遺伝的アルゴリズムによる最適 Look-up-Table コントローラを用いた閉ループ系の構成

非会員 尾 花 和 昭 (日本電信電話)

非会員 渡 辺 亮 (大阪大学)

正 員 内 田 健 康 (早稲田大学)

Closed Loop System Design with Optimal Look-up-Table Controller based on Genetic Algorithm

Kazuaki OBANA, Non-member (Nippon Telegraph and Telephone), Ryo WATANABE, Non-member (Osaka University), Kenko UCHIDA, Member (Waseda University)

In this paper, we focus minimum time optimal problems which have output and output-derivative constraints and propose a closed loop system design with "Optimal Look-up-Table (OLT) Controller" based on Genetic Algorithm. The OLT Controller uses an OLT as an upper or a lower bounds of an input which is produced by a feedback controller (PI controller). If the input is within the bounds, the suggested OLT controller works as same as the feedback controller; if the input is without the bounds, the OLT controller gives the optimal control according to the OLT. Thus, this approach would generate a sub-optimal but practical control.

キーワード：最適 Look-up-Table コントローラ, 遺伝的アルゴリズム, 最適制御, 出力フィードバック

1. はじめに

外乱を含む現実のシステムを制御するには、フィードバックコントローラを用いて閉ループ系を構成する手法が有効であり、制御系を設計する際にはそのようなアプローチがとられることが多い(例えば、文献⁽⁴⁾を参照)。

ところが最短時間問題など、最適制御の構成が要求される制御系設計問題においては、最適制御理論を直接適用した閉ループ系の構成は一般に困難である。これは、最適制御理論においてはシステムの正確なモデルが前提とされていること、またごく単純な例を除き閉ループ系で実現されること、さらには最適制御の計算が一般に厄介であることに起因する(例えば、文献⁽¹¹⁾を参照)。

本稿では、出力及び出力の微分値[†]に拘束条件のある最短時間問題に対し、近似的に最適制御を応用した閉ループを構成する手法を提案する。具体的には、静止状態にあるシステムを指定された運転状態へできるだけ短い時間で遷移させ、その後その運転状態に対して設計された制御則に滑らかに切替え、指定された運転状態を維持する制御系を目標に、このような制御を実現する閉ループ系の構成を検討

する。

本稿では遺伝的アルゴリズムを用いて、最適な入出力の関係を近似的に求め、その対応関係を表す最適 Look-up-Table を作成し、これを用いて閉ループの形で最短時間制御を近似的に実現する方法を提案する。運転状態を維持するための制御則は特に限定されないが、ここではモデルの正確な情報を必要としなく、汎用性の高い PI 制御を想定し、さらに最適 Look-up-Table から PI 制御への滑らかな切替えを実現するために anti-windup 機構を加えた閉ループ系の構成を提案する。

本稿ではシステムのモデルとして線形システムが与えられた形で定式化を行い、数値例もそれに沿ったものを示すが、最適 Look-up-Table の構成アルゴリズムは、モデルの線形/非線形性によらず、さらには正確なモデルが得られない場合でも入出力データを得る実験が可能であるという前提で適用が可能である。また、制御対象は本稿で想定しているジェットエンジンの推力制御のみでなく、一般の起動制御問題の枠組としてとらえることができるため、拘束条件も本稿で定式化したものには特に限定されない。

以下 2 節で問題設定、3 節で閉ループ系の構成を述べ、4 節で設計の手順を示し、5 節で数値例を通して有効性を検証する。

[†]本研究ではジェットエンジンの推力制御を想定しており、エンジンの仕様上の典型的な制限である出力のレート制限を考慮できるようにこの制限を加えた。

2. 問題設定

出力及び出力の微分値に不等式拘束のある、以下の最短時間問題を考える。

最短時間問題

線形時不変で SISO の制御対象

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \dots\dots\dots (1) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned}$$

において、初期条件および終端条件が

$$y(t_0) = y_0, \quad y(t_f) = y_f, \quad \dot{y}(t_f) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

で表されるとき、

$$\min t_f \dots\dots\dots (3)$$

なる条件を満たす制御入力 $u(t)$ を求めよ。

ただし出力及び出力の微分値は

$$\phi(y(t), \dot{y}(t)) \leq 0, \quad t_0 \leq t \leq t_f \dots\dots\dots (4)$$

なる拘束条件に従うものとする。

ここで、各行列及び関数は以下のように定義する。

$$\begin{aligned} A: R^n &\rightarrow R^n, \quad B: R^1 \rightarrow R^n, \quad C: R^n \rightarrow R, \\ \phi: R^2 &\rightarrow R^m \end{aligned}$$

