

## ACFとGAによる逆システム同定法を用いた Hammerstein型システムのフィードフォワード制御

著者	高田 等, 濱邊 義久, 八野 知博
雑誌名	鹿児島大学工学部研究報告
巻	49
ページ	53-60
別言語のタイトル	Feedforward Control of Hammerstein Systems Based on Identification of Inverse System by ACF and GA
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10232/5005">http://hdl.handle.net/10232/5005</a>

# ACFとGAによる逆システム同定法を用いた Hammerstein型システムのフィードフォワード制御

著者	高田 等, 濱邊 義久, 八野 知博
雑誌名	鹿児島大学工学部研究報告
巻	49
ページ	53-60
別言語のタイトル	Feedforward Control of Hammerstein Systems Based on Identification of Inverse System by ACF and GA
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10232/00003828">http://hdl.handle.net/10232/00003828</a>

# ACF と GA による逆システム同定法を用いた Hammerstein 型システムの フィードフォワード制御

高田 等\* 濱邊 義久\*\* 八野 知博\*

Feedforward Control of Hammerstein Systems  
Based on Identification of Inverse System by ACF and GA

Hitoshi TAKATA\*, Yoshihisa HAMABE\*\* and Tomohiro HACHINO\*

This report proposes a feedforward control algorithm for the Hammerstein nonlinear systems. This control scheme is based on the identification of an inverse system of the objective system. The nonlinear static part of the inverse system is represented by the Automatic Choosing Function (ACF). The weighting and adjusting parameters of the ACF and the system parameters of the linear dynamic part are estimated by using the genetic algorithm. Then the estimated inverse system is utilized as the feedforward controller. Numerical experiments are carried out to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** Feedforward control, Identification, Nonlinear system, Automatic choosing function, Genetic algorithm

## 1. はじめに

フィードフォワード制御<sup>1)</sup>は制御プラントの動特性および外乱等が既知である場合に有効な制御法である。逆システムの考えを導入することにより、追従特性の著しい改善が期待できる。本研究では、Hammerstein 型離散時間非線形システム<sup>2),3)</sup>のフィードフォワード制御法を提案する。Hammerstein 型システムは非線形静的要素と線形動的要素が直列に接続された、広範な非線形システムを表現できるモデルである。

Hammerstein 型非線形システムを制御対象プラントとし、制御対象プラントの補償器となるようなフィ

ードフォワードコントローラを構成する。ただし、フィードフォワードコントローラは制御プラントの逆システムを線形補償部と非線形補償部から構成する。線形補償部は線形動的要素の逆システムを、非線形補償部は非線形静的要素の逆関数を ACF を用いて表現する。制御プラントの真の逆システムとなるようなフィードフォワードコントローラを構成することによって、規範入力に出力を追従させ、誤差を零とするようなフィードフォワード制御が行える<sup>4),5)</sup>。

フィードフォワードコントローラは制御プラントの入出力データより、制御プラントの逆システムを遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm ; GA)<sup>6)</sup>、最小二乗法、シグモイド型自動抽出関数 (Automatic Choosing Function ; ACF) を用いた逆システムの同定結果より構成する。適切な同定結果の算出に基づくフィードフォワードコントローラの構成により、精度良いフィード

---

2007 年 8 月 20 日受理

\* 電気電子工学科

\*\* 博士前期課程電気電子工学専攻

フォワード制御を行うことができる。

本報告は以下のように構成される。第2節では制御対象プラントについて、第3節ではフィードフォワードコントローラについて、第4節では逆システムの同定に基づいた制御について述べる。第5節ではシミュレーション実験の結果を示し、第6節では結論と今後の課題について述べる。

## 2. 制御対象プラント

図-1に示される Hammerstein 型非線形システムを制御対象プラントとする。ただし、プラントの入出力関係は(1)式で与えられる。

$$\begin{cases} A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u_m(k-1) + e(k) \\ u_m(k) = f(u(k)) \\ A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} \\ B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_rq^{-r} \\ G(q) = q^{-1} \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $u(k)$ :入力信号、 $y(k)$ :出力信号、 $e(k)$ :雑音、 $u_m(k)$ :中間信号、 $q^{-1}$ :遅延演算子、 $f(\cdot)$ :非線形静的要素、 $G(\cdot)$ :線形動的要素である。また、線形動的要素のパラメータ  $a_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )、 $b_i$  ( $i = 0, 1, \dots, r$ ) および非線形関数  $f(\cdot)$  は未知である。ただし、線形項パラメータの次数  $n$  と  $r$  は既知とする。

