

出力差分値付加による 改良型 Extremum Seeking 制御

高田 等* 下野 洋明** 八野 知博*

Modified Extremum Seeking Control by Adding Difference Values of Output

Hitoshi TAKATA*, Hiroaki SHIMONO** and Tomohiro HACHINO*

In this paper we are concerned with a modified extremum seeking control for nonlinear systems. A standard extremum seeking control (SESC) has a simple structure. But it takes a long time to reach an optimal operating curve. We consider its modification scheme which is aimed to reach the optimal operating curve more rapidly than the standard one. In the modification, we add another signal to SESC's control, which is composed by using difference values of SESC's output. This proposed method is applied to Monod model to investigate its effectiveness. Numerical simulation results show that this modified method can improve the time response to the optimal operating curve more rapidly than the standard one.

Keywords: Standard extremum seeking control, Modified extremum seeking control, Monod model, Optimal operating curve

1. はじめに

プロセス系などにおける制御対象は、一般に複雑な特性を持ち非線形性が強い。そのために最適で安定した制御を行うことが一般的に困難である。これらの問題に対して最適運転点を探索しながら運転する適応制御の一種に標準型 Extremum Seeking 制御 (SESC: Standard Extremum Seeking Control) がある。SESC は適応制御の一種である。適応制御は主に既知の運転点や基準軌道に対して扱われるが、SESC は評価関数を最適化するように未知の運転点においても制御されるように設計されている。SESC は構造が簡単で実用的であり、生物や化学の攪拌プロセス^{1)–3)}や

自動車エンジンの発火点角度制御器⁴⁾などに適用され易い。しかし、制御量が最適運転点に到達するまでに時間がかかるという問題点がある。

本報告では SESC の出力応答の速応性の更なる改良を目的とし、改良型 Extremum Seeking 制御を考察する。具体的には、出力応答の差分値を付加する出力差分値付加改良型 Extremum Seeking 制御 (MESC: Modified Extremum Seeking Control) であり、これは SESC の出力応答の時間変化率に応じた信号を新たな入力信号として加える手法である。連続攪拌生成物最大化問題の Monod モデルを制御対象とした数値シミュレーション実験を行い、従来の SESC と本手法による MESC を比較・検討する。

第 2 節で問題設定、第 3 節で制御対象、第 4 節で SESC について、第 5 節で MESC について、第 6 節で数値シミュレーション実験、第 7 節で結論と今後の課題について述べる。

2008 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

2. 問題設定

制御対象として、次の未知パラメータを含む 1 入力 1 出力の非線形システムを考える。

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

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

$$J(t) = J(x_e(t), \alpha(t), u(t)) \quad (3)$$

但し、 $\bullet = d/dt$ 、 $x \in R^n$: 状態ベクトル、 $\alpha \in R^m$: 未知パラメータ、 $u \in R$: 入力 (制御量)、 $y \in R$: 出力 (評価関数)、 $f \in R^n$ と $h \in R$: 未知の非線形関数、 $J \in R$: 目標関数、 $w \in R$: ノイズ、 $x_e \in R^n$: 平衡状態における状態ベクトルである。

なお、評価するものは出力 $y(t)$ であり、この問題設定における目的は、数値シミュレーション実験において出力 $y(t)$ を目標関数 $J(t)$ になるべく速く近付けることである。

3. 制御対象

本報告では制御対象として、次に示す非線形システムである連続攪拌生成物最大化問題の Monod モデル^{5),6)}を考える。

$$\dot{x}_1 = f_1(x, \alpha, u) = x_1 \left(\frac{x_2}{\alpha + x_2} - u \right) \quad (4)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x, \alpha, u) = u(1 - x_2) - \frac{x_1 x_2}{\alpha + x_2} \quad (5)$$

$$y = h(x, \alpha, u) + w = x_1 u + w \quad (6)$$

但し、 $x = [x_1, x_2]^T$ 、 $0 < u < 1$ である。 x_1 は生物濃度、 x_2 は基質濃度、制御量の u は希釈率 (初期値 $u(0) = 0.6$)、 α は飽和定数、出力の y は生物生産率をそれぞれ表す。

