

対話型進化計算法の研究動向

Perspective on Interactive Evolutionary Computing

高木 英行^{*1} 畝見 達夫^{*2} 寺野 隆雄^{*3}
 Hideyuki Takagi Tatsuo Unemi Takao Terano

- * 1 九州芸術工科大学 芸術工学部 音響設計学科
 Dept. of Acoustic Design, Kyushu Institute of Design, Fukuoka 815-8540, Japan.
- * 2 創価大学 工学部 情報システム学科
 Dept. of Information System Science, Soka University, Tokyo 192-8577, Japan.
- * 3 筑波大学大学院 経営システム科学専攻
 Graduate School of System Management, the University of Tsukuba, Tokyo 112-0012, Japan.

1998年7月27日 受理

Keywords: interactive evolutionary computing, simulated breeding, survey, applications, human interface

Summary

This paper overviews the research on interactive evolutionary computation (EC). The interactive EC is an EC that optimizes systems based on human subjective evaluation. First, the definition and features of the interactive EC are described. Then, the overview of the interactive EC research follows. The overview consists of two parts: application and interface researches. The application fields of the interactive EC are categorized into three: artistic field, engineering field, and educational field. We also point out that the biggest remained problem is human fatigue and introduce several trials to overcome the problem. We categorize the research on this issue into four: improving of input interface, improving of display interface, fastening EC convergence, and combining normal GA search. One of feature of this paper is to overview the interactive EC research with more than 90 references.

1. ま え が き

バイオリンとクラリネットの中間のような音を出すように、シンセサイザを調整する、または、自分たちのリビングに合うようなグラフィックアートを生成することを考えよう。

このような、自分の気に入った絵や音や、自分がイメージした絵や音を作りたい、あるいは検索したい、という要求はいろいろな場面で見られる。工学的にも、自分が聞いたり見たりして最適になるようにシステムを調整するという要求はいろいろある。これらをシンセサイザやCGなどのパラメータの最適化と考えれば、数値最適化手法が適用できそうである。

では、評価はどうであろうか。従来このような場合、人間の評価系の代替モデルを作り、これを最適化システムに組み込んで探索する方法がよく行われてきた。

しかし、個人に依存する好みのようなモデルなど完全なものができるとは考えにくい。

そこで、この人間の評価系をモデル化して組み込むという分析的なアプローチに対して、その本人そのものを最適化系に組み込み、本人の評価に基づいてコンピュータに最適化させるというアプローチが考えられる。このように人間と機械との相互作用によって主観的評価に基づく最適化を行なう手法のうち、進化的計算(EC)をもちいる方法が、本解説で紹介する「対話型進化計算法」のアプローチである。

EC技術には遺伝的アルゴリズム(GA)、遺伝的プログラミング(GP)、進化戦略(ES)、進化的プログラミング(EP)などがあり、本解説でも、研究紹介には、対話型GAや対話型GPなどの用語も用いる。

対話型ECは、人間の主観的評価に基づいてシステムを最適化させる技術である。簡単に言えば、フィットネス関数を人間に置き換えたEC技術と言える。人

間の主観的評価が組み込まれるため、対話型 EC は感性をシステムに組み込む技術ということもできる。

また、EC は、自然界の生物が過去数十億年をかけて作り上げられてきた進化の過程にヒントを得て考案された手法である。数値計画法やニューラルネットの手法にくらべ、多くの計算資源を必要とする場合が多いが、複雑な組合せ構造の最適化にも柔軟に適用可能な方法としての有用性がある。自然界での進化は、生態系の中で繰り広げられた生き残りと繁殖を賭けた競争の結果である。これに対して、人類文明数千年の歴史の中で行なわれてきた農作物や家畜の品種改良、つまり、育種にヒントを得た方法として対話型進化計算法を捉えることもできる。EC 以外の方法を用いた対話型最適化手法に比べて、複雑な構造を対象とする問題領域にも適用しやすいことは明らかであろう。

人間の評価尺度はいろいろあり得るが、これらの段階評価値に基づいて EC が検索を行う。心理実験などでは、せいぜい 7 段階評価までしか行われぬが、日常的には 100 点満点のスケールが分かりやすい。逆に最小段階評価は、選ぶか選ばないかの 2 段階評価である。この 2 値評価は人工交配に相当し、この種の対話型 EC は育種にヒントを得た方法という経緯から、模擬育種法 (simulated breeding) とも呼ばれる。

なお、現在普及している GA の手法と品種改良における育種法には違いが見られる。それは、多くの生物の遺伝子が 2 倍体もしくはそれ以上の冗長な方法でコーディングされており、形質の組合せによって優勢/劣勢な形質の表出が非常に複雑な形で発生することである。そのため「価値の高い」種を一度得たとしても、それを「固定」し「普及」させることは容易でない。種々の個体群から適切なものを選択・分離する技術、戻し交配などの複雑な育種技術、また、品種の評価に用いられるさまざまな統計的分析手法は、この問題を解決するために発展してきたものといえる。

また、対話型 EC という名称からは、例えば、文献 [Filipic 93, 藤井 98] のような、人間とコンピュータのインタラクションをインタフェースに持つ EC すべてが包含され得る。しかし一般には、狭い意味、すなわち、人間の評価に基づいて EC が探索する場合を指すことがほとんどである。本解説でも、この狭い意味での対話型 EC に関する研究を紹介するが、4 章で議論するインタフェースに関しては広い意味での対話型 EC 研究にも共通に役立つ部分がある。

以下では、対話型 EC 技術の技術的側面について議論し、3 章と 4 章で具体的応用研究の紹介と、残された課題と今後の研究に向けた取り組みを紹介する。

2. 対話型 EC の枠組みと特徴

対話型 EC では、人間は心理空間上のターゲットとシステム出力との距離に応じて評価し、EC は、その心理空間上の距離尺度を評価値として特徴パラメータ空間を探索する。対話型 EC は、人間と EC が、2 つの空間の写像関係に基づいて協調的に探索し、システムを最適化していくシステムと言える。

人間が表現型の個体を直接評価するというよりは、多くの場合、個体を実現する応用システムの出力を評価する。例えば、フィルタ係数を評価するのではなく、その係数をもつフィルタで処理された画像や音を評価する。

人間の心理空間上のターゲット位置 (好み) と距離尺度 (評価値) は揺らぐ。同じシステム出力の絵や音を提示しても、時間とともに主観的評価値が揺らぐが、それでも心理空間上のターゲット近くに写像される特徴パラメータ空間位置を探索させたいというのが、対話型 EC の要求である。幸いなことに、EC 探索はノイズに対してロバストであると言われており、測定した主観評価値の揺らぎに基づいてシミュレーションで収束性を調べた結果でもほとんど影響がないと報告されている [高木 96b, Ohsaki 98b]。

この一番大きな理由は、EC の収束先が結構粗くてもよいことにある。人間が区別できなければ評価しすべて同じである。通常の最適探索と違って、大域的最適点 1 点を求めるばかりとは限らない。与えた顔とまったく同じ顔を探すタスクは、1 点を探すことになるかもしれないが、来年の車のモデルを探したい場合は、その車の持つ雰囲気のある領域にある異なる個体を探すのが目的であるからである。この意味では、対話型 EC ではランドスケープが広く、場合によっては多峰性の目的関数を最適化していると考えられることもできる。

技術的課題としては、EC の意味での集団サイズが小さく、かつ、探索世代数も少なくならざるを得ないことに対する対処が上げられる。これは、対話型 EC 操作者の疲労問題といってもよい。提示できる個体数は、画像のように空間提示ができる場合ならば画面上に表示できる面積で個体数が制限を受け、音や動画のような時系列提示を要求されるタスクの場合は、評価のための人間の記憶容量に依存して提示個体数が制約される。同様に探索世代数も、疲労のため、せいぜい 10 世代や 20 世代といったオーダーにならざるを得ない。これらに対処する取り組みはいろいろ行われており、4 章で詳しく紹介する。

対話型 EC 技術が広く実用的に使われるためには、応用分野の拡大と、分野ごとの有効性の評価、および、少ない疲労で探索できる方法の開発が必要である。また、対話型 EC は人間を扱うため、その有効性を評価するには、主観評価実験と統計的検定が不可欠である。創造支援という一見定量評価が困難に見える分野においても、定量的な有効性の積み上げを行わない限り、技術の実用化に向けた着実な進歩は望み難い。