3. 閉ループ系の構成

前節で設定した最短時間問題について、出力フィードバックを用いて閉ループ系を構成するために以下のことを仮定する。

仮定 i. 制御対象は可制御かつ可観測である。

仮定 ii. 出力に対応して最適 Look-up-Table から得られる近似的な最適制御入力を制御対象への入力の上限(ないし下限)として用いるが、線形化したフィードバックコントローラから得られる制御入力のうち、この限度内に収まる時間区分においては、与えられた最適制御の拘束条件を常に満たす出力を得る。

仮定 iii. 前項の時間区分は $t_0 < \delta < t_f$ なる時刻 δ を用いて $\{t \mid \delta \leq t \leq t_f\}$ と表される。

〈3・1〉 最適 Look-up-Table コントローラ 図 1 に最適 Look-up-Table コントローラを用いた閉ループ系を示す。図では、出力から最適 Look-up-Table を参照して得られる近似的な最適制御入力を線形制御対象への入力の上限として用いる場合を示してある(下限の場合も同様に閉ループ系の構成が可能である)。

2 節で述べた最短時間問題を閉ループ系を構成して解くことを考える。

まず、システムの出力を $y(t_0) = y_0$ から $y(t_f) = y_f$ にすることから、図 1 中の ref には y_0 から y_f へと変化するス

図 1 最適 Look-up-Table コントローラを用いて構成した閉ループ系

Fig.1. A closed loop system using Optimal Look-up-Table controller

テップ入力を与えれば良い。

また出力と出力の微分値に関しての不等式拘束条件(式(4))と、 $\min t_f$ の条件(式(3))を満たす入力(すなわち最適制御入力)と出力の対応関係は一般に陽な関数関係で表現できないため、まずこの関数を同定する最適化問題を構成し、この問題の解を試行探索法の一つである GA によるオフラインの計算にて近似的に求め、最適 Look-up-Table を作成する。この最適 Look-up-Table より得られる近似的な最適制御入力を、制御対象への入力値の最大値(もしくは最小値)として用いる。最大値・最小値のどちらを選択するかは、システムの振舞いをあらかじめ数値シミュレーションで調べ決定する。

なおフィードバックコントローラによってサーボ系を構成すれば、任意の初期値 y_0 から任意の目標値 y_f へ制御が可能となる。ただし、最適 Look-up-Table を作成する際に、 y_0 及び y_f は固定して考えた上で導出を行なうため、初期値と目標値の組合せが複数必要な場合は、それに合わせ最適 Look-up-Table も複数導出を行ない、切替えて使用することになる。

そして、フィードバックコントローラによる制御対象への入力 u_k が、最適 Look-up-Table によって得られる、上限(もしくは下限)として用いる近似的な最適制御入力である u^* を越える場合のみ、制御対象への入力に制限を加えるリミッタとして動作して u^* をシステムへの入力とし、それ以外では u_k をそのままシステムへの入力とする。

〈3・1・1〉 anti-windup コントローラ 最適 Look-up-Table コントローラは制御対象への入力のリミッタとして動作する。一般に入力に制限が存在した場合、コントローラに積分器が存在すればその積分器が飽和し、出力波形がオーバーシュートを起こすことによって、本来の設計通りの性能を発揮できない windup 現象が生じることが知られている。

前節で述べたサーボ系のためのフィードバックコントローラには任意のコントローラを用いることが可能であるが、本稿では汎用性の高い PI コントローラを用いた場合を想定し、設計通りの性能が引き出せるように anti-windup 化の手法を述べる。

文献⁽⁵⁾より、anti-windup 化の対象となるコントローラ K の最小実現が

$$K = \left[\begin{array}{c|c} A_K & B_K \\ \hline C_K & D_K \end{array} \right] \dots\dots\dots (5)$$