## 3. フィードフォワードコントローラ

### 3.1 逆システムの構成

制御プラントが Hammerstein 型非線形システムの場合、その逆システムは次式となる。

$$\begin{cases} u_m(k) = G^{-1}(q)y(k) \\ u(k) = f^{-1}(u_m(k)) \\ G^{-1}(q) = q \frac{W(q^{-1})}{V(q^{-1})} \\ W(q^{-1}) = w_0 + w_1q^{-1} + \dots + w_nq^{-n} \\ V(q^{-1}) = 1 + v_1q^{-1} + v_2q^{-2} + \dots + v_rq^{-r} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、線形動的要素のパラメータに対し、線形項パラメータは  $w_0 = 1/b_0$ 、 $w_i = a_i/b_0$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )、 $v_i = b_i/b_0$  ( $i = 1, 2, \dots, r$ ) である。ただし、制御プラントが未知である場合、その逆システムもまた未知である。

### 3.2 ACF による非線形関数の表現

非線形関数  $f(u(k))$  を表現するためにシグモイド

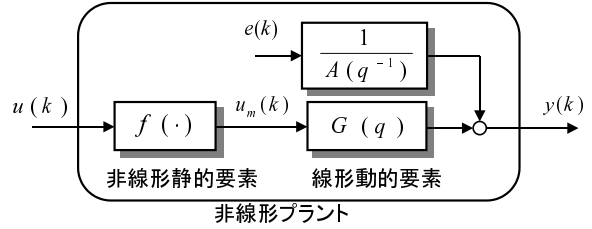


図 - 1 Hammerstein 型非線形システム

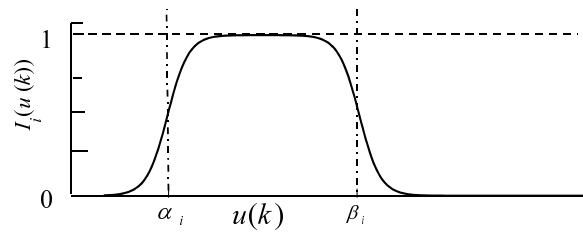


図 - 2 ACF の波形

型自動抽出関数 (ACF) を用いる。ACF は次式のように表され、図-2のような波形となる。

$$I_i(u_m(k)) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(H(u_m(k) - \alpha_i))} - \frac{1}{1 + \exp(-H(u_m(k) - \beta_i))} \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (3)$$

自動抽出関数  $I_i(\cdot)$  は、小領域  $[\alpha_i, \beta_i]$  でほぼ1となり、その他の領域では0となるような解析関数である。

非線形関数は ACF を用いると次式によって近似できる。

$$f(u(k)) \cong \sum_{i=1}^M (c_i + d_i u(k)) I_i(u(k)) \quad (4)$$

ACF による非線形関数の表現について図-3に示す。局所線形関数に ACF を掛け合わせるにより領域ごとの値を抽出し、それを足し合わせることで非線形関数の表現を行う。

### 3.3 フィードフォワードコントローラ

制御プラントにその逆システムをフィードフォワードコントローラとして接続することで、出力  $y$  を規範入力  $y_r$  に追従させるようなフィードフォワード制御が行える。ここで、フィードフォワードコントローラは線形補償部と非線形補償部から構成する。線形補償部は制御プラントの線形動的要素の逆モデル  $G^{-1}(q)$ 、

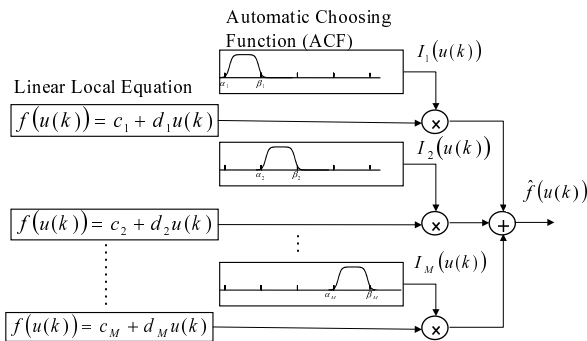


図 - 3 ACF による非線形関数の表現

非線形補償部は制御プラントの非線形静的要素の逆関数  $f^{-1}(\cdot)$  である。

Hammerstein 型非線形システムのような動特性や非線形性を有する非線形プラントに対してフィードフォワード制御を行う場合でも、図 - 4 のように非線形プラントにその逆システムとなるフィードフォワードコントローラを構築することで、適切な制御を行うことが出来る。しかし、非線形プラントの動特性や非線形性が未知である時、一般にそれは困難である。そこで、制御プラントの逆システムを同定し、同定結果に基づいてフィードフォワードコントローラを構成することによって、フィードフォワード制御を行う。