3. 対話型 EC の応用分野

対話型 EC 研究は 1986 年の Dawkins から始まり、実質的には 10 年に満たない若い分野である。これまでの研究を概観すると、90 年代前半と後半とを代表する 2 つの流れが見られる。

1 つの流れは人工生命の分野にあり、人工生命への関心の高まりとともに、自己成長していく CG グラフィックスや音楽に関心を持つ研究者やアーティストが参入した。対話型 EC 研究の前半はこの流れが主流で、特に画像生成を中心とするアート分野への応用研究が中心を占める。

第 2 の流れは、humanized technology が 90 年代のキーワードと言われて、感性情報処理などに関心を持つ研究が増えたことに伴うもので、対話型 EC が人間の感性・主観的評価を組み込めることに興味を持つ人々が、工学や他の分野へ応用を始めた。また、応用だけでなく、人間の疲労問題や対話型 EC のインタフェースなど、心理実験を伴う研究が増えていることがこの流れの特徴である。

本解説の主眼はこれらの対話型 EC の研究の全体像を眺めることにある。以下ではこの応用を 3 分野に大別して個々の研究を概観する。

3・1 芸術分野への応用

〔1〕グラフィックアート

対話型 EC 研究の初期の特徴は、応用研究が中心で、その応用先も画像生成が大半である。

アート系への応用は人工生命の分野で多く発表されており、画像生成は対話型 EC 研究の初期の応用課題の中心であった。最初の論文は、利己的遺伝子で生物進化論に一石を投じている Dawkins のバイオモルフである [Dawkins 86, Dawkins 89]。その後も、虫の形態生成 [Smith 91]、L システムに基づく植物の生成 [McCormack 93]、顔などの線画生成 [Baker 93, Baker 94, 長尾 98]、顔 CG の表情生成 [Lim 95]、CG グラフィックアート生成 [Sims 91a, Sims 91b, Sims 93, Baluja

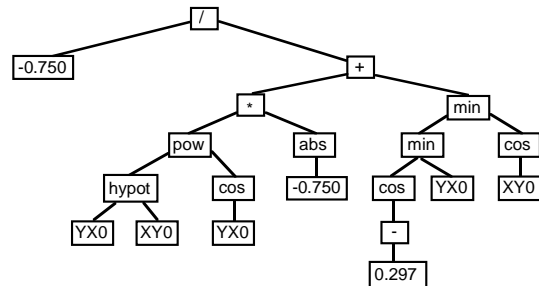
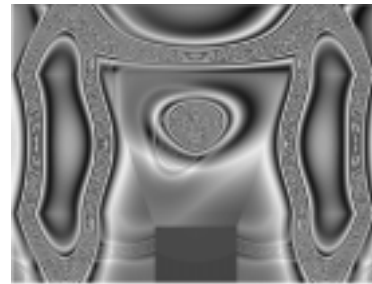


図 1 SBART: 模擬育種ベースのグラフィックス。遺伝的プログラミングが木構造の数式を進化させ、その数式で表現されるグラフィックスが進化的に得られる。SBART は URL: <http://www.intlab.soka.ac.jp/~unemi> で入手可能。

93, Baluja 94, Lund 95, Vucic 97, Greenfield 98]、3 次元 CG レンダリング [Todd 92a]、動植物の CG [Graf 95b]、など、CG などの画像生成への応用が多い。文献 [Banzhaf 97] によれば、飛行機の形状生成に応用した T. C. Nguyen らの Illinois 大学の技術報告もあるようだ。また、作品制作というよりも仮想現実環境の研究が目的であるが、対話型 GP を用いた 4 面立体映像空間 CAVE 内での 3 次元 CG 制作と音楽音源定位の空間配置への応用もある [Das 94, Papka 96, Disz 97]。〔2〕節と〔3〕節も画像への応用である。

Sims らは GP 技術を使って、数式に対応した CG 画像を評価しながら、数式を進化させ、望む画像を生成している。数式計算によって、画素単位に計算したり [Sims 91a, Sims 91b]、差分方程式を使って動きを表現したりする [Sims 93]。

たとえば、図 1 は畝見のシステムで得られた画像とそれを木構造表現した数式である [畝見 94a, 畝見 94b, 畝見 94c, 畝見 98a, Unemi 98b]。畝見の SBART システムでは、親画像から 20 画像を生成し、評価者がその中から好みの画像を親画像として取り出し、次世代 20 画像を生成する。この繰り返しを行う。

Ventrella はデフォルメした線のみのが体がコミカルに動くアニメの動作を、アニメータと EC とのインタラクションによって生成している [Ventrella 94, Ventrella

95] .

子個体を生成するにはいろいろな方法がある．1つのおもしろい方法は，時系列信号の予測によく用いられる自己回帰モデルを使って，CG の位置を予測する方法である．Grafらは，次世代のCG モデル形状を変形することにこの方法を用いている [Graf 95c] . 選ばれた親CG像を並べて時系列信号に見立てて，子世代のCG像の各点の位置を自己回帰モデルで決定するものである [Graf 95c] .

〔2〕3次元CGライティング

3次元CGは写真のシミュレーションであり，写真同様，ライトの位置，明るさ，色などのライティング条件によって，得られる印象がまるっきり異なる．ところが多くの人が作品の善し悪しは評価できても，求める印象になるようなライティング技術を持ち合わせているわけではない．CGのユーザ層がプロだけでなく，ビジネスや趣味のレベルまで広がった現在，作品の善し悪しに大きな影響を与えるライティングの設計支援の重要性は増すものと考えられる．青木らは，こに対話型ECを導入した [Aoki 96, 青木 97a, Aoki 97, 青木 97b] .

3個あるライトそれぞれに，平行光か拡散光かの種類，16階調の強さ，on/off，3次元空間上の配置座標，そして色を，試行錯誤と対話型GAで与えられたデザインコンセプトに合うよう調整する．こうして得られた，2種類のライティングCG画像を比較し，どちらがより与えたデザインコンセプトに適合しているかを主観評価法を用いて調べた．

その結果，ある程度のCG経験があるデザイナーには，有意な対話型GAのデザイン支援効果はみられなかったが，CG経験が浅い，または，ないデザイナーの場合は，統計的に有意な対話型GAのデザイン支援効果があった．これは，ライティング経験や知識がある場合には，明示的な意図に基づく手作業のライティングを行った方が，すばやく直接にライティングを行えるため，時間がかかる対話型ECの効果でなかったと考えられる．一方，具体的なライティング知識がない場合は，時間がかかる試行錯誤に比べて，対話型ECの支援が効果的に働いたものと考えられる．

従来に対話型ECの芸術応用の研究が，単に対話型ECを適用しているいろいろな画像や音が生成できる可能性を示すだけにとどまっていたのに対し，この研究は，主観評価実験と統計的検定を導入することで，どのような場合にどのような効果があるかを示したことに意義がある．

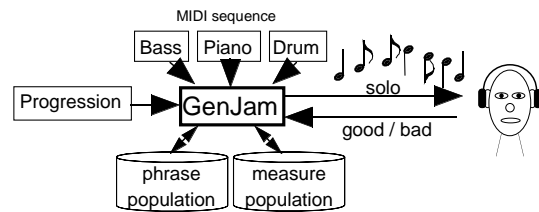


図2 対話的にジャズメロディー生成する GenJam システム .

〔3〕意匠・工業デザイン

ほとんどの工業デザインがCADシステムで設計されていることから見ても，工業デザインが，長さ，角度，座標，色番号などの設計パラメータの表現形態であることが容易に理解できる．対話型ECはこれらのCADパラメータ最適化に応用できる．

この分野への応用には，アーチコンクリートダムの形状設計 [Parmee 93]，吊り橋のデザイン設計 [Furuta 95]，車のデザイン応用 [勝山 93, Graf 95a]，服飾デザイン [Nakanishi 96a, Nakanishi 96b, 中西 98] などがある．画面上のハイパーカードの提示位置やGUI画面設計などに応用可能なレイアウト設計 [増井 92, Masui 92, Masui 94, Igarashi 95] もこの分野に分類されるであろう．

グラフィックアートや工業デザインとは違うが，他の実用的な応用に，モンタージュ顔画像の生成がある [Caldwell 91] .

