非線形システムに対するパフォーマンス・アダプティブ PID コントローラの設計

河野 貴之 * 山本 透 ** 雛元 孝夫 *
(* 広島大学大学院工学研究科) (** 広島大学大学院教育学研究科)

1. 緒言

化学プロセスでは，システムの特性が変化することが往々にして存在する．そこで，セルフチューニングコントローラ [1] が提案されているが，非線形システムに対しては，高精度な同定を期待できない問題がある．

一方，プロセス全体の安全性の維持などを目的とする制御性能評価（CPA）[2] に関する研究が近年盛んに行われている．現在，この評価に応じ，制御パラメータを調整する,「評価」と「設計」を統合したアプローチが重要な課題の一つであると考えられる．

また，化学プロセスにおいては，PID 制御が広く用いられており，一般化予測制御 (GPC)[3] に基づいた PID 制御系 (GPC-PID 制御系) 設計法 [4] が提案されている．

そこで，本稿では，まず，同定には非線形システムに効果的なデータ駆動同定法 [5] を用いて予測型 PID 制御系を設計する．さらに，予測型 PID 制御系設計パラメータを制御性能評価（CPA）により調整する．最後に数値例を通し，本手法の有効性を示す．

2. パフォーマンス・アダプティブ PID 制御系の設計

2.1 システムの記述

制御対象は，次式の離散時間非線形システムを考える．

$$y(t) = f(\phi(t-1)) \tag{1}$$

ここで, $y(t)$ はシステムの出力，$f(\cdot)$ は非線形関数を表している．さらに，$\phi(t-1)$ はシステムの時刻 t より前の状態を表しており，情報ベクトルと呼ぶこととする．いま，(1) 式で表される非線形システムが局所的に，線形モデルで表すことができると仮定する．さらに，その線形モデルを連続時間モデルに変換すると，次式となる．

$$G(s) = \frac{K}{1+Ts}e^{-Ls} \tag{2}$$

ただし，K は定常ゲイン, T は時定数, L はむだ時間を表す．

2.2 予測型 PID 制御系

(2) 式のむだ時間要素を 1 次のパディ近似し，離散化すると，次式の離散時間モデルが得られる．

$$\tilde{A}(z^{-1})y(t) = \tilde{B}(z^{-1})u(t-1) \tag{3}$$

本稿では (3) 式を予測型 PID 制御系の設計用モデルとし，GPC 則は次式の評価関数の最小化に基づき導かれる．

$$J = E\left[\sum_{j=1}^{N}\{y(t+j)-r(t+j)\}^2 + \lambda\sum_{j=1}^{N}\{\Delta u(t+j-1)\}^2\right] \tag{4}$$

ここで，λ は制御入力差分に対する重み係数，$r(t)$ は目標値を表している．また，N は予測区間を表し，実用的には時定数とむだ時間の和に相当するステップ数とする．さらに，導かれた GPC 則と比例・微分先行型 PID 制御則 (I-PD 制御則) を比較することから，GPC に基づいた PID パラメータ調整則が次式のように与えられる．

$$k_c = f_c(\theta,\lambda),\ \ T_I = f_I(\theta,\lambda),\ \ T_D = f_D(\theta,\lambda) \tag{5}$$

ただし，$f_c(\cdot), f_I(\cdot), f_D(\cdot)$ は関数を表している．つまり，PID パラメータはシステムパラメータと GPC の可調整パラメータ λ の関数として得られる（詳細は参考文献 4)）．したがって，PID コントローラの性能は，同定精度と λ の値によって決まる．本稿では，同定精度の向上のためにデータ駆動型同定法を，λ の設計には，CPA に基づく調整法を適用することで，制御性能の向上を図る．

2.3 データ駆動型システム同定法

データ駆動型モデリング法では，あらかじめデータは情報ベクトルの形式でデータベースに保存される．さらに，時刻 t における未来の出力 $y(t+1)$ を得るために必要な情報ベクトルは要求点と呼ばれる．同定は次の順序で行われる．

