Tuning of Fuzzy Logic Controller by Genetic Algorithm

— In case of concentration controls in resources processing —

by Naotaka KARIYA¹ and Yasuhiko OKANO¹

1. Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

Mineral processing plants show a lot of difficulties as control objects. As they involve many variables, non-linearity and large disturbances, they can hardly be mathematically modeled, which is required for application of deterministic control theories. It is therefore hard to control those plants by the conventional, especially linear control algorithms.

The authors have therefore conducted a series of studies on feasibility of the fuzzy logic control in mineral processing. As a result, the fuzzy logic control yielded sufficient control performances. Usually a trial and error method, however, must have been practiced in fuzzy logic control design to optimize the controller parameters, such as scaling factors, fuzzy rule tables and so on.

The authors intended in this paper to develop a way to automate a part of the above procedure by applying the genetic algorithm to optimize the scaling factors. The genetic algorithm is a unique optimum-seeking method that comes from an evolution process, and has recently been highlighted in different engineering areas. It is the algorithm to search the optimal value by mapping the search space structure into the dynamics of the evolution of the living beings.

The target control system for this study is concentration control system based on actual resources processing plant. From the results of the computer simulations, it has been demonstrated that this system can determine the fuzzy controller scaling factors automatically, and can be an effective method for a control system design of mineral processing plants.

KEY WORDS : Genetic Algorithm, Fuzzy Logic Control, Mineral Processing, Concentration

1. 緒 言

制御対象としての鉱物処理プロセスを考えた場合、その特徴として一般的に以下のようなことが挙げられる、すなわち、

1. 定量化が困難な特性が多数関与しているため、包含する変数が多数にのぼる。
2. 変数間に非線形関係が存在することが多い。また、無駄時間が存在することも多い。
3. 大きな外乱が存在することが多い。
4. 動特性が変動することが多い。

などである。これらの特徴は、実際に鉱物処理プロセス制御系を設計する際の大きな障害になる。

筆者らは、これらのうち、特に鉱物処理プロセスの持つ非線形性に着目し、種々の制御理論を適用した制御系設計法の研究を行ってきた¹⁾。それらの中の一つとして、ファジィ制御が挙げられる。

ファジィ制御は、Zadeh によって提案されたファジィ理論²⁾⁻⁴⁾に基づく制御手法である。この場合のコントローラは、その本質が非線形コントローラであることもあって、PID コントローラなどと比較して、対象の非線形性に対するロバスト性が高いという利点があるといわれている。

本研究室では、実際に資源処理の分野で遭遇した非線形性をもつプロセスの濃度制御に、ファジィコントローラの適用を試みた⁵⁾。その結果として、逆応答に対しても、ファジィコントローラが有効であることが示された。しかしながら、その一方で、特にルールテーブルを複数用いたこともあり、コントローラ設計の際のパラメータ調整に際して多くの試行錯誤を要し、多大な困難を伴ったことが報告された。また、多くのファジィ制御の研究者が、このようなコントローラ設計の問題を、今後改善すべき最も重要な課題の一つとして位置づけている。この点に関しては、PID コントローラのパラメータ調整と通ずるところがある。

このような制御系設計問題に対して、近年、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を応用しようという研究が行われている⁹⁾¹⁰⁾。遺伝的アルゴリズムとは、Holland によって提案された、生物の進化に着想を得たユニークな最適値探索アルゴリズムである⁷⁾。最急降下法などと比較して、局所的最適解に収束

* 1997 年 7 月 14 日受付 1998 年 7 月 28 日受理 XX International Mineral Processing Congress (1997.9) において一部口頭発表

1. 東京大学大学院博士課程学生 大学院工学系研究科地球システム工学専攻

2. 正会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科地球システム工学専攻 (著者連絡先) FAX 03-3818-7492 (東大・地球)

