特集 進化的アルゴリズムとファジィ理論

進化的アルゴリズムとファジィ理論の 組合せの最近の動向[†]

古橋 武*

1. はじめに

進化的アルゴリズム (Evolutionary Algorithm: EA) は生物の進化のメカニズムを工学的に応用したアルゴリズムの総称として用いられつつあり、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA)、進化的プログラミング (Evolutionary Programming: EP)、進化戦略 (Evolutionary Strategy: ES)、遺伝的プログラミング (Genetic Programming: GP) などを含む^[1]。この EA とファジィ理論の組合せの研究は、C. L. Karr^[2,3] がファジィルールのチューニングに GA を応用したことに始まる。その後、EA とファジィの組合せに関する研究は年々盛んになり、現在では、FUZZ-IEEE, ICEC などの国際会議、ファジィシステムシンポジウム、インテリジェントシステムシンポジウム (FAN シンポジウム) などの国内会議においてセッション構成の重要な部分を占めている。EA とファジィの組合せ研究は、ファジィ制御、ファジィモデリング、ファジィクラシフィケーション、ファジィ回帰分析、ファジィクラスタリング、ファジィ最適化、ファジィニューロ、ファジィ関係方程式、ファジィエキスパートシステム、ファジィ情報検索、ファジィ意思決定、ファジィパターン認識など多岐にわたっている^[4-7]。

本稿ではこの多様なファジィと EA の組合せ研究を概観し、研究マップ作

りを試みる。マップ作りには組合せの形態に対する視点が重要となるが、これまでの、EA のファジィへの導入、ファジィの EA への導入の二つの視点に対して、本稿では新たに EA の拡大フローにファジィ理論の手法を導入する視点を提供する。拡大フローにより、上記の二つの視点を複合して同時に眺めることができる。研究マップにより従来研究の位置づけを明らかにすることができるとともに、これまでは試みられて来なかった組合せの可能性を見出すことができる。

2. ファジィと EA の組合せの形態

2.1 組合せの視点

EA は組み合わせ最適化問題に有効な解法とされている^[8]。EA は図 1 に示すごとく「問題の定式化」→「染色体へのコード化」→「初期集団の生成」→(1)「個体の評価」→(2)「遺伝的演算」→

図1 EAのフロー

[†] Recent Trend in Research on Combinations of Fuzzy Logic and Evolutionary Algorithms

* Takeshi FURUHASHI

名古屋大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Nagoya University

(1)→(2)→(1)→(2)→…→「解の獲得」を基本フローとする。EA には前述のごとく GA、EP、ES 等のアルゴリズムがあり、染色体へのコード化法、遺伝的演算等にそれぞれ独自の主張があるが、EA は基本的に探索問題の解法であり、EA とファジィ理論の組合せの現状と可能性を概観するには、図 1 のフローを EA の共通の基盤と見なすことで十分であると考ええる。

ファジィと EA の組合せは図 2 (a) に示すように EA のフローの中にファジィ理論の手法を導入する視点と、ファジィ理論を用いたシステムの中に EA を導入する視点がまず考えられる。前者の視点からは、EA のフローにおいて評価や遺伝的演算にファジィ理論の手法を導入することなどが考えられ、後者の視点からは、ファジィシステム的设计・解析において組合せ最適化問題が定式化できるとき、ここに EA を導入することが考えられる。しかし、本稿の目的であるファジィと EA の組合せの研究マップ作りに、図 2 の二つの視点から個別に眺めることが有効とはいえない。

本稿では図 3 に示すような EA の拡大フローを導入する。EA は組合せ最適化問題を解くアルゴリズムであるのに対して、ファジィはあいまい情報を取り扱う要素技術であると思なすことで、図 2 の二つの視点は一つにまとめることができる。図 3 においては、図 2 (a) の視点は染色体の評価や遺伝的演算等にファジィ理論の手法を導入することであり、図 2 (b) の視点は EA の問題の定式化と EA により得られた解の利用の部分にファジィ理論の手法を導入することである。

