

GA による準最適化パラメータ値をもつ PID 型加速器付 Extremum Seeking 制御

高田 等* 寶來 正樹** 八野 知博*

An Extremum Seeking Control with PID-type Accelerator of Suboptimal Parameter by GA

Hitoshi TAKATA*, Masaki HOURAI** and Tomohiro HACHINO*

In this paper we consider a modification of the standard type extremum seeking control for nonlinear systems. This method modifies amount of control by adding a PID acceleration term behind of an Low-pass filter. Parameters included in this PID-type Accelerator are suboptimally selected by using Genetic Algorithm(GA). Simulation results show that this modified extremum seeking control enables its operation to reach the maximum point swiftly.

Keywords: Nonlinear control, Extremum seeking control, PID-type accelerator, Genetic algorithm

1. まえがき

一般に、反応温度・流量・濃度・圧力を取り扱うプロセス系を対象としたプラントなどは、その特性が複雑で、しかも非線形性が強い。これらに対して最適で安定した制御を行うことは容易でない。これらの問題に対し、最適運転点をオンラインで探索しながら運転する適応制御として Extremum Seeking 制御^{1),2)}がある。

本論文では、化学攪拌プロセスモデルである Monod モデルに対して標準型 Extremum Seeking 制御¹⁾の改良型を考察した。具体的には LPF(低域フィルタ)の後に PID(比例 + 積分 + 微分) 調節機能を有する PID 型加速器を導入する。この加速器を付加することにより最適運転点までの速応性の向上を目指す²⁾。その際 PID 型加速器^{3),4)}のパラメータである比例ゲイン、積

分時間、微分時間の 3 つのパラメータを遺伝的アルゴリズム (GA)⁵⁾ で最適化した。MATLAB-Simulink^{6),7)} による数値シミュレーション実験により本手法の有効性を確認した。

2. 標準型 Extremum Seeking 制御

2.1 概要

本章は、Extremum Seeking 制御の基礎となる標準型 Extremum Seeking 制御¹⁾について述べる。

2.2 問題設定

制御対象 (プラント) として未知パラメータを含む次の 1 入力 1 出力の非線形システムを考える。

$$\dot{x}(t) = f(x(t), \alpha(t), u(t)) \quad (1)$$

$$y(t) = h(x(t), u(t)) \quad (2)$$

ただし、 t : 時刻、 $x \in R^n$: 状態ベクトル、 $u \in R$: 入力、 $y \in R$: 出力、 f と h : 未知の非線形関数、 $\alpha \in R$: 未知パラメータ。

2010 年 8 月 31 日受理

* 電気電子工学専攻

** 博士前期課程電気電子工学専攻

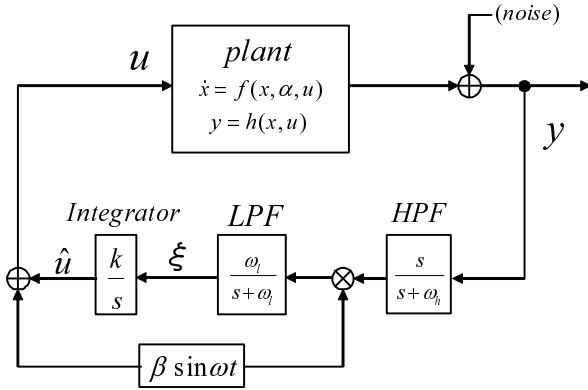


図 - 1 標準型 Extremum Seeking 制御の構成図

評価関数は (1) 式の平衡点状態 $\{z : f(z, \alpha, u) = 0\}$ に対し

$$J(u) = h(z, u) \quad (3)$$

で与えられる。

図 - 1 は標準型 Extremum Seeking 制御のフィードバック構成図を示す。ただし、 $k > 0$, $\beta > 0$, $\omega_l \leq \omega_h$ である。

標準型 Extremum Seeking 制御は構造が簡単で実用的であるが、制御量 u の最適値 u^* への移行に時間がかかり、速応性の向上という問題点が挙げられる。よって次に、速応性を向上させるため PID 型加速器を付加した PID 型加速器付 Extremum Seeking 制御²⁾について説明する。

3. PID 型加速器

3.1 背景

前章で述べたように標準型 Extremum Seeking 制御は速応性を改善する必要がある。その手法の 1 つとして、比例 (Proportional) 動作、積分 (Integral) 動作、微分 (Derivative) 動作の 3 つを組み合わせることで速応性を向上させる PID 型がある。

