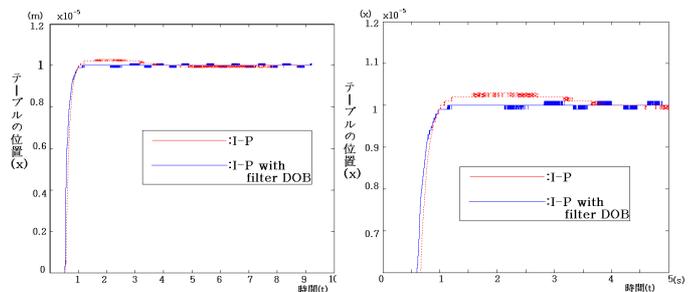


図 6 実験結果

図 7 拡大図

能が向上している。振動が確認されているが、振幅がセンサの限界である  $10^{-7}m$  以下であるため、十分制御できていると言える。外乱オブザーバによる摩擦補償の効果が実証できた。

## 5 おわりに

I-P コントローラと外乱オブザーバを用いることで、高速、高精度な位置決め制御を行うことができた。しかし、本研究では、ねじとボールの間に発生する転がり摩擦などを無視している。今後の課題として、これらの摩擦を正確に計測し、モデル化することが望ましい。

## 参考文献

- [1] 大塚二郎：『位置決め制御技術の現状と動向』，計測と制御，41-11，769/774(2004) Sensors』，電気学会論文誌 D,126-4,400/404(2006)
- [2] 高見勲：『外乱応答指定 2 自由度 IPD 制御系の設計』，南山学会，アカデミア・数理情報編，04，077/092(2004)
- [3] 浅野良，高見勲：『非線形摩擦を考慮した送り駆動系に対する位置決め制御』，南山大学修士論文 (2010)