2.2 具体例

(a) ファジィモデリング

マップ作りに当たって、従来研究の中から具体的事例を取り挙げる。図 4 は EA による階層化ファジィモデリングの例^[10]である。この階層化ファジィモデリングにおいては、各層内のサブモデル毎に入力変数選択、メンバーシップ関数の種類数選択を EA により行う。ファジィ推論システムを染色体にコード化し、サブモデルの精度・汎化性・

図2 ファジィとEAの組合せの形態

図3 EAの拡大フローに基づくファジィとEAの組合せの形態

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
2	0	3	0	0	5

(a)染色体へのコード化

(b)サブモデル

(c)階層化ファジィモデル

図4 ファジィモデリングの例

簡潔性などを指標に遺伝的演算を施し、一つのサブモデルを得る。逐次、EAによりサブモデル選択を繰り返して階層構造を組み上げていく。染色体には入力変数の候補の使用／不使用と各入力変数のメンバーシップ関数の数をコード化している。図4(a)は入力変数が $x_1, \dots, x_6$ の6個の場合の例を示す。この例では x_2, x_4, x_5 に対応するコードが0であるので、これらの変数はいらないことを意味し、 x_1, x_3, x_6 についてはそれぞれ2, 3, 5個のメンバーシップ関数を用意してモデリングを行うことを意味する。図4(b)はそれらの入力変数を用いたサブモデルを示す。モデルの評価に際してはファジィニューラルネットワークを適用して、対象システムの入出力データを利用して学習を行う。このサブモデルの精度、汎化性、簡潔性などを評価することで、染色体が決める入力変数とそのメンバーシップ関数の組み合わせの良し悪しを評価できる。図5はこの階層化ファジィモデリングを図3のファジィとEAの組合せの形態に当てはめて示す。階層化ファジィモデリングの全体のフローの中に各サブモデルをEAにより探索するフローが組み込まれている。

(b)知識発見

図6はEAにより知識発見を行う例^[11]である。ファジィモデリングは入出力データが与えられているときに、そのデータ内に含まれている知識を明示化する手法であった。データが事前には得られない場合には試行錯誤を通して知識を発見していく手法が有効となる。EAは、多数の制御入力変数の候補の中から有効な変数を選択し、メンバーシップ関数の調整を行い、さらに、新たな制御ルールの追加などに威力を発揮する。評価関数の設定はファジィ制御器を構成する上で重要な問題で

図6 EAによる知識発見

図5 ファジィとEAの組合せ例
(ファジィモデリング)

あるが、EAにおける評価関数は対象システムとは独立に設定できるため、その自由度は高い。図6はセミアクティブサスペンションのファジィ制御器設計をEAにより行う例であるが、ファジィ制御器の入力は車体の位置、速度、加速度等であり出力はダンバ係数 C である。この制御の評価は乗り心地であり、非線形な人間の感性を満足するような車体の振動抑制ルールの探索はEAにより可能となる。図6はファジィ制御器設計にEAを組み込んだ形で表現されているが、図3のファジィ

図7 ファジィとEAの組合せ例
(知識発見)

図8 ファジィとEAの組み合わせ例(ファジィ評価/チューニング)

ィとEAの組合せの形態に当てはめて示すと、図7のフローが得られる。ここでの探索問題はファジィ制御器設計であり、染色体の評価がシミュレーションおよび実機での実験によりなされる。

(c) ファジィ評価

図8(a)はファジィ理論をEAの評価関数に導入した場合のフローを示す。対象とする問題は種々の組み合わせ最適化問題とすることができる。例えば意思決定者の満足度を指標に最適化を計る問題においては、ファジィ満足化手法により解の評価を行う^[12]。また、制約を充足させながら最適化を計る場合には、ファジィ制約の導入により、制約を満たさない解を即座に致死染色体とすることなく、個体集団内の多様性を損なうことがない。

(d) ファジィチューニング

図8(b)はEAのパラメータ(例えば突然変異・交差の確率、集団内の個体数等)の調整にファジィ推論を用いる場合のフローである^[13]。EAにおいては、個体集団内の多様性を維持して、あまりに速い段階で特定の個体が集団内に広まらないようにし(初期収束の回避)、しかも、効率良く探索を行えることが要求される。EAのパラメータを探索の途中において調整することは効果的であり、その調整のノウハウをファジィルールにより記述している。