3.2 PID 動作

PID 動作は比例動作と積分動作と微分動作を組み合わせたものである。比例動作は操作量を最適値と現在値との差に比例した大きさになるようにして、徐々に調節する制御である。しかし、実際には制御量が最適値へ近づくと操作量が小さくなりすぎ、わずかな誤差の残留誤差が残る。この残留誤差を無くすために適用

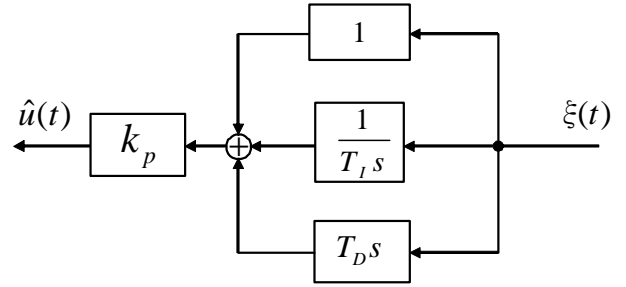


図 - 2 PID 動作の基本構成

されるのが積分動作であり、比例動作に積分動作を加えたものを PI 動作という。なお、積分制御の欠点である偏差を足していく時間ロスを補うために、偏差の変化率、つまり偏差が変化する速度を捉える微分動作を加える。PI 動作に微分動作を加えたものを PID 動作といい、PID 動作を行う加速器を PID 型加速器という。図 - 2 に PID 動作の基本構成を示す。 k_p は比例ゲイン、 T_I は積分時間、 T_D は微分時間を表している。従来の研究ではこの 3 つのパラメータは PID 型 Extremum Seeking 制御において、試行錯誤的に決定されていた²⁾。本研究ではこのパラメータを GA で準最適に決定する。

4. GA によるパラメータ最適化

4.1 概要

本研究では PID 型加速器のパラメータ決定に関し、生物の遺伝と進化の機構を計算機上で模倣し、確率的探索、学習、最適化を行うアルゴリズムである GA を用いる。

4.2 GA の構成

Q 個の個体からなる集合を考え、世代 t における集合 $P(t)$ が遺伝子の変異を経て次の世代 $t+1$ における集合 $P(t+1)$ に変わるものとする。遺伝的操作に基づいた GA の一般的手順を以下に述べる。図 - 3 にブロック図を示す。

Step1: 初期候補集団発生

ランダムに Q 個の個体を生成して初期候補集団 $P(0)$ を作り、世代 $g = 0$ とする。

Step2: デコーディング

各個体を遺伝子型から表現型にデコーディング操作

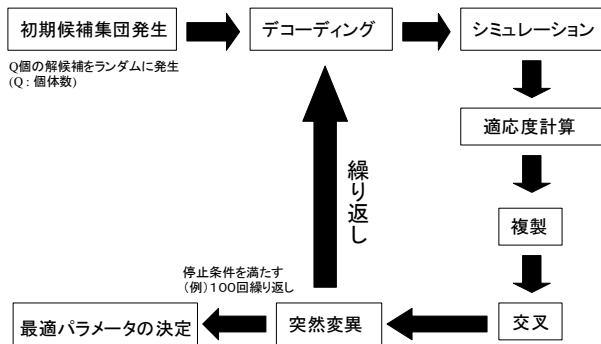


図 - 3 GA のブロック図

を施す。

Step3：シミュレーション

デコーディングされたパラメータを使用し、シミュレーションを行う。GA を行う上での評価値、つまり目的関数 Z はシミュレーションから求めることができる。シミュレーション時間 t に対する最適値を $Y(t)$ 、出力値を $y(t)$ とすると

$$Z = \int_0^t |Y(t) - y(t)| dt \quad (4)$$

となり、最適値と出力値との差の積分を目的関数 Z とする。

Step4：適応度計算

個体集団 $P(g)$ 内の各個体について、 Z を適応度 F に変換する。適応度 F は次式で表させる。

$$F = \frac{100}{\beta + Z} \quad (\beta \geq 0) \quad (5)$$

Step5：複製

個体集団 $P(g)$ に複製操作を与えて、 $P'(g)$ を生成する。

Step6：交叉

個体集団 $P'(g)$ に交叉操作を与えて、 $P''(g)$ を生成する。

Step7：突然変異

個体集団 $P''(g)$ に突然変異操作を与えて次世代の個体集団 $P(g+1)$ を生成する。

Step8：繰り返し

停止条件を満たさなければ $g = g + 1$ として Step2 へ。満たす時終了し、全世代で最大の適応度を持つ個体を解とする。

5. シミュレーション

5.1 制御対象

連続攪拌生成物反応器内の生物生産最大化問題を考える。次式で示されるような、Monod model の非線形システムを考える。

$$\dot{x}_1 = f_1(x, \alpha, u) = x_1 \left(\frac{x_2}{\alpha + x_2} - u \right) \quad (6)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x, u) = u(1 - x_2) - \frac{x_1 x_2}{\alpha + x_2} \quad (7)$$

