九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

遺伝的アルゴリズムとファジィ理論の協調

高木，英行
九州芸術工科大学音響設計学科

https://hdl.handle.net/2324/4488442

出版情報：日本ファジィ学会誌. 10 (4), pp.602-612, 1992. 日本ファジィ学会
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

Japan Society for Fuzzy Theory and Systems

日本ファジィ学会誌 Vol.10, No.4, pp.602-612 (1998)

特集 進化的アルゴリズムとファジィ理論

遺伝的アルゴリズムとファジィ理論の協調†

高木 英行*

1. はじめに

1980年代の終わりから始まったニューラルネット(NN)とファジィシステム(FS)の融合化モデルの提案およびその実用化に続き、遺伝的アルゴリズム(GA)とFSの協調モデルと応用がいろいろ提案されてきた。本解説は、後者に焦点を当てて、これまで提案されてきた技術を紹介するものである。

本解説では進化的計算論(EC)という用語やGAという用語を使うが、特に特定研究の紹介でGAの用語を用いている場合は、Mitchellが彼の著書[48]のはじめで断っているように、広い意味で受け取っていただきたい。例えば、FSの設計には狭い意味でのGAだけでなく、進化戦略(ES)も使われているし、その逆に、FSは狭い意味のGA以外のEC計算論のパラメータ制御にも利用可能であるからである。

なお、グラナダ大学のF. Herreraは表題の分野への関心が高く、文献DB、研究論文、解説論文、本の編集など精力的に行っている。http://desai.ugr.es/~herreraでこれらが参照したり取り寄せたりできる。例えば、fl-ga.htmlで得られる文献リスト[13]には562の論文が集められている。

2. ECを用いたFSの設計

2.1 FS全体を進化させる方法

FSの自動設計の方法には、NNを用いるもの[28,29,30,20,65]、ファジィクラスタリングを用いるもの[26]、勾配法を用いるもの[3,37,52]、GAを用いるもの[32,33,34,68,53,35,36,51,54,69,66,39,40]など、いろいろある。

GAでFSを設計する方法は、Karrが1989年に始めて以来[32]いろいろ発表されているが、最も多く行われている方法は、FSをパラメータ化して、FSの入出力関係を仕様に合うよう、各パラメータをGAで最適化する方法である。

FSの設計には5つの項目があると考えられる。

(1) 入力変数の選択、
(2) 演算方法の選択、
(3) 前件部の設計、
(4) 後件部の設計、
(5) ルール数の決定。

(1)の入力変数選択は、タスクによっては固定されていて選択の余地がない場合も多い。選択する必要がある場合は、変数減少法やGAなどを用いる。変数減少法は、1つづつ入力変数を減らしてFSを設計し、その変数を減らしたことでFSの性能が劣化すれば、その変数が重要であり、そうでない場合は性能にあまり寄与しない変数である、とみなす方法である。要不要の判定をする入力変数が少ない場合に使われる。入力変数が多い場合は、GAを用いて入力変数の最適組み合わせを行うことも考えられる[45]。

(2)の演算方法の選択は、各種t-ノルム演算子やt-コノルム演算子などの演算方法を選択するものである。通常、盲目的に結合子を選択してしまい、演算方法の選択がFSの設計の範疇に入らないように考えている向きも見受けられるが、演算子によって大きくFSの性格が変わる。逆にこのことを利用して、ファジィルールを固定しておいて、

† Genetic Algorithms and Fuzzy Logic

* Hideyuki TAKAGI
九州芸術工科大学 音響設計学科
Kyushu Institute of Design, Dept. of Acoustic Design

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Fuzzy Theory and Systems

演算子だけを動的に変更することで、FSの動特性を改善する研究もある[62,63,64]。

しかし、FSの設計の中で特に重要な項目は(3)～(5)である。(3)の前件部の設計とは入力空間をいかに分割するかという問題なので、分割された空間数、つまり(5)のルール数と直接関係する。これら3項目の設計にGAが使われる。これら3項目は相互に関係するので、1つづつ最適化するのではなく同時に最適設計する必要がある。以下では、これらをGAで同時に設計する方法を示そう[39]。

まず(3)の前件部設計は、メンバーシップ関数の形状をパラメータ化することから始まる。三角形ならば3点、二等辺三角形ならば2点、ガウス形ならば2点、台形ならば4点で、形状が規定される。各入力変数毎の最大分割数を決めれば、GAコーディングする前件部のパラメータ数が決まる。例えば、入力変数が3で、台形メンバーシップ関数を各入力空間毎に最大8個まで配置可能だとすれば、3×4×8=96個の形状パラメータを最適化することが、前件部の設計である。

(4)の後件部もパラメータ化する。簡易型ファジィ推論では各ルールに1つの数値を、TSKモデルでは線形式(非線形式に拡張しても同様)の係数を、Mamdani型のファジィ推論では前件部設計と同じく、メンバーシップ関数の形状パラメータを、それぞれGAコーディングする。実際に全部のルールが使われなくても最大設計ルール数分のこれら後件部パラメータをGAコーディングする。前述の例の場合、最大$8^3=512$ルール分の後件部パラメータをGAコーディングする。

