

### 3. スリップ負荷を伴う DC モータの適応制御

発表者：3AEEM013 河住紀生

指導教員：落合康住教授

平田弘志助教授

#### Adaptive control of DC motor with load slip

**Abstract:** The adaptive control strategy for DC motor with the slip in the torque transmission of the rotational part is proposed. DC motor is adaptively controlled by introducing the disturbance observer, even if the slip ratio and the momentum of inertia changes greatly. It is verified by the practical DC motor control system that the proposed approach is useful in the auto-tuning of the motor system.

#### 1. はじめに

電気自動車等の乗り物ではすべりやすい路面などで急発進・急制動等によってタイヤと路面の間でスリップが生じる。この際によく用いられるのがトラクションコントロールでスリップ率を適正な範囲におさめるような制御方策が報告されている<sup>1)</sup>。そこで本研究では、負荷部分にスリップが発生するような DC モータ実験セットを使用し、スリップ率や慣性モーメントが未知でも外乱オブザーバを用いた適応制御によりスリップ抑制可能な制御法を提案する。

対象の慣性モーメントとスリップに相当する外乱を未知とし、外乱オブザーバを構成して慣性モーメントと外乱の逐次推定を検証した。この結果、DC モータは外乱オブザーバを用いることで、スリップ率と慣性モーメントが大きく変化しても適応制御できることが判明した。

#### 2. 制御システム

Fig.1 の制御システムはモータ部に電流帰還によるトルク制御を実施している。また外乱オブザーバを付加し、モータ慣性の推定により、外乱オブザーバを逐次的に調整可能な構成にしている。この外乱推定を用いて負荷側の速度を推定し、モータ側の速度と偏差を低減するような制御を実施する。

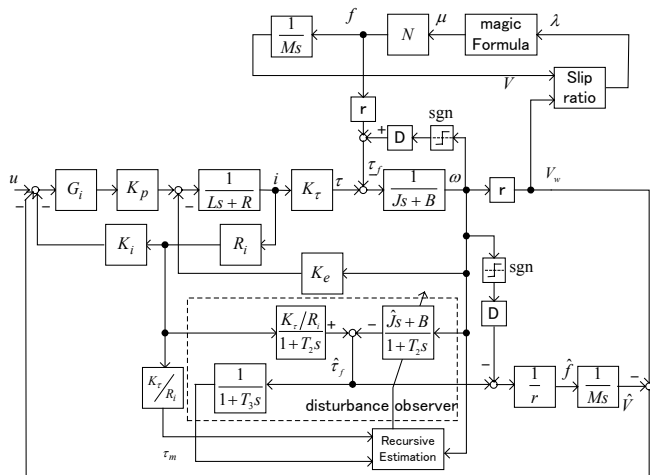


Fig.1 適応制御システム

#### 3. 外乱オブザーバの導入

スリップを1つの外乱変数とみなし、外乱オブザーバで推定し外乱の除去を行う。外乱オブザーバの構成を Fig.1 の点線内に示す。入力トルク  $\tau_m$  と DC モータの回転速度  $\omega$  を入力とし、外乱の推定を行う。 $J$  は逐次推定された慣性モーメントの推定値、 $B$  は粘性摩擦である。

#### 4. 逐次パラメータ推定<sup>2)</sup>

次に外乱オブザーバに必要なパラメータを推定する。まず、DC モータの運動方程式を式(1)に示す。

$$J\dot{\omega} + B\omega = K_t i - \tau_f \quad (1)$$

パラメータ推定の為に式(1)を以下の線形関係式に分解する。

$$\tau(t) = \varphi^T(t)\theta(t) + \tau_f \quad (2)$$

計測ベクトル  $\varphi$  と基本パラメータ  $\theta$  は次式になる。

$$\varphi = [\dot{\omega} \quad \omega]^T, \quad \theta = [J \quad B]^T \quad (3)$$

推定モデルは式(4)のように定義される。ここで、 $\hat{\theta}(t)$  は推定値を表し、 $y(t)$  は推定モデルの出力を表す。また、 $\varphi(t)$  は計測時間毎の運動データに基づいて構成されるベクトルである。

$$y(t) = \varphi^T(t) \hat{\theta}(t) \quad (4)$$

このとき、運動データの獲得<sup>3)</sup>を Fig. 2 に示す構成で実施する。ここで、入力トルク  $\tau_m$  と DC モータの回転速度  $\omega$  はそれぞれ電流検出器と光学式エンコーダにより計測され、推定に必要な各運動データは式(5)のフィルタ出力により得られる。

$$\begin{cases} \tau_a = G_0 \tau_m \\ \omega_a = G_0 \omega \\ \dot{\omega}_a = G_1 \omega \end{cases}, \quad G_0 = \frac{1}{(1+T_1s)^2}, \quad G_1 = sG_0 \quad (5)$$

