

713

物理パラメータに陽に依存する補償器を用いた低剛性二慣性系の速度制御

Speed control of low stiffness two-inertia system by controller which explicitly depends on physical parameters

○國兼万里恵(長岡技大院), 正 佐藤拓史(長岡高専), 正 小林泰秀(長岡技大)

Marie KUNIKANE and Yasuhide KOBAYASHI, Nagaoka University of Technology, Kamitomiokacho 1603-1, Nagaoka, Niigata

Hiroshi SATOH, Nagaoka National College of Technology, Nishikatakaimachi 888, Nagaoka, Niigata

Key Words: AC servo motor, Two-inertia system, Low stiffness

1 緒言

近年, 様々な制御対象に対して, できるだけ簡便な調整で良い制御性能を達成しようとする, 汎用のサーボモータが市販されている. これらのサーボモータでは, 補償器の構造として, 従来経験的に広く用いられているノッチフィルタやPID制御則が採用されており, 慣性や摩擦の推定機構を組合せ, 推定された物理パラメータから, ノッチの周波数や補償器のゲインを自動調整し, ユーザの調整がほとんど必要のないチューニングレス制御の機能を持つサーボモータも市販されている(安川電機, オリエンタルモーター等)[4][5].

しかし, 機械の軽量化や高速化に伴い, 低剛性かつ高慣性比の振動系の制御が求められるようになった. 共振周波数が低い場合において, PID補償器では十分な性能が得られないことが知られている. このような場合, H_∞ 制御等のロバスト制御系設計を行えば, 与えられた制御対象に対して, H_∞ ノルム等の意味で最適な補償器を得ることができるが, 得られる補償器の動特性と, 制御対象の物理パラメータの関連は, 単純な二慣性系の場合でさえ明らかではないため, 制御対象が変更される度に補償器の再設計を行わなければならない.

一方, 二慣性系の外乱抑制問題に対して, 安定化補償器のパラメトリゼーションに基づいた, 制御対象の物理パラメータに陽に依存する補償器が提案されている[1]. 本研究では, 本手法の利点をシミュレーションにより検証する. 具体的には, まず従来の補償器では低剛性・高慣性比の2慣性系の制御が困難である場合があることを示す. 次に, 同制御対象に対し, 提案法の補償器が良好な制御性能を示すことを明らかにする.

2 二慣性系の運動方程式

Fig.1のようなサーボモータにディスクがシャフトで結合された二慣性系を考える.

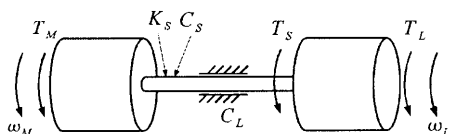


Fig. 1: Two-inertia system

パラメータを次のようにおく.

- θ_M : モータの回転角度 [rad]
- ω_M : モータの回転角速度 [rad/sec]
- J_M : モータの慣性モーメント [Kg m²]
- T_M : モータ内部の発生トルク [Nm]
- θ_L : ディスクの回転角度 [rad]
- ω_L : ディスクの回転角速度 [rad/sec]
- J_L : ディスクの慣性モーメント [Kg m²]
- T_L : ディスクにかかる負荷トルク [Nm]
- C_L : ディスクの回転に伴う減衰係数
- K_S : シャフトのねじりばね定数 [Nm/rad]
- C_S : シャフトの減衰係数
- T_S : シャフトにかかるねじりトルク [Nm]

モータと負荷の相対各変位を $\theta_r := \theta_M - \theta_L$ とおくと, 二慣性系の運動方程式は次のようになる.

$$J_M \dot{\omega}_M = T_M - T_S \quad (1)$$

$$T_S = K_S \theta_r + C_S (\omega_M - \omega_L) \quad (2)$$

$$J_L \dot{\omega}_L = T_L + T_S - C_L \omega_L \quad (3)$$

運動方程式から物理モデルを導出した. システムの伝達関数は式4で表される.

$$P(s) := \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} := \frac{\begin{bmatrix} f(J_M, s) & f(0, s) \\ f(0, s) & f(J_L, s) + C_L s \end{bmatrix}}{sJf(\bar{J}, s) + C_L f(J_M, s)} \quad (4)$$

$$f(J_M, s) := J_M s^2 + C_S s + K_S$$

$$f(J_L, s) := J_L s^2 + C_S s + K_S$$

$$f(0, s) := C_S s + K_S$$

$$\bar{J} := \frac{J_M J_L}{J}$$

$$J := J_M + J_L.$$

また, モデルの共振周波数 f_c [Hz] は式5で求められる.