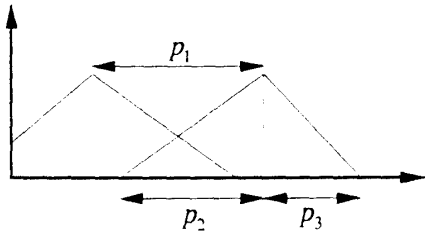


図1 GAコーディングによるファジィ分割数の決定。[a,b]にかかるメンバーシップ関数のみを有効とする。

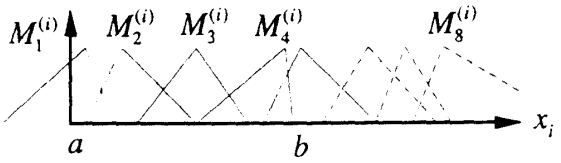


図2 昇べき順に並べる制約を課すためのメンバーシップ関数の形状パラメータ化の例。正数p_iのために、メンバーシップ関数は、右へ右へと配置される。

(5)のルール数の設計にはちょっと工夫がいる。例えば、入力変数x_iの設計範囲が$[a,b]$で、その入力空間のメンバーシップ関数$M_j^{(i)}$の最大数が8個であるとしよう。メンバーシップ関数$M_1^{(i)}, M_2^{(i)}, \ldots, M_8^{(i)}$が、$a$から大きい方へ順に並ぶように制約を加えてGAで形状を設計する。こうしてbを越えたx_iの範囲をカバーするメンバーシップ関数を無視すれば、有効な$[a,b]$のファジィ分割数が確定する。図1の場合、5つのメンバーシップ関数を有効と見なすわけである。これを全入力変数分行えば、入力空間全体の分割数、すなわちルール数が確定する。メンバーシップ関数が昇べき順に並ぶような制約の与え方の一例としては、三角形メンバーシップ関数$M_j^{(i)}$の3点を、通常(左端、中央、右端)の座標値にする代わりに、図2のように($M_{j-1}^{(i)}$の中央と$M_j^{(i)}$の中央との差、$M_j^{(i)}$の中央から左端および右端への距離)の3点をGAコーディングすることが行われている[39]。距離は正なので、メンバーシップ関数は、図の右へ右へと順に並ぶ。

以上のGAコーディングで、FSの設計項目(3)～(5)が同時に設計できる。

2.2 GAによるFS設計上のTips

一般にルール数が多いほどFSの性能は向上する。しかし、メモリと計算コストを考えれば、できるだけ少ないルールで仕様を満たすFSを設計したい。この矛盾を解決するため、ルール数に比例するようなペナルティをGAの評価関数に導入する。例えば、評価関数の分母にルール数を入れたり、ルール数に定数を掛けて評価値から減じる、などである。

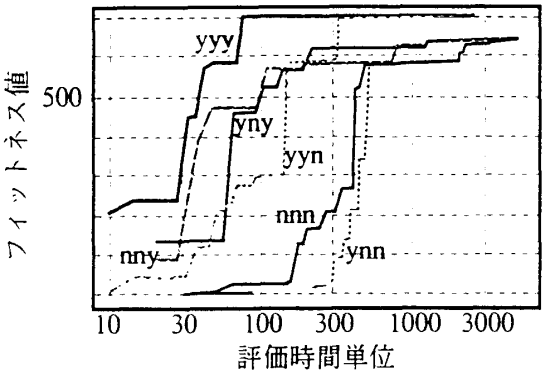
NII-Electronic Library Service

Japan Society for Fuzzy Theory and Systems

また、FSの適用タスクに対する先見的知識をGAコーディングに導入することで、探索空間を狭めて、すばやく良い解に到達できるようにすることは重要である[40]。例えば、倒立振子のファジィ制御の場合のように、振子の右側と左側の制御は対称であるはずである、との先見的知識があれば、各入力変数に対する探索空間を半分にすることができる。また、入力である振子の角度、角速度、角加速度が0であれば、制御量は0であるはずであるから、後件部がTSKモデルの場合、定数項は0であるべきである、との先見的知識を利用すれば、GA探索のパラメータを減らすことができる。手作業でFSを調整する場合、等間隔に配置されたメンバーシップ関数から調整を始めるのは素性が良いと考えられているからであろう。GAの初期値をすべて乱数で決めるのではなく、初期値の1つに、この等間隔配置のメンバーシップ関数を1つ加える、というのも先見的知識の1つである。FSのGA設計における、先見的知識導入の効果を表1の組合せと図3の効果で示す[40]。

表1 先験的知識の組合せ

	nnn	nny	ynn	yny	yyn	yyy
対称なメンバーシップ関数			○	○	○	○
対称な後件部					○	○
2つの初期化知識		○		○		○



(1単位は12シミュレーションに相当)

図3 FS設計における先験的知識組み込みの効果

2.3 個々のルールを進化させる方法

第2.1節の設計方法は設計仕様が学習データとして与えられている場合の方法である。その評価基準はファジィルール全体がどの程度与えた学習データを満たすかであり、仕様と実際のFSの出力の差がfitness値に反映されている。また、基本的には、ファジィルールは対象の入力空間をすべて覆うように設計する。

一方、ファジィルール全体の進化ではなく、個々のファジィルールを進化させる、ファジィクラシファイアシステム(ファジィCS)も、特に知識獲得の形で使われている。

ファジィCSは、FSの推論結果がうまく働いた場合に、その推論結果を導いたファジィルールの信頼度を上げる強化学習システムである(正確に言えば、FS全体の信頼度を上げるPittsburghアプローチもある)。しばらく動作させると信頼度が高いルールや低いルールができるので、この信頼度をfitness値として、選択、交叉、突然変異のGA演算を行い、新しいルールを生成していく。

大規模FSの場合は、ルール数が膨大になるのを防ぐため、ルールがカバーしない領域が生じてもやむを得ない、との立場に立つことがある。この考えに基づいたFSの設計では、使用するルール数nを予め決めておき、このルール数nで入力空間のどの領域をカバーすればFSの性能が最大になるか、という問題に置き換える。このルールのカバー領域を選択する設計にGAを用いる[17]。簡単な方法では、無条件に入力空間をメッシュ状に分割し、その全ルールの中から、重要なルール空間n個を選択するという、組合せ最適化問題にGAを用いればよい。ファジィCFは、この考え方に適した方法である。