また、平衡状態出力、即ち目標関数は次式で与える。

$$J = \frac{u^*(1 - (1 + \alpha)u^*)}{1 - u^*} \quad (7)$$

但し、

$$u^* = 1 - \sqrt{\frac{\alpha}{1 + \alpha}} \quad (8)$$

未知パラメータ α は、 $0 \leq t < 800$ 秒の時は $\alpha = 0.02$ 、 $800 \leq t \leq 2000$ 秒の時は $\alpha = 0.1$ と設定する。全体の数値シミュレーション時間は 2000 秒である。ノイズ w は、 $PSD = 0.000001$ の白色雑音を用いる。

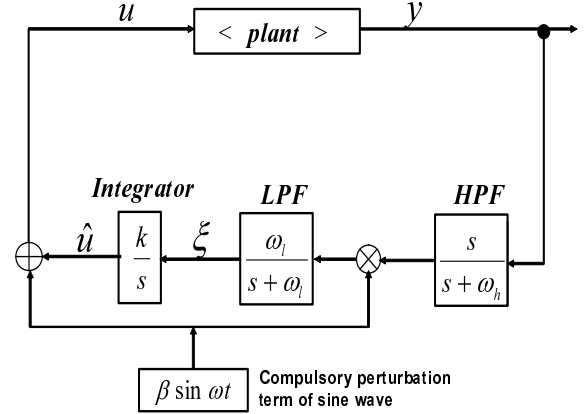


図 - 1 SESC の機構

4. 標準型 Extremum Seeking 制御

4.1 概要

非線形問題に対して SESC は、制御対象におけるシステムの最適化を目的としており、ハイパスフィルタ (HPF)、ローパスフィルタ (LPF)、積分器 (Integrator)、正弦波強制振動項からなるフィードバック構造である。最適運転点を探索しながら運転する。Monod モデルでは生物生産率の最大化に着目している。図 - 1 に SESC の機構を示す。但し、 $k > 0$ 、 $\beta > 0$ 、 $\omega_l \leq \omega_h$ である。

4.2 SESC の制御手法

図 - 1 において、強制振動項である正弦波は出力応答の振動的要因となりうるが、plant 内のシステム状態が変化した場合においても常に制御量 u を最適値 u^* へ移行するために必要な常時監査機構である。

plant からの出力信号 $y(t)$ は、正弦波強制振動項 $\beta \sin \omega t$ と同等の角周波数成分 ω を含む多数の項の和で表せ、この信号を HPF を通すと直流成分が遮断される。次に、この信号に正弦波強制振動項が乗じられ、LPF を通すことで交流成分が遮断される。但し、HPF と LPF の遮断周波数は正弦波強制振動項の角周波数に対してそれぞれ適度を選択しなければならない。そして、この信号を Integrator を通し、最後に正弦波強制振動項が加えられる。よって、入力信号 $u(t)$ は次のように表せる。

