

Interactive Evolutionary Computation: Fusion of the Capabilities of EC Optimization and Human Evaluation[†]

高木英行

九州芸術工科大学芸術情報設計学科

815-8540 福岡市南区塩原 4 丁目 9 - 1

Tel&Fax: +81-92-553-4555, E-mail: takagi@kyushu-id.ac.jp, URL: http:// www.kyushu-id.ac.jp/~takagi/

Abstract— In this paper, we survey the research on interactive evolutionary computation (IEC). The IEC is an EC that optimizes systems based on subjective human evaluation. The definition and features of the IEC are first described and then followed by an overview of the IEC research. The overview primarily consists of application research and interface research. In this survey, the IEC application fields include graphic arts and animation, 3-D CG lighting, music, editorial design, industrial design, facial image generation, speech processing and synthesis, hearing aid fitting, virtual reality, media database retrieval, data mining, image processing, control and robotics, food industry, geophysics, education, entertainment, social system, and so on. Also in this survey, the interface research to reduce human fatigue includes improving fitness input interfaces and displays based on fitness prediction, accelerating EC convergence especially in early EC generations, examining combinations of interactive and normal EC, and investigating active user intervention. Finally, we discuss the IEC from the point of the future research direction of computational intelligence. The biggest feature of this paper is to wholly survey them with about 250 IEC papers rather than to carefully select representative papers to show the status quo of the IEC researches.

I. INTRODUCTION

システムを最適化する場合、最適化性能が評価関数として数値的表現できるシステムとそうでないシステムがある。これまで扱われてきた多くのシステム最適化問題は前者に属し、自動制御やパターン認識や工学的な設計問題が含まれる。これらのシステム最適化には誤差最小化規範に基づく各種最適化手法が適用できる。

しかし、例えば画像や音楽を生成したり処理したり検索するシステムのようなヒューマン - マシンインタラクションシステムなどでは、「気に入った」システム出力を得ようとする場合、望ましい出力とはそのユーザが主観的に決めるものであり、評価関数を与えることが困難か与えることができない。もっと一般的に、システム出力が画像や音響信号や人工現実感などのように五感に訴えるものの場合、ユーザの心にある印象、好み、聞こえやすさ、見やすさなどが望ましい出力である。このような分野は、本論文で示すように、芸術や美学の分野だけでなく、工学や教育の分野にも多数存

[†] 本論文は、Proceedings of the IEEE, vol.89, no.9, pp.1275-1296 (Sept., 2001) に掲載された筆者の同タイトル論文の下書きを日本語論文にまとめたものである。

在する。このようなシステムを最適化するには、ユーザの主観的評価に基づいてシステムの特長パラメータや構造を最適化させなければならない。しかし心理曲面の勾配情報を使うわけにも行かないため、従来と異なる最適化手法が必要となる。

「インタラクティブ進化計算法 (IEC)」はユーザの主観評価に基づいて最適化を行なう技術のうち、進化的計算 (EC) を最適化手法として用いる方法である。簡単に言えば、フィットネス関数を人間に置き換えた EC 技術である。図 1 は IEC システムを示しており、ユーザがシステム出力を見たり聞いたりして評価し、その評価値に基づいて良いと思われる出力が得られるように EC がシステムを最適化する。人間の主観的評価が組み込まれるため、IEC は感性をシステムに組み込む技術ということもできる。

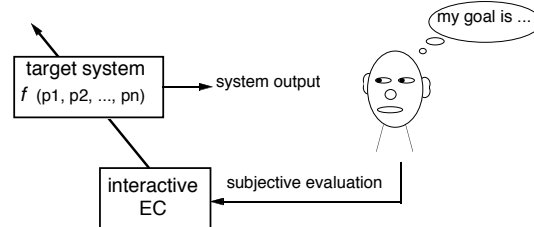


Fig. 1. General IEC system: system optimization based on subjective evaluation.

IEC には 2 つの定義がある。狭義の定義は「システム出力に対する人間の主観評価をフィットネス値とし、EC 技術が対象システムを最適化する技術」であり、広義には「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 ベースシステム」である。「フィットネス関数を人間に置き換えた EC 技術」と前述したが、これは狭い定義である。*interactive, evolutionary* のキーワードを持つ広義の IEC 論文も見られるが [36], [37], [62], [111], これまで発表されたほとんどの IEC 論文は狭義の IEC 論文であり、本論文では狭義の IEC 論文をサーベイする。しかし、IV 節で議論するインタフェースに関しては広義の IEC 研究にも共通に役立つ部分がある。

最後に本論文で用いる用語の説明をする。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、Interactive GA, GP, ES, and EP (IGA, IGP, IES, and IEP) の

用語も用いる．また，IEC での主観的評価には一般に n 段階の評価が行われ，最小段階評価は，個体（解候補）を選ぶか選ばないかの 2 段階評価である．交配種を選ぶか選ばないかという人工交配へのアナロジーから，この 2 値評価の IEC は模擬育種法とかユーザ選択ベースの IEC とも呼ばれる．

本論文では，IEC の技術的枠組みを 2 節で述べた後，3 節と 4 節でこれまでの IEC 研究を概観する．本論文では，IEC 論文を精選せず，できる限り多くの研究を紹介することで，全体像が見渡せるようにした点に特徴がある．また，単に応用研究だけではなく，IEC のインターフェースや理論についても紹介する．最後に今後の IEC 研究の方向性について述べる．

II. TECHNICAL FRAMEWORKS AND FEATURES OF IEC

IEC は，人間と EC が，特徴パラメータ空間と心理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である．IEC 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（図 2）．

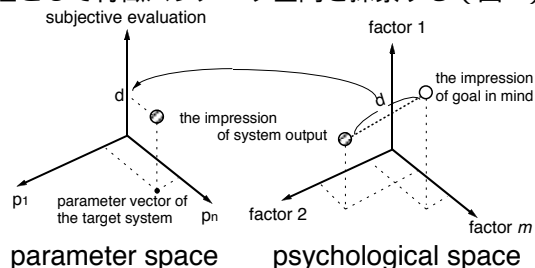


Fig. 2. Psychological distance between target in our psychological spaces and actual system outputs becomes the fitness axis of a feature parameter space where EC searches the global optimum in an IEC system.