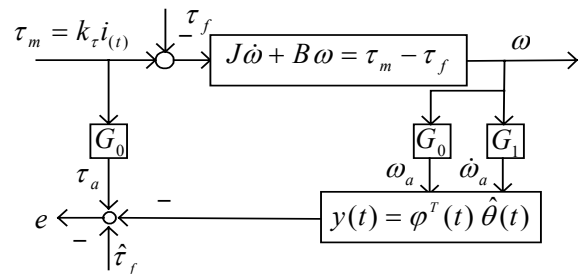


Fig. 2 センサ特性の補償

式(5)を用いて以下のような逐次最小2乗推定則<sup>4)</sup>を適用する。

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{P(t-1)\varphi(t)}{1 + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} \varepsilon(t) \quad (6)$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda(t)} \left\{ P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda(t) + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} \right\} \quad (7)$$

$$\varepsilon(t) = \tau_m(t) - \varphi^T(t)\theta(t-1) - \hat{\tau}_f \quad (8)$$

$$\lambda(t) = (1 - \mu)\lambda(t-1) + \mu, \quad (\mu = 0.01) \quad (9)$$

#### 5. 適応制御系の構成

外乱オブザーバを併用することで有用な制御系になる。しかし、慣性モーメントが未知の場合、オブザーバ部が適当な値では制御性能が劣化する。そこで、Fig. 1 に示すような逐次推定の結果を有効に活用した適応制御系を提案する。この系は逐次推定機構により未知の慣性モーメント等を常に、監視可能である。DC モータの状況変化に応じて、随時外乱オブザーバを更新することが可能である。

## 6. 負荷側のモデル

スリップを再現するためには負荷側の速度  $V$  が必要になる。負荷側の速度の推定値  $\hat{V}$  は駆動力  $f$  と車体の運動方程式により算出される。駆動力  $f$  はスリップ率  $\lambda$  を求め、Magic Formula<sup>5)</sup>により摩擦係数  $\mu$  を求め、抗力  $N$  を介して算出される。車体重量を  $M$ 、車輪速度を  $V_w$ 、車体速度を  $V$  として車体の運動方程式を式(9)、スリップ率  $\lambda$  を式(10)、Magic Formula を式(11)に示す。

$$M \frac{dV}{dt} = f \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{V_w - V}{V_w} \quad (\text{駆動時}) \quad , \quad \lambda = \frac{V_w - V}{V} \quad (\text{制動時}) \quad (10)$$

$$\mu(\lambda) = D \sin \left[ C \tan^{-1} \left\{ (1-E)\lambda + \frac{E}{B} \tan^{-1} B\lambda \right\} \right] \quad (11)$$

ただし、 $B=26.66$ ,  $C=1.4$ ,  $D=0.24$ ,  $E=0.4$  (snow) とする。

## 7. シミュレーション

シミュレーション条件として Fig.1 のそれぞれの値を Table 1 に示す。入力はステップ入力  $0.3[\text{V}]$ 、サンプリング時間を  $1[\text{ms}]$ 、データ数を  $5000$  点、この条件でシミュレーションを行った。まず、慣性モーメントの推定値  $\hat{J}$  を  $0$  とし始め、随時外乱オブザーバの慣性モーメントの推定値  $\hat{J}$  を変化させる。また、粘性摩擦はシミュレーション結果よりある程度の誤差があったとしても推定結果や外乱推定結果に影響がなかったため Table 1 の粘性摩擦の値を固定値とした。

Table 1 シミュレーションの条件

慣性モーメント	$J = 4\text{E}-5$	$[\text{kgm}^2]$
粘性摩擦	$B = 2.481\text{E}-5$	$[\text{Nms}]$
電機子インダクタンス	$L = 6$	$[\text{mH}]$
電機子抵抗	$R = 4.5$	$[\Omega]$
検出抵抗	$R_f = 0.2$	$[\Omega]$
逆起電力定数	$K_e = 0.07162$	$[\text{V sec/rad}]$
トルク定数	$K_t = 0.07154$	$[\text{Nm/A}]$
パワーアンプ・電流アンプ	$G_i \cdot K_p = \frac{50}{1+0.01s}$	
観測ノイズ	$\sigma = 1\text{E}-6$	$[\text{V}]$

開ループ時および閉ループ時のシミュレーション結果として、Fig.3 から Fig.4 はそれぞれの応答を示している。Fig.3 は速度偏差を帰還していない開ループ時の DC モータの回転速度であり、スリップしていることがわかる。Fig.4 は速度偏差を帰還した閉ループ時の DC モータの回転速度である。Fig.3 と Fig.4 を比較するとスリップ抑制されていることがわかる。