3. GAを用いたFS設計の応用

3.1 民生機器

NNとFSの融合化技術は、1991年から日本の民生機器開発に利用されている。一方韓国では、GAとFSの融合化技術を応用した民生機器が

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Fuzzy Theory and Systems

1994年から発売されている。

三星社は、冷蔵庫と洗濯機にGA+FS技術を応用している[38]。1994年発売の冷蔵庫は、庫内の温度むらがないように、庫内内壁のセンサに応じて庫内冷気の吹き出し制御をFSで行っている。ここには2種類のFSが使用されており、第1のFSは庫内温度の推定、第2のFSは第1のFS出力を入力して冷気吹き出し口の決定を行っている。これら、2つのFSは、学習データに合うよう、GAで調整されたものである。また、1995年発売の洗濯機には、ウールや女性の下着を手洗いのように洗えるランジェリーモードを備えているが、この低速回転のモータ制御は、FSが行っている。このFSもGAで設計されたものである。

LG電子も多くの機器のNN-FSやFSの設計にGAを利用している[61]。彼らの食器洗い乾燥機、炊飯器、電子レンジには、皿枚数推定のNN-FS、米の量を推定するNN-FS、最適に制御を行うNN-FSが使われているが、これらのNN-FSはGAで設計されたものである。同様に、彼らの冷蔵庫、洗濯機、掃除機で使われているFSもGAで設計されたものである。

3.2 学習機能の導入

ここでちょっと脇道に逸れて、NNとGAの融合化技術を組み込んだ韓国LG電子のエアコンの事例[60]を紹介しよう。NNで生成する制御ルール領域をGAを使ってユーザサイドで学習的に変更するもので、ルールベースに通じるものである。

ルール領域は、RCEタイプのNN[56]で形成されている。このNNは、ニューロンと重み係数で円の半径と中心座標を表現し、円の合成で制御ルール領域を形成するものである(図4参照)。ユーザが標準制御を好まず修正すると、現在の室温等の環境下での制御を学習的に修正する。この修正にはNNがカバーする制御ルール領域を修正するように円を削除したり新規に追加したりするようニューロンの削除・追加と重み係数の修正を行う。これが、GAで行われている。

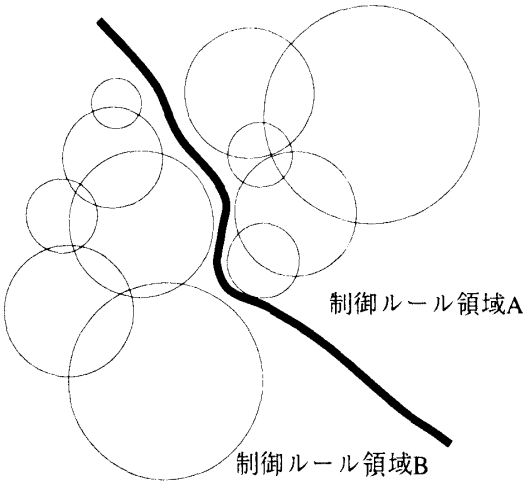


図4 RCEタイプのNNによるエアコンの制御ルール領域の生成。GAがユーザサイドで学習的に各ニューロンを削除・追加しNN学習する。

3.3 インタラクティブECによるVRのための制御ルール獲得

まだ研究段階であるが、筆者らで行っている人間と腕相撲を行うロボットアームの制御[67]への応用を紹介しよう。目的は勝ち負けではなく、対戦する人間が、力覚系の人工現実感(VR)を感じるような制御を行うことである。ところが、VR感は対戦している人間しか分からないため、どのような腕相撲制御をしてよいか誰にも分からない。

そこで、インタラクティブEC技術[1,2]を導入する。対戦している人によりリアリティを感じさせる腕相撲制御をしたFSに対してより高い主観評価点を与え、ECがFSを進化させるものである。

初めに、ロボットが人間の腕を押した時の制御ルールに報償を与える評価系のクラシファイアシステムで得た2万の「勝つためのルール」を、GAを用いて8個のファジィルールのFSに変換する[31]。このFSを初期値にしてインタラクティブECを始める。この勝つためのFSとVRを実現しているFSを比較することで、VR感を与える要因が解析できるのではないかと期待している。

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Fuzzy Theory and Systems

4. FSによるGA制御

4.1 GAパラメータの動的制御

GA探索を行う時には、交叉率、突然変異率、個体数などいくつかのGAパラメータを設定しなければならない。NNと同じく、これらのパラメータの値によって収束性能が大きく異なる。さらに、探索空間の状況にこれらの最適値が変わるので、探索世代毎に、つまり動的に最適化できることが望ましい。NN学習の場合、学習率を動的に変えることはいまや常識であり、例えば非線形最適化手法を導入することで、最適化が図れる。しかし、GAの場合は多点探索であることや突然変異のような演算のために、単に誤差曲線を観察して動的に最適化することはなかなか困難である。

これまでもGAパラメータの決定方法についていろいろ研究されてきた[6,15,7,19,58,59,16,27,5,18,39]。動的に最適化する方法もいろいろ提案されている。早くにはメタレベルのGA方式が提案されている[19,11]。これは6つのGAパラメータをGAコーディングに組み込み、世代毎にGAパラメータを進化させるというものである[19]。また、どのGA演算を用いるかを確率的に選択できるように各演算に評価値を与え、過去数世代で評価の高い子個体を生成したGA演算に高い評価を与えることで、探索に応じて選択される交叉や突然変異などのGA演算の割合を変化させる提案もある[14]。その他では、個体の探索空間上の分布の多様性を測る関数を用意し、広域探索と局所探索のバランスを取るようパラメータを調整する提案もある[43]。