$$y = h(x, \alpha, u) = x_1 \cdot u \quad (8)$$

ただし、 x_1 ：生物濃度、 x_2 ：基質濃度、 u ：希釈率、 α ：飽和定数、 y ：生物生産率である。ここで、シミュレーション実験として次のように設定した。

$$\alpha = \begin{cases} 0.02 & (0 \leq t < 1000) \\ 0.1 & (1000 \leq t < 2000) \\ -0.00008t + 0.26 & (2000 \leq t < 3000) \\ 0.02 & (3000 \leq t \leq 4000) \end{cases}$$

$\beta = 0.04$, $\omega = 0.15$, $\omega_h = 0.2$, $\omega_l = 0.1$, $k = 0.5$

初期値 $u(0) = 0.6$,

Noise power = 0 or Noise power = 0.001

ここで Noise power とは白色雑音の強度を示し、パワースペクトル密度 (PSD) の高さを表す。

5.2 GA の設定パラメータ

GA のパラメータは以下のように設定した。

世代数： $G = 100$

個体数： $Q = 100$

各個体の二進文字列ビット数： $L_1 = L_2 = L_3 = 8$

交叉確率： $P_c = 0.8$

突然変異確率： $P_m = 0.01$

k_P の探索範囲： $0.4 \leq k_P \leq 4$

T_I の探索範囲： $0.5 \leq T_I \leq 5$

T_D の探索範囲： $5 \leq T_D \leq 50$

これらの各パラメータ値は工学的に妥当と思われるものを試行錯誤的に求めた。GA を 100 世代シミュレーションし、世代数に対する適応度の推移を図 - 4 に示す。世代数が進むにつれて適応度の値が大きくなっていくことから GA が機能していることがわかる。最終的に収束した値は $F = 2.0838$ であり、その時の各パラメータ値は $k_P = 3.4071$ 、 $T_I = 2.5471$ 、 $T_D = 17.7059$ であった。

この最適化されたパラメータ値を使用し、Extremum

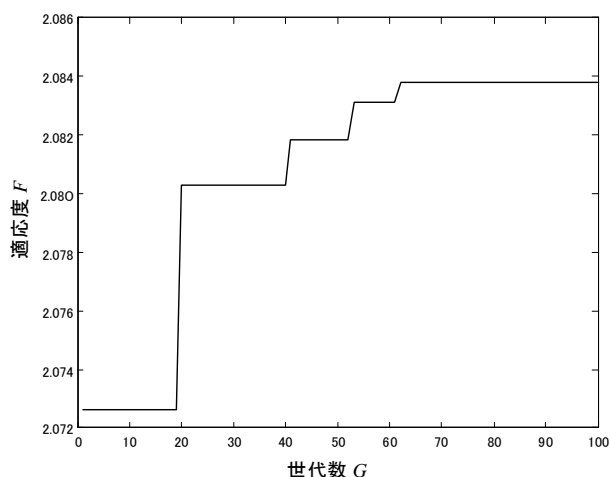


図 - 4 適応度の推移

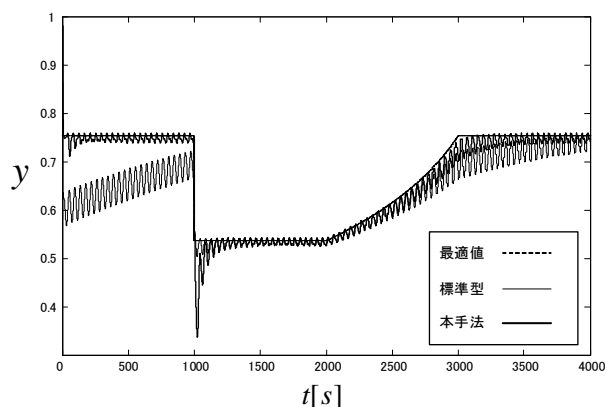


図 - 5 本手法と標準型の比較 (ノイズなし)

Seeking 制御のシミュレーションを行った結果を図 - 5、図 - 6、図 - 7、図 - 8 に示す。

5.3 シミュレーション結果の考察

図 - 5 から PID のパラメータを GA で探索する本手法のほうが、1000 秒あたりでのアンダーシュートはあるものの、PID を付加していない標準型よりも全体的にみて最適運転点到達時間が短縮されていることがわかる。特に 0 秒から 1000 秒において速応性の向上が顕著にみられる。また、PID を付加したほうが波形の振動も抑えられていることから、偏差の変化を捉える微分動作がうまく機能していることもわかる。

