

2 慣性系の適応フィードフォワードモデリング

80121729 北出 哲司

指導教員 佐野 昭

1 はじめに

モータ速度制御系において、モータに負荷を剛性の低い軸で結合した場合には、2 慣性系となり軸ねじれ振動が生じる。この軸ねじれ振動を抑制するためには、負荷時定数や軸時定数といった物理パラメータが必要となる。本稿ではモータ速度制御系に単純適応制御 (SAC) と同じ構造をした適応フィードフォワード補償器を導入し、2 慣性系の全ての物理パラメータ (モータ時定数, 負荷時定数, 軸時定数, モータ及び負荷の速度に比例する粘性抵抗係数) を同時に同定する手法を提案する。ここで SAC は直接法に分類されるため、一般的に可調整パラメータが物理パラメータを陽に示さない。そこで可調整パラメータに物理パラメータが陽に表れるような新しい規範モデルを提案する。さらに同定した値を用いて PI 制御器の自動チューニングを行えることを示す。

2 制御対象

図 1 のような 2 慣性系に比例ゲイン 1 の PI 制御器を合わせたものを制御対象と考える。PI 制御器はステップトルク外乱に対処するために導入したものである。

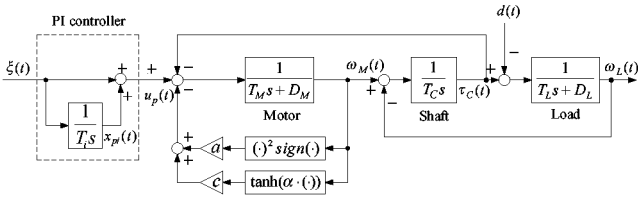


図 1: 制御対象

制御対象の状態方程式は (1) 式で表される。出力はモータの速度 $\omega_M(t)$ である。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_p(t) &= \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p(t) + \mathbf{B}_p \xi(t) + \mathbf{A}_{\gamma p} \gamma(\omega_M(t)) \\ \omega_M(t) &= \mathbf{C}_p \mathbf{x}_p(t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}_p(t) = [\omega_M(t), \tau_C(t), \omega_L(t), x_{pi}(t)]^T$ また 2 慣性系を 1 慣性系 $1/(T_M + T_L)s$ と仮定し、PI 制御器の比例ゲインを K_e として 2 慣性系を PI 制御器のみで制御した場合には、特性多項式は (2) 式となる。

$$s^2 + \frac{T_i D_M + K_e T_i}{T_i(T_M + T_L)} s + \frac{K_e}{T_i(T_M + T_L)} \quad (2)$$

(2) 式より、閉ループ系の減衰係数 ζ は $\zeta = \frac{(K_e + D_M)\sqrt{T_i}}{2\sqrt{K_e(T_M + T_L)}}$ となる。ここで閉ループ系のカットオフ周波数 ω_C とし、PI 制御器のパラメータを次のように設定する。($D_M = 0$ と仮定)

$$K_e = \omega_C(T_M + T_L), T_i = \frac{c_0}{\omega_C} \quad (c_0 \text{ は定数}) \quad (3)$$

この時閉ループ系の減衰係数は (4) 式で与えられる。

$$\zeta = \frac{\sqrt{c_0}}{2} \quad (4)$$

$c_0 = 2$ と設定すると、閉ループ系の減衰係数 ζ は最適値である約 0.7 に設定することができる。

したがって (3) 式より物理パラメータ T_M, T_L がオンラインで同定できれば PI 制御器を自動チューニングできる。

3 適応フィードフォワード補償器の設計法

図 1 の制御対象に対して適応フィードフォワード補償器を導入することを考える。図 2 のような可調整パラメータに物理パラメータが陽に表れるように工夫した規範モデルを用いて適応フィードフォワード補償器を設計する。この時規範入力はランプ入力と考える。そして図 3 のような制御系を構成する。