前述したように、探索の性質や確率的な演算のために、GAパラメータの動的な最適化は困難であるが、我々には定性的な知識がある。例えば、誤差曲線の減少が停滞していたら、局所最適解に陥っている可能性があるので突然変異率を上げてみるとか、個体群の中で評価値が高い個体数が少ないのであれば、全体の個体数を減らして計算コストを下げ、逆に評価値が高い個体が大多数であれば、個体数を増やせばもっとよい評価値を持つ個体が得られる可能性が高くなる、などである。そこで、この定性的知識をファジィルールで記述して、GAパラメータを動的に制御しようとすることが1993年以来提案されている[41,10,72,73,4,25,8,46]。

動的パラメトリックGAは、ファジィルールでGAのパラメータを動的に最適化しようとする提案である[41]。この論文では一例として、(平均fitness値／最良fitness値)、(最悪fitness値／平均fitness値)、前世代からのfitness値の変化、の3つを入力とし、個体数、交叉率、突然変異率の3つを出力とするFSが実験に使われている。毎世代のfittiness値をモニタしながら、毎世代GAパラメータが変更される(図5)。問題は、このような入出力関係を持つFSをどのように設計するかであるが、ここでは、第2.1節で述べたGAを用いたFSの自動設計手法を用いている(図5下部のGA)。DeJongの5関数[15]を適用タスクとして得られた、個体数、交叉率、突然変異率の全制御ルールと全メンバーシップ関数が、文献[41,42]に開示してある。

重要なことは、これら制御ルールはDeJongの5関数のためのルールではなく、fitness値の動き

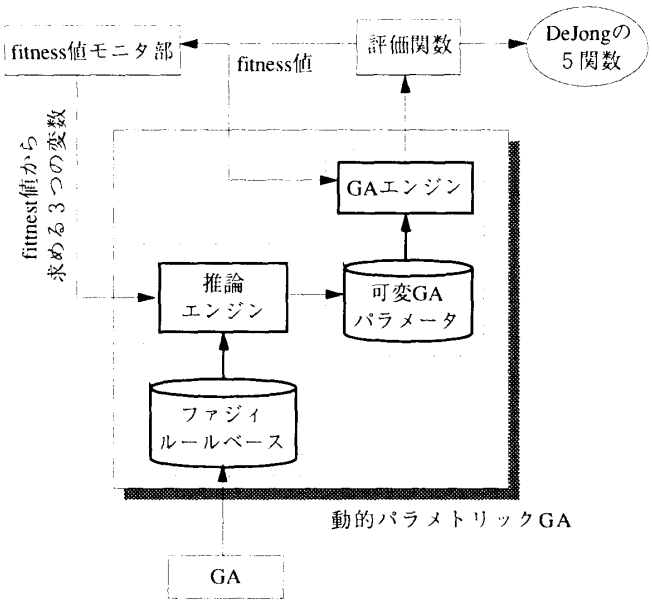


図5 動的パラメトリックGAと、GAを用いたFSの設計

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Fuzzy Theory and Systems

に対する汎用GAのためのルールであることである。テストタスクとして倒立振子の制御を行い、従来のパラメータ固定のGAと動的パラメトリックGAのonline性能を調べたものが図6である。

4.2 GA演算のファジィ化

4.2.1 GA探索空間の制御

GAでは広域探索能力と局所探索能力とのバランスが重要であり、初めは広く探索して大局的最適解近傍を探し出し、その後最適解に向かって正確に収束させる必要がある。このバランスが悪いと局所最適解に陥ったり、なかなか最適解に収束しないことになる。Herreraらは、交叉演算にファジィ結合子を導入して、演算結果の大小関係で、広域探索と局所探索の制御することを提案した[23,24]。

2つの親の実数遺伝子[0,1]に変換して c_i^1, $c_i^2 \in [a_i, b_i]$とする。ここで、$\alpha_i = \min(c_i^1, c_i^2)$, $\beta_i = \max(c_i^1, c_i^2)$とすれば、2つの親の近傍とその他の区間が図7のようにできる。前者と後者の領域探索は、局所探索領域と広域探索領域に相当する。交叉の結果得られた子個体が、この区間に配置されるように、交叉演算にt-ノルム演算、t-コノルム演算、平均演算子、補償演算子などを導入して演算結果の大小関係を空間の探索範囲に利用しようとするのがHerreraらの考え方である。例えば、t-ノルム演算子のmin, Hamacher積、代数積、Einstein積をそれぞれ、T_1、T_2、T_3、T_4とし、t-コノルム演算子のmax、Hamacher和、代数和、Einstein和をそれぞれ、G_1、G_2、G_3、G_4とし、平均演算子を同様にP_jとすれば、$T_4 \leq T_3 \leq T_2 \leq T_1 \leq P_j (j=1,\ldots,4) \leq G_1 \leq G_2 \leq G_3 \leq G_4$の性質があるので、図7の$[a_i, \alpha_i]$の区間だけでも、$T_4 \sim T_1$の順に探索範囲を変えて子個体の分布を決めることができるような交叉演算が構成できる。

4.2.2 染色体のファジィコーディング

2変数を3ビットでバイナリィコーディングすると、例えば、

$$g = (101, 011)$$

になったとしよう。この表現型は

$$h = (1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0,\ 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0)$$

になる。

このバイナリィ値を[0,1]の実数値に拡張しようとする方法が提案されている[71]。例えば、

$$g = (0.22, 0.86, 0.14,\ 0.03, 0.18, 0.92)$$

の表現型は

$$\begin{aligned} h &= (0.22 \cdot 2^2 + 0.86 \cdot 2^1 + 0.14 \cdot 2^0,\ 0.03 \cdot 2^2 + 0.18 \cdot 2^1 + 0.92 \cdot 2^0) \\ &= (2.74,\ 1.40) \end{aligned}$$