#### 4. 逆システムの同定に基づいた制御

本節では、制御プラントの入力データ、出力データよりその逆システムをオフライン同定し、同定結果に基づいたフィードフォワードコントローラを構築する。構築したコントローラをオンラインの制御システムに構成することによってフィードフォワード制御を行う。

##### 4.1 制御システムの構成

図 - 5 のような制御システムについて制御を行う。制御プラントには Hammerstein 型非線形システムを用いる。プラントの入出力関係は (1) 式で与えられる。制御プラントの入力  $u(k)$  および出力  $y(k)$  を入力データ、出力データとして各時間ステップで常に採取し、それを用いて制御プラントの逆システム同定を行う。ここで、フィードフォワードコントローラは制御プラントの逆システムの同定結果より構成する。同定結果の算出と、フィードフォワードコントローラの構成を

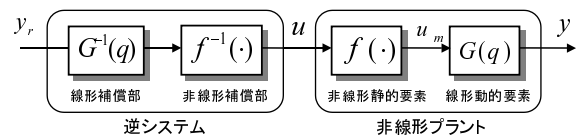


図 - 4 非線形プラントと逆システム

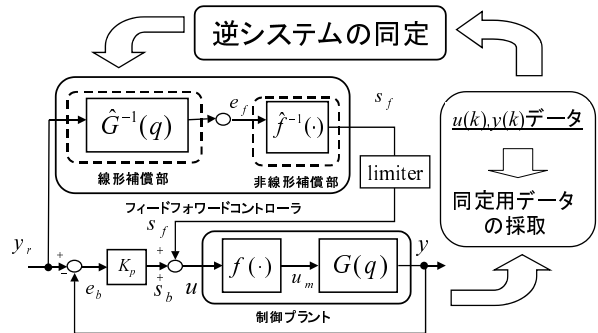


図 - 5 システム構成の概要図

繰り返し行うことで、より良いフィードフォワードコントローラを構成し、制御プラントの出力  $y$  を任意の規範入力  $y_r$  に追従させるフィードフォワード制御を行う。ただし、同定結果の算出前はフィードフォワードコントローラの構成は行わない。また、フィードフォワードコントローラの出力  $s_f(k)$  にリミッターを設け、コントローラの状態が悪い場合に備える。

図 - 5 は比例ゲインコントローラを用いたフィードバックコントローラにフィードフォワードコントローラを付加した制御システムである。比例ゲインコントローラを付加することにより、逆システムの推定が不完全で適切なフィードフォワードコントローラの構成が出来ない場合に対応し、適切なコントローラの構成が進めばフィードバックされる誤差信号は自ずと零へ収束する。

ここで制御プラントの逆システムの未知パラメータと未知の非線形関数を推定することにより、制御プラントの逆システム同定を行う。また、制御プラントの逆システムの同定結果に基づいてフィードフォワードコントローラを構成し、フィードフォワード制御を行う。

##### 4.2 コントローラの構成と時間ステップ

制御システムの稼働後の時間ステップと逆システムの同定およびフィードフォワードコントローラの構

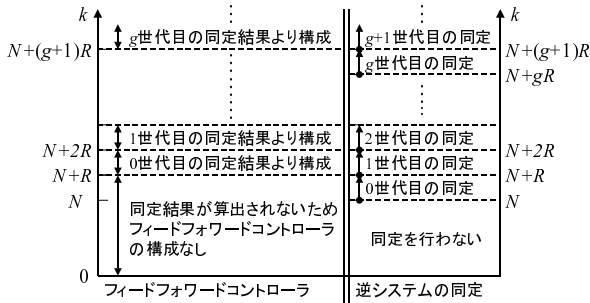


図 - 6 時間ステップとフィードフォワードコントローラ

成の関係を図 - 6 に表す。ここで、 $N$ :同定用信号ベクトル数、 $g$ :同定世代数 (GA の世代数)、 $R$ :フィードフォワードコントローラの更新間隔である。ただし、フィードフォワードコントローラの更新間隔が  $R$  であるため、各世代の同定は  $R$  ステップの間に同定結果を算出する。制御システムは時間ステップ  $k = 0$  で稼動を開始し、各時間ステップで制御プラントの入力データ  $u(k)$  および出力データ  $y(k)$  を採取する。また、制御プラントの逆システムの同定には最新の  $N$  組の同定用信号ベクトル (入力データ  $u(k)$ 、出力データ  $y(k)$ ) を用いる。