と与えられているとすると、左既約分解に基づく anti-windup コントローラ K_F は、

$$K_F = \left[\begin{array}{c|c|c} A_K - FC_K & B_K - FD_K & F \\ \hline C_K & D_K & 0 \end{array} \right] \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここで F は anti-windup ゲインであり、本研究で対象としているのは、SISO のシステムに対する出力フィードバックコントローラであるため

$$K_F = \left[\begin{array}{c|c|c} A_K - fc_K & b_K - fd_K & f \\ \hline c_K & d_K & 0 \end{array} \right] \dots\dots\dots (7)$$

となる。すなわち f はコントローラの次元と同じ数の要素を持つ列ベクトルとなる。

〈3・2〉 最適 Look-up-Table の作成 最適制御の拘束条件である式 (4) を満たす制御入力と制御対象の出力を表す関数として、

$$\psi(u(t), y(t)) = 0, \quad t_0 \leq t \leq t_f \dots\dots\dots (8)$$

を考える。さらに、この式 (8) において、最短時間の条件を満足する、最適制御入力と最適制御出力との対応関係を表す関数を

$$\psi^*(u^*(t), y^*(t)) = 0, \quad t_0 \leq t \leq t_f \dots\dots\dots (9)$$

と表す。

このとき、最適制御出力の取り得る値を

$$y_{\min}^* \leq y^*(t) \leq y_{\max}^*, \quad t_0 \leq t \leq t_f \dots\dots\dots (10)$$

とし、さらに $y^*(t)$ を時間軸でなく y^* の取る値において離散化し、

$$\begin{aligned} \hat{y}^* &= \{y_i^* \mid i = 1, \dots, N\} \\ &= \{y_{\min}^* + \frac{(i-1)(y_{\max}^* - y_{\min}^*)}{N-1} \mid i = 1, \dots, N\} \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

とすると、式 (9) は

$$\psi^*(\hat{u}^*(t), \hat{y}^*(t)) = 0, \quad t_0 \leq t \leq t_f \dots\dots\dots (12)$$

と表される。この関数 ψ^* を、最適 Look-up-Table に表し、最適制御入出力の対応関係を得る。また

$$\hat{y}_i^* < y^* < \hat{y}_{i+1}^*, \quad i = 1, \dots, N-1 \dots\dots\dots (13)$$

に対応する u^* は隣あう 2 点の線形補間で得るものとする。図 2 に最適 Look-up-Table の例を示す。

〈3・3〉 遺伝的アルゴリズムの適用 2 節で述べた最短時間問題は、拘束条件が m 個存在することより

$$\phi(y(t), \dot{y}(t)) = \{g_i(y(t), \dot{y}(t)) \mid i = 1, \dots, m\} \dots\dots\dots (14)$$

かつ、

$$p_i = \begin{cases} g_i(y(t), \dot{y}(t)), & g_i(y(t), \dot{y}(t)) > 0 \\ 0, & g_i(y(t), \dot{y}(t)) \leq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

とおくと、端点条件と拘束条件を折り込んで以下の評価関数を最小化する制御入力 $u(t)$ を求める問題に帰着できる。

$$\begin{aligned} J &= p_1 + \dots + p_m + t_f + |y(t_0) - y_0| \\ &\quad + |y(t_f) - y_f| + |\dot{y}(t_f)| \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

ここで、 J を最小化するように GA を用いて式 (12) の $\hat{u}_i^*$ の探索を行い、その時の入出力の対応関係を最適 Look-up-Table に表し、それを用いて構成した最適 Look-up-Table コントローラから得られるシステムへの入力 $u(t)$ が求める解となる。

$\hat{u}_i^*$ の探索に用いる遺伝子作成のために $\hat{u}_i^*$ を並べて作ったパラメータベクトル U を考える。

$$\begin{aligned} U &= [U_1, \dots, U_N, U_{N+1}] \\ &= [\frac{\hat{u}_1^*}{\max(\hat{u}^*)}, \dots, \frac{\hat{u}_N^*}{\max(\hat{u}^*)}, \max(\hat{u}^*)] \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

ここで、各要素は量子化の誤差を低減するために $\max(\hat{u}^*)$ で割り、

$$0 \leq U_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, N \dots\dots\dots (18)$$