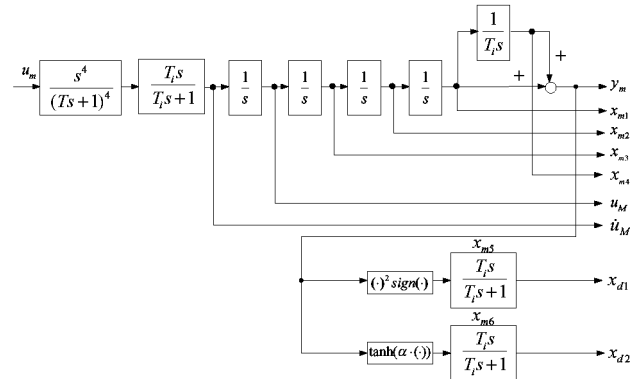


図 2: 提案規範モデル

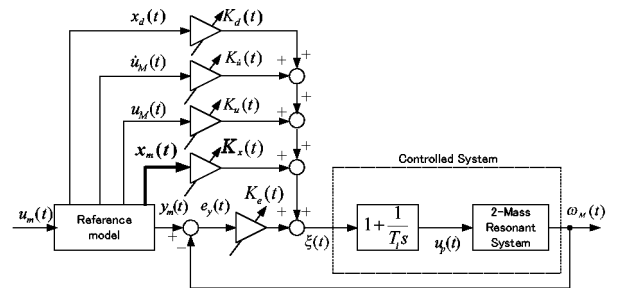


図 3: 制御系の全体図

図 3 において $K_e(t)$ は適応的に調整されるパラメータであり、PI 制御器の比例ゲインとなる。

図 2 の規範モデルの状態方程式は

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_m(t) &= \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{B}_m u_M(t) + \mathbf{A}_{\gamma m} \gamma(y_m(t)) \\ y_m(t) &= \mathbf{C}_m \mathbf{x}_m(t) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで $\mathbf{x}_m(t) = [x_{m1}, x_{m2}, x_{m3}, x_{m4}, x_{m5}, x_{m6}]^T$

この時制御入力を (6) 式で構成する。

$$\xi(t) = \mathbf{K}^T(t) \mathbf{r}(t) \quad (6)$$

$$\mathbf{r}(t) = [e_y(t) \quad \mathbf{x}_m(t) \quad u_M(t) \quad \dot{u}_M(t) \quad \mathbf{x}_d(t)]^T$$

$$\mathbf{K}(t) = [K_e(t) \quad \mathbf{K}_x(t) \quad K_{u_M}(t) \quad K_{\dot{u}_M}(t) \quad \mathbf{K}_d(t)]^T$$

$$e_y(t) = y_m(t) - \omega_M(t)$$

$$\dot{\mathbf{K}}(t) = e_y \mathbf{\Gamma} \mathbf{r}(t)$$

この時以下の定理が成り立つ。

定理 図1を制御対象とし、図2の規範入力をランプ入力とした規範モデルを用いて図3の制御系を構成し、(6)式で制御入力を構成する。このとき可調整パラメータ $\mathbf{K}(t)$ の収束値に関して(7)式が成立する。

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} K_{d1} &= a, \lim_{t \rightarrow \infty} K_{d2} = c, \lim_{t \rightarrow \infty} K_{x1} = D_M + D_L \\ \lim_{t \rightarrow \infty} K_{x2} &\cong T_M + T_L, \lim_{t \rightarrow \infty} K_{x3} \cong -2T_C T_L D_L, \lim_{t \rightarrow \infty} K_{x4} \cong 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} K_{u_M} &\cong -T_C T_L^2, \lim_{t \rightarrow \infty} K_{\dot{u}_M} \cong 3T_C^2 T_L^2 D_L \end{aligned} \quad (7)$$

証明 CGT理論より理想状態 $\mathbf{x}_p^*(t)$ と理想入力 $\xi^*(t)$ は(8)式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_p^*(t) &= \mathbf{S}_{11} \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{S}_{12} u_M(t) + \mathbf{S}_{13} \dot{u}_M(t) \\ \xi^*(t) &= \mathbf{S}_{21} \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{S}_{22} u_M(t) + \mathbf{S}_{23} \dot{u}_M(t) + \mathbf{S}_{24} \gamma(y_m(t)) \end{aligned} \quad (8)$$

(1)式、(2)式と(8)式より理想入力を計算すると

$$\begin{aligned} \xi^*(t) &\cong (D_M + D_L)x_{m1}(t) + (T_M + T_L)x_{m2}(t) \\ &\quad + (-2T_C T_L D_L)x_{m3}(t) + 0 \cdot x_{m4}(t) + (-T_C T_L^2)u_M(t) \\ &\quad + (3T_C^2 T_L^2 D_L)\dot{u}_M(t) + a \cdot x_{d1}(t) + c \cdot x_{d2}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

よって定理より可調整パラメータは物理パラメータを用いて表すことができ、(10)式より物理パラメータをオンライン同定できる。

$$\begin{aligned} T_L &= \frac{3K_{x3}K_{u_M}}{2K_{\dot{u}_M}}, T_M = K_{x2} - T_L, T_C = -\frac{4K_{\dot{u}_M}^2}{9K_{x3}^2 K_{u_M}} \\ D_L &= \frac{3K_{x3}^2}{4K_{\dot{u}_M}}, D_M = K_{x1} - D_L \end{aligned} \quad (10)$$

