遺伝的アルゴリズムを用いたPID制御器の一設計†

山本 透*・満倉 靖恵*・兼田 雅弘*

A Design of PID Controllers Using a Genetic Algorithm†

Toru YAMAMOTO*, Yasue MITSUKURA* and Masahiro KANEDA*

PID control schemes have been widely used in most of process control systems represented by chemical processes for a long time. However, it is still a very important problem how to determine or tune the PID parameters, because these parameters have a great influence on the stability and the performance of the control system. On the other hand, in the last twenty years, a genetic algorithm(GA) is attracted as one method which gives us optimal answers for search, optimization and machine learning problems.

In this paper, we propose a new genetic tuning algorithm of PID parameters, in which the search area of PID parameters is reduced sharply by considering an effective parameters' area from the viewpoint of the control engineering. First, we explain the tuning method of PID parameters briefly. Next, by using the GA, we present a scheme to find optimum values of user-specified parameters included in this method. Finally, we illustrate a simulation example to show the effectiveness of the proposed scheme and consider the statistical properties.

Key Words: PID control, genetic algorithm, process control, nonlinear systems

1. はじめに

ロバスト制御法や適応制御法など現代制御理論の研究が活発に行なわれている一方で、化学プロセスなどプロセス制御系においては、今なおPID制御法^{1)~4)}が主として用いられている。ところで、PIDパラメータは制御系の性質を大きく左右するため、これらの調整法は重要な問題であり、古くから現在に至るまで、数多くの調整法が考察されている。プロセス制御系ではシステムの特性変動や非線形特性の影響があるため、適切なPIDパラメータを理論的に決定することが困難である。そのため、ファインチューニングに相当するPIDパラメータの決定には何らかの評価規範に基づくランダム探索、あるいは試行錯誤が必要であった。このようなランダム探索法の一つとして、近年、生物の遺伝や進化のメカニズムを模擬した遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm; GA)^{5),6)}が注目され、工学の広い分野に応用されている^{7),8)}。さらに、GAを用いて最適なPIDパラメータを算出する研究も報告されている^{9)~11)}。しかしながら、これらの方法は3つのPIDパラメータを、そのままGAを用

いて探索するため、探索範囲が広く、最適な値を得るまでに長時間を要している。

一方、著者らは、セルフチューニング制御法¹²⁾の観点から、一般化最小分散制御法との関連に基づいて、PIDパラメータを調整する方法を提案し¹³⁾、その有効性を化学プロセスへの適用を通して検証した¹⁴⁾。しかしながら、この手法はいくつかの設計パラメータを含み、これらをどのように設計すれば良いかという問題が残されていた。

本論文では、上述の点に着目し、著者らが先に提案したPIDパラメータの調整法に含まれる設計パラメータの最適値を、GAを用いて探索する方法について考察する^{15),16)}。つまり、ここで提案する方法は、望ましい設計パラメータをGAにより求め、これを仲立ちとして、PIDパラメータを調整するものである。このとき、設計パラメータには制御工学的な制約範囲が存在するため、その探索はかなり狭い範囲に限定される。したがって、本手法によると、比較的短時間で最適なPIDパラメータを求めることができる。まず、制御対象の記述モデルについて考察した上で、先に提案したPIDパラメータの調整法を簡単に説明する。次に、このPIDパラメータ調整法へのGAの適用について考察する。最後に、本手法の有効性を数値例を用いて検証し、さらに、GAによる探索の統計的な性質についても考察する。

2. 問題の記述

2.1 詳細モデル

本論文では、次式のような詳細モデルで記述される制御対

† IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics で発表 (1997.10)

* 岡山県立大学情報工学部 総社市窪木 111

* Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Okayama Prefectural University, 111 Kuboki, Soja
(Received March 16, 1998)

(Revised December 18, 1998)

象を考える。ここで詳細モデルとは、制御対象の特性をできる限り厳密に表現した記述モデルをいう¹⁷⁾。

$$\alpha(z^{-1})y(t) = z^{-k}\beta(z^{-1})u(t-1) + g(u, y) \quad (1)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \alpha(z^{-1}) &= 1 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_{n_1} z^{-n_1} \\ \beta(z^{-1}) &= \beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_{n_2} z^{-n_2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