制御プラントの逆システムの同定は、同定に必要な信号ベクトル数の揃う  $N$  ステップから 0 世代目の同定を開始する。 $N + R$  ステップまでに 0 世代目の同定結果を算出し、 $N + R$  ステップで 0 世代目の同定結果を基にフィードフォワードコントローラを構成する。ここで、0 ステップから  $N + R$  ステップまではフィードフォワードコントローラの構成は行われない。また、引き続き  $N + R$  ステップから 1 世代目の同定を開始する。 $N + 2R$  ステップまでに 1 世代目の同定結果を算出し、 $N + 2R$  ステップで 1 世代目の同定結果を基にフィードフォワードコントローラを構成する。また、引き続き  $N + 2R$  ステップから 2 世代目の同定を開始する。これらの操作を世代数  $g$  を 1 ずつ増加させながら続けることによって、制御プラントの逆システムの同定およびフィードフォワードコントローラの構成と更新を行う。ただし、制御プラントの状態が推測できる場合、それに基づいたフィードフォワードコントローラを予め構成し、より適した逆システムの同定結果が算出された段階で本手法のコントローラに移行する。

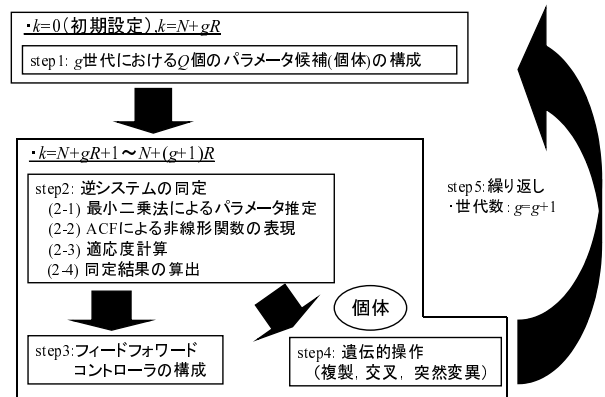


図 - 7 同定に基づいたコントローラの構成

#### 4.3 フィードフォワードコントローラの構成

同定に基づいたフィードフォワードコントローラの構成および更新は以下の step 1 から step 5 によって行う。その概略図を図 - 7 に示す。

ここで、0 世代における  $Q$  個のパラメータ候補 (個体) の構成は初期設定として行う。ただし、フィードフォワードコントローラの更新間隔である  $R$  ステップ間に同定世代数  $g$  における step 2 から step 4 の操作を行う。

$k = 0$  (初期設定),  $k = N + gR$

step 1 :  $g$  世代における  $Q$  個のパラメータ候補の構成

同定世代数  $g = 0$ 、時間ステップ  $k = 0$  のとき、個体集団  $\Omega(0)$  を初期設定としてランダムに設定する。また、同定世代数  $g (g = 1, 2, \dots)$ 、時間ステップ  $k = N + gR$  のとき、個体集団  $\Omega(g)$  のそれぞれの個体は  $g - 1$  世代の個体に遺伝的操作を施して設定する。各個体の遺伝的操作については step 4 で述べる。

個体は図 - 8 のように 0、1 の二進文字列 (遺伝子型) で構成される。また、個体を図 - 9 のようにデコーディングすることによってそれぞれのパラメータの解候補 (表現型) となる。

$k = N + gR + 1 \sim N + (g + 1)R$

step 2 : 逆システムの同定

フィードフォワードコントローラを構成するために、制御プラントの逆システムの同定を以下の手順で行った。

(2-1) : 最小二乗法によるパラメータ推定

それぞれの個体を個体番号 ( $j = 1, 2, \dots, Q$ ) とする。 $Q$  個の個体の持つパラメータと時間ステップ  $k = N + gR + 1$  までに採取された  $y(k)$  データを用いて  $Q$