となる。

このコーディングにファジィ集合を持ち込み、ファジィテンプレートとする提案もある[57]。

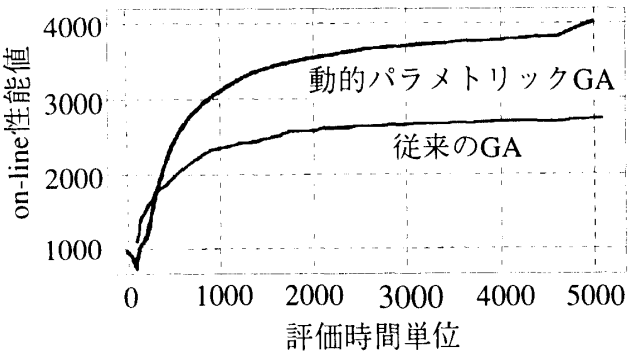


図6 動的パラメトリックGAとパラメータ固定の従来GAの性能比較。倒立振子制御用FSの設計をタスクにした場合のon-line性能値。

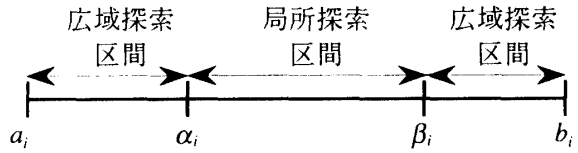


図7 交叉によって得られる個体の分布

4.3 その他

FSをGAのために用いるその他の方法としては、FSを使ってGAの初期値を決定するものがある。例えば、仕様の色を作るための顔料混合比率を推定する調色問題はペイント業界では重要な

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Fuzzy Theory and Systems

問題であるが、この推定にGAを使い、その初期値をFSで推定している例がある[49,50]。色は連続的に変化するので、赤や緑のスペクトル領域をメンバーシップ関数でファジィ分割させた方が妥当であるが、調色に先験的知識を使ってGA探索の初期値を決定しようとするとFSが必然的に使われるようにある。なお、このGAのfitness関数には2つのNNと1つの知識ベースが使われている[49,50]。

また、GA探索の停止条件を決めるのにFSを使う例もある。最適解は初めから分からないが、最適解の近傍の何%位ならば許容できるかを、まず初めにGA探索者に入力させ、40世代毎に収束状況から最適値を予測しながら探索停止かどうかを決めるものである[47]。

その他のFSの導入としては、fitness関数をFSで構成するということも容易に考えられる。

5. その他

ファジィクラスタリングへの応用は、1994頃から発表が相次いだ[9,12,22,44,70,74]。この他にも、紹介すべきFSとGAの分野はいろいろあるが、冒頭で述べたように、1996年時点で562点ものファジィとGA関連論文があるとのことであり、本解説ではとても全分野を網羅することができない。ご興味ある読者のために、Herreraらが文献[13]で分類している項目と論文数を列挙し、今後の読者のご参考に供したい。

ファジィGA (24)、ファジィクラスタリング (14)、ファジィ最適化 (39)、ファジィNN (34)、ファジィ関係式 (6)、ファジィエキスパートシステム (8)、ファジィCS (33)、ファジィ情報検索とデータベース検索 (6)、ファジィ意志決定・金融・経済モデル (10)、ファジィ回帰分析 (6)、ファジィパターン認識と画像処理 (20)、ファジィ分類・概念学習 (24)、ファジィ制御(設計・学習・調整・応用) (287)、ファジィ論理－GAフレームワーク (13)、その他のファジィ関連 (38)、合計562件。

6. 今後

NNとFSの融合化技術は、基本的枠組み[21]がほぼ固まり、基本特許も成立し、我々の日常生活に広く応用されるようになった。同様に、GAとFSの基本的な枠組みもほぼ出そろった。今後はその枠組みの中での応用が中心になるだろう。新しいEC技術とFSでは、まだ、そのバリエーション形態の融合化は出てくるかもしれない。例えば、ECが表現するパラメータや演算がファジィ化されたり、前述の人間を組み込んだインタラクティブECで人間の主観の部分とファジィが接点を持つ余地があることなどである。

NNやFSは入出力があるシステムであるから、その融合化にはシステムの結合という制約があるが、ECはアルゴリズムであるため、ファジィのいろいろな分野で融合化が図りやすいとも言える。本解説で紹介した枠組み以上の展開や、枠組み内でも実際の応用展開へと今後の期待が望まれる。

参考文献

[1] ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」論文集，福岡(1998年3月).
[2] 特集号「対話型進化計算」，人工知能学会誌，vol. 13，no.5(1998)予定.
[3] Araki, S., Nomura, H., Hayashi, I., and Wakami, N., "Self-generating method of fuzzy inference rules," Int'l Fuzzy Engineering Symposium(IFES'92), Yokohama, Japan, pp.1047-1058(Nov.,1992).
[4] Arnone, S., Dell'Orto, M., and Tettamanzi, A, "Toward a fuzzy government of genetic populations," 6th Int'l Conf. on Tools with Artificial Intelligence(TAI 94), New Orleans, LA, USA, pp.585-591(Nov., 1994).
[5] Back, T., "Self-adaptation in genetic algorithms," 1st European Conf. on Artificial Life, Paris, France, pp.263-271(Dec., 1991).
[6] Bageley, J.D., "The behavior of adaptive systems which employ genetic and correlation algorithms," Doctoral Dissertation, Univ. of Michigan, Univ. Microfilms No.68-7556(1967).
[7] Baker, J.E., "Adaptive selection method for genetic algorithms," 1st Int'l Conf. on Genetic

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Fuzzy Theory and Systems

Algorithms and Their Applications (ICGA'85), Pittsburgh, PA, USA, pp.101-111, Lawrence Erlbaum Associates (1985).