従来は，この人間の評価系をモデル化して，この代替モデル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．これを仮に分析的なアプローチと呼ぼう．従来 AI の分野ではこの分析的なアプローチが多くとられてきたが，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．それに対して，その本人そのものをブラックボックスの評価系として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合成的なアプローチが IEC である [203], [216], [218] ．

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．

人間は心の物差しを変えずに矛盾のない評価をしていても，好み（心理空間上のターゲット位置）と評価（心理空間上の距離尺度）の多少の揺らぎは避けられない．同じシステム出力である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，IEC 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

るとされており，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 [199], [201], [147] ．

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．IEC の最適探索点は，通常の EC 探索の観点からすると最適領域と言ってもよいだろう．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．

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，IEC 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，音や動画像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，IV 節で詳しく紹介する．

IEC 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，IEC 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 [157] ．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．

III. IEC APPLICATIONS

IEC 研究は 1986 年の Dawkins [30] に始まるが，実質的には 90 年代の研究である．表 I にこれまでの IEC 論文を年代別・分野別に分類する．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．IEC 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 [12] ．実用的な分野である意匠や工業デザインもこの一環である．

第 2 の流れは，技術の人間化が 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，IEC 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 IEC のインターフェースなど，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．IEC 応用の初期は芸術応用に偏っていたが，最近の傾向は，工学や娯楽のような実用的な分野に應用が広がっている [203], [204], [206], [207], [213], [216] ．

本解説の主眼はこれらの IEC の研究の全体像を眺め

TABLE I
 STATICS OF IEC PAPERS BY FIELD AND YEAR. PAPERS THAT DISCUSS MORE THAN ONE TOPIC ARE COUNTED IN EACH
 CORRESPONDING CATEGORY.

	1980s	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	total
graphic art & CG animation	2		3	2	4	5	5	2	2	4	9	4	42
3-D CG lighting design								1	3	1			5
music					1	3	3	1		1	3	5	17
editorial design									1		1	2	4
industrial design				2	2	1	5	4		2	4	9	29
face image generation			1		1	1	2		1	4	5	1	16
speech processing & prosodic control							2	1	2		1	1	7
hearing aids fitting										2	7	5	14
virtual reality								1	1				2
database retrieval								2	1	8	8	1	20
knowledge acquisition & data mining							5	3	3	1	4		16
image processing									1	2			3
control & robotics				1				2		3	4	4	14
internet										1	2	1	4
food industry								1	1				2
geophysics											1	2	3
art education												2	2
writing education									1	3			4
games and therapy								1	1	1			3
social system										1			1
discrete fitness value input method								5		2			7
prediction of fitness values							1	2	1	8	3	1	16
interface for dynamic tasks						1					1	3	5
acceleration of EC convergence								1	1	3	1		7
combination of IEC and non-IEC								1	2				3
active intervention			1								3	2	6
total	2	0	5	5	8	11	23	28	22	48	57	43	252

ることにある。本節では、IECの応用分野別にサーベイする。これらの分野はアート、工学、教育・エンターテインメントの大きく3分野に大別できる。必ずしもこれらの境界がはっきりしているわけではないが、この3分野に沿って以降の節を分け概観する。

A. Graphic Art and CG Animation

最初のIEC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[30], [31]。これは植物の自己再帰的な発達過程を数理的に表現するLシステムを用い、その分岐の数や角度のパラメータを遺伝情報として、主観的選択と突然変異を繰り返すことで、昆虫のような多様な形態を容易に作り出せることを示すために作られた。

その後も、虫の形態生成[190]、Lシステムに基づく植物の生成[119], [145]（文献[145]はIECを扱っているが、論文の主眼は審美レベルのフィットネス関数を作成した自動化にある）、数式やセルラ・オートマトンのルールに基づく2-D CGグラフィックアート生成[1], [10], [11], [49], [50], [68], [112], [175], [187], [188], [189], [232], [238], [239], [240], [241], [242], [247], [251]、3次元CGレンダリング[231]、動物のCG[46]、翼や胴体の構成要素を進化させる飛行機の線画[133], [134]など、CG生成への応用が多い。数式ベースでは、GPに基づく任意の非線形数式生成、反復関数系の枠組みで線形、非線形のフラクタル変換式生成、差分方程式や力学方程式を与えて係数をGAで変化させる方式などがある。

Toddらのアート生成システム、*Mutator*は2-D、3-D CGの他、アニメーション、線顔像生成、Computer Artwork Ltd.の商用3-Dスクリーンセーバー、音楽、

財務計画と幅広く適用されている[233]。

2001年4月に長崎市にオープンする水族館には、バーチャル水族館を併設する。そのためのプロジェクトの1つに、CG経験のない来館者にもIECで好きな形の3-Dの魚CGを生成してもらい、人工現実感の海の中で泳がせるプロジェクトがある[83], [70]。3-Dの魚形状を関数で表現し、その関数の係数をIGAで変化させるのである。さらに、インターネット版のIECインタフェースを開発し、来館前にインターネットを介して魚CGを制作できるようにする予定である。

IECでフーリエ表現された形状やテクスチャをVR空間に生成するアート応用がある[108]。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、IGP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[29], [164], [32]。