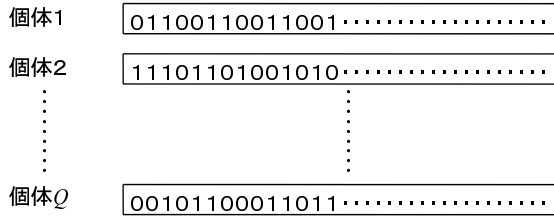


図 - 8 遺伝子型の設定

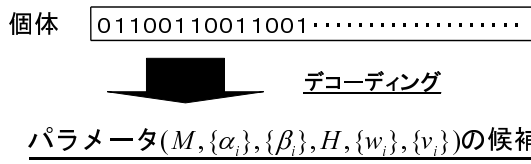


図 - 9 デコーディングによる個体の変換

個の  $u_m(k)$  のデータ候補  $u_{mj}(k)$  を次式より算出する。

$$\begin{cases} u_{mj}(k) = G_j^{-1}(q)y(k) \\ G_j^{-1}(q) = q \frac{W_j(q^{-1})}{V_j(q^{-1})} \\ W_j(q^{-1}) = w_{0j} + w_{1j}q^{-1} + \dots + w_{nj}q^{-n} \\ V_j(q^{-1}) = 1 + v_{1j}q^{-1} + v_{2j}q^{-2} + \dots + v_{rj}q^{-r} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、step 1 で求めた各個体のパラメータ、およびデータ候補  $u_{mj}(k)$  を用いると ACF は次式のように表される。

$$I_{ij}(u(k)) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(H_j(u_{mj}(k) - \alpha_{ij}))} - \frac{1}{1 + \exp(-H_j(u_{mj}(k) - \beta_{ij}))} \quad (6)$$

$(i = 1, 2, \dots, M_j), (j = 1, 2, \dots, Q)$

逆システムの非線形関数  $f^{-1}(\cdot)$  への入力を  $u_{mj}(k)$  とした時の出力  $u(k)$  は次式によって表すことができる。

$$u(k) = \sum_{i=1}^{M_j} (c_{ij} + d_{ij}u_{mj}(k))I_{ij}(u_{mj}(k)) + \epsilon(k) \quad (7)$$

ここで、 $\epsilon(k)$ :近似誤差、 $c_{ij}, d_{ij}$ :重みパラメータ、 $I_{ij}(\cdot)$ :各個体のパラメータを用いた ACF である。(7) 式およびデータ候補  $u_{mj}(k)$  より、重みパラメータ  $c_{ij}, d_{ij}$  を最小二乗法によって求める。(7) 式をベクトル表示すると次式のようになる。

$$u(k) = f^{-1}(u_{mj}(k)) = \varphi_j^T(k)\theta_j + \epsilon(k) \quad (8)$$

ここで、ベクトル  $\theta_j$  とベクトル  $\varphi_j(k)$  は次のようになる。

$$\begin{cases} \theta_j = [c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{M_jj}, d_{1j}, d_{2j}, \dots, d_{M_jj}]^T \\ \varphi_j(k) = [I_{1j}(u_{mj}(k)), I_{2j}(u_{mj}(k)), \dots, \\ I_{M_jj}(u_{mj}(k)), u_{mj}(k)I_{1j}(u_{mj}(k)), \\ \dots, u_{mj}(k)I_{M_jj}(u_{mj}(k))]^T \end{cases} \quad (9)$$

(9) 式に最小二乗法を適用すると、未知パラメータベクトル  $\hat{\theta}_j$  は次式のようになる。

$$\hat{\theta}_j = \left[ \sum_{k=k_s}^{k_s+N-1} \varphi_j(k)\varphi_j^T(k) \right]^{-1} \left[ \sum_{k=k_s}^{k_s+N-1} \varphi_j(k)u(k) \right] \quad (10)$$

(10) 式より、それぞれの個体に対する重みパラメータ  $c_{ij}, d_{ij}$  が求まる。ここで  $N$  は同定用信号ベクトル数であり、 $u(k)$  は制御プラントから採取した値を用いる。 $u_{mj}(k)$  は制御プラントから採取した  $y(k)$  を (10) 式に代入することにより得られた値を用いる。

(2-2):ACF による非線形関数の表現

各個体の推定パラメータより次式で ACF による非線形関数の表現を行う。

$$\hat{u}_j(k) = \sum_{i=1}^{M_j} (c_{ij} + d_{ij}u_{mj}(k))I_{ij}(u_{mj}(k)) \quad (11)$$

(2-3):適応度計算

各個体の適応度を計算する。適応度計算には AIC<sup>7)</sup> (赤池情報量規範: Akaike Information Criterion) を用い、逆システムの真の出力と推定出力以外に ACF の個数  $M$  も考慮に入れる。

$$AIC_j = N \log \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=k_s}^{k_s+N-1} \{u(k) - \hat{u}_j(k)\}^2 \right\} + 2P_j \quad (12)$$