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K_S \left(\frac{1}{J_L} + \frac{1}{J_M} \right)} \quad (5)$$

3 補償器設計

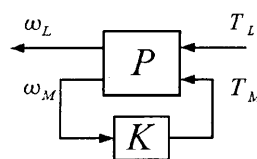


Fig. 2: Closed-loop system

閉ループ系のブロック線図をFig.2に示す. ここでは二慣性系の物理モデルに対する外乱抑制制御系の設計問題を考え, 閉ループ系を内部安定化し, かつ, 閉ループ系の H_∞ ノルムを最小化する.

上記, H_∞ ノルムの最小化を行うために用いる, 補償器の構造を明示する.

(a)P 補償器 K_p

$$K_p = k_p \quad (6)$$

(b)PI 補償器 K_{pi}

$$K_{pi} = k_p + k_i \frac{1}{s} \quad (7)$$

(c) ノッチフィルタを組み合わせた P 補償器 K_{notch}

$$K_{notch} = k_p F \tag{8}$$

$$F = \frac{(s^2 + 2\zeta_1\omega_c s + \omega_c^2)}{(s^2 + 2\zeta_2\omega_c s + \omega_c^2)} \tag{9}$$

ここで, $\zeta_1=0.1, \zeta_2=2.0$ と設定する.

(d) H_∞ 補償器 K_{H_∞}

二慣性系の計算モデルを用いて設計

(e) 提案型補償器 $K_{a_0 a_1}$

$$K(s) = \frac{-f(J_M, s)}{(a_1 s + a_0) f^2(0, s) - s} \tag{10}$$

4 補償器の性能比較

3章で示した5つの補償器について, H_∞ ノルムが最小となるパラメータを数値的に探索し最適な補償器を得た. それぞれのパラメータを Table 1 に示す.

Table 1: Parameters

補償器	Values	γ
K_p	$k_p = -0.0095$	112.1
K_{pi}	$k_p = -0.0113, k_i = 1.0 \times 10^7$	115.3
K_{notch}	$k_p = -0.0084$	186.2
K_{H_∞}	二慣性系の計算モデルを用いて設計	0.1590
$K_{a_0 a_1}$	$a_0 = 126.9, a_1 = 2.395$	95.98

得られた H_∞ 補償器 K_{H_∞} と提案型補償器 $K_{a_0 a_1}$ の A 行列固有値の実部の最大値はそれぞれ 8.129×10^{12} , 568.9 であり, 両者は閉ループ系を安定とする不安定補償器となっている.

各補償器のゲイン特性と位相特性を Fig.3 に, 閉ループ系のゲイン特性を Fig.4 に示す. ただし, K_{H_∞} における閉ループゲインは他の補償器に比べ非常に小さいため, Fig.4 では割愛する.

Fig.3 で $K_{a_0 a_1}$ はノッチを含んだ特性を示しており, P 補償器 K_p , PI 補償器 K_{pi} に比べ理想的な補償器 K_{ideal} とゲイン特性が似ている. ノッチフィルタを組み合わせた P 補償器 K_{notch} も $K_{a_0 a_1}$ 同様, 共振周波数において K_{ideal} と似たゲイン特性を示している. しかし, Fig.4 に注目すると低周波域では K_{notch} は $K_{a_0 a_1}$ に比べゲインが高くなっている. $K_{a_0 a_1}$ は共振周波数付近にピークを持っているものの, K_{H_∞} を除いた他の補償器に比べ低周波域でのゲインは小さい. $K_{a_0 a_1}$ は共振周波数のゲインと引き換えに, 全体的なゲインを下げているといえる. また, 提案法は不安定な補償器も表現できるためパラメータの設定範囲が P 制御や PI 制御より広く自由度が高い. Fig.3, Fig.4 より, $K_{a_0 a_1}$ は K_{pi} , K_{notch} と同程度のパラメータ数で良好なゲイン特性を持つことが示された.