〔4〕音楽

対話型ECはジャズセッションのメロディー生成 [Biles 94] やパーカッション部のリズム生成 [Horowitz 94] にも応用されている．

図2はBilesらのGenJamで，リズムセクションとコード進行を入力してジャズメロディーを生成する．これを人間が聞いて，よいと思った瞬間にgoodのボタンを，不適切と感じたときはbadボタンを押すことで評価する．メロディー全体を聞いてから1つの評価をするのでは時間がかかりすぎて人間の疲労が大きくなりすぎるため，1つのメロディーの途中のon-line状態で評価を与え，メロディー単位ではなくフレーズ単位に進化させている．評価時間の短縮を図るこの方法は，対話型ECで時系列信号を扱う場合の参考になる．

音楽生成ではないが，FMシンセサイザのパラメータを調整して心にイメージした音色を生成することにも対話型ECは利用可能である [岩井 94] .

3・2 工学分野への応用

対話型EC応用の初期は芸術応用に偏っていたが，

最近では工学のような、本来客観的な評価尺度が存在するはずと思われていた領域にまで拡大されてきた [高木 98a] .

〔 1 〕 音声処理

歪んだ音声を聴感的に回復させるフィルタを設計するタスクである．音響信号や動画を対話型 EC で扱う場合，時系列提示を強いられるため，評価する人間の負担が増加する．このような環境でも対話型 EC が有効かどうかを検討することもこの課題の 1 つである．

具体的には，ホルマント帯域を抑制するように処理された音声を入力とし，設計者の聴感評価に基づいて GA が歪回復フィルタの 8 つの係数を最適化する．

できあがった FIR フィルタで歪回復した音声は，評価した操作者だけでなく，他の被験者においても本来の音声より音質が回復されていることが，主観評価実験を通して，統計的に有意に示された [渡辺 95, Watanabe 95] .

対話型 EC は音声合成にも応用できる．音声には音韻と韻律の 2 つの情報が含まれており，音声を聞いた時の印象は，声の高さ，大きさ，長さ，速度などの韻律情報に支配される．佐藤ら是对話型 EC を韻律制御に応用し，とりたてて音質を劣化させることなく「かわいい」「怒った」などの 5 つの表情に変える声質変換を実現した [佐藤 96, Sato 97, 佐藤 97] .

〔 2 〕 聴覚補償

高齢者社会を迎え，高齢者の社会参加を促進するためにも補聴器の普及が望まれる．最近のデジタル補聴器の登場に伴い，従来のアナログ型ではできないような信号処理が可能になり，聴き難いという問題を技術的に解決するため一步一步前進しているのが今日現在の状況である．

しかしながら，技術的な可能性を秘めたデジタル補聴器ではあるが，その技術を最大限に発揮するための，使用者に対して最も聞こえが良くなるような調整法はまだない．根本的な理由は，聞こえの善し悪しを判断できるのはその補聴器を使うその人のみであり，いかなる名医，有能な技師でも使用者の聞こえは分からないからである．残念ながら聞こえの善し悪しが分かる使用者には専門家でない限り信号処理のパラメータ調整はできない．

大崎らは，使用者の聞こえに基づいて信号処理パラメータを自動的に最適化する技術として，対話型 EC を導入しようとしている [大崎 98, Ohsaki 98d] (図 3) .

このアプローチは従来の補聴器にない特徴を持っている．従来はオーディオグラムなどの聴覚特性を計測し，

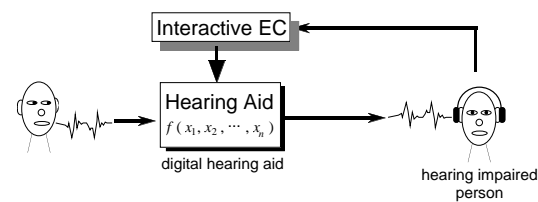


図 3 デジタル補聴器の自動調整．対話型 EC が聴覚障害者の聞こえに基づいて信号処理パラメータを最適化する．

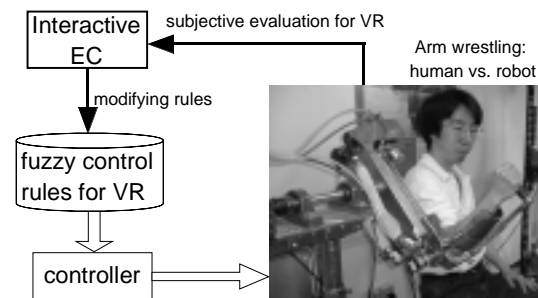


図 4 腕相撲の人工現実感．対戦相手があたかも人間のように感じた度合いに応じて，ファジィコントローラを進化させる．

その特性と健聴者の特性との差を見て医師や技師が補聴器パラメータを調整した．うまくフィットしない場合は医師や技師が微調整していた．問題は，事前に計測できる聴覚特性は極一部でしかないことと，この計測に時間がかかることである．これに対し，提案手法では原理的に聴覚特性を計測する必要はなく，抹消から中枢までを経た最終的な聞こえを基に，補聴器パラメータを最適化する．

〔 3 〕 人工現実感

人工現実感を与える要因は何であろうか．この要因解析の過程で対話型 EC が利用できる．図 4 のシステムで人間がロボットアームと腕相撲を行うことを考えてみる [竹田 96] . 腕相撲の制御ルール次第で，機械に振り回されているようにも，人間と闘っているようにも感じる．制御のどのような要因が力覚系の人工現実感を与えるのであろうか．

この解析のために，まず勝つための制御ルールを得た．相手を前に押したらそのルールを強化する分類子システムで 2 万点のルールを得，次に解析を容易にするために，これらのルールを 8 個のファジィ制御ルールに変換した．このコンパイルには，GA によるファジィ知識獲得技術を用いた [蒲原 96, Kamohara 97] .

次に，このファジィ制御ルールを初期値にして，対話型 EC 技術で人工現実感ある制御ルールに修正するのである．力覚系の人工現実感を感じる制御ルールか

どうかは対戦している人間のみが主観的に判断可能であり、その評価が高くなるようにファジィ制御ルールを修正するには対話型 EC が最適である。こうして得られた人工現実感あるファジィルールと初期値の勝つためのファジィルールとの差を解析することで、力覚系の人工現実感を与える要因が解明できるのではないかと期待される。

〔4〕 データベース検索

大規模なデータベースやインターネット上から目的に合った画像や音楽を探し出したい場合を考えよう。多くの場合、この目的とは特定の画像や音楽を探し出すことではなく、ある用途にふさわしい、または自分が気に入る画像や音楽を探し出すことであろう。多くの場合、キーワード検索ができない上、検索者がデータベースやインターネット上にどのような画像や音楽があるかも分からないことが多い。

対話型 EC は、検索して得られた画像や音楽の評価に基づいて、より用途に適したと思われる、あるいは気に入った画像や音楽を探し出すことに利用できる。

EC 技術が検索するのは画像や音楽の特徴物理空間であり、人間が評価するのは心理評価空間である。したがって、心理空間から特徴量空間への写像ができればよい。しかし、一般に心理空間の次元数は特徴量空間の次元数に比べて小さいことが一般であり、写像は難しい。逆に特徴量空間から心理空間への写像は容易であると考えられる。

m 次元から n 次元 ($m \leq n$) への写像には NN (ニューラルネットワーク) が適している。一度この学習ができてしまえば、その逆写像を行うことで、心理空間から特徴量空間への写像ができる。この技術に GA が利用できる (図 5)。当然一対多の写像なので、1つの心理空間上の座標に写像される特徴量空間の座標点は複数存在する。同じ印象の画像や音楽が複数見つかり得るということで、検索の立場からすれば好ましいと言える。

検索された結果をみて印象の違いを感じる時もあるはずである。この場合、もう一度再検索する方法と、求めるべき心理空間座標を変えて検索する方法との2つが考えられる。通常は組み合わせられる。後者に対して対話型 EC が利用できる。

画像検索に応用した例は多い。北本らは後述するハイブライン型 GA で対話的な画像探索を行っている [北本 97, 北本 98]。趙らも、wavelet を画像特徴量として、同様の画像検索をしている [趙 98, Lee 98]。長尾らは、顔の線画像生成をタスクとして画像検索に向けた研究を行なっている。収束を早めるため、過去の評

