ガウシャンプロセスモデルによる多段先予測器に基づくモデル予測制御

佐藤 太紀　　八野 知博
(鹿児島大学)

1　はじめに

電力系統など多くの実システムは非線形性を有する非線形システムであり、このようなシステムの制御に対し非線形モデルに基づく予測制御が検討されてきた。本稿では、ガウシャンプロセスモデルを用いて多段先予測モデルを構築し、この予測モデルに基づいてカッコウ探索アルゴリズムによるモデル予測制御を行う手法を提案する。電力システムに提案手法を適用したシミュレーション実験を行い、出力が雑音に乱されている場合でもモデル予測制御が可能であることを確認した。

2　対象システム

次の簡単化された電力系統を制御対象とする。

$$\begin{cases} \tilde{M}\ddot{\delta}(t) + \tilde{D}\dot{\delta}(t) + P_e = P_{in} \\ P_e = \dfrac{e_t E_{fd}}{X_e}(1 + \Delta E_{fd}(t)) \sin\delta(t) \\ y(t) = \delta(t) + v(t) \end{cases} \tag{1}$$

ここで、$\delta(t)$:相差角、$v(t)$:平均 0、分散 σ^2 の正規性白色雑音、$\Delta E_{fd}(t)$:界磁電圧の増分、$\tilde{M}$:慣性係数、$\tilde{D}$:制動係数、e_t:無限大母線電圧、E_{fd}:界磁電圧、X_e:系統インピーダンス、P_{in}:タービン出力である。また入力 $u(k) = \Delta E_{fd}(kT_s)$ と雑音に乱された出力 $y(k) = y(kT_s)$ が入手可能とする (T_s:サンプリング周期)。

3　GP モデルによる多段先予測

GP 事前分布による j 段先予測モデル ($j = 1, \cdots, M$) は

$$\boldsymbol{y}_j \sim N(\boldsymbol{m}_j(\boldsymbol{X}), \boldsymbol{K}_j(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{X})) \tag{2}$$

のように導出できる。ただし、

$$\begin{aligned} \boldsymbol{y}_j &= [y(k_s + j), \cdots, y(k_s + j + N - 1)]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{X} &= [\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2, \cdots, \boldsymbol{x}_N]^{\mathrm{T}} \\ &= [\boldsymbol{x}(k_s), \boldsymbol{x}(k_s + 1), \cdots, \boldsymbol{x}(k_s + N - 1)]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{x}(k) &= [y(k), y(k-1), \cdots, y(k - L_y + 1), \\ &\quad u(k), u(k-1), \cdots, u(k - L_u + 1)]^{\mathrm{T}} \end{aligned} \tag{3}$$

ここで、$\boldsymbol{m}_j(\boldsymbol{X})$ は平均関数ベクトル、$\boldsymbol{K}_j(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{X})$ は共分散行列である。

新たなモデル入力

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}_* &= \boldsymbol{x}_*(k_0) \\ &= [y_*(k_0), y_*(k_0 - 1), \cdots, y_*(k_0 - L_y + 1), \\ &\quad u_*(k_0), u_*(k_0 - 1), \cdots, u_*(k_0 - L_u + 1)]^{\mathrm{T}} \end{aligned} \tag{4}$$

に対する出力 $y_*(k_0 + j)$ の事後分布は

$$y_*(k_0 + j)|\boldsymbol{X}, \boldsymbol{y}_j, \boldsymbol{x}_* \sim N(\hat{y}_*(k_0 + j), \hat{\sigma}_*^2(k_0 + j)) \tag{5}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \hat{y}_*(k_0 + j) &= m_j(\boldsymbol{x}_*) \\ &\quad + \boldsymbol{\Sigma}_j(\boldsymbol{x}_*, \boldsymbol{X})\boldsymbol{K}_j^{-1}(\boldsymbol{y}_j - \boldsymbol{m}_j(\boldsymbol{X})) \\ \hat{\sigma}_*^2(k_0 + j) &= s_j(\boldsymbol{x}_*, \boldsymbol{x}_*) \\ &\quad - \boldsymbol{\Sigma}_j(\boldsymbol{x}_*, \boldsymbol{X})\boldsymbol{K}_j^{-1}\boldsymbol{\Sigma}_j(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{x}_*) + \sigma_{j[best]}^2 \end{aligned} \tag{6}$$

である。ここで $\hat{y}_*(k_0+j)$ が j 段先の予測値であり、$\hat{\sigma}_*^2(k_0+j)$ はその信頼性の情報として用いられる [1]。

4　モデル予測制御

次のモデル予測制御問題を考える。

$$\min_{u_*(k_0)} \sum_{j=1}^{M} (y_{ref}(k_0 + j) - \hat{y}_*(k_0 + j))^2 \tag{7}$$

subject to

$$|u_*(k_0)| \leq U_{max} \tag{8}$$

$$\sum_{j=1}^{M} \hat{\sigma}_*^2(k_0 + j) \leq S_{max} \tag{9}$$

ここで、$y_{ref}(k)$ は参照軌道、U_{max} は入力信号に対する制約、S_{max} は出力予測値の不確かさに対する制約である。(9) 式の制約条件は、出力予測値に大きな不確かさを生ずる入力は最適化の対象から除外することを意味している。予測区間は $[k_0{+}1, k_0{+}M]$、制御入力区間は $[k_0, k_0]$ である。本稿では、この制約付き最適化問題にカッコウの托卵行動に着想を得たカッコウ探索アルゴリズム（CS）を適用する。

5　シミュレーション

(1) 式において $\tilde{M} = 0.06$、$\tilde{D} = 0.06$、$E_{fd} = 1.0$、$e_t = 1.0$、$X_e = 1.0$、$P_{in} = 0.8$ とした電力系統を制御対象とする。ここで、$v(t)$ は平均 0、分散 $\sigma^2 = 0.004^2$ の正規性白色雑音とする。評価関数の制約条件は $U_{max} = 2.5$、$S_{max} = 0.001$ とした。予測モデルの次数を $L_y = 10$、$L_u = 1$、指令値を 0.7 ($0 \leq k < 150$)、1.0 ($150 \leq k < 300$)、0.8 ($300 \leq k \leq 500$) とした。図 1 に出力 $y_*(k)$ の時間応答を示す。

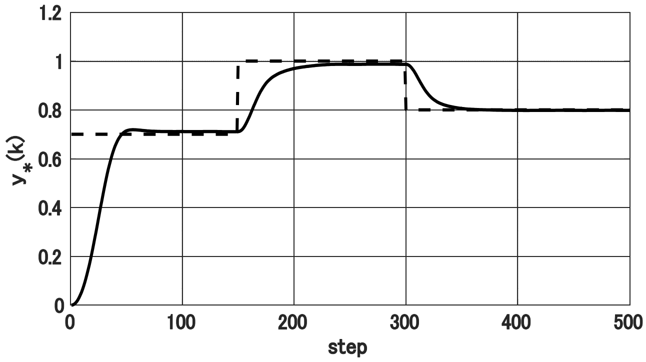

図 1 出力 $y_*(k)$ の時間応答

参考文献

[1] 成富圭司, 八野知博, 高田 等, 福島誠治, 五十嵐保隆: 離散時間ガウシャンプロセスモデルによる電力系統の多段先予測器構築, 平成 26 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, p.247 (2014)