に正規化し、 $\max(\hat{u}^*)$ 自身も GA によって探索を行なうために要素に含める。 $u^* < 0$ なる u^* も対象にする場合は、

$$\hat{u}_i^{*'} = \hat{u}_i^* + \max(\hat{u}^*),$$

$$\max(\hat{u}^{*'}) = 2 * \max(\hat{u}^*)$$

なる変換を施し、同様の正規化を行なう。

遺伝子のコーディングに際しては、 $\hat{u}_i^*$ の量子化に s ビットを用い、 $\max(\hat{u}_i^*)$ の値の量子化にさらに t ビットを用いる。すなわち GA のストリング長は $sN + t$ となる。

図 2 最適 Look-up-Table の例
Fig. 2. An example of Optimal Look-up-Table

式(16)において、GAによって最小化する場合、システムの出力を得るために数値シミュレーションないし実験を行う際に初期値として y_0 を与えるため、 $|y(t_0) - y_0|$ の項は不要となる。また収束の制御のための定数 $c_1, \dots, c_{m+3}$ を用い、さらに拘束条件を $t_0 \leq t \leq t_f$ までの間に M 回評価するものとして、

$$J_{ga} = c_1 P_1 + c_2 P_2 + \dots + c_m P_m + c_{m+1} t_f + c_{m+2} |y(t_f) - y_f| + c_{m+3} |\dot{y}(t_f)| \dots \quad (19)$$

とする。ここで $P_1, \dots, P_m$ は拘束条件を満たさない場合のペナルティ項であり、

$$P_i = \sum_{k=1}^M p_{i,k} \dots \dots \dots (20)$$

と表す。すなわち、 $p_{i,k}$ は拘束条件の要素 $y(t), \dot{y}(t)$ を時間軸に対して離散化した区分的に一定な出力及び出力の微分値

$$\begin{cases} \hat{y}(t) = y_k \\ \hat{\dot{y}}(t) = \dot{y}_k \end{cases} \text{ on } [t_{k-1}, t_k] \text{ for } k = 1, \dots, M \quad (21)$$

($t_M = t_f$)

を用いて、近似的に

$$p_{i,k} = \begin{cases} g_i(y_k, \dot{y}_k), & g_i(y_k, \dot{y}_k) > 0 \\ 0, & g_i(y_k, \dot{y}_k) \leq 0 \end{cases} \dots \dots (22)$$

と表す。

〈3・3・1〉 スケーリングウィンドウ GAは適応度が高くなるように探索を進めていくため、評価関数が減少することにより適応度を高めるような変換を行わなければならない。最小化したい関数を $J(U)$ 、適応度を $f(U)$ としたとき、最も簡単な変換は、充分大きい数 L を用いて

$$f(U) = L - J(U) \dots \dots \dots (23)$$

とすることである。ところがこの方法では、探索が進み L の値に比べて $J(U)$ の値が全ての個体で小さくなった時、淘汰圧が作用しにくくなる現象が生じ、収束速度の低下につながる。そこで、 L の値を動的に変化させ、淘汰圧を適切に保つことにより、収束速度の低下を避けるスケーリングウィンドウを採用した。これはGAのPDSソフトであるGAucsd1.4で用いられている⁽³⁾。

スケーリングウィンドウでは最小化する対象関数 $J(U)$ の過去 W 世代の最大値(最悪値)を L に設定する。 t 世代目での L の値を $L(t)$ 、集団中の最悪値(最大値)を $J_{\max}(t)$ とすると、 $W = 2$ のとき

$$L(t) = \max \{J_{\max}(t), J_{\max}(t-1), J_{\max}(t-2)\} \quad (24)$$

となる。ただし $J_{\max}(-1), J_{\max}(-2) = -\infty$ とする。この W の値をスケーリングウィンドウサイズと呼ぶ。

4. 設計の手順

閉ループ系を構成する手順は以下のようになる。
step i. GAを用いて探索を行なうための評価関数を定め

図3 最適 Look-up-Table 作成時
 Fig. 3. Making the Optimal Look-up-Table

る。すなわち式(19)における $c_1, \dots, c_{m+3}$ を定める

- step ii.** 制御対象に対して、最適 Look-up-Table のみをコントローラとして用いたシステム(図3参照)を構成し、GAを用いて最適制御入出力の関係を近似的に求め、最適 Look-up-Table に表す。
- step iii.** 制御対象に対して、PIコントローラのみを用いて構成した閉ループ系でシミュレーションを行ない、最適 Look-up-Table を上限・下限どちらとして用いるかを決定する
- step iv.** 最適 Look-up-Table を実装した最適 Look-up-Table コントローラを用いて最終的なシミュレーションを行ない、anti-windup ゲインを決定する

step i. における $c_1, \dots, c_m, c_{m+1}, c_{m+2}, c_{m+3}$ については明解な決定手法はなく、試行錯誤的に設定するしかないが、 c_{m+1} 以外については端点条件、及び拘束条件を満たせば $P_i = |y(t_f) - y_f| = \dot{y}(t_f) = 0$ となるため、大きめの値を設定し探索の序盤において端点条件、及び拘束条件を満たすように設定した。