$(i = 1, 2, \dots, Q)$

ここで、 $u(k)$  は逆システムの真の出力 (制御プラントへの入力)、 $\hat{u}_j(k)$  は推定モデル出力、 $P_j$  はパラメータ数で  $P_j = 2M_j$  である。なお、GA は適応度  $F$  の最大化を図るアルゴリズムなので、この AIC は次式のように適応度  $F$  に変換される。

$$F_j = \mathcal{X} \exp \left( \frac{-AIC_j}{\mathcal{Y}} \right) \quad (j = 1, 2, \dots, Q) \quad (13)$$

ただし、 $\mathcal{X}, \mathcal{Y}$  は適応度の重みパラメータであり、任意に設定を行う。

(2-4):同定結果の算出

制御プラントの逆システムの同定結果を算出する。

(13) 式の適応度計算によって算出された適応度が最も高い個体を  $g$  世代における同定結果とする。同定結果より線形項パラメータ:  $\{w_i\}(i = 0, 1, \dots, n)$ 、 $\{v_i\}(i = 1, 2, \dots, r)$ 、非線形関数:  $f^{-1}(u_m(k))$  を決定する。

step 3 : フィードフォワードコントローラの構成

同定世代数  $g$ 、時間ステップ  $k = N + gR + 1 \sim N + (g + 1)R$  における同定結果 (線形項パラメータ:  $\{w_i\}(i = 0, 1, \dots, n)$ 、 $\{v_i\}(i = 1, 2, \dots, r)$ 、非線形関数:  $f^{-1}(u_m(k))$ ) からフィードフォワードコントローラの構成を行う。このコントローラは時間ステップ  $k = N + (g + 1)R + 1 \sim N + (g + 2)R$  で制御に用いる。フィードフォワードコントローラの線形補償部、非線形補償部は以下のように構成する。

線形補償部

線形補償部は  $g$  世代の同定結果のパラメータ  $\{w_i\}$ 、 $\{v_i\}$  を用いて次式のように構成する。

$$\begin{cases} e_f(k) = G^{-1}(q)y_r(k) \\ G^{-1}(q) = q \frac{W(q^{-1})}{V(q^{-1})} \\ W(q^{-1}) = w_0 + w_1q^{-1} + \dots + w_nq^{-n} \\ V(q^{-1}) = 1 + v_1q^{-1} + v_2q^{-2} + \dots + v_rq^{-r} \end{cases} \quad (14)$$

非線形補償部

非線形補償部は  $g$  世代の同定結果のパラメータ  $M$ 、 $\{\alpha_i\}$ 、 $\{\beta_i\}$ 、 $H$ 、 $\{c_i\}$ 、 $\{d_i\}$  より次式のように構成する。

$$s_f(k) = f^{-1}(e_f(k)) = \sum_{i=1}^M (c_i + d_i e_f(k)) I_i(e_f(k)) \quad (15)$$

step 4 : 遺伝的操作

複製

個体集団  $\Omega(g)$  に適応度に比例した選択確率で複製操作をする。すなわち、各個体  $\Omega_i(g)$  を  $F_i / \sum_{j=1}^Q F_j$  の確率で複製し個体集団  $\Omega'(g)$  を生成する。

交叉

個体集団  $\Omega'(g)$  内で個体のペアをランダムに作り、交叉確率  $P_c$  に従って交叉点の前後で二進文字列を入れ替えて新たな個体集団  $\Omega''(g)$  とする。また、交叉点の位置はランダムに選ぶ。交叉例を図 - 10 に示す。

突然変異

個体集団  $\Omega''(g)$  内の各遺伝子 (二進文字列) について、突然変異確率  $P_m$  に従ってその遺伝子を反転させる。突然変異の例を図 - 11 に示す。

step 5 : 繰り返し

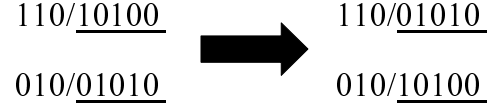


図 - 10 交叉の例



図 - 11 突然変異の例

世代数  $g = g + 1$  とし step 1 に戻る。

step 1 から step 4 を繰り返し行うことによってフィードフォワードコントローラの構成を行い、図 - 5 の制御システムにおいてフィードフォワード制御を行う。