[8] Bastian, A., 林, "ファジィルールと遺伝的アルゴリズムを用いた知識ベースシステムの一提案," 日本ファジィ学会誌, vol.8, no.6, pp.1058-1065 (1996).

[9] Bezdek, J.C. and Hathaway, R.J. "Optimization of fuzzy clustering criteria using genetic algorithms," 1st IEEE Conf. on Evolutionary Computation (ICEC'94), Orlando, FL, USA, vol.2, pp.589-594 (June, 1994).

[10] Bergman, A., Burgard, W., and Hemker, A., "Adjusting parameters of genetic algorithms by fuzzy control rules," 3rd Int'l Workshop on Software Engineering, Artificial Intelligence and Expert Systems for High Energy and Nuclear Physics, Oberammergau, Germany (Oct., 1993), in *New Computer Techniques in Physics Research* III, (eds.) K.H. Becks and D. P. Gallix, World Scientific, Singapore, pp.235-240 (1994).

[11] Bramlette, M.F., "Initialization, mutation, and selection methods in genetic algorithms for function optimization," 4th Int'l Conf. on Genetic Algorithms (ICGA'91), San Diego, CA, USA, pp.100-107, Morgan Kaufmann (July, 1991).

[12] Buckles, B.P., Petry, F.E., Prabhu, D., et al., "Fuzzy clustering with genetic search," 1st IEEE Conf. on Evolutionary Computation (ICEC'94), Orlando, FL, USA, vol.1, pp.46-50 (June, 1994).

[13] Cordón, O., Herrera, F. and Lozano, M., "A classified review on the combination fuzzy logic-genetic algorithms bibliography," Technical Review #DESCAI 95129, Dept. of Computer Science and Artificial Intelligence, Universidad de Granada (Dec., 1996) (http://decsai.ugr.es/~herrera/fl-ga.html).

[14] Davis, L., "Adapting operator probabilities in genetic algorithms," 3rd Int'l Conf. on Genetic Algorithms (ICGA'89), Fairfax, VA, USA, pp. 61-69, Morgan Kaufmann (June, 1989).

[15] DeJong, K.A., "An analysis of the Behavior of a calaa of genetic adaptive systems," Doctoral Dissertation, Univ. of Michigan, Univ. Microfilms No.76-9381 (1975).

[16] DeJong, K.A. and Spears, W.M., "An analysis of interacting roles of population size and crossover in genetic algorithms," Parallel Problem Solving from Nature, 1st Workshop, PPSN 1, 38147 (1990).

[17] 古橋, 中岡, 森川, 前田, 内川, "ファジィクラシファイアシステムによる知識発見に関する一考察," 日本ファジィ学会誌, vol.7, no.4, pp. 839-848 (1995).

[18] Goldberg, D.E., Deb, K., and Clark, J.H., "Genetic algorithms, noise and the sizing of populations," Complex Systems, vol.6, no.4, pp.333-362 (1992).

[19] Grefenstette, J.J., "Optimization of control parameters for genetic algorithms," IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, vol. SMC-16, pp.122-128 (1986).

[20] 林, 高木, "神経回路網モデルによるファジィ推論の定式化," 第4回ファジィシステムシンポジウム, 東京, pp.55-60 (1988年5月).

[21] 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.188-190 (1993).

[22] Hall, L.O., Bezdek, J.C., Boggavarpu, S., and Bensaid, A., "Genetic fuzzy clustering," NAFIPS/IFIS/NASA'94, San Antonio, TX, USA, pp.411-415 (Dec., 1994).

[23] Herrera, F., Herrera-Viedma, E., Lozano, M., and Verdegay, J. L., "Fuzzy tools to improve genetic algorithms," EUFIT'94, Aachen, Germany, pp.1532-1539 (Sept., 1994).

[24] Herrera, F., Lozano, M., and Verdegay, J. L., "The use of fuzzy connectives to design real-coded genetic algorithms," Mathware & Soft Computing, vol.1, no.3, pp.239-251 (1995).

[25] Herrera, F. and Lozano, M., "Adaptation of genetic algorithm parameters based on fuzzy logic controllers," in *Genetic Algorithms and Soft Computing*, (eds.) F. Herrera and J. Verdegay, Physica Verlag, pp.95-125 (1996).

[26] 廣田, 吉成, "ファジィクラスタリングを用いたファジィ制御規則の同定", 第5回ファジィシステムシンポジウム, pp.253-258 (1989年6月).

[27] Hesser, J. and Manner, R., "Towards an optimal mutation probability for genetic algorithms," Parallel Problem Solving from Nature, 1st Workshop, PPSN 1, 23132 (1990).

[28] Ichikawa, R., Nishimura, K., Kunugi, M., and Shimada, K., "Auto-tuning method of fuzzy membership functions using neural network learning algorithm: Application to water flow forecasting for reservoir," 2nd Int. Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks (IIZUKA'92), Iizuka, Japan, pp.345-348 (1992).

[29] Jang, J.-S.R., "Fuzzy controller design without domain experts," IEEE Int.l Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE'92), San Diego, CA, pp. 289-296 (1992).

[30] Jang, J.-S.R., "Self-learning fuzzy controllers based on temporal back propagation," IEEE

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Fuzzy Theory and Systems

Trans. on Neural Networks, vol.3, no.5, pp. 714-723(1992).

[31]蒲原，高木，竹田，“仮想現実感を与える腕相撲制御ルールの獲得，”第12回ファジィシステムシンポジウム，東京，pp.487-490(1996年6月).