また c_{m+1} に関しては端点条件を満たさなければ t_f を求められないので、小さめの値を設定して端点条件を満たした後の評価関数の急激な増加を防ぎ、なめらかな探索を行なえるようにした。

step iv. における anti-windup ゲインの設定に関しては、文献⁽⁵⁾に H_∞ 状態フィードバック問題に帰着する手法が提案されている。

5. 数値例

対象システムとして

$$\frac{1}{1 + 2.0s} \dots \dots \dots (25)$$

を考え、コントローラには

$$Kp + \frac{K_i}{s} = 32.0 + \frac{16.0}{s} \dots \dots \dots (26)$$

なるPIコントローラを用いた。初期条件及び終端条件は

$$y(t_0) = 0, y(t_f) = 1, \dot{y}(t_f) = 0 \dots \dots \dots (27)$$

また出力の微分値は

$$|\dot{y}(t)| \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (28)$$

なる拘束条件に従うものとした。(拘束条件が1つであるため、 $m = 1$ となる) さらに anti-windup ゲインは

$$f = 0.5 \quad \dots\dots\dots (29)$$

とした。

この対象システムに対し、評価関数

$$J = c_1 P + c_2 t_f + c_3 |y(t_f) - 1.0| + c_4 \dot{y}(t_f) + c_5 L \quad \dots\dots\dots (30)$$

を最小にするように GA を用いて最適 Look-up-Table を作成した。ここで、 P は、数値計算でシステムの動作をシミュレートした際、各時刻で $|\dot{y}| - 1.0$ が正の場合の全ての和である。すなわち

$$P = \sum_{k=1}^M p_k \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$p_k = \begin{cases} |\dot{y}(t_k)| - 1.0 & (|\dot{y}(t_k)| > 1.0), \\ 0 & (|\dot{y}(t_k)| \leq 1.0), \end{cases} \quad k = 1, \dots, M \quad (t_M = t_f) \quad (32)$$

また L は探索の際のサブゴールであり、 P の存在によって $\dot{y}(t) = 1$ に近い値 (すなわち最適解) から離れようとする斥力を打ち消すために設定した。

$$L = |1.0 - y(1.0)| \quad \dots\dots\dots (33)$$

図 4 に得られた最適 Look-up-Table を示した。また図 5 に LT コントローラ動作時における、最適 Look-up-Table からの入力と、元となる PI コントローラの入力とを示した。さらに、図 6 に最適 Look-up-Table を採用し PI コントローラと併合した最適 Look-up-Table コントローラ (以下 OLT コントローラと称する) による入力を示し、図 7 から図 8 に出力の微分値と入出力波形をそれぞれ示した。破線が元となった PI コントローラのみによるもので、実線が OLT コントローラによるものである。

なお、最適 Look-up-Table が $0 \leq y^* \leq 1.5$ まで存在するのは、目標値である $y(t_f) = 1.0$ 近傍において PI コントローラに制御を切替えるためである。

これらの図より OLT コントローラによる波形は、目標値である $y(t_f) = 1.0$ 近傍まで最適 Look-up-Table による上限に制限され、準最適軌道をとって推移し、近傍付近で PI コントローラに切り替わっていることがわかり、OLT コントローラにより閉ループ系が構成できたことが確認できる。

表 1 に探索に用いた GA の各パラメータを示す。

6. おわりに

本稿では、遺伝的アルゴリズムにより作成した最適 Look-up-Table を、従来の出力フィードバックコントローラのリミッタとして用いることにより、最短時間問題の近似解と

して閉ループ系を構成する手法を提案し、数値例を通してその有効性を検証した。本論文では制御対象として線形システムを仮定しているが、提案手法は制御対象の入出力関係が得られれば適用可能である。今後の課題としては、非線形のモデルや状態方程式が不明の現実のモデルに適用することが挙げられる。