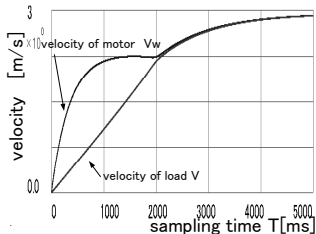


Fig.3 回転速度

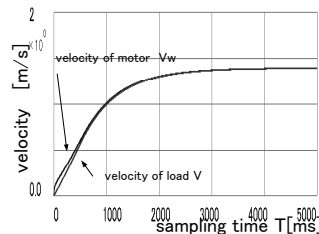


Fig.4 回転速度

## 7. 実験

本研究では Fig.5 の DC モータ実験セットを使用する。手前がモータ側の回転体であり、ベルトを介して負荷側の回転体を配置している。この機構により、モータ側の回転体とベル

トの間でスリップが生じる。本実験では Fig.1 の外乱オブザーバの慣性モーメントを推定機構により調整する。また、それぞれ慣性モーメントと粘性摩擦は開ループで推定した結果を用いて初期値とした。入力はステップ入力  $0.3[\text{V}]$ 、サンプリング時間  $1[\text{ms}]$ 、データ数  $5000$  点で行った。

実験結果を Fig.6 から Fig.8 に示す。Fig.6 は開ループ時のモータ側の回転速度と負荷側の回転速度である。速度が一致していない部分はスリップが生じている部分である。Fig.7 は閉ループ時のモータ側の回転速度と負荷側の回転速度である。Fig.6 と Fig.7 を比較するとスリップが短くなっていることがわかる。Fig.8 はスリップ率の比較である。このスリップ率からも開ループでは  $2.0[\text{s}]$  スリップしているが、閉ループ時では  $1.0[\text{s}]$  となっている。本実験ではスリップ率が半分にはなっていないが、これ以上のスリップが生じる場合でもおよそ  $1.0[\text{s}]$  から長くても  $2.0[\text{s}]$  に収められる。

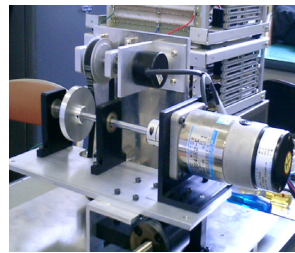


Fig.5 実機

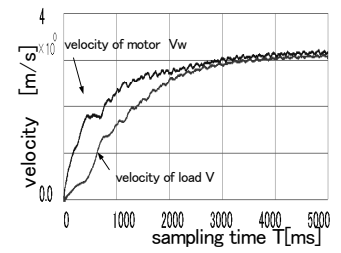


Fig.6 回転速度

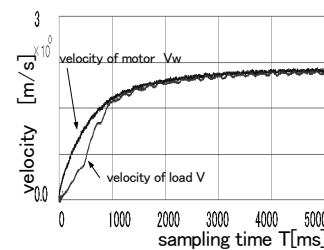


Fig.7 回転速度

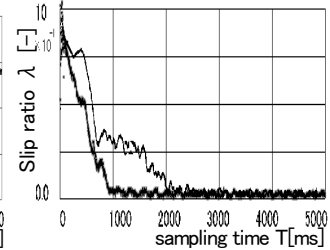


Fig.8 スリップ率

## 8. まとめ

シミュレーション結果では、慣性モーメントの推定時間が短く負荷側の速度の推定も良好であった。さらに、モータの速度との偏差を短い時間で低減させることができ、スリップ抑制することができた。実験セットを用いた実験でも開ループ時の応答よりもスリップ抑制することができ、外乱オブザーバを逐次的に変化させ適応制御することができた。

## 参考文献

- 1) 宮本徹也, 堀洋一: 「外乱オブザーバを用いた電気自動車のスリップ抑制制御」, 産業計測制御研究会, IIC-00-9(1997)
- 2) R.Phornsuk, N.Jongkol, M.Anabuki & H. Hirata: Recursive Simultaneous Estimation of a Two-link Direct Drive Manipulator with Great Variation of Payload, IEEE ISICIT, (2001)
- 3) 大須賀: メカニカルシステムの同定, 計測と制御, 33, 6, 487/493 (1994)
- 4) I.D.Landau: System Identification and Control Design, Prentice Hall, (1990)
- 5) 酒井真一郎: 「電気自動車の新しい車両運動制御に関する研究」 東京大学大学院学位論文(1999)

## 業績

- 1) 平田, 河住, 清宮: 2リンクダイレクトドライブアーム適応制御系のための逐次パラメータ推定, SI2003 学術講演会, pp792-793(2003)
- 2) 平田, 河住, 羽賀: スリップ負荷を伴う DC モータの適応制御, SI2004 学術講演会, pp514-515(2004)