[32]Karr, C., Freeman, L., and Meredith, D., “Improved fuzzy process control of spacecraft autonomous rendezvous using a genetic algorithm,” SPIE Conf. on Intelligent Control and Adaptive Systems, Philadelphia, PA, pp.274-283(nov., 1989).

[33]Karr, C., “Applying genetics to fuzzy logic,” AI Expert, vol.6, no.2, pp.26-33(1991).

[34]Karr, C., “Design of an adaptive fuzzy logic controller using a genetic algorithm,”Int.l Conf. of Genetic Algorithms(ICGA'91), San Diego, CA, USA,pp.450-457, Morgan Kaufmann (July, 1991).

[35]Karr, C., Gentry, E., “A genetics-based adaptive pH fuzzy logic controller,” Int.l Fuzzy Systems and Intelligent Control Conf.(IFSICC'92), Louisville,KY, pp.255-264(1992).

[36]Karr, C., Sharma, S., Hatcher, W., and Harper, T.,“Control of an exothermic chemical reaction using fuzzy logic and genetic algorithms,” Int. l Fuzzy Systems and Intelligent Control Conf. (IFSICC'92), Louisville, KY, pp.246-254(1992).

[37]Katayama, R., Kajitani, Y., Nishida, Y., “A self generating and tuning method for fuzzy modeling using interior penalty method,” 2nd Int. Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks (IIZUKA'92), Iizuka, Japan, pp.349-352(July, 1992).

[38]Kim, J., Ahn, L., and Yi, Y.-S., “Industrial applications of intelligent control at Samsung Electronics Co. -in the home appliance division-,” Int'l J. Conf. of CFSA/IFIS/SOFT'95 on Fuzzy Theory and Applications, Taipei, Taiwan, pp.478-482, World Scientific(Dec., 1995).

[39]Lee, M.A. and Takagi, H., “Integrating design stage of fuzzy system using genetic algorithms,” IEEE 2nd Int'l Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE'93), San Francisco, CA USA, vol.1, pp.612-617(Mar.-April, 1993).

[40]Lee, M.A. and Takagi, H., “Embedding apriori knowledge into an integrated fuzzy system design method based on genetic algorithms,” 5 th IFSA World Congress, Seoul, Korea, vol.II, pp.1293-1296(July, 1993).

[41]Lee, M.A. and Takagi, H., “Dynamic control of genetic algorithms using fuzzy logic techniques,” 5th Int'l Conf. on Genetic Algorithms (ICGA'93), Urbana-Champaign, IL, USA, pp. 76-83, Morgan Kaufmann(July, 1993).

[42]Lee, M.A. and Takagi, H., “A framework for studying the effects of dynamic crossover, mutation, and population sizing in genetic algorithms,” in *Advances in Fuzzy Logic, Neural Networks and Genetic Algorithms*.(eds.) T. Furuhashi, pp.111-126, Springer-Verlag, Berlin (1995).

[43]Li, T.-H., LucAsius, C.B., and Kateman, G., “Optimization of calibration data with the dynamic genetic algorithm,” Analytia Chimica Acta, vol.268, pp.123-134(1992).

[44]Liu, J.-Z. and Xie, W.-X., “A genetics-based approach to fuzzy clustering,” 4th IEEE Int'l Con. on Fuzzy Systems(FUZZ-IEEE'95) and 2 nd Int'l Fuzzy Eng. Symp., Yokohama, Japan, vol.4, pp.2233-2240(March, 1995).

[45]松下，黒宮，山岡，古橋，内川，“遺伝的アルゴリズムを変数選択に用いたファジィGMDHに関する基礎的研究，”第5回FANシンポジウム，東京，pp.335-338(1995年5月).

[46]Mc Clintock, S., Lunney, T., and Hashim, A., “A fuzzy logic controlled genetic algorithm environment,” IEEE System, Man and Cybernetics(SMC'97), Orlando, Florida, USA, pp. 2181-2186(Oct., 1997).

[47]Mayer, L. and Feng, X., “A fuzzy stop criterion for genetic algorithms using performance estimation,”3rd IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems, Orlando, Florida, USA, pp.1990-1995(1994).

[48]Mitchell,M.,“遺伝的アルゴリズムの方法，”伊庭監訳，東京電機大学出版局(1997).

[49]Mizutani, E., Takagi, H., and Auslander, D.M. “A cooperative system based on soft computing methods to realize higher precision of computer color recipe prediction,” the SPIE-The International Society for Optical Engineering, Orlando, FL, USA, vol.2492, pt.1：303-314(Apr., 1995).

[50]Mizutani, E., Takagi, H., and Auslander, D.M., “Evolving color paint,” IEEE Int'l Conf. on Evolutionary Computation(ICEC'95), Perth, WA, Australia, vol.2, pp.533-538(Nov.-Dec., 1995).

[51]西山，高木，Yager, R.R.,中西，遺伝的アルゴリズムを用いたファジィ推論ルールの自動生成，”第8回ファジィシステムシンポジウム，広島，pp.237-240(1992年5月).

[52]Nomura, H., Hayashi, I., and Wakami, N., “A self-tuning method of fuzzy control by descent method”, 4th IFSA Congress, Vol.Engineering, 1991, Brussels, Belgium, pp.155-158(1991).

[53]野村，荒木，林，若見，“デルタルールによる学習型ファジィ推論 -遺伝的アルゴリズムによる

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Fuzzy Theory and Systems

前件部の構造道程-,” 第2回 FAN シンポジウム, pp.25-30(1991).

[54]Nomura, H., Hayashi, I., and Wakami, N., “A self-tuning method of fuzzy reasoning by genetic algorithm,” Int.l Fuzzy Systems and Intelligent Control Conf. (IFSICC'92), Louisville, KY, pp.236-245(1992).