キーワード: 遺伝的アルゴリズム, ファジィ制御, 鉱物処理, 濃度

する可能性が低いという点に、最適化する対象に対する制限（例えば微分可能性など）が少なく、適用可能範囲が非常に広いという利点がある。また、全探索や全くのランダム探索に比較して収束速度が大きいという利点もあるため、特に探索範囲が広く、探索空間が複雑な場合に効力を発揮する手法である。ただしGAに関しては、その適用の際のパラメータ調整に困難が伴うことが多いという欠点もある。加えて、GAのメカニズムに関する理論的研究も十分でなく、これらの点が今後の課題といえる。

現在までに、GAによるファジィコントローラのパラメータ調整に関する研究はいくつも存在している¹⁰⁾。それらのうちの多くは、機械学習による知識獲得という側面が強調され、複雑なファジィルールの獲得を主目的としている。一方で、ファジィコントローラにおいてゲインに相当する、スケーリングファクタの調整に着目している事例は少ないように見受けられる。しかしながら、一般のコントローラ設計におけるゲイン調整の重要性を考えると、スケーリングファクタを第一に調整するのが有効であろうと思われる。

そこで本論文では、前述の濃度制御系に対するファジィコントローラのスケーリングファクタを、GAを用いて調整するシステムを構築した。また、計算機上でのシミュレーションを行い、GAにより設計されたファジィコントローラによるステップ応答を評価することによって、本システムの有効性に関する検討を行った。

2. 遺伝的アルゴリズムの概要

遺伝的アルゴリズムの概念図を、図1に示す。この図に示されるとおり、探索空間は仮想的な生命体の染色体に写像される。染色体はビット列で表現されることが多く、このビット列への変換をコード化と呼ぶ。探索点の評価関数を、探索点に対応する個体の環境への適合度とみなして進化シミュレーションを行うことにより、最も環境に適応した個体を見いだすことができる。最適な個体の染色体をデコードすることにより探索空間上の最適点を得ることになる。すなわち、探索空間の構造を生物の進化のダイナミクスに写像することにより最適値探索を行うアルゴリズムであるといえる。

今回は、その中でも単純GAと呼ばれるアルゴリズムを用いた。その具体的な手順は、以下の通りである。

1. 初期個体分布の発生
2. 各個体の適応度を計算
3. 適応度に従って、淘汰と増殖を実行
4. 各個体間の交差を実行
5. 各個体の突然変異を実行
6. 望ましい条件を満たすまで、2.から5.を繰り返す。

3. システム構成

3.1 本システムの概要

図1 遺伝的アルゴリズム概念図

図2 システム構成図

図3 プラントモデル図

図2に本システムの構成の概略図を示す。遺伝的アルゴリズムを用いたファジィコントローラ設計の手法としては、操業中にオンラインでコントローラ・パラメータの調整を行う方法も考えられるが、本システムでは設計段階でのファジィコントローラの最適化に注目した。すなわち、遺伝的アルゴリズムの評価関数として、制御系のステップ応答のISEに基づく指標を導入し、この指標を最小化するコントローラパラメータを得ることを目的とした。

3.2 対象プラント

本システムにより設計される制御系の制御対象として、図3に示されるようなプラントを採用した。このプラントは、実際に選鉱工場における浮選試薬濃度制御系、あるいは湿式粉碎工程のバルブ濃度制御系、といった事例に基づいてモデル化されたものである。

プラントのモデルは、直列に接続された2槽の攪拌槽から構成され、各攪拌槽の体積はともに $V[m^3]$ である。左側の攪拌槽に流量 $Q(t)[m^3/s]$ の水と、フィードレート $F(t)$ の試薬、あるいは被粉碎物が供給されており、右側の攪拌槽から濃度 $c(t)$ の水溶液、あるいはスラリーが排出される。各攪拌槽がともに完全混合槽であるとする、プラントの入出力関係式は、各攪拌槽での濃度を、 $c_1(t)$ 、 $c_2(t)$ として、

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \end{pmatrix} &= Q(t) \begin{pmatrix} -1/V & 0 \\ 1/V & -1/V \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1/V \\ 0 \end{pmatrix} F(t) \\ c(t) &= (0 \ 1) \begin{pmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad \dots (1)$$