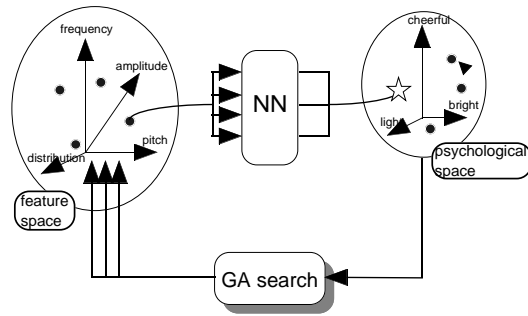


図 5 物理空間から心理空間への写像ができると、その逆写像を利用して、求める印象の画像や音楽をメディアをデータベースから検索できる。

価に遡って重みを付け、そのユークリッド距離で事前に評価を行ない、提示する以上の個体数を扱えるようにしている [長尾 98]。

鍋田らは、マルチメディアタイトルのデザインに対話型 EC を適用し、素材データベースの中からユーザの嗜好に適合する素材の組合せを生成するシステムを開発した [鍋田 98]。これは多くの素材のなかから目的とするイメージにあったものを探索し、時間軸上に配置する作業を対話型 EC を使ってシステム化したものである。遺伝的操作には、Messy GA の手法を取り入れてコードに冗長さを持たせることにより、対話的な選択の付加を軽減する工夫を施している。

〔5〕 知識獲得とデータマイニング

新製品の開発が企画されるときには、商品の市場コンセプトをまず決め、次に商品の属性パラメータを商品コンセプトに合うように調整する。問題はどのように整合させるかである。両者の関係は市場調査で得られるのであろうが、アンケートにはノイズが避けられない。

寺野ら是对話型 EC を商品のアンケートからの知識獲得に適用した [石野 95, Terano 95a, Terano 95b, Terano 96, 石野 97, 寺野 97]。これは、(1) データの分類には基本的に帰納学習手法を利用し、(2) 属性の選択の際に遺伝的操作を用いて多様性を増加させ、さらに、(3) 帰納学習の属性選択問題の解決に対話型 EC を組み合わせ、この間に遺伝子の選択確率にバイアスをかけることによって、(4) 比較的少ない属性で十分な説明力のある決定木あるいは決定ルールを獲得することを目標とする。

この手法の有効性を確認するために行った実験では、歯磨などの口中用品を対象にした 2,300 のアンケートデータを用いた。用意された属性は「味・香りがよい」

「家族みんなで使える」などの16種類である。目的は、口中用品を特徴づける、より少ない属性で記述されたより信頼できるルールを獲得することである。人間は、対話型 EC が生成するルールを選択し、その選択されたルールが次世代のルールを生む親ルールとなる。実験で得られたルール属性数もルール木サイズも大幅に小さくなり、マーケティング戦略が得られたと報告されている。

Venturini にも対話型 EC をデータマイニングに応用している [Venturini 97]。知識発見の対象となるデータの属性集合に GP の方法で四則演算をほどこし、2つの座標値 (v_1, v_2) を計算する。これを2次元空間の座標とするデータの散布図を作成し、複数の散布図を利用者に提示する。利用者は、この中から「知識」を表すのに適した表現を選択する。これに遺伝的操作を適用し、次の散布図を生成する。この方法によって適切な知識が得られたと報告されている。

田淵らは、ステンレスの8種類の傷データを分類する知識獲得に対話型 EC を応用している [田淵 96]。普通の対話型 EC と異なり、高速化のために、基本的には自動探索し、100回毎に人間が干渉して評価する方法を採用している。実験では、17個のパラメータからなる傷データを用い、この17パラメータを入力し、GP技術を用いて傷の種類を分類するルールを得る。GPで得られたルールは、人間の評価を加えた100世代目や200世代目に大きく変化し、ノイズデータに対するロバスト性が示されたという。

〔6〕 画像強調

医療画像の強調は、医師が疾患部を容易にかつ正しく検出するために有用であり、かつ必要な処理である。医療画像強調のための画像フィルタの性能は、画像を利用する人、つまり医師のみが評価できる。診断のための最良の処理画像というものは、ひょっとすると個々の医師の好みに依存するかもしれない。このため、これまでのフィルタ設計法には試行錯誤の要素が多い。

Poli らは、対話型 GP を MRI (磁気共鳴画像) と超音波心臓画像を強調するフィルタ設計に応用した [Poli 97]。GP は人間の視覚的評価に基づいて、画像フィルタを生成する数式を生成する。

武藤らは模擬育種法を画像フィルタの処理順決定に応用している [武藤 98]。デジタルカメラ、スキャナ、パソコン、WWW の普及に伴い、一般ユーザが画像を扱う機会が増えてきた。画像を扱う多くのユーザは各種画像フィルタを用意しているレタッチソフトを用いる。一般に、画像フィルタをかける順序を変えると異なる処理効果が出る。つまり、A,B,C の順にフィルタ

をかけた画像と、C,B,A の順にフィルタ処理をした画像とは異なる。一般ユーザにとってはフィルタ処理順を決定することは容易ではないが、処理された画像を見比べてどれがよいかを決めることは容易である。

3・3 教育・ゲーム分野への応用

最近、対話型 EC がいろいろな分野に応用展開されてきた。そのような新しい応用分野に教育などの分野がある。

〔1〕 作文支援

対話型 EC は複数の個体を提示するため、操作者にひらめきを与えてくれる場合がある。このことは、対話型 EC が創造性刺激に役立つかもしれないことを予感させる。対話型 EC の操作過程で得られるひらめきは、EC が生成する画像や音などの出力そのものよりも教育上重要である。

栗山らは、対話型 EC のこの特性を子供の作文支援に応用している [栗山 98a, Kuriyama 98b, Kuriyama 98c]。何をどのように書くかを構成することは、文章を書くことよりも重要であり、かつ難しい。特に、低学年の子供にとっては、何を書くのかが分からなくなってしまうことはしばしばである。

彼らのシステムでは24枚の絵を画面上に提示し、子供に絵を選ばせて、4枚の絵を並べさせる。これを2種類作らせる。この絵の順序が作文のストーリーになる。選ばれた2種類のストーリーを親個体として、GA演算を施して複数の子個体(4枚の絵の並び)を生成させる。子供は、次に2つの新たな個体を選び、次の世代のストーリーを生成する。気に入った作文のストーリーが決まる、または思いつくまでこの作業を繰り返す。

〔2〕 ゲーム

子供にとって、操作指示をしたりプログラムを書くよりは、単に良いものを選ぶことの方が簡単のため、教育と同様、エデュテメントやゲームは対話型 EC のよい応用先である。この選択は強化学習の報酬に相当し、強化学習と同じく、対話型 EC は制御ルールやターゲットシステムのメカニズムを学習することができる。

対話型 EC のこの種の応用に、子供のための移動ロボットの開発がある。Lund らは NN ベースのロボットを開発し、子供に自分の気に入った動きをするロボットを選択させることで、NN の進化学習を行わせている。この NN はロボット本体のセンサからの情報を入力し、移動制御量を出力する1層タイプの NN であるが、この重み係数は、子供のロボット選択に基づいて EC が進化させる [Pagliarini 96, Lund 98]。子供にブ

ログラミングさせることなく、自動的に制御プログラムを作らせるということは、対話型 EC のおもしろい応用と言えよう。

Pagliariini らはいくつかのゲームを開発している。上述のロボットはそのうちの 1 つである。他のゲームには、人工生命のサバイバルゲーム、NN 進化に基づくお絵かき、似顔絵生成などがある [Pagliarini 96]。

彼らの似顔絵生成ソフトはエデュテメントだけでなく心理療法にも用いられている。このソフトを使って、精神障害のある子供たちに顔の表情を理解させる共同研究を、イタリアのセラピストと始めたそうである [Pagliarini 96]。

4. 対話型 EC の技術的課題

対話型 EC の残された最大の課題は、操作者の疲労をどう軽減するかである。人間が、疲れを知らないコンピュータと協調して、世代毎に多くの個体を比較評価し、評価値を入力するには限界がある。これが実用上の大きな問題になっている。