$$u(t) = \hat{u}(t) + \beta \sin \omega t \quad (9)$$

この $u(t)$ が plant 内へ入力信号として戻り、フィードバックにより以上の過程を繰り返す。 $\hat{u}(t)$ はフィード

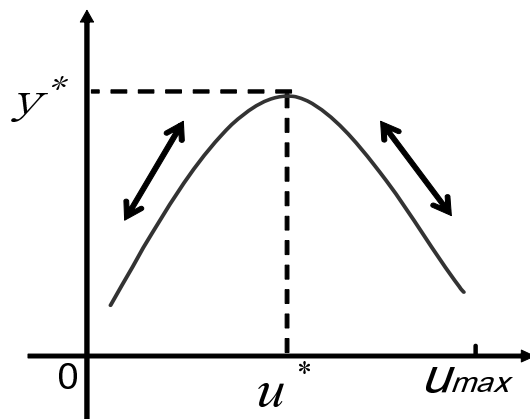


図 - 2 出力応答の概念図

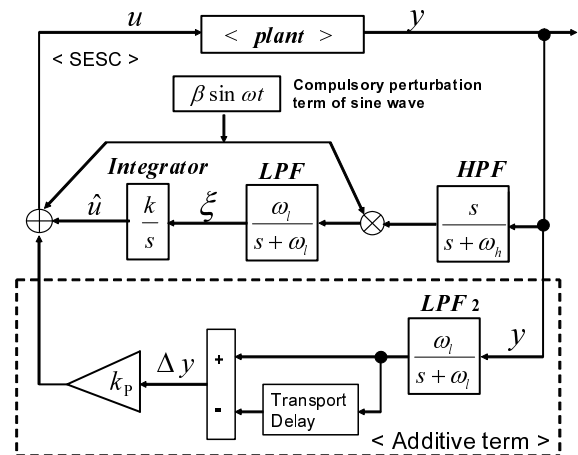


図 - 4 MESC の機構

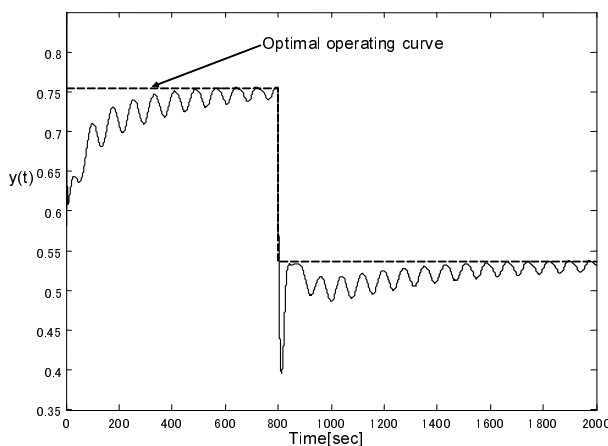


図 - 3 出力 y の時間応答

バックを繰り返すごとにその都度傾きが決定され、制御量 $u(t)$ の最適値である最適運転状態 $u^*(t)$ へと徐々に移行していく。ここで、最適値とは *plant* 内のシステムが落ち着く状態、即ち、平衡状態のことである。制御量 $u(t)$ が最適値へ近付いていくにつれて、出力 $y(t)$ もまた最適値へ近付いていく。

図 - 2 に制御量に対する出力応答の概念図を示す。また、参考として図 - 3 に 6.1 節の数値シミュレーション実験における SESC の出力応答結果の一部を示す。ここでは 800 秒においてシステム状態が変化するように設定しており、破線が目標関数の最適運転軌道である。

このように SESC は構造が簡単で実用的であるが、最適値を探索しながら運転するために制御量が最適値に到達し、安定するまでに時間がかかる。そこで、この出力応答の速応性を改良するために第 5 節において SESC の改良手法を考察する。

4.3 SESC のパラメータ特性

SESC は制御対象に応じて各制御パラメータを設定しなければならないが、一般的にこのパラメータ設定が容易でない。本報告では、制御対象の Monod モデルに対して試験的に以下のようにパラメータを設定し、これを SESC の基本制御パラメータとする。

HPF : 遮断周波数 $\omega_h = 0.2[\text{rad/sec}]$

LPF : 遮断周波数 $\omega_l = 0.02[\text{rad/sec}]$

Integrator : 比例ゲイン $k = 5$

正弦波強制振動項 : $\beta \sin \omega t = 0.03 \sin 0.08t$

5. 改良型 Extremum Seeking 制御

5.1 概要

SESC は図 - 3 に示すようにある程度の時間を要すれば出力応答が最適値に到達する。本節では、SESC の出力応答の速応性を改良することを目的とし、出力応答の差分値を付加する出力差分値付加改良型 Extremum Seeking 制御 (MESC) を考察する。

近年、筆者らは様々な SESC の改良手法を考案しており、正弦波強制振動項に変化を与える^{7)–10)}、チェビシェフ多項式同定を用いる^{5),6),11)}、PID 動作を付加する¹²⁾などの手法がある。