組合せマップを図9に示すようにまとめることができる。

3.1 問題の定式化/利用←ファジィ

図の一番上は問題の定式化である。ファジィシステムの設計・解析において組み合わせ最適化問題が定式化できるとき、EAのアプローチが適用

図9 ファジィとEAの組み合わせマップ

3. 組合せマップ

前章の具体例などから、ファジィ理論とEAの

可能である。ファジィ制御^[2,3]、ファジィモデリング^[10,14,15]、ファジィクラシフィケーション^[16]、ファジィクラスタリング^[17]、ファジィニューロ^[18]、ファジィクラシファイアシステム^[19,20]等におけるファジィ理論とEAの組合せ形態の多くがこの部分でなされている。

この解の定式化と解の利用の箇所について、極力、応用先によらない一般的な事項をまとめることを試みる。EAによりファジィ推論システムを探索する問題は、ファジィ推論システムの何を探索すべきかにより種々の研究展開が可能となる。図10はそのイメージを示す。課題は入力変数選択^[19]、階層構造選択^[19,15]、推論法選択^[23]、メンバーシップ関数の種類数選択^[19,14,15]、メンバーシップ関数の形状・台集合の調整^[2,3]である。ファジィ推論システムが表現すべき非線形入出力関係が複雑であるとき、それぞれがEAの探索対象となり得る。たとえば、入力変数の選択は入力変数間に相乗・相殺効果があるとき、適当な組み合わせを決めることは困難であることがある。EAは、基本的に様々な組み合わせを効率よく試す手法であり、この困難を克服できる可能性が高い。また、ファジィ推論システムを多段とすることでシステムとしての非線形写像能力を高めることができると期待されるが、適切な階層構造を決めるにはやはり種々の組み合わせを生成・評価するEAのアプローチが有効となる。

入力空間の分割法はファジィ推論システムの性能を決める重要な要素の一つである。図11はその代表的と思われる例を示す。図は入力変数が x_i, x_j の二つの場合を示す。図11(a)は格子状の分割であり最も一般的な分割法である。(b)は入力空間をツリー状に順次細分化する手法^[24]である。(c)は分割される空間が非矩形^[16]であり、また(d)は必要な領域だけがクラスターされる手法^[11,17,23]である。それぞれ一長一短がある。例えば、格子状分割は入出力関係をif~then~形式で把握するのに容易であるが、ルール数が増えすぎてしまう傾向がある。(b), (c)は入出力関係の非線形性に応じた分割を行うために少ない分割数で済むが、ル

ールが表現する入出力関係は複雑となる。(d)は入力空間内のデータをクラスタリングをする手法であり、データの無い領域については特にルールを設けない。これらのいずれを採用するかにより、染色体のコーディング法・評価法は異なってくる。

図10 EAでファジィ推論システムの何を探究するか

図11 入力空間の分割法

ファジィ推論システムは複数のファジィルールにより構成されるが、このルール群を染色体にコード化する際にも種々の形態が考えられる。図12はその例を示す。これらは2入力 x_1, x_2 , 1出力 y のファジィルール群をコード化した例である。図12(a)は1ルールを1染色体にコード化^[19,20]している。染色体群によりファジィ推論システムを構成しているので、入力空間分割は図11(d)のタイプになる。染色体群によりファジィ推論システムの性能が決まるので、システムの推論結果への個々のルールの貢献度を評価することで、ルール群に遺伝的演算が適用される。これはファジィクラシファイアシステムと呼ばれる機械学習の枠組みに分類される。ファジィクラシフィケーションの研究^[25]ではこのタイプのルール表現により図11(c)の分割を獲得することを目指しているものがある。図12(b)は全ルールを1つの染色体に表現した例^[2,3]である。1染色体が1つのファジィ推論システムを表現している。従って、染色体毎にファジィ推論システムの性能が求められ、この性能により染色体群に遺伝的演算が施される。入力空間分割は図11(a)のタイプとなる。図12(c)は図11(a)と(b)の中間の形態^[11,23]である。複数(m 個)のルールを1つの染色体にコード化している。ファジィ推論システムは1つの染色体により構成され、染色体毎にシステムの性能が求められる。