と表せる。この入出力関係式に対して、 $F(t) = F$ （定数）とお

き、 $F = Q_0 c_0$ を満たす、 Q_0 、 c_0 で流量と濃度の正規化を行っている。なお、制御量は c_2 であるが、操作量としては Q そのものを用いていない。 $c_2 = 1$ で定常状態にある系における Q を基準として、そこからの増減量を操作量としている。

図4に、この系のステップ状入力に対する応答を示す。図から、 $t = 2.5$ と、 $t = 7.5$ 付近に特殊な逆応答が生じているのが分かる。これは、給水量を急激に増加させたことにより、攪拌槽1内での滞留時間が減少したために起こった現象であると考えられる。このように、系の動特性が変化するような系は、一般に制御困難である。

3・3 ファジィコントローラの構成

本論文で用いるファジィコントローラの構成は、図5に示す通りである。通常、ファジィコントローラでは、入力は制御偏差 e 、偏差の増分 de のみであることが多い⁶⁾。今回用いたファジィコントローラでは、それらに加えて、制御量 y を直接参照している。これは、制御量に応じたルールテーブルを用意することによって、プラントの非線形性に、より柔軟に対処しようと試みたためである。ファジィルールに用いるメンバシップ関数は、標準的な三角型の関数を用い、7段階の言語的ラベルを割り振った。通常、ルールテーブルのマトリックス内の言語的ラベルに対してもメンバシップ関数が割り振られることになるが、今回は1から-1の間を7分割したクリスプ値で表現することにした。

構成図中の $S1$ 、 $\dots$ 、 $S4$ は、各々、制御偏差、制御偏差の増分、制御量、操作量の増分に関するスケーリングファクタである。これらのスケーリングファクタは、PIDコントローラにおけるコントローラゲインに相当する値であり、前述の通り、ファジィコントローラの設計において最も重要なパラメータであると考えられる。本システムでのコントローラの設計では、これらの値の最適

図4 系の逆応答

図5 ファジィコントローラ構成図

表1 ルールテーブル1

Y	PS						
	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PB							
PM							
PS							
ZE	NB	NM	NM	ZE	PM	PB	PB
NS				PM			
NM		ZE		PB			
NB				PB			PM

表2 ルールテーブル2

Y	PM						
	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PB							
PM							
PS							
ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PM	PB
NS				PS			
NM		PS		PM			
NB				PB			PS

表3 ルールテーブル3

Y	PB						
	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PB							
PM							
PS							
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	ZE	PS	PM
NS				ZE			
NM		PM		PS			
NB				PM			ZE

化を行う。なお、ルールテーブルの設計は前述の本研究室による論文に従った⁵⁾。表1～3に、各々の制御量に対するルールテーブルの形状を示す。

ファジィコントローラの入出力関係は、これらのルールテーブルのマトリックスを $R_k = [r_{ij}^k]$ ($k = PB, \dots, PS$) とおくと、以下のように表現できる。

$$\frac{du}{dt} = S3 \cdot \frac{\sum_{i,j,k} r_{ij}^k \mu_i(S1 \cdot e) \mu_j(S2 \cdot de) \mu_k(S4 \cdot y)}{\sum_{i,j,k} \mu_i(S1 \cdot e) \mu_j(S2 \cdot de) \mu_k(S4 \cdot y)} \quad (2)$$

($i, j = PB, \dots, NB; k = PB, \dots, PS$)

ただし、 i, j はファジィ集合の言語的ラベルを表し、 $\mu_i(x)$ は各言語的ラベルに対応するメンバシップ関数を示す。また、 u は操作量である。

式に示される通り、ファジィ推論にはいわゆる簡略型推論法を用いており、逆ファジィ化には代数積—加算重心法を用いている。

3・4 GAの諸設定

遺伝的アルゴリズムにおけるオペレータ、パラメータなどの設定を以下に示す。

【コード化手法】 遺伝的アルゴリズムのコード化には、スケーリングファクタ $S1, S2, S3$ をそれぞれ 32 bit ずつ用いて、図6のような染色体を構成した。また、遺伝子として用いられる各パラメータは実数値であるので、実数値から 32 bit 離散値への変換が必要になる。これを以下の式に従って行った。

$$S1^*(\text{離散化後の値}) = \frac{S1_{\max} - S1_{\min}}{2^n} S1 \quad (3)$$

S1	S2	S3
32bit	32bit	32bit

図6 染色体構成

ただし、 n は離散化ビット数でこの場合は 32 であり、 $S1_{\max}$, $S1_{\min}$ は想定される $S1$ の上限、下限である。上式は、 $S1$ に関する式であるが他のパラメータも全く同様に処理される。