IECのグラフィックアーティストのパイオニアはSimsである¹。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[187], [188]、時間変数を持つ力学方程式を使って動きを表現したりする[188], [189]。彼は、*Panspermia* (1991)や*Primordial Dance* (1993)などの作品の他、一般の観賞者に作品創造を参加させるインタラクティブアートシステムをいくつかのアートショーで展示してきた。10~16台程度のグラフィックワークステーションと超並列マシンを結合したシステムで稼働するIECシステムで、東京・初台のICCでは*Galapagos*という名前の、Lシステムによる形態形成を応用したIEC

¹作品例は例えば <http://genarts.com/karl/>。

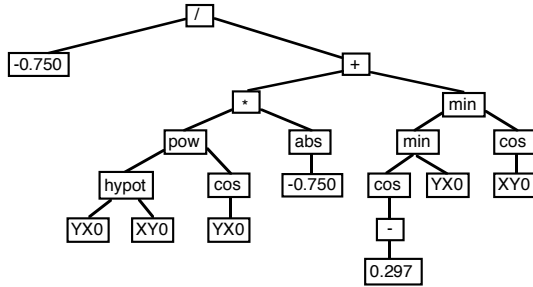
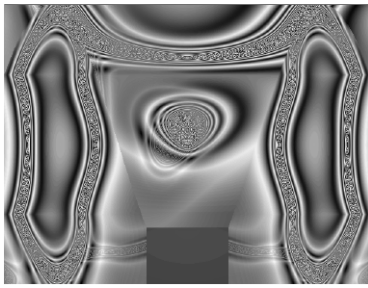


Fig. 3. SBART: simulated breeding-based 2-D CG system. GP evolves math equation that is applied to each pixel, and graphics created by the equations are evolutionary obtained.

システムが展示されている。

IEC でグラフィックスを生成する方法の例を、公開²されている SBART³ を例に説明する [238], [239], [240], [241], [242]. SBART は図 3 下のように GP で数式の木構造を生成し、その式で各画素の値を計算する。数式の非終端記号には四則演算、冪乗、 $\sqrt{\quad}$, sin, cos, log, exp, min, max のような算術関数を、その終端記号には、定数と変数 (図では XY0) が与えられる。定数は、3 つの同じ実定数からなる 3-D ベクトル、変数は、画素座標と定数 0 の 3-D ベクトル $(x, y, 0)$ と見なし、GP で生成された 1 つの数式から 3 つの値を求める。この 3 値を (色相, 明度, 彩度) ベクトルと見なし、当該画素の RGB を計算する。ただし、この 3 値は

$$f(x) = \begin{cases} x - 4m & (4m - 1) \leq x \leq (4m + 1) \\ -x + 4m + 2 & (4m + 1) \leq x \leq (4m + 3) \end{cases}$$

のノコギリ型の関数で $[-1, 1]$ の範囲に正規化される。 m は整数。時刻 t を導入し、変数を (x, y, t) の 3 値にすると動画ができる。またカラー生成ができるような機能拡張もされている [241], [242]。こうして生成される 20 の 2-D 画像を毎世代生成し、評価者がその中から好みの画像を親画像として選択し、次世代 20 画像を生成する。多様性を維持するため複数の SBART インタフェース間の親の移動も許している。この繰り返しを行う。

Graf らはビットマップ画像の変形に面白い演算を導入して子個体を生成している。選ばれた親ビットマップ画像を並べて時系列信号に見立てて、各頂点や画素点の位置を自己回帰モデルで決定することで、次世代の子画像を生成するものである [47]。次世代の画像を変形することに使われている。

²文献 [176] には 14 個の IEC ベースの 2-D, 3-D, 音楽のパッケージが URL と共に公開されている。

³URL: <http://www.intlab.soka.ac.jp/~unemi> で入手可能。

前述の Sims の *Panspermia*, *Primordial Dance*, 前述の SBART 以外にも、*Mutator*[231] や第 3 回インターネット展示会 *International Interactive Genetic Movie* [251] の作品では、静止画座標 (x, y) に時間パラメータを加えた動画が生成されている。Angeline は、座標点を線形に別の座標点に変換するアフィン変換に基づいて IEP でフラクタル画像ムービーを生成している [1]。アフィン変換だけでは静止画像しかできないので、アフィン変換の集合を別のアフィン変換のフラクタル集合に写像するような Meta レベルの定義をして、ムービー化した。アフィン変換の係数行列が EP で更新され、ユーザは各世代 10 本のグラフィックムービーを評価する。

グラフィックムービーではなく、具象的な動きの生成にも IEC が使われている。Ventrella はデフォルメした線のみの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 [244], [245]。Lim らも各 joint angle の組合せを IEC で探索することにより線のみのが歩行動作軌跡の生成を行っている [109]。渋谷らは、多目的 GA と IGA を組み合わせ、2 本の腕の動きのアニメ生成を行っている [184], [185]。

B. 3-D CG Lighting Design

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、ここに IEC を導入した [3], [5], [4], [6], [7]。

3-D 空間上の 3 個のライトそれぞれに、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 IGA で与えられたデザインコンセプトに合うよう調整する。図 4 に同一ユーザが手作業と IGA で得たライティングを示す。

主観評価法と統計的検定で比較評価の差を検定した結果、ある程度の CG 経験があるデザイナーには、有意な IGA 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 IGA 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 IEC の効果が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、IEC の支援が効果的に働いたものと考えられる。

C. Music

IEC はメロディー生成 [131], [132], [13], [16], [17], [18], [19], [20], [160], [243] やパーカッション部のリズム生成 [56], [236], [237] にも応用されている。