第 2 の問題として、比較評価の際の肉体的および心理的疲労軽減のため、個体数と探索世代数を、通常の EC 探索と比較して非常に少なくせざるを得ないことがある。これは、収束悪化につながる。

第 3 の問題点として、対話型 EC の出力が音や動画のような場合、解候補を時系列提示せざるを得ないことである。評価する人間にとって、記憶にある過去の解候補との比較を強いられることになるので、心理的負担が大きい。通常は空間比較できる画像の場合でも同様のことが起きる。精密画像であれば 1 枚または数枚づつの時系列提示をせざるを得ないし、上記第 2 の問題と絡んで個体数を増やせば、画面に表示できる画像数の制約から、時系列提示をせざるを得ない。この心理的疲労にどう対処するかが第 3 の課題である。

反面、対話型 EC のタスクの場合、少ない世代数でも実用上十分な場合が多いという側面もある。人間が評価判断する問題は、数値最適化や組合せ最適化問題と性格が異なり、大局的最適値 1 点というものが存在しない。したがって、対話型 EC のタスクでは、最適点ではなく最適領域に早く到達すればよい。勾配法と違い、一般に EC の多点探索は初期収束性能が良く、最適領域に早く到達しやすい。このため、短い探索世代数でも実用上使いものになるという側面もある。

しかし、このような都合のよい話があっても、疲労問題が実用化の妨げになっていることに変わりはない。対話型 EC の広い実用化のためには、疲労問題をなん

としてでも解決しなければならない。

このためには、4 つの取り組みがある。コンピュータへの入力インタフェースの改善、コンピュータからの提示インタフェースの改善、EC の高速収束、そして対話型でない通常の EC との融合方法の考案の 4 点である [Takagi 96d, 高木 98b, Ohsaki 98a]。

4・1 入力インタフェース

EC 出力を評価し、主観的評価値を入力して EC にフィードバックする過程では、評価のしやすさが心理的疲労に大きく左右される。例えば、評価する対象が 100 点満点中の 62 点が 63 点を区別しようとする方法では、選択する点数幅が大きいため多少迷うことになり、これが心理的負担になる。

そこで、5 段階評価とか、7 段階評価のような粗い評価点にすれば、多少の違いに煩わされることなく、思い切った評価ができ、疲労が軽減するのではないかと考えられる。このような評点を心理的な離散評価点として、100 点満点や 200 点満点と区別し、入力することが提案されている [高木 96a, 高木 96b, Takagi 96a, Takagi 96c, Ohsaki 98b]。このような粗い評価点入力方式は、量子化ノイズを増やすことになり、収束が悪くなることが考えられる。この長所短所の総合評価をして、提案手法の効果が調べられた。

主観評価実験の結果、収束の問題以上に使いやすいたことが、統計的に有意に示された。また、シミュレーション実験の結果、量子化ノイズによる収束の悪化が観察されるのは、EC 探索の世代数が数 10 とか 100 世代以上になってからであり、対話型 EC の実用的な探索世代である、10 世代とか、せいぜい 20 世代程度ではほとんど問題がないことが分かり、主観評価実験を裏付ける結果となった [Takagi 96a, Takagi 96c, Ohsaki 98b]。

また、前述したように GenJam では、時系列入力の場合の評価時間を短くするため、提示途中で時々刻々評価していく提案をしている [Biles 94]。記憶に残った過去の時系列提示との比較評価では心理的疲労が増すが、この方法では、もっと短い単位（フレーズ）での比較で済むため、評価が容易になる。人工現実感の応用例で紹介した腕相撲制御ルールの評価にも同様に用いることができる。

4・2 評価予測に基づく提示インタフェース

対話型 EC の出力をランダム提示するより、提示順序を工夫すれば、比較評価がしやすくなると考えられる。例えば、人間の評価順に提示されるのであれば、隣

接する個体どうしの比較で大雑把な評価ができるので、評価者の負担が軽減できると期待される。また、似たような評価値個体をグループ化して提示しても、大雑把な評価が容易にできると期待できる。

このためには、評価者の評価特性を学習して評価値を予測する必要がある。この予測に NN を利用する方法 [Takagi 96d, Biles 96, Ohsaki 98a, Ohsaki 98c] やユークリッド距離を用いる方法が提案されている [長尾 98, Ohsaki 98a, Ohsaki 98c]。シミュレーションでは有意な予測効果が見られるが、心理的疲労を軽減するまでにはまだ至っておらず、この方法にはまだ改善が求められる [Ohsaki 98c]。

4・3 EC 収束の高速化

EC 探索の高速化は、疲労軽減に大きな効果が見込まれる。EC 探索の一般的な高速化手法すべてが利用可能であるが、対話型 EC 用としては、特に、初期世代での収束の効果が期待される高速化手法が必要である。人間が評価につき合える対話型 EC の世代数は、せいぜい 10 とか 20 としたオーダーであるので、勾配法の 2 次収束のような、大域的最適解に近づいて初めて高速化が発揮できるような高速化は対話型 EC に適していない。

高速化のために、単峰性関数当てはめによる新エリート方式が提案され [印具 97]、対話型 EC に適用した例が報告されている [Ohsaki 98a]。シミュレーションでは収束の高速化が示されているが、主観評価実験では、その高速化で有意に疲労軽減が示されるまでには至っていない。

EC が提示する解候補に評点を付けるだけのこれまでの対話型 EC は、ある意味で受動的であり、これが探索の遅さにも影響を与えている。探索のための先験的知識を組み込んだり、単に評価点を与えるだけでなく、探索途中で気づいた検索上の意図がもっと積極的に探索に反映させる仕組みを考えることも必要であろう。例えば、3・1 節で述べた SBART では、検索の途中で木構造を直接マニュアル修正可能である。モニター画面生成や顔の検索途中で、例えば、目はこれでよい、と思えば、その遺伝子座には交差や突然変異を起こさないようマスクする仕組みが用意されていれば、EC の探索空間が狭まり高速化につながる。

対話型 EC では、人間が評価判断する時間はコンピュータからみれば非常に長い。この待ち時間を利用して、EC 側でできることをするという考えは、高速化につながる。北本らのパイプライン型 GA はこの考えに基づいたものである [北本 97, 北本 98]。

4・4 非対話型 EC との統合

2 章で指摘したように、対話型 EC では 1 世代あたりの個体数が少数であり、少ない個体で探索できる EC 技術の開発が求められている。個体数が少なくならざるを得ないのは、評価する時の疲労の問題以外に、画面上に表示できる個体数や人間が記憶できる時系列提示個体数に限りがあることによる。少ない個体数でも初期数世代で大きく収束するような EC 技術が対話型 EC には必要である。

この取り組みの 1 つとして、4・2 節で述べた予測を利用する方法がある。予測ができれば、実際の提示数より多い、通常の EC 探索並の個体数を用意し、予測で人間の評価が高いと予想される個体のみを実際に人間に提示することができる。長尾らは、ユークリッド距離による人間の評価を予測する目的関数を作成し、GA 内部では 200 個体に対して GA 演算を行う。そのうち上位 10 個体のみを操作者に提示している [長尾 98]。

また、対話型 EC における利用者の負担を軽減するために、対話プロセスの間に目的関数に含まれるパラメータを簡単な強化学習の手法によってチューニングする方法が提案されている [石野 97, 寺野 97]。これによって、対話型 EC と通常の GA とを交互に実施できるようなシステムとなっている。

5. ま と め

本解説では、対話型 EC が広い分野で使われ始めてきた状況を概観し、実用化のために残された課題とその他の対処のための取り組みを紹介した。

対話型 EC 技術は、人間の優れた評価能力をモデル化して置き換える従来の AI の分析型アプローチと異なり、優れた人間の評価能力をそのままシステムに組み込んで使う合成型のアプローチ、つまり人間の感性や評価を尊重する技術と言えよう。個人の好みや感性に基づいた設計・調整・創造には、人間の優れた能力を尊重するこのようなアプローチがより有効になるのではなからうか。対話型 EC 操作者の疲労という問題を解決し、「技術の人間化」「人間にやさしい技術」を代表する手法となるよう期待している。