図12 ファジィルールのコード化

入力空間分割は全空間を網羅しない図10(d)のタイプとなる。

ファジィ推論システムの入力変数が多くなると、図12(b)のような全入力空間を網羅するルール表現ではルール数が膨大となり、また、入力空間を細分化し過ぎることで推論システムの汎化性を損なってしまうことがある。図12(a), (c)のルール表現でもこの困難は避けられない。そこで、考慮しなくて良い変数の存在を1つのルールの中にも認めることで、少ないルール数でシステムの精度と汎化性を満たすことが有効となる。図13はその例である。図13(a)は図12(a)のタイプにおいて、5入力 $x_1, \dots, x_5$, 1出力 y のファジィルール群に* (ドンとケア)記号を挿入して、考慮しなくて良い入力変数を指定している^[25]。図13(b)は図12(c)の1つの染色体に複数のルールをコード化したものと同じタイプであるが、1つのルールを縦に表現している。各ルールにおいて使用しない入力変数は省略されている^[11]。

3.2 評価/データ/パラメータ調整←ファジィ

ファジィ最適化^[12]、ファジィエキスパートシステム等においてはEAの評価関数にファジィ理論を導入することが考えられる。ファジィデータを扱うものとしてはファジィ関係方程式^[21]、ファジィ

(a) 1ルール/染色体

(b) 複数ルール/染色体

図13 * (ドントケア) の利用

ィ情報検索^[22]等に応用の可能性がある。ファジィ推論による EA のパラメータチューニング^[13]は、種々の組み合わせ最適化問題の探索の効率化に適用できよう。

3.3 新しい組合せの可能性

図中において、いまだ試みられていないファジィと EA の組合せの可能性を見ることができる。例えば、コード化はファジィ推論システムの種々のパラメータを染色体中に表現することでなされてきたが、コードそのものがファジィ集合である可能性を考えることはできないだろうか。また、遺伝的演算そのものにファジィ推論の手法を導入することはできないだろうか。思わぬ展開が有り得るかもしれない。

さらには、染色体の初期集団の生成にもファジィ推論を導入することは可能であろう。先の、図 7 の制御ルールの知識発見においては、染色体の評価は実際の制御を行うことでなされる。この実験を全染色体について毎世代行うことは大変な労力・時間を要する。探索問題に対する先験的知識があれば、初期集団の生成時にこれをおおいに活用すべきであり、ファジィ理論の手法をここに利用できる可能性も有り得る。

4. 他のマップの可能性

本稿では、EA は組合せ最適化問題を解くアルゴリズムであるのに対して、ファジィはあいまい情報を取り扱う要素技術であると見なして、両者の組合せマップを作成した。得られたマップは見通しの良いものであったが、視点を変えれば、組合せの他の側面を強調したマップが作成できると期待される。

例えば、ファジィと EA の融合の度合いに応じたマップは作れないだろうか。文献[26]ではファジィとニューラルネットワークの融合について見通しよくまとめられている。この手法に倣って、図 14 に示すようなマップはできないだろうか。ファジィ-EA は例えばファジィ推論によりデータの

図14 融合度のレベルに応じたマップ

前処理を行った後に EA を用いたシステム (Evolutionary System : EvS) を適用するアプローチであり、EA-ファジィは例えば EvS により組合せ最適化問題を解いて得られた解の候補をもとにファジィ推論を行うアプローチである。これらはファジィと EA の融合の度合いが最も低い形態である。ファジィ的 EA は EvS のフローの中にファジィの手法を導入する融合の形態であり、EA 的ファジィはファジィの手法の中に EvS が取り込まれている形態である。最も融合の度合いが高いのがファジィ化 EA (もしくは EA 化ファジィ) であろうが、ファジィの手法と EvS が一体となるようなアプローチが有り得るかも知れない。このファジィ化 EA (EA 化ファジィ) に良い提案がなされればこのマップの軸が定まりそうである。

5. マップの周辺

マップの周辺にも新しい研究展開があろう。その一つにインタラクティブ EA (GA) ^[27-29]がある。設計・デザインにおいては、結果に対する評価が重要となるが、図 15 に示すように結果の評価に人間が関わり、人間とコンピュータが相互に作用しあいながら創造的な仕事を行う枠組が有効と期待される。EA は基本的に繰り返し計算であるので、評価に携わる人間の疲労に配慮した評価法^[29]が必要となる。