Sonomorphs は名前からも分かるように Dawkins のバイオモルフに触発されて開発された最初の音楽用

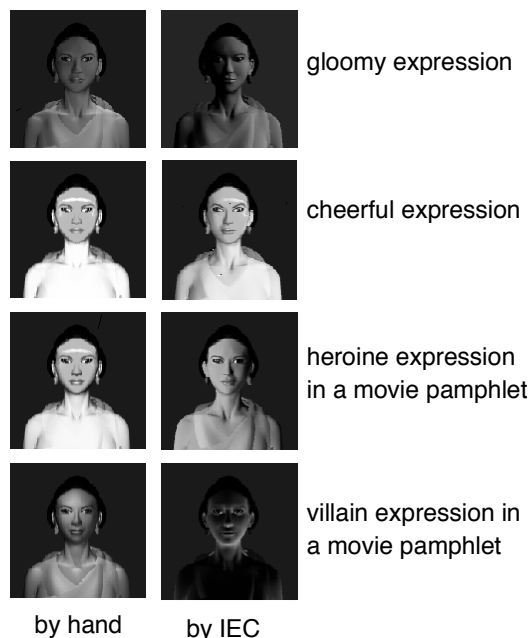


Fig. 4. 3-D CG lighting arts whose design motif is "debut of a villain actress" made by an amateur with manual (left) and with IGA (right).

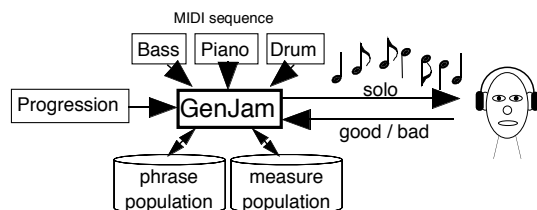


Fig. 5. GenJam system that interactively generates jazz melody.

IEC システムで、ユーザ選択に基づいて、小節～フレーズ程度の長さのメロディーを生成する [131], [132]. *Sonomorphs* はコンピュータ音楽の分野でよく使われている音楽記述言語 MAX で書かれている.

図 5 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. この手法で制作されたオーディオ CD が発売され [14], 聴衆の多数決評価を *GenJam* にフィードバックするパフォーマンスが行われ [15], 演奏家が実時間で *GenJam* と演奏できる [17], [18].

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オンライン状態で評価を与え、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 [13]. 評価時間の短縮を図るこの方法は、IEC で時系列信号を扱う場合の参考になる. また、音楽を画像と同じ様なインタフェースで扱うメロディー生成の IEC もある [243].

Vox Populi は直接評価をする代わりにフィットネス関数のパラメータをリアルタイムでユーザに変更させることで作曲を行うシステムである [123]. 各声部メロディーの声部レンジの一致度、メロディーやハーモニーの調和度などを事前にフィットネス関数で記述してお

く、ユーザは GA が生成する音楽を聴きながら、5 つのユーザインタフェースを使ってフィットネス関数のパラメータを調整する.

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 IEC は利用可能である [69].

D. Editorial Design

インターネットの普及に伴い、ビジネスだけでなく、趣味としてホームページを公開する家庭が急速に増えている. ビジュアルな HTML ファイルの作成ソフトが多数出回っていて、今や小学校の教育でもホームページ作成が採用されている. が、見た目を決定する、背景色、フォントのタイプ、サイズ、色、タイトルレベル毎の文字種、リンク色など、の組合せで印象は大きく変わる. この HTML スタイルシートの作成に IEC が利用されている [121], [221].

ポスターの、レイアウト、文字の大きさ、配色の最適組合せに IEC が使われている [120], [144]. ユーザは初めにポスターに使う文章と画像ファイルを指定する. 次にポスターで表現したい印象をシステムが用意している 12 の印象語への帰属度合いとして与える. GA が生成するレイアウトに対し、専門家のレイアウト知識を表現したファジィ推論ルールで先ほどの 12 の印象語への帰属度を推定する. ユーザ入力の印象ベクトルと推定した印象ベクトルの距離をフィットネスとして GA が次世代のレイアウトを検索する [120]. 同様にフォント・配色についても行う [144]. ファジィルールには個人のばらつきを吸収するよう学習機能を持たせる. 前述の丹内らの HTML スタイルシートのカラーデザイン [221] もこの方法に基づいている.

III-J 節と同様で、一回で解が得られればよし、得られなければ求めるターゲットの心理空間上の座標を変更し次の探索を行う. これが EC の次世代探索に相当する.

E. Industrial Design

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. IEC はこれらの CAD パラメータ最適化に応用できる. 工業デザインへの応用には、車のデザイン [76], [44], [45], 服飾デザイン [128], [129], [130], [78], [28], [79], [80], [81], [82], ニットウェアやグラフィックデザインを題材にした色設計 [34], 新しいハサミや工具やなどの 3-D 物体の新しい形状開発 [178], [179], [183], [91], [92], がある. 3-D 形状を変形させる 5 つのコマンド列を遺伝子コード化して対話的に新しい形状を形成する研究もある [143].

また同様に、土木工学や建築学でのデザインにも使われている. アーチコンクリートダム の形状設計 [165], 吊り橋のデザイン設計 [40], 建物のデザイン [45], [48] がこれらの例である. Graf らの車や建物のデザインは、2 つの画像の頂点や点の内挿を使った warping と morphing の演算から得られたビットマップ画像をユーザに提示して選択させるためリアリティがある [44], [45], [48]. 他の工業デザインや建築、土木工学などでの応用が期待できる.