参 考 文 献

- [Aoki 96] Aoki, K., Takagi, H. and Fujimura, N.: Interactive GA-based Design Support System for Lighting Design in Computer Graphics, in *Int'l Conf. on Soft Computing (IIZUKA'96)*, Iizuka, Fukuoka, Japan, pp.533-

- 536 1996, World Scientific.
- [青木 97a] 青木研, 高木英行: 対話型 GA による 3 次元 CG ライティング設計支援, 電報通信学会総合大会, p. A-15-30, 1997.
- [青木 97b] 青木研, 高木英行: 3 次元 CG におけるライティングデザイン支援, 第 13 回ファジィシステムシンポジウム, 富山, pp.311-314, 1997.
- [Aoki 97] Aoki, K. and Takagi, H.: 3-D CG Lighting with an Interactive GA, in *1st Int'l Conf. on Conventional and Knowledge-based Intelligent Electronic Systems (KES'97)*, Adelaide, Australia, pp.296-301, 1997.
- [青木 98] 青木研, 高木英行: 対話型 GA による 3 次元 CG ライティングデザイン支援, 電子情報通信学会論文誌, vol. J81-D-II, no. 7, pp.1601-1608, 1998.
- [Baker 93] Baker, E.: Summary: Evolving Line Drawings, in *5th Int'l Conf. on Genetic Algorithm (ICGA'93)*, Urbana-Champaign, IL, USA, p.627, 1993, Morgan Kaufmann Publisher.
- [Baker 94] Baker, E. and Seltzer, M.: Evolving Line Drawings, in Davis, W. A. and Joe, B. eds., *Graphics Interface '94*, Banff, Alberta, Canada, pp.91-100, 1994, Morgan Kaufmann Publishers.
- [Baluja 93] Baluja, S., Pomerleau, D. and Jochem, T.: Simulating User's Preferences: Towards Automated Artificial Evolution for Computer Generated Images, Technical Report CMU-CS-93-198, CMU Computer Science Technical Reports, 1993.
- [Baluja 94] Baluja, S., Pomerleau, D. and Jochem, T.: Towards Automated Artificial Evolution for Computer-generated Images, *Connection Science*, vol.6, no.2&3, pp.325-335, 1994.
- [Banzhaf 97] Banzhaf, W.: Interactive Evolution, in T. Back, Z. M., D. Fogel ed., *Handbook of Evolutionary Computation*, Oxford University Press, 1997, chapter C2.10, pp.1-5.
- [Biles 94] Biles, J. A.: GenJam: A Genetic Algorithm For Generating Jazz Solos, in *Int'l Computer Music Conf. (ICMC'94)*, Aarhus, Denmark, pp.131-137, 1994.
- [Biles 96] Biles, J. A., Anderson, P. G. and Loggi, L. W.: Neural Network Fitness Functions for a Musical IGA, in *IAA'96/SOCO'96. Int'l ICSC Symposia on Intelligent Industrial Automation And Soft Computing*, Reading, UK, pp.B39-44, 1996.
- [Caldwell 91] Caldwell, C. and Johnston, V. S.: Tracking a Criminal Suspect through "Face-Space" with a Genetic Algorithm, in *4th Int'l Conf. on Genetic Algorithm (ICGA'91)*, San Diego, CA, US, pp.416-421, 1991, Morgan Kaufmann Publisher.
- [趙 98] 趙誠培: インタラクティブ GA を用いた内容に基づく画像検索の検討, ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」, 福岡, pp.19-24, 1998.
- [Das 94] Das, S., Frangiadakis, T., Papka, M., DeFanti, T. A., et al.: A Genetic Programming Application in Virtual Reality, in *1st IEEE Conf. on Evolutionary Computation (ICEC'94)*, vol.1, Orlando, FL, USA, pp.480-484, 1994.
- [Dawkins 86] Dawkins, R.: *The Blind Watchmaker*, Longman, Essex, 1986.
(ブラインド・ウォッチメイカー, [上][下], 早川書房, 1993, 中嶋他訳.)
- [Dawkins 89] Dawkins, R.: The Evolution of Evolvability, in Langton, C. G. ed., *Artificial Life*, Addison-Wesley, pp.201-220, 1989.
- [Filipic 93] Filipic, B. and Juricic, D.: An Interactive Genetic Algorithm for Controller Parameter Optimization, in *Int'l Conf. on Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms*, Innsbruck, Austria, pp.458-462, 1993.
- [Disz 97] Disz, T., Papka, M. E. and Stevens, R.: Ubi-World: An Environment Integrating Virtual Reality, Supercomputing and Design, in Hensgen, D. ed., *6th Heterogeneous Computing Workshop (HCW'97)*, Geneva, Switzerland, pp.46-57, 1997, IEEE Comput. Soc. Press.
- [藤井 98] 藤井誠, 古橋武: ファジィクラシファイアシステムを用いた人間とシステムもインタラクションに関する研究, ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」, 福岡, pp.37-41, 1998.
- [Furuta 95] Furuta, H., Maeda, K. and Watanabe, E.: Application of Genetic Algorithm to Aesthetic Design of Bridge Structures, *Microcomputers in Civil Engineering*, vol.10, no.6, pp.415-421, 1995.
- [Graf 95a] Graf, J. and Banzhaf, W.: Interactive Evolution of Images, in McDonnell, J. R., Reynolds, R. G. and Fogel, D. B. eds., *4th Annual Conf. on Evolutionary Programming*, San Diego, CA, USA, pp.53-65, 1995, MIT Press.
- [Graf 95b] Graf, J. and Banzhaf, W.: Interactive Evolution for Simulated Natural Evolution, in Alliot, J. M., Lutton, E., Ronald, E., Schoenauer, M., et al. eds., *Artificial Evolution. European Conf. (AE'95). Selected Papers.*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 259-272, 1995.
- [Graf 95c] Graf, J. and Banzhaf, W.: An Expansion Operator for Interactive Evolution, in *IEEE Int'l Conf. on Evolutionary Computation (ICEC'95)*, vol.2, Perth, WA, Australia, pp.798-802, 1995.
- [Greenfield 98] Greenfield, G. R.: New Directions for Evolving Expressions, in *the 1st Annual Conf. of BRIDGES: Mathematical Connections in Art, Music, and Science*, Winfield, Kansas, USA, 1998
- [Horowitz 94] Horowitz, D.: Generating Rhythms with Genetic Algorithms, in *Int'l Computer Music Conf. (ICMC'94)*, Aarhus, Denmark, pp.142-143, 1994.
- [Igarashi 95] Igarashi, T., Matsuoka, S. and Masui, T.: Adaptive Recognition of Implicit Structures in Human-Organized Layouts, in Haarslev, V. ed., *11th IEEE Int'l Symposium on Visual Languages*, Darmstadt, Germany, pp.258-266, 1995, IEEE Comput. Soc. Press.
- [印具 97] 印具毅雄, 高木英行, 大崎美穂: 対話型遺伝的アルゴリズムのインタフェース改善 - GA の高速化手法の提案 -, 第 13 回ファジィシステムシンポジウム, 富山, pp.859-862, 1997.
- [石野 95] 石野洋子, 良永和幸, 寺野隆雄: 模擬育種法と帰納学習の統合によるデータ分析手法, 第 21 回知能システムシンポジウム, 東京, pp.1-6, 1995.
- [石野 97] 石野洋子, 寺野隆雄: 模擬育種法と帰納学習を適用したマーケティング情報分析, 人工知能学会誌, vol.12, no.1, pp.121-131, 1997.
- [岩井 94] 岩井政佳: 遺伝的アルゴリズムによる FM 音源パラメータの調整, 夏のプログラム・シンポジウム「娯楽とコンピュータ」, 1994.
- [蒲原 96] 蒲原新一, 高木英行, 竹田仰: 仮想現実感を与える腕相撲制御ルール獲得, 第 12 回ファジィシステムシンポジウム, 東京, pp.487-490, 1996.
- [Kamohara 97] Kamohara, S., Takagi, H. and Takeda, T.: Control Rule Acquisition for an Arm Wrestling Robot, in *IEEE Int'l Conf. on System, Man, Cybernetics (SMC'97)*, vol.5, Orlando, FL, USA, pp.4227-4231, 1997.
- [勝山 93] 勝山信之, 山川宏: 遺伝的アルゴリズムによる感性を考慮した設計の遺伝と進化に関する研究, 日本機械学会第 3 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 東京, pp.43-47, 1993.
- [北本 97] 北本朝展, 高木幹雄: パイプライン型遺伝的アルゴリズムによる模擬育種法を用いた類似画像検索 規準の学習, 電