予備的に行ったテストシミュレーションの結果に基づいて、各パラメータの上限、下限を推定し、以下のように設定した。

$$\begin{cases} S1_{\max}=10, S1_{\min}=0.1 \\ S2_{\max}=10, S2_{\min}=0.1 \\ S3_{\max}=20, S3_{\min}=0.2 \\ S4=0.5 \end{cases}$$

〔遺伝的アルゴリズムのオペレータ〕 遺伝的アルゴリズムのオペレータとして使用したものは以下の通りである。

再生オペレータとしては、トーナメント選択方式のオペレータを用いた。最も一般的な SGA で用いられるルーレット選択を用いなかったのは、評価関数のスケージングの調整が困難であることと、一般的に個体分布の多様性が保持されにくい点を考慮したためである。

また、交差オペレータとしては基本的に一点交差を用いた。ただし、通常の交差オペレータのように染色体ごとに一点交差を行うのではなく各遺伝子ごとに一点交差を行った。これは、染色体内で各遺伝子の区分が明確であることから、多様性を保つのにこの方式が優れていると考えたためである。

一方、個体分布の多様性を考慮した結果、優れた個体が次世代まで生存する確率が低下し、ひいては遺伝的アルゴリズムの収束速度が鈍化する恐れが生ずる。その対策として、エリート保存戦略を採用した。この戦略は、現在までの世代で生じた個体の中で最も優れた個体が必ず次世代に生き残る、というものである。この結果、各世代における最良の個体の評価値は世代ごとに広義単調増大することになる。

なお遺伝的アルゴリズムのパラメータとして、交差確率 0.7、突然変異確率 0.05、個体数 60、という設定値を用いた。

〔評価関数〕 遺伝的アルゴリズムに用いる評価関数として、制御系のステップ応答の ISE に基づく指標を用いた。ただし、遺伝的アルゴリズムは基本的に最大化問題を解くアルゴリズムであるので、ISE の最小化問題を解くためには何らかのスケージングを行う必要がある。今回は、ISE の逆数を用いた。通常の SGA の場合、再生オペレータにルーレット選択法を用いるためスケージングの調整に神経を使う必要があるが、今回はトーナメント選択を用いるため、最大化問題への変換を行うだけでよい。これが、トーナメント選択法を用いた理由の一つである。

また、単に ISE の最小化問題に帰着させた場合、観測時間の取り方によっては、整定しない応答波形が生ずるような制御系が最適解として得られる場合がある。これは観測時間を十分長く設定すれば解決できる問題ではあるが、その分計算時間も増大するため、現実問題として観測時間を十分取れないことも多い。今回も、このような状況が生じたため、その改善策として評価関数の改良を行った。評価関数の算出に単なる ISE を用いるのではなく、観測時間終了まで残り 1 割の区間の誤差を 10 倍して計算し、その逆数を取ったものを用いた。計算式は以下の通りである。

$$\int_0^{0.9t_0} e^2(t) dt + 10 \int_{0.9t_0}^{t_0} e^2(t) dt \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $e(t)$ は制御偏差、 t_0 は観測終了時間を表す。これに

図7 適用結果

図8 評価値の世代変化

よって、極端に観測時間を増やすことなく、十分に整定していない応答波形を示す制御系が最適解となるのを防止できた。

4. 適用結果

本システムを実際に適用し、シミュレーションを行った結果を図7、図8に示す。

図7は、本システムにより設計されたファジィ制御系と、試行錯誤により設計された制御系のステップ応答を比較したものである。図から、本システムによる制御系のステップ応答は、試行錯誤による制御系の応答と比較して、立ち上がり時間が若干早く、オーバーシュートがより低く抑えられた波形となっている。すなわち、多大の労力を費やした試行錯誤によって得られた結果を上回る制御性能が、今回の体系的手法によってもたらされている。