1. 要求点とデータベースに蓄えられている情報ベクトルとの距離を求める．
2. 距離近いものから N_e 個の情報ベクトルを近傍として選択する．
3. 選択された情報ベクトルを用いて，重み付最小二乗法によりシステム同定を行う．

2.4 パフォーマンス・アダプティブ PID コントローラ

以上，考察してきた提案法のアルゴリズムを以下に示す．

1. 2.3 に基づきシステムパラメータを計算する．また，推定誤差 $\varepsilon(t)$ の標準偏差 σ_ε を算出する．
2. 推定パラメータを用いて，λ を変化させて PID コントローラを設計する．このとき，それぞれの λ に対応した制御誤差・制御入力の分散を計算する．
3. 制御誤差及び制御入力の分散双方を考慮し，λ を決め，PID パラメータを変更する．
4. $t = t+1$
5. 1．で計算したシステムパラメータを用いて，次式により予測誤差 $\eta(t)$ を計算する．
$$\eta(t) := \Delta y(t) - \bar{\phi}^T(t-1)\theta \tag{6}$$
6. 次式の関係を満足する時は 1．へ，そうでない場合は 4. へ戻る．
$$|\eta(t)| \geq \gamma\sigma_\varepsilon \tag{7}$$
ここで，最小二乗法のもつ性質から，予測誤差が近似的に正規分布に従うという前提において，γ は統計的観点から約 3.0〜5.0 に設定する．

3. 数値例

提案手法を以下に示すシステムに適用して有効性を検証する．

$$\left.\begin{array}{l} y(t) = 0.6y(t-1) - 0.1y(t-2) \\ \qquad +1.2x(x-5) - 0.1x(t-6) + \frac{\xi(t)}{\Delta} \\ x(t) = 1.5u(t) - 1.5u^2(t) + 0.5^3(t) \end{array}\right\} \tag{8}$$

このとき，$T_s = 1.0$[s] とした．また，$\xi(t)$ は平均 0，分散 0.01^2 の白色確率雑音である． 提案手法のシミュレーション結果を

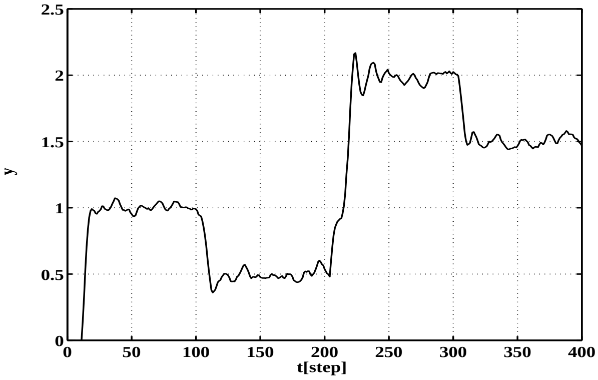

Fig.1. 提案法による制御結果．

Fig.1 に示す．非線形システムに対しても良好な応答が得られていることがわかる．

4. 結言

本稿においては，データ駆動型同定法と予測型 PID 制御法とを融合させる制御系で非線形システムに対しても応答の改善を図ることができる PID コントローラの設計法を提案した．今後の課題としては，同定精度の向上，冗長データの削除方法の検討などがあげられる．

参考文献

1) 大松，山本: “ セルフチューニングコントロール ”，計測自動制御学会学術図書 (1996)
2) B.Hung and S.L. Shah: “ Performance Assessment of Control Loops: theory and applications ”, Springer-Verlag London (1999)
3) D.W.Clarke, C.Mohtadi and P.S.Tuffs: “ Generalized predictive control ”, Automatica, vol.23, no.6, pp.859-875(1987)
4) M.Katayama, T.Yamamoto and Y.Mada: “ A design of multiloop predictive self-tuning PID controllers ”, Asian J. Control, vol.4, no.4, pp.472-481(2002)
5) 高尾，山本，雛元:“ Memory-Based 型システム同定による一般化予測制御系の一設計 ”，電気学会論文誌, Vol.125, No.3, pp.442-449(2005)