である。ここで、 $u(t)$ および $y(t)$ は、それぞれ制御入力とシステム出力であり、 k はむだ時間を示している。さらに、 $g(u, y)$ は非線形成分を表している。ここで制御対象として考えているプロセス系は、一般には、(1) 式のように非線形系でかつ高次系であることが知られている。以下では、(1) 式の詳細モデルが与えられるものとして話を進めるが、(1) 式のような数式の詳細モデルを構成することが困難であることも考えられる。その際は、制御対象の入出力関係を模擬するニューラルネットワークモデルなどで置き換えるものとする。この詳細モデルは、後で述べる遺伝的アルゴリズムにおける適応度関数の計算に用いられる。

2.2 設計用モデル

次に、前節で述べた詳細モデルを線形 2 次系で近似した次式の設計用モデル¹⁷⁾を考える。

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B(z^{-1})u(t-1) \quad (3)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

である。先に述べたように、一般にはプロセス系は非線形系でかつ高次系と考えられるが、これに基づく制御則は複雑で、実装化が困難であることから、制御系の設計に際しては、(1) 式の詳細モデルを線形でかつ 2 次以下の系に簡略化して用いることが多い。本論文では、(3) 式を設計用モデルとして用いる。ただし、常に制御対象を 2 次系で記述するのではなく、1 次系 ($a_2 = 0$) として記述することもある。一方、2 次系で記述しきれない高次の部分は、 $B(z^{-1})$ の次数 m を大きく設定することで対応する。

2.3 PID 制御則

(3) 式の設計用モデルに対して、次式の PID 制御則を適用する。

$$\Delta u(t) = k_c \left(\Delta + \frac{T_s}{T_I} + \frac{T_D}{T_s} \Delta^2 \right) e(t) \quad (5)$$

ただし、

$$e(t) := w(t) - y(t) \quad (6)$$

で、 Δ は差分演算子を示しており、 $\Delta := 1 - z^{-1}$ である。また、 $w(t)$ は目標値で、ステップ関数で与えられるものとする。 k_c 、 T_I および T_D は、それぞれ比例ゲイン、積分時間、微分時間を示しており、 T_s はサンプリング間隔である。

次に、以下の考察を容易にするために、(5) 式を次式として書き換える。

$$C(z^{-1})y(t) + \Delta u(t) - C(z^{-1})w(t) = 0 \quad (7)$$

ただし、 $C(z^{-1})$ は次式により定義される。

$$\begin{aligned} C(z^{-1}) &:= k_c (\Delta + T_s/T_I + T_D/T_s \Delta^2) \\ &= c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} \end{aligned} \quad (8)$$

(5) 式、あるいは (7) 式に含まれる PID パラメータは、制御系の性質を大きく左右する。そのため、PID パラメータの調整は重要であり、現在もその調整法に関する研究が進められている。その一つとして著者らは、一般化最小分散制御則との関連から PID パラメータを調整する方法を先に提案した¹³⁾。この調整法には、いくつかの設計パラメータが含まれており、これらをどのように設計すれば良いかという問題が残されていた。そこで本論文では、最適な設計パラメータを GA を用いて探索し、この設計パラメータを仲立ちとして、PID パラメータを調整する方法について考察する。

3. PID パラメータ調整法

ここでは、著者らにより、すでに提案されている一般化最小分散制御則との関連に基づいた PID ゲインの調整法¹³⁾について簡単に説明する。

まず、次式により与えられる一般化最小分散制御則の評価規範を考える。

$$J = \{P(z^{-1})y(t+k+1) + \lambda \Delta u(t) - R(z^{-1})w(t)\}^2 \quad (9)$$

ここで $P(z^{-1})$ は設計多項式で、次式として与えられる。

$$P(z^{-1}) = 1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} \quad (10)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= -2e^{-\frac{\rho}{2\mu}} \cos \frac{\sqrt{4\mu-1}}{2\mu} \rho \\ p_2 &= e^{-\frac{\rho}{\mu}} \\ \rho &= \frac{T_s}{\sigma} \\ \mu &= 0.25(1-\delta) + 0.51\delta \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

である。ここで、 σ は立上り時間に相当するパラメータで、 μ は減衰振動特性に関連するパラメータである。また、(11) 式は、 μ が δ により調整されることを示している¹³⁾。さらに (9) 式の λ は設計パラメータで、制御入力に対する重みを表しており、 $R(z^{-1})$ も本来設計多項式であるが、これについては PID 制御則との関連に基づいて決定する。