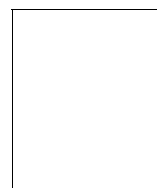
- 子情報通信学会技術報告 HIP96-4, pp.17-22, 1996.
- [北本 98] 北本朝展, 高木幹雄: バイブライン型遺伝的アルゴリズムを用いた対話的な画像散策, ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」, 福岡, pp.31-36, 1998.
- [栗山 98a] 栗山健, 寺野隆雄, 沼尾正行: インタラクティブ GA と CBR を適用したオーサリング支援, ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」, 福岡, pp.13-18, 1998.
- [Kuriyama 98b] Kuriyama, K., Terano, T. and Numao, M.: Authoring Support by Interactive Genetic Algorithm and Case Base Retrieval, in *IEEE 2nd Int'l Conf. on Conventional and Knowledge-based Intelligent Electronic Systems (KES'98)*, Adelaide, Australia, pp.390-395, 1998.
- [Kuriyama 98c] Kuriyama, K., Terano, T. and Numao, M.: Story Composition Support by IGA and CBR, in *Asian Fuzzy System Symposium*, Masan, Korea, pp.485-488, 1998.
- [Lee 98] Lee, J.-Y. and Cho, S.-B.: Interactive Genetic Algorithm for Content-based Image Retrieval, in *Asian Fuzzy System Symposium*, Masan, Korea, pp.479-484, 1998.
- [Lim 95] Lim, I. S.: Evolving Facial Expressions, in *IEEE Int'l Conf. on Evolutionary Computation (ICEC'95)*, vol. 2, Perth, WA, Australia, pp.515-520, 1995.
- [Lund 95] Lund, H. H., Pagliarini, L. and Miglino, P.: Artistic Design with GA & NN, in *1st Nordic Workshop on Genetic Algorithms and Their Applications (INWGA)*, Vaasa, Finland, pp.97-105, 1995.
- [Lund 98] Lund, H. H., Miglino, O., Pagliarini, L., Billard, A. and Ijspeert, A.: Evolutionary Robotics - A Child's Game, in *IEEE Int'l Conf. on Evolutionary Computation (ICEC'98)*, pp.154-158, 1998.
- [Masui 92] Masui, T.: Graphic Object Layout with Interactive Genetic Algorithms, in *IEEE Workshop on Visual Languages*, Los Alamitos, CA, USA, pp.74-80, 1992.
- [増井 92] 増井俊之: 遺伝子アルゴリズムを用いた対話型図形配置, ヒューマンインタフェース, pp.41-48, 1992.
- [Masui 94] Masui, T.: Evolutionary Learning of Graph Layout Constraints from Examples, in *UIST '94, 7th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, Marina del Rey, CA, USA, pp.103-108, 1994, ACM.
- [McCormack 93] McCormack, J.: Interactive Evolution of L-System Grammars for Computer Graphics Modelling, in Green, D. G. and Bossomaier, T. eds., *Complex Systems: from Biology to Computation*, IOS Press, Amsterdam, Netherlands, pp.118-130, 1993.
- [武藤 98] 武藤武士, 駒形伸子, 上田勝彦: 模擬育種法を用いた画像フィルタシーケンスの自動生成の試み, ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」, 福岡, pp.7-12, 1998.
- [鍋田 98] 鍋田茂子, 寺野隆雄: 時間変動を伴うデザインへの対話型進化計算手法の適用, 第12回人工知能学会全国大会, pp.489-490, 1998.
- [長尾 98] 長尾光悦, 山本雅人, 鈴木恵二, 大内東: インタラクティブ進化計算に基づいた画像検索システムの性能評価, ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」, 福岡, pp.25-30, 1998.
- [Nakanishi 96a] Nakanishi, Y.: Applying Evolutionary Systems to Design Aid System, in *ALIFE V, Poster Presentations*, PP-25, pp.147-154, 1996.
- [Nakanishi 96b] Nakanishi, Y.: Capturing Preference into a Function Using Interactions with a Manual Evolutionary Design Aid System, in *Late Breaking Papers at Genetic Programming*, pp.133-140, 1996.
- [中西 98] 中西泰人: 感性情報処理と遺伝的プログラミング, *Computer Today*, 1月号, pp.40-45, 1998.
- [大崎 98] 大崎美穂, 高木英行: デジタル補聴器フィッティングへの対話型 EC の応用, 第14回ファジィシステムシンポジウム, 岐阜, pp.193-194, 1998.
- [Ohsaki 98a] Ohsaki, M., Takagi, H. and Ingu, T.: Methods to Reduce the Human Burden of Interactive Evolutionary Computation, in *Asian Fuzzy System Symposium (AFSS'98)*, Masan, Korea, pp.495-500, 1998.
- [Ohsaki 98b] Ohsaki, M., Takagi, H., and Ohya, K.: An Input Method Using Discrete Fitness Values for Interactive GA, *J. of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol.6, no.1, pp.131-145, 1998.
- [Ohsaki 98c] Ohsaki, M. and Takagi, H.: Improvement of Presenting Interface by Predicting the Evaluation Order to Reduce the Burden of Human Interactive EC Operators, in *IEEE Int'l Conf. on System, Man, Cybernetics (SMC'98)*, San Diego, CA, USA, 1998.
- [Ohsaki 98d] Ohsaki, M. and Takagi, H.: Application of Interactive Evolutionary Computation to Optimal Tuning of Digital Hearing Aids, in *Int'l Conf. on Soft Computing (IZUKA'98)*, Iizuka, Fukuoka, Japan, 1998, World Scientific.
- [Pagliarini 96] Pagliarini, L., Lund, H. H., Miglino, O. and Parisi, D.: Artificial Life: A New Way to Build Educational and Therapeutic Games, in *ALIFE V*, pp.152-156, 1996, MIT Press.
- [Papka 96] Papka, M. E. and Stevens, R.: UbiWorld: An Environment Integrating Virtual Reality, Supercomputing and Design, in *5th IEEE Int'l Symposium on High Performance Distributed Computing*, Syracuse, NY, USA, pp.306-307, 1996, IEEE Comput. Soc. Press.
- [Parmee 93] Parmee, I. C.: The Concrete Arch Dam: An Evolutionary Model of the Design Process, in *Int'l Conf. on Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms*, Innsbruck, Austria, pp.544-555, 1993.
- [Poli 97] Poli, R. and Cagnoni, S.: Genetic Programming with User-Driven Selection: Experiments on the Evolution of Algorithms for Image Enhancement, in *2nd Annual Conf. on Genetic Programming*, pp.269-277, 1997.
- [佐藤 96] 佐藤裕二, 安藤ハル, 北原義典: 進化的計算を用いた韻律係数フィッティングによる声質変換に関して, 第12回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, 横浜, pp.469-475, 1996.
- [Sato 97] Sato, Y.: Voice Conversation Using Evolutionary Computation, in *Intelligent Processing of Manufacturing of Materials '97*, pp.342-348, 1997.
- [佐藤 97] 佐藤裕二: 進化的計算を用いた韻律係数最適化による声質変換に関して, 人工生命とその応用シンポジウム論文集, pp.71-78, 1997.
- [Sims 91a] Sims, K.: Artificial Evolution for Computer Graphics, *Computer Graphics, ACM SIGGRAPH Conf. Proc.*, vol.25, pp.319-328, 1991.
- [Sims 91b] Sims, K.: Interactive Evolution of Dynamical Systems, in Varela, F. J. and Bourgine, P. eds., *Toward a Practice of Autonomous Systems. First European Conf. on Artificial Life*, Paris, France, 1991, MIT Press.
- [Sims 93] Sims, K.: Interactive Evolution of Equations for Procedural Models, *The Visual Computer*, vol.9, no.8, pp.466-476, 1993.
- [Smith 91] Smith, J. R.: Designing Biomorphs with an Interactive Genetic Algorithm, in *4th Int'l Conf. on Genetic Algorithms (ICGA'91)*, San Diego, CA, USA, pp.535-538, 1991, Morgan Kaufmann Publisher.
- [田淵 96] 田淵真, 田浦俊春: 遺伝的学習機構と人との対話型知識獲得手法, 人工知能学会誌, vol.11, no.4, pp.600-607,