MESC では、これらの各手法よりもよりシンプルな構造を用いることに重点を置いたものである。

5.2 MESC の制御手法

図 - 4 に MESC の機構を示す。これは SESC の機構に新たな追加機構を設けた構造である。

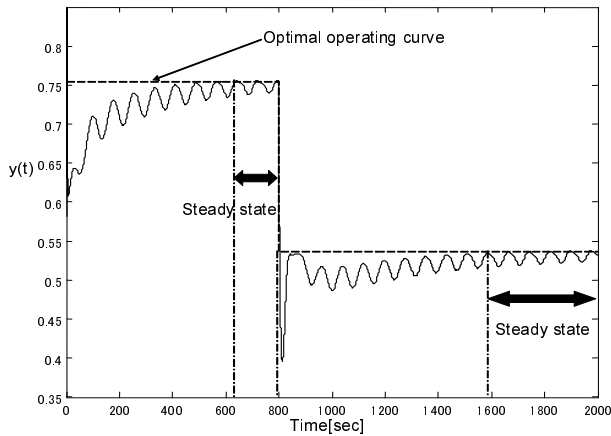


図 - 5 出力 y の時間応答

図 - 5 において、600 秒と 1600 秒あたりからそれぞれの出力応答がほぼ定常状態となる。そこで、定常状態出力時には SESC の機構のみでも出力応答に大きな支障はないので、過渡状態出力時において MESC の追加機構部分が働くような構造にする。過渡状態では時間軸に対して出力応答が大きく変化しているので、この出力応答 $y(t)$ の時間変化率 $\Delta y(t)$ を捉える。なお、SESC からの出力 $y(t)$ にはノイズが含まれていることを考慮して、高周波成分を除去するために LPF_2 を通す。 $\Delta y(t)$ は LPF_2 からの直接信号と、その信号をある時間だけ遅らせた信号との差を取ることで増減の程度を捉える。ここでは、強制振動項の正弦波の一周分だけ波形を遅らせている。ノイズフリー時、 $\Delta y(t) \neq 0$ の時が過渡状態出力であるので、この場合に $\Delta y(t)$ の値を比例ゲイン k_P を通し、これを元の SESC の入力信号部分に加える。MESC での入力信号 $u(t)$ は、(9) 式に対して次のようになる。

$$u(t) = \hat{u}(t) + \beta \sin \omega t + k_P \Delta y(t) \quad (10)$$

定常状態の時は $\Delta y(t) \simeq 0$ となり、元の SESC の機構をほぼそのまま活かすことができる。即ち MESC とは、SESC からの出力応答 $y(t)$ が過渡状態における時に出力信号 $y(t)$ の時間変化率 $\Delta y(t)$ を捉え、それに応じたバイアスを SESC の入力信号源に加えて補正を行うというシンプルな構造である。また、MESC の追加機構部分における各制御パラメータは次のように設定している。