次に、(9) 式の評価規範の最小化により、次式の制御則が導出される¹²⁾。

$$\begin{aligned} F(z^{-1})y(t) + \{E(z^{-1})B(z^{-1}) + \lambda\}\Delta u(t) \\ - R(z^{-1})w(t) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

ただし、 $E(z^{-1})$ と $F(z^{-1})$ は、次式の Diophantine 方程式に基づいて計算される。

$$P(z^{-1}) = \Delta A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-(k+1)}F(z^{-1}) \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} E(z^{-1}) &= 1 + e_1 z^{-1} + \dots + e_k z^{-k} \\ F(z^{-1}) &= f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

さらに, (12) 式の第2項の係数部を定常ゲインに置き換えることにより, 次式を得る. ここで, 定常ゲインに置き換える理由については, 文献13)を参照されたい.

$$\frac{F(z^{-1})}{\nu} y(t) + \Delta u(t) - \frac{R(z^{-1})}{\nu} w(t) = 0 \quad (15)$$

ただし, ν は次式により定義される.

$$\nu := B(1)E(1) + \lambda \quad (16)$$

このとき, (7) 式と (15) 式を比較し,

$$R(z^{-1}) = F(z^{-1}) \quad (17)$$

$$C(z^{-1}) = \frac{F(z^{-1})}{\nu} \quad (18)$$

として $R(z^{-1})$ と $C(z^{-1})$ を設計するとき, 2つの制御則が等価となり, PIDパラメータは次式で与えられる.

$$\left. \begin{aligned} k_c &= -\frac{1}{\nu}(f_1 + 2f_2) \\ T_I &= -\frac{f_1 + 2f_2}{f_0 + f_1 + f_2} T_s \\ T_D &= -\frac{f_2}{f_1 + 2f_2} T_s \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

したがって, 望ましいPIDパラメータを求めることは, 一般化最小分散制御則における設計パラメータ σ , δ , λ を適切な値に設計することに対応する.

4. 遺伝的アルゴリズムの適用

4.1 PIDパラメータの遺伝的調整法の概要

本論文で提案するPIDパラメータの遺伝的調整機構の概略図を Fig.1 に示す.

Fig.1 Schematic diagram of the genetic tuning scheme of PID parameters.

Fig.1 の一点鎖線より下の部分は, 実際の制御対象の特性をできる限り厳密に表現した詳細モデル (Full Model) と, パラメータ $\{k_c, T_I, T_D\}$ をもつPIDコントローラからなる通常のフィードバック制御系を構成している.

一方, 一点鎖線より上の部分が遺伝的アルゴリズムによる1世代交代におけるPIDパラメータの調整部である. 左から順に, (1)GAで探索されたパラメータ $\{\lambda, \sigma, \delta\}$ をPIDパラメータ $\{k_c, T_I, T_D\}$ に変換するパラメータ変換部 (Parameter Converter), (2)ある世代における各個体の適

応度関数 $f(P)$ が与えられた時, 次世代の個体を発生する手続部 (Generation Step of GA), および, (3)各個体の適応度関数の計算部 (Fitness Calculator) から成っている. 本提案手法の特徴は以下のように要約できる.

1) GAによってPIDパラメータ $\{k_c, T_I, T_D\}$ を直接探索するのではなく, 3節で述べたように, PID制御則を一般化最小分散制御則と関係づけることにより, 評価規範中のパラメータ $\{\lambda, \sigma, \delta\}$ をGAにより探索し, それを $\{k_c, T_I, T_D\}$ に変換する方法を採っている. このため, 物理的 (制御工学的) に有意な値の範囲にパラメータの探索範囲を縮小することが可能となって, 大幅に探索時間を短縮することができる.

2) 適応度関数 $f(\cdot)$ を工夫することにより, 制御系の応答をかなり自由に整形することができる. すなわち, 立ち上り特性, 行き過ぎ量, 制御入力 $u(t)$ の振動性の抑制等がきめ細かく指定できる.

3) 詳細モデルは, 必ずしも解析的な数式で表現される必要はなく, 単に, 入力 $u(t)$ から出力 $y(t)$ の関係が実際の制御対象の特性に何らかの意味で近いものであれば良いので, 先に述べたように詳細モデルとして, ニューラルネットワークモデル等の利用も可能であり, また, 非線形特性も自由に組み込むことが可能である.

次に, 上述のPIDパラメータの調整部 (1), (2), (3) について述べる.