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 [116], [117], [118], [58], フロア配置計画 [191], [35] もこの分野に分類されるであろう。なお、増井のレイアウト設計では、ユーザがよいレイアウトと悪いレイアウトを GP に教えることでフィットネス関数を適応させている [118]。

室内インテリアのレイアウトに IEC が使われている。レイアウトは個人の好みの他、機能性からみた家具の位置関係、部屋の目的に応じた位置関係、場合によっては中国社で使われている風水に基づくこともある。GA が家具の位置の組み合わせを行い、フィットネス値を知識に基づく客観評価とユーザの好みに基づく評価との組合せで決定するシステムがある [89]。

F. Face Image Generation

モンタージュは複数の顔の部分画像を組み合わせるイメージ合成する方法である。福岡県警の場合 50 人の顔画像を部分画像に分けて組み合わせることで、多くのモンタージュを生成している。従来のモンタージュは鼻が大きかったとか、目が細かったなどの部分画像に対する明示的な選択指示が必要である。しかし、一般の目撃者が顔の詳細を覚えていることは困難である。IEC ベースのモンタージュは、個々の印象よりは顔全体の印象に基づいて顔部分画像の最適組合せを行って顔画像を生成する [25], [84], [85], [211]。これらは写真画像を原画像としているが、さらに 3-D 形状計測装置 (Cyberware) を用いて 3-D 顔データを取り込み、3-D での任意の表情の顔を IGA で生成する方法も行われている [67]。

線画による顔の生成も IEC の研究用題材として扱われている [8], [9], [126], [127], [135], [136], [192], [193], [57], [194]。顔の線画像生成をタスクとし、収束を早めるため、過去の評価に遡って重みを付けした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うことで高速収束の研究をしたり [126], [127]、模擬育種の選択だけの疲労ですべての個体に評価する IEC の探索効果を出すための自動フィットネス値付与の研究に使われている [135], [136], [192], [193], [57], [194]。

顔画像の画素位置を連続的に写像してデフォルメすることにより、顔の表情を変化させることができる。この表情生成に IEC が使われている [107]。

G. Speech Processing and Prosodic Control

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。具体的には、ホルマント帯域を抑圧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 つの係数を最適化したり [249], [250]、帯域別増幅率を最適化する [234], [235]。

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 [249], [250]。

IEC 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や自然性は、声の高さ、大きさ、長さ、速度などの韻律情報に支配される。この印象や自然性と韻律情報の関係は、従来音声言語学者がルール化に注力してき

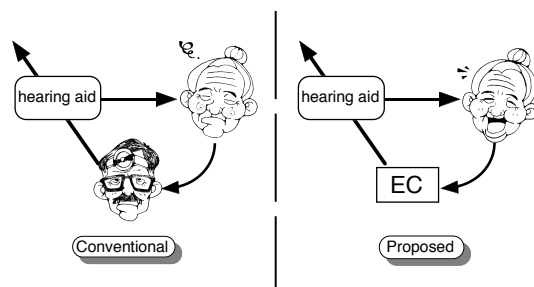


Fig. 6. Conventional hearing aid fitting (left) and IEC Fitting (right).

た。最終的には人間が合成音を聞いて善し悪しを評価する必要があるため、韻律制御は IEC に適したタスクである。IEC で韻律制御を行い、1 つの音声を、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が実現されている [180], [181], [182]。

H. Hearing Aids Fitting

高齢者社会を迎えた昨今、デジタル補聴器が普及し始めて、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ってきた。しかし補聴器の性能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確立していない。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、いかなる他人にも使用者の聞こえは分からないからである。

IEC を導入することで、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ことが可能になる [146], [151], [208], [209], [217] (図 6)。このアプローチは従来の補聴器フィッティングやフィッティング自動化とは本質的に異なり、ユーザの聞こえに基づいてフィッティングが最適化される。従来はオーディオグラムなどの聴覚特性を計測し、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。問題は、音源が純音や帯域ノイズに限定されること、事前に計測できる聴覚特性は極一部でしかないこと、この計測に時間がかかること、専門家の場所に限定されること、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、いかなる場所でいかなる生活環境音を使っても、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できる。フィッティングのための音源が限定されないという特徴を活かし、音声、雑音下の音声、音楽などで評価した結果、従来のラウドネス聴覚障害補償方法よりユーザの評価が高いことが示され [152], [153], [154], [209], [212], [156]、その解析も行われている [38], [39]。

ノート PC 上に市販の補聴器の IEC フィッティングシステムを構築し、実際の補聴器ユーザを使つてのフィールドテストで評価中である [248], [155], [39]。

I. Virtual Reality

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 IEC が利用できる。図 7 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。腕相撲の制御ルール次第で、機械に振り回されている

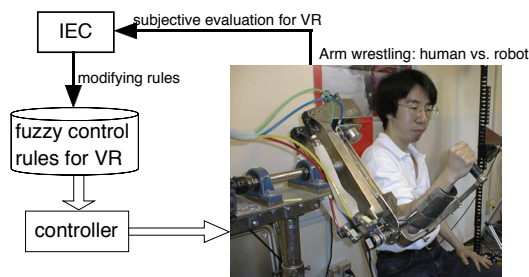


Fig. 7. VR of arm wrestling. Fuzzy logic controller evolved based on human perception of VR.

