

二自由度制御系を用いた位置決め制御

2010SE271 山本隆之

指導教員：高見勲

1 はじめに

本研究では過去に提案されたシステムに対して、モデルマッチング問題によって設計したフィードフォワード制御器を付加し二自由度制御系を構成することで速応性を改善する。しかし、モデルマッチング問題においては適切な軌道設定が重要になってくる。本研究では摩擦モデルに着目して軌道設定を行い二自由度制御系を構成することで既存のシステムよりも速い速応性を達成した。

2 モデリング

2.1 送りねじ位置決め機構

送りねじ位置決め機構はモータとカップリングで繋がれたスクリューが回転をすることでナットの部分にボールが転がり、回転運動を直線運動に変換し、テーブルの位置を動かすものである。

モータの角を $\theta(t)$ [rad]、テーブルの変位を $y(t)$ [m] とし、電力指令値を $u(t) = i(t)$ [A] とすると、モータに関する運動方程式は、

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

となり、テーブルに関する運動方程式は、

$$M\ddot{y}(t) = K(R\theta(t) - y(t)) - F_v \dot{y}(t) - F \quad (2)$$

となる。 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 [Nms²]、 K を直線系バネ定数 [N/m]、 M をテーブルの質量 [Kg]、 F_v を直線系の粘性摩擦係数 [Ns/m]、 R をボールねじ定数、 F を摩擦による外乱 [N] とする。摩擦による外乱については後述にてモデル化し、シミュレーションにおいてモデルに加える。

ここでテーブルの運動に比べ、モータの運動が速いことから回転運動の遅れを無視することで以下の式を得る。

$$M\ddot{y}(t) + F_v \dot{y}(t) = \frac{K_t}{R} i(t) \quad (3)$$

また、 $x(t)^T = \begin{bmatrix} y(t) & \dot{y}(t) \end{bmatrix}$ とすると、状態空間表現は

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{F_v}{M} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_t}{RM} \end{bmatrix} u(t) \quad (4)$$

となる。

2.2 非線形摩擦のモデル化

本実験で扱う送りねじ位置決め機構は、テーブルとボールねじ部の接触面において非線形摩擦が発生し、位置決め性能を劣化させている。このため、高精度な位置決め制御を実現するためには、非線形な摩擦モデルをシミュレータ内に組込み、制御器設計を行う必要がある。そこで本実験では摩擦モデルとしてストライベック効果を組み込んだ非線形摩擦モデルである Tustin モデルを用いる。このモデルは最大

静止摩擦から指数関数的な過渡状態であるストライベック効果を経て、クーロン摩擦と粘性摩擦が支配的な動摩擦領域へ移行する非線形摩擦モデルである。Tustin モデルを表した式を式 (5)、モデルを図 1 に示す。

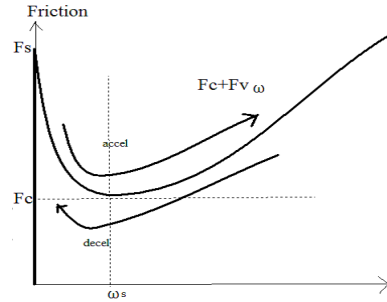


図 1 Tustin 摩擦モデル

$$F_n = (F_c + (F_s - F_c)e^{\frac{|\omega|}{\omega_s}}) \times \text{sgn}(\omega) + F_v \omega \quad (5)$$

ここで、 ω をテーブル速度、 ω_s をストライベック速度、 F_s を最大静止摩擦力、 F_c をクーロン摩擦力、 F_v を粘性摩擦係数、 $\text{sgn}(\cdot)$ を符号関数とする。本実験ではこのモデルをシミュレーションに組込んだ。

3 制御系設計

3.1 フィードバック制御器の設計

本研究では既存のフィードバック制御器として最適レギュレータと外乱オブザーバを組み合わせた制御器を採用した。最適レギュレータによって動摩擦を補償し、外乱オブザーバによってクーロン摩擦を推定する。この制御器は、目標値に収束するのに 15 秒近く掛かり、速応性が低い制御器である。

3.2 モデルマッチング問題によるフィードバック制御器の作成

軌跡追従形制御によるフィードフォワード制御器を作成する。二自由度制御系の基本構成は図 2 のようになる。図 2

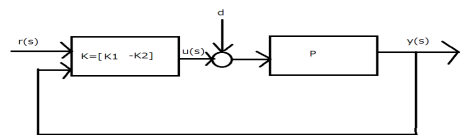


図 2 二自由度制御系の基本形

より、入力は次のようになる。

$$u(s) = \begin{bmatrix} K1(s) & -K2(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(s) \\ y(s) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= K1(s)r(s) - K2(s)y(s) \quad (7)$$