4.2 パラメータ変換部

前述のパラメータ変換部の作業の流れを Fig.2 に示す.

$$\begin{aligned} & \xrightarrow{\text{GA}} \{\lambda, \sigma, \delta\} \rightarrow \{\lambda, p_1, p_2\} \rightarrow \\ & \rightarrow \{\lambda, e_1, \dots, e_k, f_0, f_1, f_2\} \rightarrow \\ & \rightarrow \{\nu, f_0, f_1, f_2\} \rightarrow \{k_c, T_I, T_D\} \end{aligned}$$

Fig.2 Calculation flow of the parameter conversion.

なお, λ , σ , δ の制御工学的に有意な値の範囲は, たとえば, λ については, 制御系の安定性をボード線図等で調べ, 適当な安定余裕を与える範囲を考慮することができる. また, σ については, 制御対象の概略の時定数の $1/3 \sim 1/2$ 程度が通常好ましいとされているが, 実際の探索範囲としては, それより少し広くとることが考えられる. さらに, δ については, $0.0 \sim 2.0$ 程度が好ましい応答とされているが, これについても実際上は, もう少し広い範囲を探索領域に設定することになる.

このような制御工学的な制約により, PIDパラメータ $\{k_c, T_I, T_D\}$ の探索領域は, これら3つのパラメータの有効な組み合わせの形で限定されるため, 実際上かなり狭い範囲に限定されることになる.

4.3 遺伝的アルゴリズム

前述のパラメータ $\{\lambda, \sigma, \delta\}$ の好ましい値をGAによって探索するため, これらのパラメータに対応した遺伝子型を G_λ ,

G_σ , G_δ とし, それぞれ, n ビットのビット列で表す. また, これらをまとめて, GA における各個体の遺伝子型 (Genotype) を次式で表す.

$$G = [G_\lambda, G_\sigma, G_\delta] \quad (20)$$

また, G に対応する表現型 (Phenotype) を次式の P で表す.

$$P = [P_\lambda, P_\sigma, P_\delta] \quad (21)$$

P の各要素 P_λ , P_σ , P_δ は, それぞれ G_λ , G_σ , G_δ を n ビットの 2 進数と考へて, それらを実数値に変換し, さらに, 4.2 節で述べた λ, σ, δ の各値の範囲に, フルスケールを換算した値である. この表現型 P を, 4.2 節で述べたパラメータ変換部を通して, PID パラメータ k_c , T_I , T_D に変換し, 4.4 節で述べる適応度関数 f を計算したものを $f(P)$ とする. なお, 突然変異率 (mutation probability) を p_m で表す.

ここで, 世代数を i で表し, 第 i 世代の個体の遺伝子型を G^i で表現すると, GA の手順は次のように示せる.

[step1] 初期設定 (初期集団 $\{G^0\}$ の発生, 各種パラメータの設定, $i = 1$)

[step2] 適応度関数 $f(P)$ の計算

[step3] 選択・交叉・突然変異による次世代の集団 $\{G^i\}$ の発生

[step4] 世代数 i を $i + 1$ として [step2] へ

4.4 適応度関数

前述したように, 制御系の応答は GA における適応度関数を適切に選ぶことにより, かなり自由に整形することができる. しかし, 簡単のためここでは適応度関数として, 通常, 制御系設計においてよく用いられる 2 乗誤差積分 ISE (Integral of Squared Error) に対応した次式を用いることにする^(注1).

$$f(P) = \sum_{t=1}^N \{y_m(t) - y_P(t)\}^2 \quad (22)$$

ここで, $y_m(t)$ は目標値 $w(t)$ を入力とする参照モデル出力, $y_P(t)$ は GA における各個体の表現型 P に対応する PID パラメータを用いた制御による詳細モデルの出力である. また, $u_P(t)$ はそのときの制御入力である.

なお, 本手法では (9) 式と (22) 式に示すように 2 つの評価規範を用いているが, (22) 式の適応度関数が小さくなるように, GA により, (9) 式に含まれる設計パラメータ $\{\lambda, \sigma, \delta\}$ を調整し, この設計パラメータをもった一般化最小分散制御法との関連に基づいて, PID パラメータを決定することを意味している.

5. 数 値 例

本論文で提案した手法の有効性を検証するために, 次の Hammerstein モデルで与えられる非線形システムに対して,

(注1) 適応度という意味を考慮して, 通常 GA においては, 誤差の逆数を適応度関数として定義することが多い. しかしながら, 制御理論との関連を明確にするために, ここでは, 適応度関数を (22) 式として定義する.