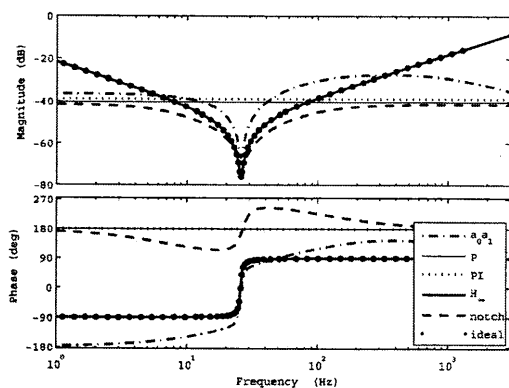


Fig. 3: Bode diagram of controllers

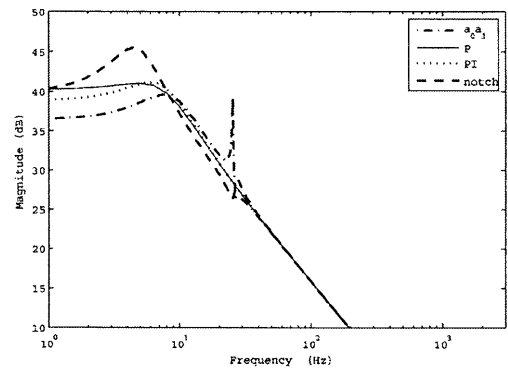


Fig. 4: Magnitude plot of closed-loop systems

5 P 補償器におけるノッチフィルタ

4章でノッチフィルタを組み合わせた P 補償器の特性を示したが, Fig.4 に示すように P 補償器に比べ γ が高くなっている. そこで P 制御におけるノッチフィルタの有用性を調べるために, ノッチ深さ ζ_2/ζ_1 を変更し, 各ノッチフィルタにおいて最適な補償器を設計した. 具体的には, まず $\zeta_1=0.1$ を与え, ζ_2 を 0.1 ~ 2.0 まで変化させた F を設計する. 次に, 各フィルタにおいて H_∞ ノルムが最小となる P ゲイン k_p を探索した. ノッチ深さと γ の関係を Fig.5 に示す. Fig.5 よりノッチ深さが大きくなるほど γ が大きくなっていることが分かる. 従って, ノッチフィルタと P 制御を組み合わせても閉ループゲイン特性が向上しないことが示された.

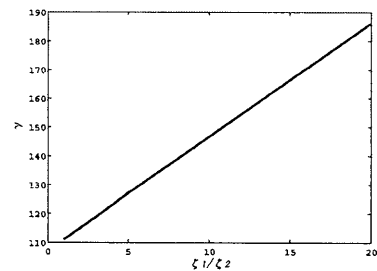


Fig. 5: Plot of ζ_2/ζ_1 vs. γ

6 結言

提案型補償器は共振付近のゲインと引き換えに, 全体的なゲインを小さくする. また, 不安定な補償器を表現できるため, P, PI 補償器に比べパラメータの設定範囲が広い. その結果 P, PI 補償器と同程度のパラメータ数で, 良好なゲイン特性を得る.

参考文献

- [1] Yasuhide Kobayashi, Yuta Sugano, Tetsuya Kimura: A Disturbance Attenuation Controller Design for Two-Inertia Systems which Explicitly Depends on Physical Parameters(2010)
- [2] Guoguang Zhang, Junji Furusho: Speed Control of Two-Inertia System by PI/PID Control(2000)
- [3] 劉: 線形ロバスト制御, コロナ社 (2002)
- [4] 安川電機株式会社: $\Sigma - V$ シリーズユーザーマニュアル設計保守編 アナログ電圧・パルス列指令形 資料番号 SIJP S800000 45E
- [5] オリエンタルモーター株式会社: チューニングレス AC サーボモーターユニット NX シリーズ ユーザーズマニュアル