この他、ファジィシステムを探索対象とする EA の計算の効率化を目指して、遺伝的演算にバックテリアやウイルスの進化のメカニズムを取り入

図15 インタラクティブEA

れる試み^[23,30]もある。

6. まとめ

本稿ではファジィ理論の手法とEAとの組合せの現状と今後の展開の可能性を明らかにするために両者の組合せ研究に関するマップの作成を行った。EAの拡大フローを新たに導入し、組合せ研究を概観することができた。しかし、マップを作るにより見えてくるものがある代わりに、マップにより発想に枠がはめられてしまうことを恐れる。いったん作ったマップはすぐ壊してしまうに限る。本稿が読者自身のオリジナルなマップ作りの一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] D. B. Fogel, "Evolutionary Computation: A New Transactions", IEEE Trns. on Evolutionary Computation, Vol. 1, No. 1, p.1 1998
- [2] C. L. Karr, L. Freeman, D. Meredith, "Improved Fuzzy Process Control of Spacecraft Autonomous Rendezvous Using a Genetic Algorithm", SPIE Conf. on Intelligent Control and Adaptive Systems, pp.274-283, 1989
- [3] C. L. Karr, "Design of an Adaptive Fuzzy Logic Controller Using a Genetic Algorithm", Proc. of the 4th Int'l Conf on Genetic Algorithms, pp.450-457, 1991
- [4] J. T. Alander, "Indexed Bibliography of Genetic Algorithms and Fuzzy Systems", Univ. of Vaasa, Dept. of Information Technology and Production Economics. ftp://ftp.uwasa.fi/cs/report94-1/gaFUZZYbib.ps.Z, 1996
- [5] O. Gordon, F. Herrera, M. Lozano, "A Classified Review on the Combination Fuzzy Logic-Genetic Algorithms Bibliography: 1989-1995", in E. Sanchez, T. Shibata, L. A. Zadeh (Eds.), "Genetic Algorithms and Fuzzy Logic Systems - Soft Computing Perspectives", Advances in Fuzzy Systems - Applications and Theory, Vol.7, World Scientific, pp.209-240, 1997
- [6] F. Herrera, J. L. Verdegay (Eds.), "Genetic Algorithms and Soft Computing", Physica-Verlag, Heidelberg, 1996
- [7] O. Gordon, F. Herrera, M. Lozano, "On the Combination of Fuzzy Logic and Evolutionary Computation": A Short Review and Bibliography, in W. Pedrycz (Ed.), "Fuzzy Evolutionary Computation", Kluwer Academic Publishers, pp.33-56, 1997
- [8] Z. Michalewicz, R. Hinterding, M. Michalewicz, "Evolutionary Algorithms", in W. Pedrycz (Ed.), "Fuzzy Evolutionary Computation", Kluwer Academic Publishers, pp. 3-31, 1997
- [9] W. Pedrycz (Ed.), "Fuzzy Evolutionary Computation", Kluwer Academic Publishers, pp. 3-31, 1997
- [10] S. Matsushita, A. Kuromiya, M. Yamaoka, T. Furuhashi, and Y. Uchikawa, "Determination of Antecedent Structure for Fuzzy Modeling Using Genetic Algorithm", (ICEC'96), pp.235-238, 1996
- [11] T. Hashiyama, T. Furuhashi, Y. Uchikawa: "A Study on Finding Fuzzy Rules for Semi-Active Suspension Controllers with Genetic Algorithm", Proc. of ICEC '95, pp.279-282, 1995
- [12] M. Sakawa, et al., "Hot Parts Operating Schedule of Gas Turbines by Genetic Algorithms and Fuzzy Satisficing Methods", Proc. of IJCNN'93, pp.746-749, 1993
- [13] M. A. Lee, T. Takagi, "Dynamic Control of Genetic Algorithms using Fuzzy Logic Techniques", Proc. of the 5th ICGA, pp.76-83, 1993
- [14] H. Nomura, I. Hayashi, N. Wakami, "A Self-tuning Method of Fuzzy Reasoning by Genetic Algorithm", Proc. of 1992 Int'l. Fuzzy Systems and Intelligent Control Conf., pp.236-245, 1992