数値シミュレーションを行なった.

$$\left. \begin{aligned} y(t) &= 0.8y(t-1) - 0.3y(t-2) \\ &\quad + 0.4x(t-1) + 0.2x(t-2) \\ x(t-1) &= u(t-1) + 0.5u^2(t-1) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

ここでは, 詳細モデルも (23) 式として与えられるものとする.

次に, (23) 式の入出力データに基づいて, 最小 2 乗法を用いてパラメータ同定を行なったところ, 次式として設計用モデルが得られた.

$$\begin{aligned} y(t) &= 1.11y(t-1) - 0.47y(t-2) + 1.58u(t-1) \\ &\quad + 0.26u(t-2) - 0.47u(t-3) \end{aligned} \quad (24)$$

本論文で提案する手法を適用する前に, まず, PID パラメータの調整則として広く用いられる, Chien, Hrones & Reswick らによる目標値応答のオーバーシュートなしの調整則 (CHR 法)³⁾により計算した PID パラメータによる制御結果を, Fig.3 に示す. ただし, PID パラメータは $k_c = 0.36$, $T_I = 4.07$, $T_D = 1.25$ である.

Fig.3 Control result by using CHR type PID control scheme.

Fig.3 から, この手法によるとほぼ良好な結果が得られているものの, 過渡状態に振動がみられ, 整定時間が長くなっていることが分かる.

次に, 本論文で提案した手法を適用する. ここで用いた GA の戦略ならびにパラメータを以下に示す.

個 体

λ , σ および δ をそれぞれ 8 ビット 2 進表現し, これらをまとめた 24 ビットのビット列で表す. さらに個体数は 50 とする.

世代数

20

選択・交叉

エリート戦略を用いる. すなわち, 適応度の小さい個体から 10 個体を残し, 残りの 40 個体については, ランダムに親を選択し, λ , σ および δ ごとにランダムな位置で 1 点交叉を行なう.

突然変異

$p_m = 0.1$ とする. すなわち, 50 個体からランダムに 5 個体を選び, それぞれの個体の 1 ビットをランダムに選択し反転する.

なお, 適応度関数の計算においては, 次式による参照モデルを用いる.

$$y_m(t) = \frac{0.40z^{-1}}{1 - 0.74z^{-1} + 0.14z^{-2}} w(t) \quad (25)$$

さらに、探索範囲は事前情報に基づいて、 $0.1 \leq \lambda \leq 2.0$, $1.0 \leq \sigma \leq 10.0$, $0.0 \leq \delta \leq 2.0$ とする。

以上の手順ならびにパラメータを用いて探索した結果、 $k_c = 0.11$, $T_I = 0.55$, $T_D = 1.31$ を得た。ただし、(19)式において、 $T_s = 1.0[\text{sec}]$ とした。これらのPIDパラメータによる制御結果を Fig.4 に示す。Fig.4 から、提案した手法によると、過渡状態における振動も殆んどなく、良好な制御結果が得られていることが分かる。

Fig.4 Control result by using the proposed PID control scheme.

次に、GAによる探索の統計的な性質について考察する。上述のGAによる探索を1回の試行とし、初期集団を変えて100回の試行を行なった。このとき、次式により定義される平均適応度 (f_a) と最良適応度 (f_b) の推移を、それぞれ Fig.5(a) および (b) に示す。

$$f_a(i) = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{100} \bar{f}(i, j) \quad (26)$$

$$f_b(i) = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{100} f_{\min}(i, j) \quad (27)$$

ただし、

$$\bar{f}(i, j) = \frac{1}{50} \sum_{k=1}^{50} f(i, j, P_k) \quad (28)$$

$$f_{\min}(i, j) = \min_k f(i, j, P_k) \quad (29)$$

であり、 $f(i, j, P_k)$ は第 j 回目の試行における第 i 世代の個体 k の適応度を示している。Fig.5 から、初期収束もなく、世代を経るごとに平均適応度および最良適応度が、それぞれ良好に改善されていることが分かる。とくに、最良適応度については、十数世代くらいで収束していると見なすことができる。