ようにも、人間と闘っているようにも感じる。

この解析のために、まず勝つための制御ルールを得た。相手を前に押ししたらそのルールを強化する分類システムで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 [72], [73]。

次に、このファジィ制御ルールを初期値にして、IEC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IEC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。

J. Database Retrieval

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。

IECは、コンテンツベースのメディア検索に利用でき、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パラメータ空間であり、人間が評価するのは心理評価空間である。この心理空間は、ある時は、図2のような人間の心の中の空間 [186], [26], [100], [101], [102], [103], [27], [28] であり、ある時は明示的に構築した図8のような心理空間である [140], [141], [210], [214]。後者には、ユーザが入力する心理空間からECが検索する特徴パラメータ空間への写像が必要である。しかし、一般に心理空間の次元数は特徴パラメータ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。逆に特徴パラメータ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($m \geq n$)への写像にはNN(ニューラルネットワーク)、ファジィ推論、その他の非線形写像が使える。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、心理空間から特徴パラメータ空間への写像ができる。この技術にGAが利用でき

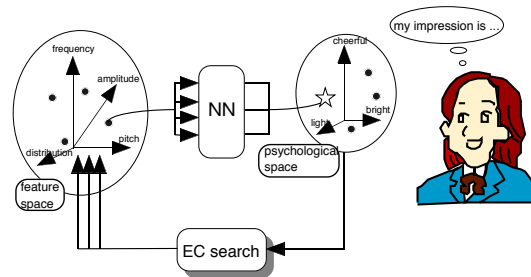


Fig. 8. Media database can be retrieved by reverse-mapping from the psychological space of a user to the physical space of the media in the database after obtaining the opposite mapping relation.

る(図8)。当然一對多の写像なので、1つの心理空間上の座標に写像される特徴パラメータ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。後者に対してIECが利用できる。

画像検索にIECを応用した例は多く、後述するパイプライン型GAで対話的な画像探索 [86], [87], [88], waveletを画像特徴量とした画像検索 [26], [100], [101], [102], [103], [27], [28], メッシュ領域の色, テクスチャ, メッシュの位置を特徴量にし、ユーザの評価値だけでなく表示されない個体にもバイアス評価値を与える画像検索 [186], マルチメディアタイトルのデザイン用に素材画像の検索 [125], 国旗検索 [115] などがある。

マルチメディアタイトルのデザイン用に素材画像の検索システムは、ユーザの好みの合う素材画像探索して時間軸上に配置する作業にIECを使っている。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 [125]。

また、メディアコンバータの提案もされている。心理空間を共通にした画像検索とMIDIファイル検索とを組合せ、画像から音楽を、またはその逆の検索を可能にするシステムである [214], [142]。

通常、ECの検索は色、濃淡などの空間分布情報の特徴量にして検索するため、画像の意味レベルのIEC検索は困難である。例えば、暗闇でほほえむ人物を「明るい印象の人物」として検索することは困難である。しかし、意味レベルが、三角や四角や丸といった基本形状であれば特徴量として表現できるかもしれない。このようなシンプルな画像に限定して意味レベルの扱いを試みたIEC画像検索もある [74], [75]。

K. Knowledge Acquisition and Data Mining

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。

寺野らはIECを口中用品のアンケートからの知識獲得に適用した [63], [222], [223], [224], [225], [226],

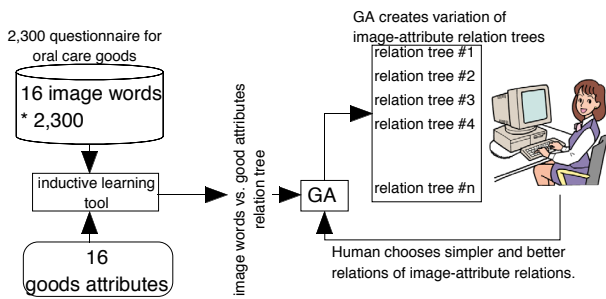


Fig. 9. Reliable rules with fewer number of attributes that characterize each oral care product are determined from questionnaire data using the IEC and a marketing expert.

[227], [64], [228], [229]. 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 IEC 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 (図 9)。

彼らの実験では、「味・香りがよい」「家族みんなで使える」などの 16 種の質問から成る 2,300 のアンケートデータに帰納学習と IEC を適用して専門家がルールの洗練化を行った結果、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。

同様にビール製品に対するアンケートからの知識獲得 [65], [66] や医療データからの知識獲得 [59], [230] についても適用されている。帰納学習に基づいて得られたルールをマーケティングや医療分野の専門家が評価し、模擬育種法に基づいた IEC でルールを精練していくものである。

Venturini らも IEC をデータマイニングに応用している [246]。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 IEC を応用している [196]。普通の IEC 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。

L. Image Processing

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、IGP 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 [174]。GP は人間の視覚的評価に基づいて、画像強調フィルタの数式を生成する。超音波心臓画像では心臓の動きが正常かどうかを見るため、伸縮の 2 画像を 1 枚重ね合わせ、その重ね合わせ画像を視覚的に見やすくするようなフィルタを生成する。

画像から植物の輪郭を抽出するフィルタリングに IGA が使われている。遠隔地の植物画像から形、成長率、葉の色などの生育情報を得るには、植物部分のセグメンテーションをして輪郭抽出する画像処理が必要であるが、ベストな処理結果を得るには、画像毎に画像フィルタ係数を調整する必要がある。そこで、描画ユーザインタフェースを使ってオリジナル画像から得られた対象画像を用意し、その対象画像に最も合致した画像処理結果を得るような画像フィルタを GA で設計する。この時の評価に、画素単位の一貫度を表すフィットネス関数と、人間の視覚的評価の 2 つのフィットネスを使っている [161]。

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 [124]。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。

M. Control and Robotics

III-I 節の腕相撲ロボットアーム制御以外にも、IEC の制御応用が最近増えてきた。

最初の IEC の工学応用は昆虫型 6 足ロボットの歩きの GA 制御である [106]。各足には足を前後に進めるニューロンと上下に動かすニューロンがあり、この間の oscillation で 1 足の動きを決定している。次にこの 6 足の oscillator 間の結合パラメータで歩行を制御する。最初の oscillator ニューロンの学習は足の動きを観察してフィットネス値を与え、後者の足と足との間の制御はどれだけふらつきが少なく前進あるいは後進ができたかのフィットネス関数で行う。

その他にも、ハードの 8 足ロボットの NN 制御では、IEC と 3 つの工夫を導入することでシミュレーションでは 100 万回必要であった進化を 200 回までに抑ええた研究 [51] がある。また、Khepera ミニチュアロボットを使った障害物回避制御では、IEC の時間を短縮しユーザの疲労を軽減するためユーザモデルを獲得し

て自動化する仕組みが取り入れられている (IV-B 節参照) [33].