- 1996.
- [高木 96a] 高木英行, 大宅喜美子: 対話型 GA の入力インタフェース改善方法とその評価, 電子情報通信学会総合大会, D-156, 1996.
- [Takagi 96a] Takagi, H. and Ohya, K.: Discrete Fitness Values for Improving the Human Interface in an Interactive GA, in *IEEE 3rd Int'l Conf. on Evolutionary Computation (ICEC'96)*, Nagoya, Aichi, Japan, pp.109-112, 1996.
- [高木 96b] 高木英行, 大宅喜美子, 大崎美穂: 対話型遺伝的アルゴリズムのインタフェース改善手法の提案と評価, 第12回ファジシステムシンポジウム, 東京, pp.513-516, 1996.
- [Takagi 96b] Takagi, H.: System Optimization Without Numerical Target, in 1996 Biennial Conf. of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS'96), Berkeley, CA, USA, pp.351-354, 1996.
- [Takagi 96c] Takagi, H., Ohya, K. and Ohsaki, M.: Improvement of Input Interface for Interactive GA and its Evaluation, in *Int'l Conf. on Soft Computing (IZUKA'96)*, Iizuka, Fukuoka, Japan, pp.490-493, 1996, World Scientific.
- [Takagi 96d] Takagi, H.: Interactive GA for System Optimization: Problems and Solution, in *4th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing (EUFIT'96)*, Aachen, Germany, pp.1440-1444, 1996.
- [高木 98a] 高木英行, 青木研: インタラクティブ GA: 創作支援から工学応用へ, ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」, 福岡, pp.1-6, 1998.
- [高木 98b] 高木英行, 大崎美穂, 印具毅雄: インタラクティブ EC 操作者の疲労軽減手法, ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」, 福岡, pp.47-52, 1998.
- [竹田 96] 竹田仰, 蒲原新一: 仮想人物との腕相撲対戦システムの構築, 電子情報通信学会誌, vol.179-A, no.2, pp.489-497, 1996.
- [Terano 95a] Terano, T. and Ishino, Y.: Data Analysis Using Simulated Breeding and Inductive Learning Methods, in *IJCAI'95 Workshop on Data Engineering and Inductive Learning*, Montreal, Canada, pp.60-96, 1995.
- [Terano 95b] Terano, T., Ishino, Y. and Yoshinaga, K.: Integrating Machine characteristics of Consumer Goods, in Biethahn, J. and Nissen, V. eds., *Evolutionary Algorithms in Management Applications*, Springer-Verlag, pp.211-224, 1995.
- [Terano 96] Terano, T. and Ishino, Y.: Knowledge Acquisition from Questionnaire Data Using Simulated Breeding and Inductive Learning Methods, *Expert Systems With Applications*, vol.11, no.4, pp.507-518, 1996.
- [寺野 97] 寺野隆雄: 対話式進化計算手法の原理と応用, システム情報合同シンポジウム'97, 仙台, pp.59-64, 1997.
- [Todd 92a] Todd, S. and Latham, W.: Artificial Life or Surreal Art?, in *Toward a Practice of Autonomous Systems - 1st European Conf. on Artificial Life*, MIT Press, pp.504-513, 1992.
- [畷見 94a] 畷見達夫: 遺伝的アルゴリズムとコンピュータグラフィックスアート, 人工知能学会誌, vol.9, no.4, pp.518-523, 1994.
- [畷見 94b] 畷見達夫: 人工生命が作ったアートの世界 - 人工生命とコンピュータグラフィックス, 柴田崇徳, 福田敏男(編), 人工生命の近未来 - 新たな生を作るテクノロジー, 時事通信社, 1994.
- [畷見 94c] 畷見達夫: 品種改良で CG 画像を作る模擬育種システム, *Computer Today*, 11 月号, pp.76-82, 1994.
- [畷見 98a] 畷見達夫: マルチ・フィールドを用いた模擬育種法のユーザインターフェース, ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」, 福岡, pp.42-46, 1998.

- [Unemi 98b] Unemi, T.: A Design of Multi-Field User Interface for Simulated Brdding, in *Asian Fuzzy System Symposium (AFSS'98)*, Masan, Korea, pp.489-494, 1998.
- [Ventrella 94] Ventrella, J.: Explorations in the Emergence of Morphology and Locomotion Behavior in Animated Characters, in *Artificial Life IV.: 4th Int'l Workshop on the Synthesis and Simulation of Living System*, Cambridge, MA, USA, pp.436-441, 1994, MIT Press.
- [Ventrella 95] Ventrella, J.: Disney Meets Darwin-the Evolution of Funny Animated Figures, in *Computer Animation '95*, Geneva, Switzerland, pp.35-43, 1995, IEEE Comput. Soc. Press.
- [Venturini 97] Venturini, G., Slimane, M., Morin, F. and Beauville, de J. P. A.: On Using Interactive Genetic Algorithms for Knowledge Discovery in Databases, in *7th Int'l Conf. on Genetic Algorithm (ICGA'97)*, pp.696-703, 1997, Morgan Kaufmann Publisher.
- [Vucic 97] Vucic, V. and Lund, H. H.: Self-Evolving Arts - Organisms Versus Fetishes, *Muhely - The Hungarian Journal of Modern Art*, vol.104, 69-79, 1997.
- [渡辺 95] 渡辺辰巳, 高木英行: 対話型 GA を用いた歪音声の音質の改善, 第11回ファジシステムシンポジウム, 沖縄, pp.183-186, 1995.
- [Watanabe 95] Watanabe, T. and Takagi, H.: Recovering System of the Distorted Speech Using Interactive Genetic Algorithms, in *IEEE Int'l Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC'95)*, vol.1, Vancouver, Canada, pp.684-689, 1995.

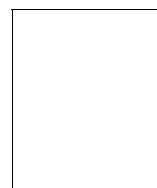
著者紹介

高木 英行 (正会員)



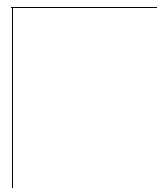
1979年九州芸術工科大学芸術工学部音響設計学科卒業。1981年同大学院情報伝達専攻修士課程修了。1981年～1995年松下電器産業中央研究所勤務。1991年～1993年 California 大学 Berkeley 校客員研究員。1995年九州芸術工科大学音響設計学科助教授。博士(工学)。ファジシステム, ニューラルネット, 遺伝的アルゴリズム等の研究に従事。1988年度電子情報通信学会 篠原記念学術奨励賞, KES'97 Best Paper Award。IEEE, 電子情報通信学会, 日本ファジ学会, 日本音響学会各会員。 takagi@kyushu-id.ac.jp

畷見 達夫 (正会員)



1978年東京工業大学工学部制御工学科卒業。1980年同大学院総合理工学研究科システム科学専攻修士課程修了。1981年同専攻博士後期課程中退。同専攻助手。1987年長岡技術科学大学工学部計画・経営系講師。1992年創価大学工学部情報システム学科講師。1995年同助教授。1992年～1995年国際ファジ工学研究所客員研究員。この間, 自然言語処理, 知識工学, 機械学習などの研究に従事。現在は, 遺伝的アルゴリズム, 強化学習法, 自律分散ロボットの研究を行っている。情報処理学会, 日本認知科学会, 日本ソフトウェア科学会, 日本ファジ学会, 計測自動制御学会各会員。 unemi@iss.soka.ac.jp

寺野 隆雄 (正会員)



1976年東京大学計数工学科数理工学コース卒業。1978年同情報工学科修士課程修了。1978年～1989年(財)電力中央研究所勤務。1990年より筑波大学大学院経営システム科学専攻, 1996年同教授(筑波大学大学院企業科学専攻兼任)。工学博士。1996年 Illinois 大学ならびに Stanford 大

学客員研究員・創発的計算手法，組織行動，機械
学習，知識システム開発方法論などの研究に従事．
計測自動制御学会，日本 OR 学会，情報処理学会，電気学会，経営情報
学会，IEEE，AAAI，ACM 各会員．
terano@gssm.otsuka.tsukuba.ac.jp