さらに、上記のGAによる探索で得られたPIDパラメータのうち、 k_c と T_I の分布の様子を Fig.6 に示す。(a) は第10世代における各個体が示す k_c と T_I の関係をプロットしたものである。また、(b) は第20世代におけるそれを示したものである。これらの図から、世代が進むことでばらつきが減少している様子が分かる。さらに、(b) より k_c と T_I の間には線形の関係が読み取れるため、それらの比、すなわち k_c/T_I を各試行ごとにプロットしたところ、(c) を得た、(c) より、ほとんどすべての試行において、一定の値をとっていることが分かる。なお、 k_c については、0.1 から 0.17 くらいの区間に収束していることが分かる。次に、 k_c と T_D の関係についても、同様の図を描いたところ、Fig.7 を得た。なお、(c) は

$k_c \cdot T_D$ を示している。この場合もほとんどすべての試行において、 $k_c \cdot T_D$ が一定の値をとっていることが分かる。

Fig.5 Evaluation of the mean f_a and the best f_b of fitness values over 100 trials.

ところで、 k_c/T_I および $k_c \cdot T_D$ は (5) 式から分かるように、それぞれ積分動作と微分動作の強さを表わすゲイン (それぞれ積分ゲイン、微分ゲインという) を表わしている。GAによる探索では、PIDパラメータの様々な組み合わせが解として得られたが、世代を経るにつれ、ほぼ一定の積分ゲインと微分ゲインに収束していることが分かる。また、比例ゲイン k_c も十分小さな範囲に収まっており、制御動作という側面から考えると、少ない世代数で最適なパラメータの組み合わせが得られていると考えられる。

緒言においても述べたが、文献9) - 11) では詳細な設計については異なるものの、PIDパラメータをGAにより直接探索するという点において、共通の方策をとっている。そこで、以下では本論文で提案した手法とPIDパラメータを直接探索する方法との比較検討を行なう。Fig.8 には、それぞれの手法による最良適応度 f_b ((27) 式) の推移を示す。図中の○印は、PIDパラメータを直接探索する方法による場合を示している。一方、+印は、本論文で提案した手法による場合を示しているが、これは、Fig.5(b) と同じものである。さらに、ここで用いたGAの戦略は、 k_c , T_I および T_D のそれぞれを8ビット2進数で表現し、これらをまとめた24

(a) generation : 10

(b) generation : 20

(c) k_c/T_l **Fig.6** Distributions of k_c and T_l , and the ratioD

ビットを1個体として表わす他は、提案手法の場合と全く同じとした。ただし、探索範囲は、先のCHR法によるPIDパラメータを参考にしてそれぞれのパラメータの1/3~3倍の範囲、すなわち $0.12 \leq k_c \leq 1.08$, $1.36 \leq T_l \leq 12.21$, $0.4 \leq T_D \leq 3.75$ とした。

Fig.8より、PIDパラメータを直接探索する方法に比べ、本論文で提案した手法の方が、早い世代において最良適応度が小さな値をとっており、計算時間が大幅に削減されていることが分かる。また、PIDパラメータを直接探索する方法によると、PIDパラメータの組み合わせによっては、計算途

(a) generation : 10

(b) generation : 20

(c) $k_c \cdot T_D$ **Fig.7** Distributions of k_c and T_D , and the product.

中に制御系が不安定になり、適応度関数が数値的不安定に陥ることがある。しかしながら提案した手法は、パラメータ入の探索範囲を、制御系の安定性を考慮して設定できることから、この問題を容易に回避することができる。以上のような理由からも、提案した手法の有効性を確認することができる。

6. 結 言

本論文では、GAを用いたPID制御器の一設計法について考察し、本手法の有効性を非線形系に対する数値例により確認した。本論文で提案した手法は、一般化最小分散制御則

Fig.8 Convergence behavior of the best fitness values f_b .

における設計パラメータの最適値をGAで探索し、これを仲立ちとして、PIDパラメータを求めるものである。そのため、探索する設計パラメータに制御工学的な制約範囲が設定でき、探索範囲が限定されて、計算時間を大幅に削減することができた。また、本手法でのGAによる探索の統計的な性質の考察から、結果として得られる3つのパラメータは、試行ごとにかなり異なった値の組み合わせが現われるものの、制御動作という制御工学的な側面から考えると、同一の制御結果を示しており、少ない世代数で最適なPIDパラメータの組が得られていることも確かめた。ここでは、単純なGAを用いたが、さらに収束性の向上を図るためにはGAそのものに対する工夫も必要と思われる⁵⁾。なお、本手法が有効に機能するか否かについては、(1)式の詳細モデルに対する(3)式的设计用モデルのモデル化誤差に依存している。すなわち、設計用モデルには、モデル化誤差や、システム変動に伴う不確かさが存在することも多いことが考えられ、この問題に対する対処法が必要不可欠であると思われる。今後は、セルフチューニング制御法あるいはロバスト制御法と、本論文で提案した手法とを融合させることで、システムのもつ不確かさを考慮した制御法について、さらに考察を重ねる予定である。