Lego ロボットを子供の好きなような動きをするような制御を実現するために IEC が使われている. 1 層タイプの NN が, 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ことでロボットの制御をする. 子供がどのロボット移動を気に入って選択したかに基づいて EC がこの NN の重み係数を進化させる [162], [113], [114]. IEC はプログラミングなしのプログラムを実現しているとも言え, 子供用ゲームやおもちゃに最適である. わずか 9 個の個体数で 5 ~ 7 世代目には障害物のある 2 次元空間をおもしろく動き回るロボット制御プログラムが得られているという Lundrån の実験結果には驚かされる.

人間とロボットが物の手渡しなどの協調作業を行う際に, 人間が恐怖心を抱かないような速度とロボットアームの軌跡を求めることに IEC を用いている [93], [94]. 産業用ロボットであれば最短距離や安定な動作が軌跡などを決定する評価尺度になるが, 鉄の固まりであるロボットアームが人間に向かってくる場合, 大なり小なり恐怖心を覚える. この程度が最も少なくなるような軌跡と速度変化を人間の主観評価で求めるのである. 介護ロボットなど, 効率よりもヒューマンフレンドリーであることが求められるロボットには有効なアプローチであろう.

人の動きから感情が推察されるように, 自律移動ロボットの動きにも感情を表現できる. ロボットの動きをファジィ制御ルールで表現し, このルール後件部出力値を ES で決定する. 異なるファジィ制御ルールを組み込んだロボットは異なる動きをするので, 喜び, 怒り, 悲しみ, などの感情に適した動きをすると思われるロボットを選択することで, 動きの感情表現を行おうとするものである [77].

ファジィ制御のペットロボットに芸 (平面上の移動) を教えることに IGA が使われている. ロボットの動きを人間が見て, 「快」「不快」のセンサをタッチすることで評価し, その評価が GA に戻されて次世代の芸が生成される [95].

エンジンの空気 - 燃料混合比制御に乗り心地を考慮した取り組みがある. スロットル角と速度から空気 - 燃料混合比を生成する NN 制御器を構成し, EC で適応進化させるのであるが, ここに, ユーザの乗り心地の好みも考慮して IEC を導入しようとする試みである [71]. 研究の第 1 段階としてはシミュレーションおよび実際のエンジンについて IEC を使わずに, オフラインで得られた, マシンデータとユーザの好みとの関係を NN で学習させてユーザモデルとして, IEC のユーザの評価の代わりに使っている. 今後の研究ステップで IEC 化を目指すとしている.

制御の中には, うまく制御できるだけでなく, 人に説明しやすい制御ルールを獲得することを求められる場合もある. うまく制御できたかどうかの客観的な評価関数以外に, 得られたファジィ制御ルールが分かりやすいかどうかの主観評価とを組み合わせ, IEC で車の車庫入れ用のファジィ制御ルール獲得が行われている [2], [158], [159]. この研究紹介は前述の知識獲得に分類されるかもしれない.

通常のファジィクラシファイアでの制御ルール獲得

の途中で人間が有効と思われるルールを指示することでフィットネスを上げることも提案されている. 相手のロボットにぶつからずに旗を取って戻ってくるロボットのファジィ制御ルールをファジィクラシファイアで得ようとするのであるがシミュレーションでは成功しなかった. そこで, 21 世代目に旗を取ることに成功したルール群を観察し, 発火していたルールをユーザが指示してその近傍を探索するようにしたところ 23 世代目に成功したロボット制御ルールが得られた [37].

最近のロボットの話題は, 産業用ロボットから家庭用ロボットへの広がりである. ホンダの 2 本歩行ロボット, ASIMO, は家庭での作業協力を考えて大きさを決めているし, 25 万円という高額にも関わらずわずか 17 分で 5,000 台をインターネット上で売り切ったソニーのロボット, AIBO, はしぐさを可愛がるペットとしての側面を全面に出している, 旧通産省の機械研のアザラシとネコのペットロボットもかわいさや心の癒しを引き起こすことを狙っている. 作業効率ではなく, しぐさや安心感を売り物にしている家庭用ロボットには, 今後, 可愛い動作, 人間のような自然な動き, 安心感を与える動作の生成・制御に IEC 技術応用が展開されていく余地が大である.

N. Internet

ここ数年の急激なインターネットの普及に伴い, IEC も IT 分野に応用され始めた. III-D 節のホームページのデザイン [121], [221] はそのうちの 1 つである. III-A 節のバーチャル水族館プロジェクトや III-Q 節の造形教育プロジェクトもインターネットを介してデザインや教育を行うことを特徴の 1 つにしている.

E-ビジネスはこの分野の 1 つのキーワードであるが, IEC がバーナー広告の自動生成に使われようとしている [41], [42]. 基本的には, ユーザの評価が高いバーナー広告を親にしてデザイン要素を組み合わせるのであり, デザイン方法はこれまで述べたアート応用と同様である. 大きく異なる点は, IEC ユーザはデザイナーではなくバーナー広告を見る顧客であり, 顧客の訪問回数 (クリック回数) に基づいてより魅力的なバーナー広告を自動生成しようとする点である. この応用では IEC の最大の課題であるユーザの疲労問題が発生せず, ユーザの好みも反映され, それでいて魅力的なデザインの自動化ができる.