LPF_2 : 遮断周波数 $\omega_l = 0.04[\text{rad/sec}]$

k_P : 比例ゲイン $k_P = 0.25$

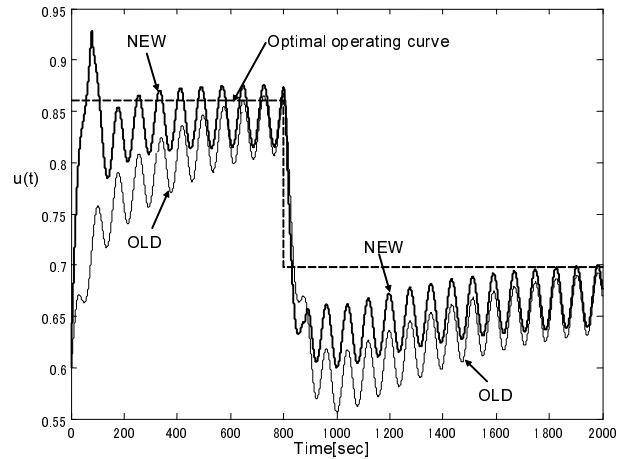


図 - 6 入力 u の時間応答

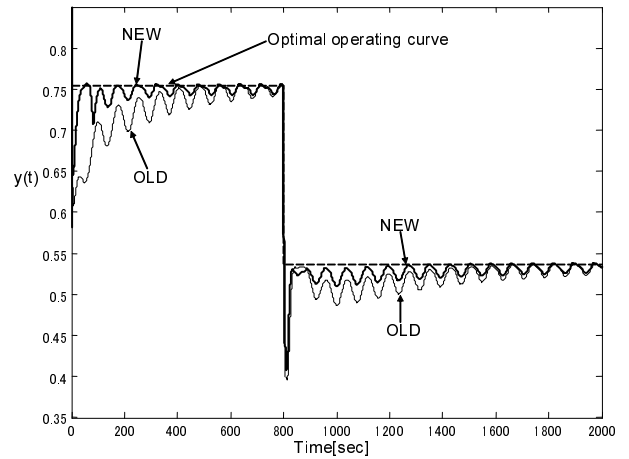


図 - 7 出力 y の時間応答

6. 数値シミュレーション実験

6.1 数値シミュレーション

Monod モデルを制御対象とした数値シミュレーション実験を行った。MATLAB Simulink version 6.3 を使用した。

まず、ノイズフリーの場合として図 - 6 に入力 $u(t)$ 、図 - 7 に出力 $y(t)$ の数値シミュレーション結果をそれぞれ示した。次に、ノイズを加えた場合の出力 $y(t)$ の結果を図 - 8 に示した。破線が目標関数である最適運転軌道、NEW が MESC による時間応答、OLD が SESC による時間応答をそれぞれ表す。このノイズフリーの場合の $\Delta y(t)$ の様子を図 - 9 に、その拡大図を図 - 10 にそれぞれ示した。

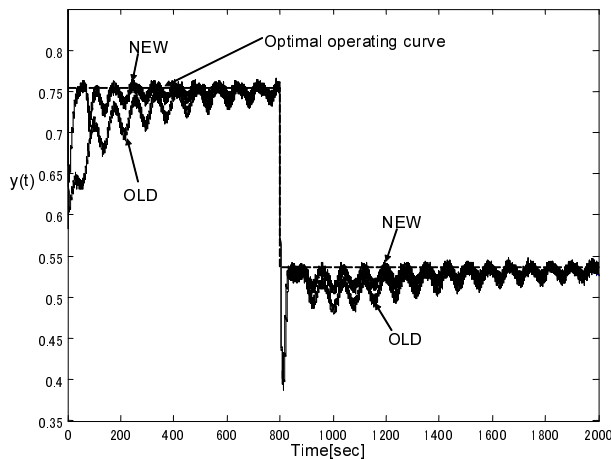


図 - 8 出力 y の時間応答 (ノイズあり)

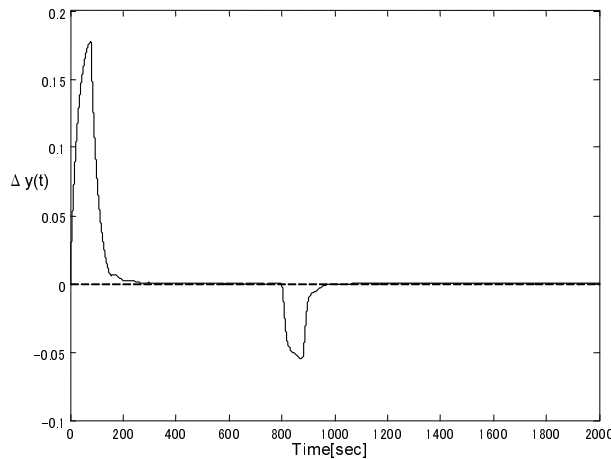


図 - 9 Δy の時間応答

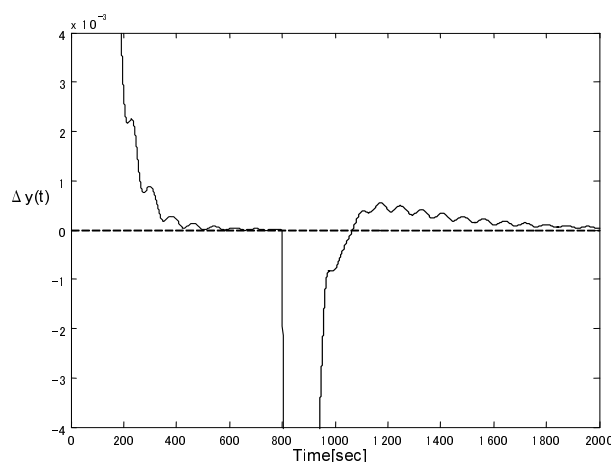


図 - 10 Δy の時間応答 (図 - 9 の拡大図)