参考文献

- 1) 須田:PID制御, 朝倉書店 (1992)
- 2) J.G.Ziegler and N.B.Nichols: Optimum Settings for Automatic Controllers, Trans. ASME, **64**-8, 759/768 (1942)
- 3) K.L.Chien, J.A.Hrones and J.B.Reswick: On the Automatic Control of Generalized Passive Systems, Trans. ASME, **74**, 175/185 (1952)
- 4) 北森:制御対象の部分的知識に基づく制御系の設計法, 計測自動制御学会論文集, **15**-4, 549/555 (1979)
- 5) D.E.Goldberg: Genetic Algorithm in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley (1992)
- 6) 北野編:遺伝的アルゴリズム, 産業図書 (1993)
- 7) D.B.Fogel:Evolutionary Computation, IEEE press (1995)
- 8) K.F.Man, et al.: Genetic Algorithm for Control and Signal Processing, Springer (1997)
- 9) B.Porter and A.H.Jones: Genetic tuning of digital PID controllers, Electronics Letter, **28**, 843/844 (1992)
- 10) A.H.Jones, N.Ajlouni and M.Uzam: On-Line Frequency Domain Identification and Genetic Tuning of PID con-

trollers, Proc. of IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Hawaii, 261/266 (1996)

- 11) 大松, 梶村, 北川:GAによるPID制御系の設計とニューロコントロール, 第4回インテリジェントシステムシンポジウム講演論文集, 177/182 (1994)
- 12) 大松, 山本 編著:セルフチューニングコントロール, 計測自動制御学会学術図書, コロナ社 (1996)
- 13) 山本, 兼田:一般化最小分散制御則に基づくセルフチューニングPID制御器の一設計, システム制御情報学会論文誌, **11**-1, 1/9 (1998)
- 14) 藤井, 山本, 兼田:ポリブテン重合反応器に対するセルフチューニングPID制御法の適用, 計測自動制御学会関西支部創立30周年記念シンポジウム講演論文集, 91/94 (1996)
- 15) 満倉, 山本, 兼田:PIDパラメータの遺伝的調整法, 電気学会産業計測制御研究会資料, **IIC97**-36, 25/30 (1997)
- 16) Y.Mitsukura, T.Yamamoto and M.Kaneda: A Genetic Tuning Algorithm of PID Parameters, Proc. of IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, Orlando, 923/928 (1997)
- 17) 大須賀:制御工学, 共立出版 (1995)

[著者紹介]

山本 透 (正会員)

1961年8月29日生。1987年3月徳島大学大学院工学研究科修士課程(情報工学専攻)修了。同年4月高松工業高等専門学校助手。1988年同講師。1992年4月大阪大学基礎工学部システム工学科助手。1994年4月岡山県立大学情報工学部情報通信工学科助教授となり現在に至る。この間、平成2年度文部省内地研究員(東京大学工学部計数工学科)。1996年9月~11月アルバート大学化学・材料工学科客員教授。適応制御とくにセルフチューニングコントローラ的设计と応用に関する研究に従事。工学博士。IEEE, システム制御情報学会, 電気学会などの会員。

満倉 靖恵 (学生会員)

1974年5月1日生。1997年3月岡山県立大学情報工学部情報通信工学科卒業。同年4月岡山県立大学大学院情報系工学研究科修士課程(電子情報通信工学専攻)入学。現在に至る。遺伝的アルゴリズムを用いた制御系設計に興味をもつ。システム制御情報学会, 電気学会, 電子情報通信学会などの会員。

兼田 雅弘 (正会員)

1943年3月27日生。1970年3月京都大学大学院工学研究科博士課程(電子工学専攻)修了。同年4月岡山大学工学部講師。1983年4月詫間電波工業高等専門学校助教授。1986年4月同教授。1983年4月岡山県立大学情報工学部情報通信工学科教授となり現在に至る。工学博士。制御理論, 制御系設計の高度化と知能化に関する研究に従事。システム制御情報学会, 電子情報通信学会, 日本機械学会などの会員。