## 5. シミュレーション実験

次のような Hammerstein 型非線形システムを制御対象プラントとする。

$$\begin{cases} A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u_m(k-1) + e(k) \\ u_m(k) = f(u(k)) \\ = \begin{cases} 0.025u(k) + 4.75 & (10.0 \leq u(k)) \\ 0.5u(k) & (-10.0 \leq u(k) < 10.0) \\ 0.025u(k) - 4.75 & (u(k) \leq -10.0) \end{cases} \\ A(q^{-1}) = 1 + 0.4q^{-1}, \quad B(q^{-1}) = 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

ここで、 $e(k)$  は (平均, 分散) = (0.0, 0.01) の正規白色雑音である。(16) 式のような信号を規範入力に用いた。

$$y_r = 4.0 \sin(0.1 \cdot k) \quad (17)$$

線形動的要素の次数  $n = 1$ 、 $r = 0$  より、線形補償部のパラメータは  $w_0$  と  $w_1$  である。フィードバックコントローラのゲインは  $K_p = 1.0$  に設定し、同定用信号ベクトル数とフィードフォワードコントローラの更新間隔はそれぞれ  $N = 500$ 、 $R = 100$  に設定した。

GA の設定パラメータ等は以下の通りである。

[GA の設定パラメータ]

個体数:  $Q = 50$ 、交叉確率:  $P_c = 0.8$ 、突然変異確率:



$P_m = 0.03$ .

探索範囲；ACF の最大個数  $M_{max} = 11$ 、線形補償部のパラメータ  $\{w_i\} : [-5, 5]$ 、ACF の分割点  $\{\alpha_i\} : [-10, 10]$ 、 $\{\beta_i\} : [-10, 10]$ 、 $H : [0.1, 100]$ 。

適応度の重みパラメータを  $\mathcal{X} = 300$ 、 $\mathcal{Y} = 300$  に設定した。ACF の個数を決定する  $S_1$  ブロックのビット数  $L_1$  は 10 ビット、ACF の分割点を決定する  $S_2$  ブロックのビット数  $L_2$  はそれぞれ 10 ビット、ACF の形状を決めるパラメータである  $H$  を決定する  $S_3$  ブロックのビット数  $L_3$  は 10 ビット、逆システムの線形項パラメータである  $\{w_i\}$  を決定する  $S_4$  ブロックのビット数  $L_4$  は 10 ビットとした。なお、線形補償部の次数  $r = 0$  よりパラメータ  $\{v_i\}$  およびそれに関する  $S_5$  ブロックは存在しない。フィードフォワードコントローラの出力に対するリミッターは  $[-2000.0 \leq s_f(k) \leq 2000.0]$  となるように設定した。

時間ステップ  $k = 30000$  でフィードフォワードコントローラに構成されている線形補償部のパラメータを表 - 1 に、非線形補償部を図 - 12 に示す。また、図 - 13 に時間ステップ  $k = 0 \sim 1000$  における規範入力  $y_r(k)$ 、出力  $y(k)$ 、誤差信号  $e_b(k)$  を示す。図 - 14 に時間ステップ  $k = 29000 \sim 30000$  における規範入力  $y_r(k)$ 、出力  $y(k)$ 、誤差信号  $e_b(k)$  を示す。ただし、逆システムの同定結果において一つのパラメータを固定しても同定結果の一般性は失われないことから  $w_0 = 2.0$  として線形補償部のパラメータおよび非線形補償部の比較を行う。

表 - 1 から線形補償部は真の逆システムのパラメータと比較して  $w_1$  に大きな誤差がある。また、図 - 12 から非線形補償部も真の逆システムと比較してわずかなずれがあることが分かる。図 - 13、図 - 14、図 - 15 から雑音に乱されたシステムでも制御開始時には規範入力  $y_r(k)$  と出力  $y(k)$  はかなりの誤差を有するが、フィードフォワードコントローラの構成が行われることにより規範入力に出力が追従し、誤差もほぼ零になっていることが確認できる。また、このことから真の逆システムと線形補償部、非線形補償部それぞれの差分は互いに打ち消しあうことで適切な逆システムの同定が行えていると考えられる。図 - 15 の  $k = 18000$  あたりで、より良いフィードフォワードコントローラの構成による制御性能の向上が見られる。