ここで、目標値応答特性を考慮する。図 2 より、

$$\begin{aligned} y(s) &= P(s)(u(s) + d) \\ &= P(s)(K1(s)r(s) - K2(s)y(s)) + P(s)d \end{aligned} \quad (8)$$

$$y(s) = \frac{P(s)K1(s)}{1 + P(s)K2(s)}r(s) + \frac{P(s)}{1 + P(s)K2(s)}d \quad (9)$$

となるので、

$$\frac{P(s)K1(s)}{1 + P(s)K2(s)} = G_m(s) \quad (10)$$

とする。上式より、

$$K1(s) = (P(s)^{-1} + K2(s))G_m(s) \quad (11)$$

となるので、目標軌道 $G_m(s)$ を適切に設定すればフィードフォワード制御器を作成できる。本実験で使用するブロック線図を図 3 に示す。

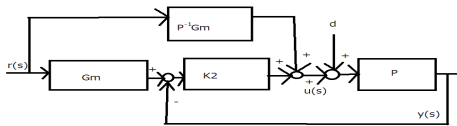


図 3 二自由度制御系シミュレーションモデル

3.3 目標軌道の設計

目標値軌道 $G_m(s)$ を適切に設定することで、二自由度制御系を設計することが出来る。本実験では摩擦モデルに着目して軌道を作成する。摩擦に関しては、モデルより静止時から動作に移るとき、静止摩擦の影響が大きいと言える。よって軌道在设计する際考慮するポイントは次の通りである。

- 静止摩擦の影響をなるべく早めに抜け出せるように加速度を上げる。
- その後は目標値に収束するようにする。

以上の二点を考慮し、目標軌道在设计した。目標軌道としては図 4 を用いた。このような軌道在设计するために用いた

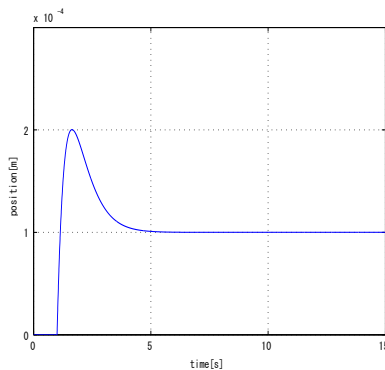


図 4 目標軌道

$G_m(s)$ は試行錯誤により次式のようにになった。

$$G_m(s) = \frac{\omega_n^2 \times (2.3s + 1)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n} \quad (12)$$

ただし、 $\omega = 2, \zeta = 1$ とした。

4 実験結果

二自由度制御系における実験結果とシミュレーションの比較を示す。目標値関数 $r(s)$ はステップ関数で目標値 1.0×10^{-4} とし、ステップ開始時間は 1 秒とした。出力は大体シミュレーションと一致している。つぎに、従来のフィー

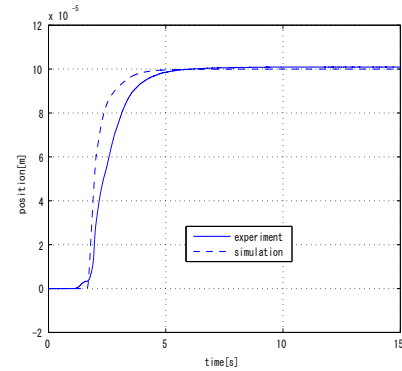


図 5 出力における実験結果とシミュレーションの比較

ドバック制御器のみの場合と、二自由度制御系の場合の実験結果を示す。確かに、速応性を改善している。

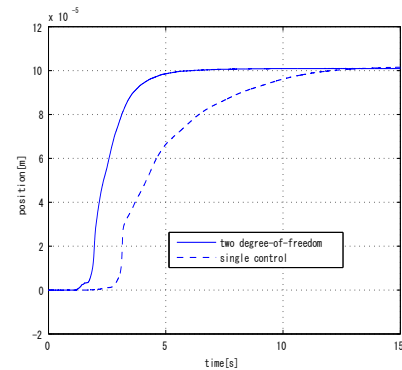


図 6 従来法と二自由度制御系の出力比較

5 おわりに

本実験では、二自由度制御系によって既存のシステムの速応性を改善した。しかし、試行錯誤による規範モデルの決定に時間がかかってしまった。故に、より理論的に軌道を決するシステムを作成することが今後の課題である。

参考文献

- [1] 安田 晴香: 最適レギュレータによるボールスクリーンの位置決め制御, 南山大学, 愛知, 2013
- [2] 石川 信行, 鈴木 勝男: 2 自由度制御器の原子力制御への応用, 日本原子力研究所, 茨木, 1996