[55]Qian, Y., Tessier, P., Dumont, G., “Fuzzy logic based modeling and optimization,” 2nd Int.l Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks (IIZUKA'92), Iizuka, Japan, pp.349-352(July, 1992).

[56]Reilly, D. L., Cooper, L.N., and Elbaum, C., “A neural model category learning,” Biological Cybernetics, vol.45, no.1, pp.35-41(1982).

[57]Sanchez, E., “Fuzzy genetic algorithms in soft computing environment,” 5th IFSA Congress, Seoul, Korea, pp.XLIV-L(1993).

[58]Schaffer, J.D. and Morishima, A., “An adaptive crossover distribution mechanism for genetic algorithms,”2nd Int'l Conf. on Genetic Algorithms(ICGA'87), pp.36-40(1987).

[59]Schaffer, J.D., Caruana, R.A., Eshelman, L.J., and Das, R., “A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization,” 3rd Int'l Conf. on Genetic Algorithms(ICGA'89), Fairfax, VA, USA, pp.51-60(June, 1989).

[60]Shim, M.S., Byun, I.S., Lee, H.J., and Kim, J.H., “A learning control of air-conditioner in the field using evolutionary algorithms,” KFMS Spring Meeting, PyungTaek, Korea, pp.221-226(1995)(韓国語).

[61]Shim, M.S., Lee, K.L.,Lim, H.T., and Wang, B. H., “Applications of evolutionary computations at LG Electronics,” Int'l J. Conf. of CFSA/IFIS/SOFT'95 on Fuzzy Theory and Applications, Taipei, Taiwan, pp.483-488, World Scientific (Dec., 1995).

[62]Smith, M.H., “Parallel dynamic switching of reasoning methods in a fuzzy system,”2nd IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems(FUZZ-IEEE'93), San Francisco, CA, USA, pp.968-973(Mar. - April, 1993).

[63]Smith, M.H. and Takagi, H., “Optimization of fuzzy systems by switching reasoning methods dynamically,” 5th IFSA World Congress, Seoul, Korea, vol.II, pp.1354-1357(July, 1993).

[64]Smith, M.H., “Optimization of fuzzy systems by dynamic switching of reasoning methods,” Ph. D Dissertation of Univ. of California at Berkeley(1994).

[65]Takagi, H. and Hayashi, I., “NN-driven Fuzzy Reasoning”, Int'l J. Approximate Reasoning (Special Issue of IIZUKA'88), vol.5, no.3, pp. 191-212(1991).

[66]高濱，宮本，小倉，中村，“遺伝アルゴリズムによるファジィ制御規則の学習，” 第8回ファジィシステムシンポジウム，広島，pp.241-244(1992年5月).

[67]竹田，蒲原，“仮想人物との腕相撲対戦システムの構築，” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J79-A, no.2, pp.489-497(1996).

[68]Thrift, P., “Fuzzy logic synthesis with genetic algorithms,” Int.l Conf. of Genetic Algorithms (ICGA'91), San Diego, CA, USA, pp.509-513, Morgan Kaufmann(July, 1991).

[69]土屋，松原，長町，“商品発注支援システムにおける知識獲得手法 -Genetic Algorithm を用いたファジィ IF-THEN ルールのパラメータ同定-,” 第8回ファジィシステムシンポジウム，広島，pp.245-248(1992年5月).

[70]Van Le, T., “Evolutionary fuzzy clustering,” 2 nd IEEE Conf. on Evolutionary Computation (ICEC'95), vol.2, Perth, WA, Australia, pp. 753-758(Nov.-Dec., 1995).

[71]Voigt, H.M., “Fuzzy evolutionary algorithms,” Technical Report tr-92-038, Int'l Computer Science Institute, UC Berkeley(1992). (ftp://ftp.icsi.berkeley.edu/下の pub/techreports/1992/tr-92-038.ps.gz)

[72]Xu, H.Y. and Vukovich, G., “A fuzzy genetic algorithm with effective search and optimization,” Int'l J. Conf. on Neural Networks (IJCNN'93), Nagoya, Japan, pp.2967-2970(Oct., 1993).

[73]Xu, H.Y. and Vukovich, G., “Fuzzy evolutionary algorithms and automatic robot trajectory generation,” 1st IEEE Conf. on Evolutionary Computation(ICEC'94), Orlando, FL, USA, vol.2, pp.595-600(June, 1994).

[74]Yuan, B., Klir, G.J., and Swan-Stone, J.F., “Evolutionary fuzzy c-means clustering algorithm,” 4th IEEE Int'l Con. on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE'95) and 2nd Int'l Fuzzy Eng. Symp., Yokohama, Japan, vol.4, pp.2221-2226(March, 1995).

(1998年4月23日 受付)

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Fuzzy Theory and Systems

[問い合わせ先]
〒815-5840
福岡市南区塩原4丁目9-1
九州芸術工科大学 音響設計学科
高木 英行
TEL ：092-553-4555
FAX ：092-553-4555
E-mail：takagi@kyushu-id.ac.jp.
URL：http://www.kyushu-id.ac.jp/~takagi/

著 者 紹 介

高木 英行（たかぎ ひでゆき）

九州芸術工科大学 音響設計学科

昭56 九州芸工大修士課程了．同年松下電器産業入社中央研究所勤務．平3～5 UC Berkeley 客員研究員．平7 九州芸工大音響設計学科助教授．博士(工学)．ファジィシステム，ニューラルネット，遺伝的アルゴリズム等の研究に従事．昭63年度電子情報通信学会 篠原記念学術奨励賞，KES'97 Best Paper Award (1997)．IEEE，電子情報通信学会，日本ファジィ学会，人工知能学会，日本音響学会各会員．

NII-Electronic Library Service