また比例ゲイン $K_e(t)$ は(3)式と(7)式より

$$K_e(t) = \omega_c K_{x2}(t) \quad (11)$$

と設定することでPI制御器の自動チューニングが達成できる。

4 シミュレーション及び実験結果

提案した適応フィードフォワード補償器を用いてシミュレーション及び実験を行う。各物理パラメータの値は $T_M = T_L = 0.23[s]$, $T_C = 1.6e-3[s]$, $D_M = D_L = 0.1[Nm/rad]$ であり、M系列による開ループ同定試験及びカタログ値による値である。また設計パラメータは規範モデルの時定数 $T = 0.08[s]$ 、積分定数 $T_i = \frac{2}{30}$ ($\omega_c = 30[rad/s]$) の設計) としている。まずシミュレーション結果を図4,5に示す。横軸が時間であり、点線が真値、実線が推定値である。

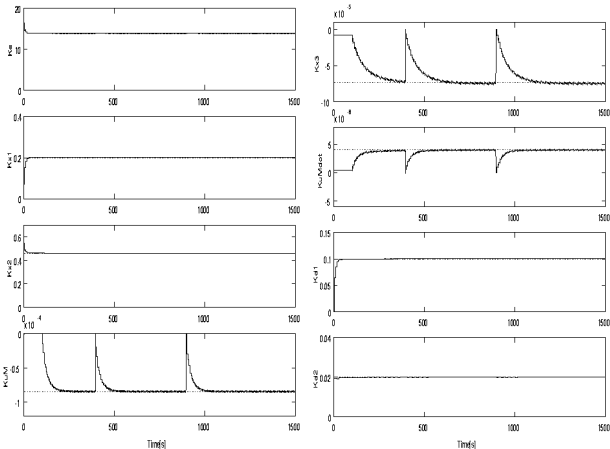


図4 シミュレーション結果(可調整パラメータ)

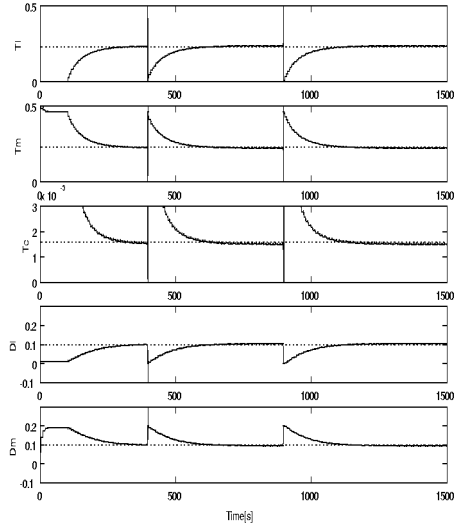
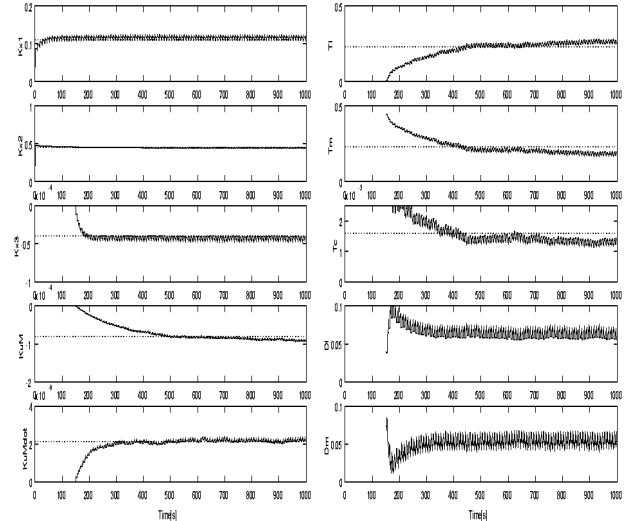


図5 シミュレーション結果(物理パラメータ)

シミュレーションでは途中でステップトルク外乱を2回付加した。図において途中で振動しているのはステップトルク外乱の影響であり、ステップトルク外乱が入っても不安定になることなく同定できていることからPI制御器の効果が確認できる。また調整するには最初の100秒はオーダーの大きい可調整パラメータのみを調整し、100秒後から全ての可調整パラメータを調整し始めるという手順をとっている。これはオーダーの大きいパラメータはあらかじめノミナル値を求めておき、その後微小な部分に対して調整則を適用するためである。

つづいて実験結果を図6に示す。シミュレーション結果と実験結果より提案した適応フィードフォワード補償器の有効性が確認できる。



(a) 可調整パラメータ (b) 物理パラメータ

図6 実験結果

5 結論

モータに負荷を剛性の低い軸で結合した2慣性系に対し、2慣性系の全ての物理パラメータを同時にかつ安定に同定できる適応フィードフォワード補償器の構成法を示した。またステップトルク外乱に対処するためにPI制御器を導入した場合、同定した値を用いてPI制御器を自動チューニングできることを示した。最後にシミュレーションと実験により提案した手法の有効性を示した。