図 - 6 は PID のパラメータを試行錯誤的に求めている旧手法と、GA でパラメータを探索した本手法との比較である。この図からかわるように GA でパラメータを探索したほうが、最適なパラメータが選択され、

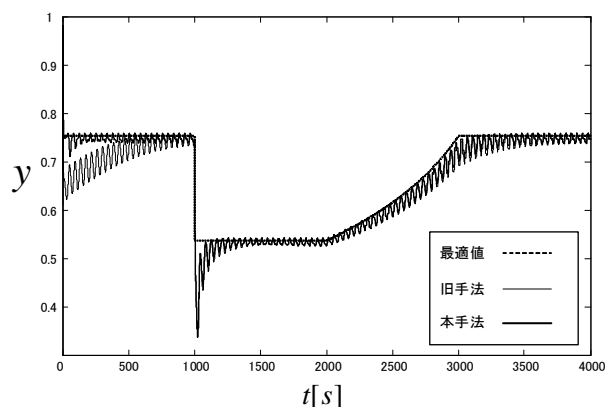


図 - 6 本手法と旧手法の比較 (ノイズなし)

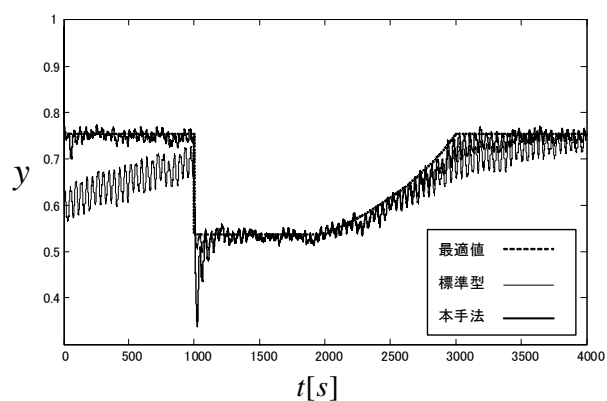


図 - 7 本手法と標準型の比較 (ノイズあり)

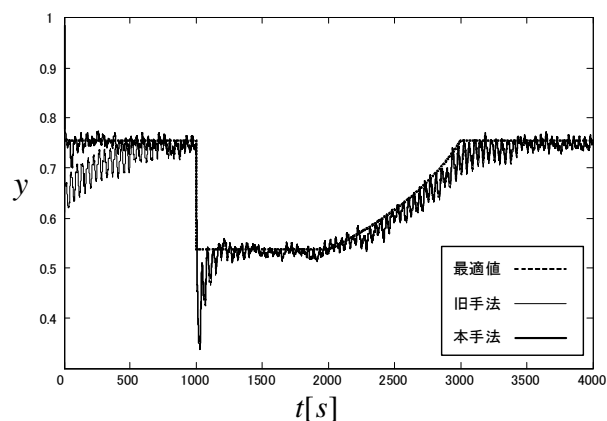


図 - 8 本手法と旧手法の比較 (ノイズあり)

最適運転点到達時間が改善されていることがわかる。

図 - 7、図 - 8 はノイズを付加したときの出力結果である。ノイズの影響を少しは受けているが、本手法の有効性が確認できる。

以上から、PID 型加速器を付加し、そのパラメータを GA で最適化するという本手法の有効性が確認できた。

6. おわりに

本論文では、PID 型加速器を付加し、そのパラメータを GA で準最適に求める Extremum Seeking 制御を提案した。その結果、GA で最適化されたパラメータを使用することで、ノイズの有無に関わらず速応性が改善された。

今後の課題として GA のみならず PSO などのアルゴリズムの適用や、他のシステムへの応用などがある。

参考文献

- 1) K. B. Ariyur and M. Krstić: Real-time Optimization by Extremum Seeking Control, John Wiley & Sons, INC., pp.99-117 (2003).

- 2) 高田 等、上原 幸樹、八野 知博：PID 型補正を有する Extremum Seeking 制御、第 61 回電気関係学会九州支部連合大会講演論文集、12-2P-03 (2008).
- 3) 須田 信英：PID 制御、朝倉書店 (1992).
- 4) 山本 重彦、加藤 尚武：PID 制御の基礎と応用（第 2 版）朝倉書店、pp.73-140 (2005).
- 5) 北野 宏明:遺伝的アルゴリズム、産業図書 (1993).
- 6) The Math Works : MATLAB The Language of Technical Computing、サイバネットシステム株式会社 (2004).
- 7) The Math Works:SIMULINK Dynamic System Simulation for MATLAB、サイバネットシステム株式会社 (1997).