また図8は、それぞれ個体群における評価値の最大値、平均値、最小値を世代変化に従って表示したものである。前述のごとく、エリート保存戦略により最大値は広義単調増大している。また、平均値と、最小値をみると個体群の多様性を保ちつつ探索を行っていることが推定できる。

5. 結 び

本研究では、いわゆる決定論的な制御系設計手法の適用困難な、資源処理プロセスに対する、ファジィコントローラの設計を、遺伝的アルゴリズムを用いて自動化する手法を提案した。特に、ファジィコントローラの設計において重要なパラメータである、スケージングファクタの調整を行うことを検討した。制御対象として、実際の資源処理工場で遭遇する濃度調整プロセスを採り上げ、計算機シミュレーションにより、本システムの評価を行った。制御系のステップ応答を比較した結果、多大の時間と労力を要する試行錯誤による設計の場合と同等以上の制御性能を示す制御系が、

本システムによって得られることが示された。

本システムにおいては、ルールテーブルの最適化は行っていないが、ルールテーブル設計の自動化が今後の重要な課題であるといえる。

GAを用いた設計段階におけるルールテーブル設計手法としては、例えばピッツアアプローチが適用可能である。しかしながら、探索空間が莫大なものになり、それに伴って計算時間も飛躍的に増大するため、それをいかにして抑えるかが大きな問題になる。現在、その対策として、「初期個体群を特定の分布に従って発生させ初期状態での評価値を改善する。」とか、「経験上ルールテーブルとして意味を持たない形式のものが生じないようにオペレータを工夫する。」とか、「収束性を犠牲にしないために破壊性の低いオペレータを用いる。」などといったことを検討している。

それ以外にも、評価関数にファジィ積分を用いてより人間の判

断に近い最適波形を得る、といったことも考えられる。

引用文献

- 1) 松尾誠治・岡野靖彦：資源と素材，Vol. 112，p. 94-98，(1996)
- 2) Zadeh, L. A. : Information and Control, Vol. 12, p. 94-102, (1968)
- 3) Zadeh, L. A. : Information and Control, Vol. 8, p. 338-353, (1965)
- 4) Zadeh, L. A. : IEEE Trans, System, Man and Cybernetics, p. 28-44, (1973)
- 5) 定木 淳：東京大学博士論文，(1990)
- 6) 村上周太：講座ファジィ5. ファジィ制御，(1993)，日刊工業(東京)
- 7) Holland, J. H. : Adaptation in Natural and Artificial Systems, (1975), University of Michigan Press, (1992), MIT Press
- 8) 坂和正敏・田中雅博：遺伝的アルゴリズム，(1995)，朝倉(東京)
- 9) Wang, P. and Kwork, D. P. : Eng. Practice, Vol. 4, p. 641-648, (1994)
- 10) Nordvik, J. - P. and Renders, J. - M. : Proceedings of the Forth International Conference on Genetic Algorithm, p. 480-486, (1991)

■お知らせ■

「資源と素材」 1997年12号 リサイクリング大特集号 特別価格頒布

☆

(社)資源・素材学会 リサイクリング特集号発行委員会編
A4判変形 約300頁 1997年12月発行 (Vol. 113 No. 12)

内 容

総 説		3 編
講 座		15 編
解説論文		20 編
論文・報告		17 編
事例集		27 編

★詳細目次は、昨年の12号をご覧ください。(申出により特集号「目次」のコピーを送付いたします。) ★

価 格：特別価格 2,100円 (定 価 3,000円)
消費税サービス (消費税 150円)
送 料 有料 (15冊以上購入される場合は、送料無料)

申込方法：FAXでお申し込み下さい。(請求書を付けて送付いたします。)

申 込 先：(社)資源・素材学会 FAX 03-3403-1776