- [15] K. Shimojima, T. Fukuda, Y. Hasegawa, "Self-Tuning Fuzzy Modeling with Adaptive Membership Function, Rules, and Hierarchical Structure Based on Genetic Algorithm", *Fuzzy Sets and Systems*, vol.71, no.3, pp. 295-309, 1995
- [16] H. Ishibuchi, K. Nozaki, N. Yamamoto, H. Tanaka, "Selecting Fuzzy Rules by Genetic Algorithm for Classification Problems", *Proc. of FUZZ-IEEE'93*, pp.1119-1124, 1993
- [17] D. B. Fogel, P. K. Simpson, "Evolving Fuzzy Clusters", *Proc. of ICNN'93*, pp.1829-1834, 1993
- [18] R. Machado, A. F. Rocha, "Evolutive Fuzzy Neural Networks", *Proc. of FUZZ-IEEE'92*, pp.493-500, 1992
- [19] M. Valenzuela-Rendon, "The Fuzzy Classifier System: A Classifier System for Continuously Varying Variables", *Proc. of 4th ICGA*, pp.346-353, 1991
- [20] K. Nakaoka, T. Furuhashi, Y. Uchikawa, "A Study on Fuzzy Classifier System for Knowledge Acquisition of Large Scale Systems", *Proc. of FUZZ-IEEE'94*, pp.1797-1800, 1994
- [21] W. Pedrycz, "A Hybrid Genetic Learning in Fuzzy Systems", *Proc. of FUZZ-IEEE'94*, pp. 1354-1358, 1994
- [22] F. E. Petry, B. P. Buckles, D. H. Kraft, D. Prabhu, "Generating Fuzzy Information Retrieval Queries via Genetic Programming", *Proc. of IFSA'93*, pp.481-484, 1993
- [23] T. Furuhashi, K. Nakaoka, Y. Uchikawa, "A New Approach to Genetic Based Machine Learning and an Efficient Finding of Fuzzy Rules", *Proc. of IEEE/Nagoya Univ. WWW*, pp.114-122, 1994
- [24] C.-T. Sun, J.-S. Jang, "Fuzzy Classification Based on Adaptive Networks and Genetic Algorithms", in E. Sanchez, T. Shibata, L. A. Zadeh (Eds.), "Genetic Algorithms and Fuzzy Logic Systems - Soft Computing Perspectives", *Advances in Fuzzy Systems - Applications and Theory*, Vol.7, World Scientific, pp.113-131, 1997
- [25] 中島、村田、石渕「ファジィファイアシステムによる言語的識別ルールの獲得」*日本経営工学会誌*, Vol.47, No.3, pp.199-206, 1996
- [26] 林、馬野「ファジィ・ニューラルネットワークの現状と展望」*日本ファジィ学会誌*, Vol.5, No.2, pp.178-190, 1993
- [27] Karl Sims, "Artificial Evolution for Computer Graphics", *Computer Graphics*, Vol.25, No.4, 1991
- [28] ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」1998
- [29] 高木、大宅、大崎「対話型遺伝的アルゴリズムにおける入力インターフェイスの改善および評価」第12回ファジィシステムシンポジウム, pp. 513-516, 1996
- [30] K. Shimojima, N. Kubota, T. Fukuda, "Virus-Evolutionary Genetic Algorithm for Fuzzy Controller Optimization", in F. Herrera, J. L. Verdegay (Eds.), "Genetic Algorithms and Soft Computing", *Physica-Verlag, Heidelberg*, pp.369-388, 1996

(1998年7月15日 受付)

[問い合わせ先]

〒464-8603

名古屋市千種区不老町

名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻

古橋 武

TEL : 052-789-2792

FAX : 052-789-3166

http://www.bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp/member/furuhashi/

著者紹介

古橋 武 (ふるはし たけし)

名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻

昭和60年3月 名古屋大学工学研究科電気系専攻博士課程修了。工学博士。平成2年12月 名古屋大学工学部助教授、現在に至る。主にソフトコンピューティングによる不完全情報利用技術、パターン・記号統合モデルに関する研究に従事。