表 - 1 線形補償部のパラメータ

	$w_0$	$w_1$
真の逆システム	2.00	0.80
線形補償部	2.00	1.05

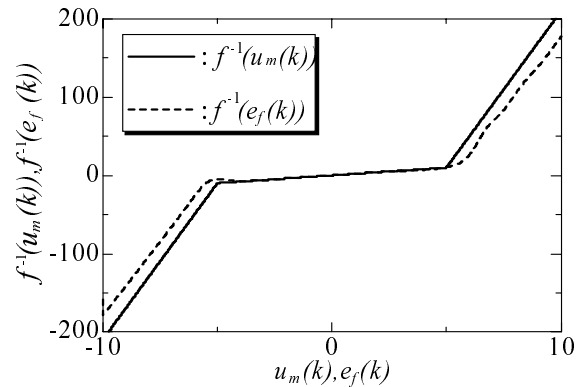


図 - 12 非線形静的要素の真の逆関数と非線形補償部

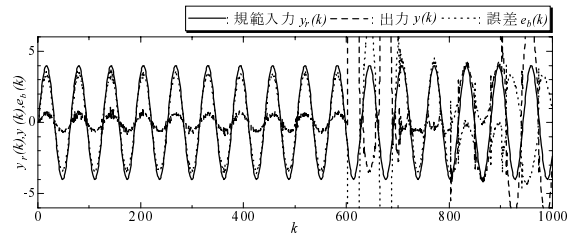


図 - 13  $k=0 \sim 1000$  の規範入力, 出力, 誤差

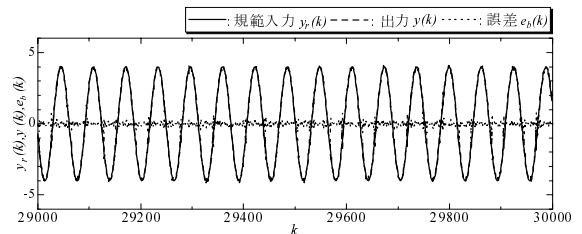


図 - 14  $k=29000 \sim 30000$  の規範入力, 出力, 誤差

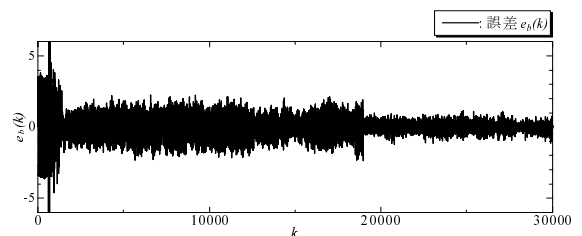


図 - 15 誤差信号

## 6. おわりに

本報告では、ACF と GA を用いた Hammerstein 型離散時間非線形システムのフィードフォワード制御法を提案した。また、フィードフォワードコントローラの構成法として、制御プラントの入力信号および出力信号のデータより、その逆システムを同定し、同定結果に基づいてフィードフォワードコントローラを構成する方法を提案した。シミュレーション実験により、出力データが雑音により乱されている場合にも規範入力に出力が追従し、その誤差がほぼ零になるような制御を行うことができた。

逆システムを構成しにくい、飽和特性や不感帯要素を非線形静的要素に持つ Hammerstein 型非線形システムを制御プラントとする場合や、高レベルの雑音が存在する場合の制御、制御プラントが緩やかな変化をした場合の本制御法の適用、実システムへの適用などが今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 吉田 晋、鎌野 琢也、鈴木 茂行、安野 卓、片岡 雄、遺伝的アルゴリズムに基づく非線形サーボシステムのフィードフォワード制御、システム制御情報学会論文誌、Vol.9, No.11, pp.511-519 (1996).
- 2) 足立 修一、村上 秀幸、Hammerstein モデルを用いた非線形同定に基づく一般化予測制御系の構成法、システム制御情報学会論文誌、Vol.8, No.3, pp.115-121 (1995).
- 3) T. Hatanaka, K. Uosaki and M. Koga, Evolutionary Computation Approach to Hammerstein Model Identification, Proc. of the 4th Asian Control Conference, pp.1730-1735 (2002).
- 4) 八野 知博、濱邊 義久、高田 等、GA と自動抽出関数による Hammerstein 型非線形システムのフィードフォワード制御、第 24 回計測自動制御学会学術講演会予稿集、pp.73-74 (2005).
- 5) 濱邊 義久、八野 知博、高田 等、GA と ACF による同定に基づく Hammerstein 型非線形システムのフィードフォワード制御、第 25 回計測自動制御学会学術講演会予稿集、pp.47-48 (2006).
- 6) 北野 宏明、遺伝的アルゴリズム、産業図書、(1993).

- 7) H. Akaike, A New Look at the Statistical Model Identification, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.19, No.6, pp.716-723 (1974).