(平成 11 年 6 月 21 日受付, 同 12 年 2 月 4 日再受付)

文 献

- (1) 尾花, 内田, "遺伝的アルゴリズムによる最適制御問題の解法—評価関数が制御入力に陽に依存する場合へのアプローチ", 第 39 回自動制御連合講演会予稿集, Oct. 1996
- (2) H.Seywald, R.R.Kumar, and S.M.Deshpande, *Genetic Algorithm Approach for Optimal Control Problems with Linearly Appearing Controls*, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.18, No.1, Jan.-Feb. 1995
- (3) N.N.Schraudolph, *A User's Guide to GAUCSD 1.4*, Computer Science & Engineering Dept., UCSD, Jul. 1992
- (4) 志水, 大谷, 佐藤, "非線形システムの最適状態フィードバック制御則とそのニューラルネットによる最近似", 第 24 回制御理論シンポジウム予稿集, May. 1995
- (5) 渡辺, 松井, 内田, "状態フィードバック H_∞ 制御理論に基づいたアンチwindアップコントローラの設計と実装", 電気学会論文誌 C 分冊, 第 117 巻第 3 号, pp.307-314, Mar., 1997
- (6) R.Hanus, M.Kinnaert, and J.L.Henrotte, *Conditioning Technique, a General Anti-Windup and Bumpless Transfer Method*, Automatica, 23-6, pp.729-739, 1987
- (7) P.J.Campo, M.Morari, and C.N.Nett, *Multivariable Anti-Windup and Bumpless Transfer. A General Theoly*, Proc. of American Control Conference, pp.1706-1711, 1989.
- (8) 森 編, 渡辺 他 著, " H_∞ 制御の実プラントへの応用, 第 4 章「ジェットエンジン制御への応用」", 計測自動制御学会, May., 1996
- (9) 吉田, 鎌野, 鈴木, 安野, 片岡, "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, 1996
- (10) D.E.Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, Mass, 1989
- (11) 清水 著, "最適制御の理論と計算法", コロナ社, May, 1994

尾 花 和 昭 (非会員) 1995 年, 早稲田大学理工学部電気工学科卒業。1997 年, 同大学大学院理工学専攻修士課程修了。同年, 日本電信電話株式会社入社, 現在に至る。遺伝的アルゴリズム, ニューラルネットワークの制御への応用などの研究に従事。電子情報通信学会, IEEE の会員。

渡 辺 亮 (非会員) 1989 年, 慶應義塾大学大学院修士課程修了。95 年, 早稲田大学大学院博士課程修了。89 年, 石川島播磨重工業 (株) 入社。98 年 1 月より大阪大学助手, 同年 10 月より同大学講師, 現在に至る。ゲインスケジューリング, 非線形システムの準大域的な解析, 制御理論応用などの研究に従事。97 年度計測自動制御学会論文賞受賞。計測自動制御学会などの会員。博士 (工学)。

内 田 健 康 (正員) 1973 年, 早稲田大学大学院修士課程修了。1976 年, 同大学院博士課程修了。1983 年より早稲田大学教授 (電気電子情報工学科), 現在に至る。制御系の情報構造, ロバスト制御および推定などの研究に従事。工学博士。計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEE などの会員。

表1 GAのパラメータ
Table 1. parameters of GA

parameter	value
個体数	50
y^* の離散化ステップ数 N	20
u_j^* の量子化ビット数 s	5
$\max(u^*)$ の量子化ビット数 t	8
スケーリングウィンドウサイズ	10
交叉確率	0.40
突然変異確率	0.002
選択確率	0.50
終了条件 (世代数)	1000
終了条件 (評価関数値)	0.50
評価関数の係数 c_1	200
評価関数の係数 c_2	1.0
評価関数の係数 c_3	100
評価関数の係数 c_4	100
評価関数の係数 c_5	5.0

図6 制御対象への入力 $u(t)$
Fig. 6. Input $u(t)$ to the system

図4 得られた最適 Look-up-Table
Fig. 4. Calculated Optimal Look-up-Table

図7 出力の微分値 $\dot{y}(t)$
Fig. 7. Derivative Output $\dot{y}(t)$

図5 $u_k(t)$ と $u_{max}(t)$
Fig. 5. $u_k(t)$ and $u_{max}(t)$

図8 出力 $y(t)$
Fig. 8. Output $y(t)$