6.2 数値シミュレーション結果の検討

図 - 7 において、SESC と MESC は両者とも 600 秒と 1600 秒あたりから定常状態出力となり、本手法の効果が現れている。なお、過渡状態における出力応答は MESC の方が SESC よりも速応性が改良されていることが分かる。問題点としては、図 - 7 においてシステム状態が変化する 800 秒直後における波形の大きな下降が改良されていないことである。これは SESC の出力変化の影響を MESC がそのまま受け取ってしまったと考えられ、今後この部分に関して工夫が必要である。

また、出力応答 $y(t)$ に対する $\Delta y(t)$ の変化は図 - 9 と図 - 10 のようになり、その信号の値に応じた新たな入力信号が元の SESC の入力 $u(t)$ へと加えられ、図 - 6 のような結果が得られた。しかし、 $\Delta y(t)$ は図 - 10 のように定常状態になるにつれて 0 に近付いていく。図 - 8 は雑音下での数値シミュレーション例であるが、ノイズフリーの場合と同様な結果が得られた。

7. 結論と今後の課題

本報告では、標準型 Extremum Seeking 制御に対して出力応答の速応性の改良を目的とし、出力応答の差分値を付加する出力差分値付加改良型 Extremum Seeking 制御を考案した。本手法はシンプルな構造を用いており、改良型構造における最も基本的な手法の一種であると言える。

数値シミュレーション実験により、単なる標準型制御よりも出力応答の速応性の改良がなされることを確認できた。また、出力差分値付加改良型 Extremum Seeking 制御は、標準型制御の出力応答から得られた情報を元に修正を加えるシンプルな手法であるので、他の各改良手法^{5)–12)}と組み合わせて使用できる可能性もある。

今後の課題として、各制御パラメータの検討、他システムに対する適用と応用、更なる制御特性の向上などがあげられる。

参考文献

- 1) G. Bastin and J. Van Impe, Nonlinear and Adaptive Control in Biotechnology, *A Tutorial, European Journal of control*, pp.37-53 (1995).
- 2) H. Wang, M. Krstić and G. Bastin, Optimizing Bioreactors by Extremum Seeking, *Interna-*

tional Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol.13, pp.651-669 (1999).

- 3) K. Ariyur and M. Krstić, Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control, A John Wiley and Sons, INC., Publication, pp.1-117 (2003).
- 4) P. Wellstead and P. Scotson, Self-tuning Extremum Control, *IEE Proceedings, Pt. D*, Vol. 137, No.3, pp.165-175 (1990).
- 5) H. Takata, D. Matsumoto and T. Hachino, An Extremum Seeking Control via Chebyshev Polynomial Identification and LQ Control, *Journal of Signal Processing*, Vol.7, No.6, pp.509-515 (2003).
- 6) H. Takata, T. Hachino, R. Tamura and K. Komatsu, Design of Extremum Seeking Control with Accelerator, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E88-A, No.10, pp.2535-2540 (2005).
- 7) 下野 洋明、時変非線形システムに対する Extremum Seeking 制御、平成 17 年度鹿児島大学工学部電気電子工学科卒業論文、pp.(S26-1)-(S26-23) (2006).
- 8) 高田 等、下野 洋明、八野 知博、Williams-Otto モデルに対する Extremum Seeking 制御法の強制振動項について、第 25 回計測自動制御学会学術講演会予稿集、pp.207-208 (2006).
- 9) 高田 等、下野 洋明、八野 知博、Extremum Seeking 制御の強制振動項における一改良、第 26 回計測自動制御学会学術講演会予稿集、pp.171-172 (2007).
- 10) H. Shimono, H. Takata and T. Hachino, Simulation Study of Modified Extremum Seeking Control, *International Conference on Control, Automation and Systems 2007*, pp.2218-2222 (2007).
- 11) 田村 竜一郎、離散型チェビシェフ多項式同定型加速器を用いた Extremum Seeking 制御の研究、平成 16 年度鹿児島大学大学院理工学研究科修士論文、pp.(14-1)-(14-31) (2005).
- 12) 北原 健次、PID 動作考慮の Krstić 型 Extremum Seeking 制御、平成 17 年度鹿児島大学工学部電気電子工学科卒業論文、pp.(S23-1)-(S23-21) (2006).