最近の情報分野の話題の 1 つがエージェントである. ソフトウェア操作方法のアドバイスをする擬人化エージェントは, オンラインマニュアルの代わりとして既に商用化されている. Microsoft Agent は動作と音声韻律情報をユーザがプログラミングで制御できるキャラクターエージェントである. 人間のような感情表現ができるよう, IEC を用いて, このエージェントの動作の選択, 音声の高さ, 大きさ, 発話速度, 強調のパラメータが調整されている [122].

O. Food Industry

Herdy は ES を IEC に用いた. 初めに主観評価値に基づく IES の探索性能を調べるため, 3 つの toy タスクに適用し効果を確認した: (1) シアンブルー, マジェンタレッド, 黄の 3 種類の基本色液を混合しチェリーブランドの色になるような混合比を求める, (2)

長さ、幅、赤、緑、青の5つのパラメータを変化させてターゲットの長方形の形と色に合わせるタスク、(3)原点から等角に放物状にのびる線分の長さで規定される多角形をターゲット多角形に合わせるタスク [54] .

次に、ベルリンのコーヒー焙煎会社の3人のプロコーヒー官能検査者を被験者にして、この IES を用いて、ターゲットの味になるような5種類のコーヒーのブレンド率を求める実験をし、11世代目でターゲットのコーヒーと区別が付かないブレンド比率を探し出している [55] .

P. Geophysics

地球物理学のシミュレーションに IEC が応用され始めている。地球の回転など物理的特性から、マントル対流などのモデルは既に作られている。このモデルが正しく、かつ、正しい地球内部の初期状態をこのモデルに与えれば、現在の地下の様子を求めることができる。誰も過去の状態は分からないので、シミュレーション結果を見ながらモデルに与える初期状態を変えながら、次のシミュレーションを行うものである。モデル出力からモデル入力を求めるので、逆問題に分類される。推定が妥当であれば、鉱物などの位置推定も可能になるかもしれない。

このシミュレーション結果の妥当性検討には、地質学や地球物理学の専門家の知識と部分的に実測定した観察データとの対応が欠かせない。従来は、これら専門家が推定結果の評価・判断はするものの、次のシミュレーションの初期値は試行錯誤的に行われていた。この初期状態パラメータ決定を GA に行わせ、シミュレーション結果の現実性の判断を専門家が行う協調システムが取り始められている [21], [22], [24] .

また、地下の重量物の存在推定にも応用され始めている。地表の A 点から B 点までの重力を測定すると、質量の異なる岩石等が地下にある場合、一様ではない重力グラフが得られる。この重力グラフから、地下のどの位の深さに、どの程度の質量の岩石がどのくらい大ききで存在するかを求めたい。1-D の重力グラフから3変数を決定することは数学的には不可能であるが、地球物理学の知見からは候補をかなり絞ることができる。そこで、地球物理学者をユーザにした IEC で、質量、深さ、大ききの岩石3変数の組合せを決定するタスクも試みられている [23] .

Q. Art Education

アート制作には、芸術的感性と技能の両方が要求される。通常のアート教育ではこのデッサンや造形の演習を通じてこの両方を教育するが、楽器演奏(技能)と演奏表現(感性)の関係と同じく、技能に多くの時間がかかる。IEC を芸術教育に用いることで、感性に焦点を当てた教育ができる。

3-D 造形 CG モデルを組み込み、その形状パラメータを IEC で変化させることで、デザインテーマやモチーフに合った形状を作り出す IEC ベース造形教育システムを作成している [137], [138], [139] . 前述したように従来の感性教育は造形技能訓練を通じて養われていたのに対し、このシステムは感性教育に焦点を当てることができ、造形技能が未熟な学生でも感性を磨くことができる。図 10 はピーマンの 3-D デッサンを行っ

ている様子を示しているが、このシステムはノート PC に移植され、教育現場への持ち込みが可能になっている。さらに、前述のバーチャル水族館と同様に、インターネット版の IEC インタフェースを導入することによって、インターネットを介した遠隔地教育システムに拡張する予定である。

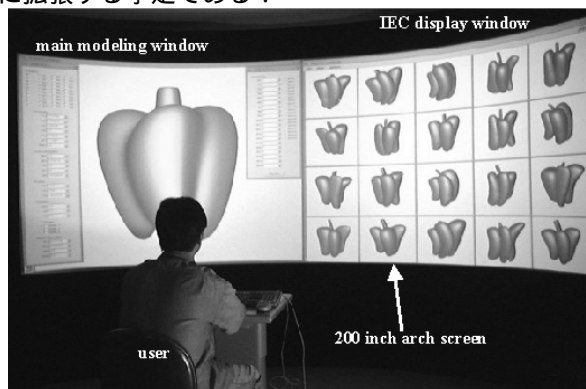


Fig. 10. IEC-based 3-D CG forming system for art education.

R. Writing Education

IEC 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、IEC が創造性刺激に役立つかもしれないことを予感させる。IEC の操作過程で得られるひらめきは、IEC 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、IEC のこの特性を子供の作文支援に応用している [96], [97], [98], [99] . 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。

S. Games and Therapy

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 IEC 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、IEC 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。

Pagliarini らはいくつかのゲームを開発している。III-M 節の Lego robot はこの範疇の応用の1つと言える。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、Artificial Painter [247], [163], 似顔絵生成などがある [162] .

Pagliarini 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 [162] .

T. Social Systems

社会システムへの新しい IEC 応用が提案されている . すべての EC 演算を人間が実行するシステムである . EC は生物進化の計算モデルなので , EC 研究者にとって EC はコンピュータ内で動くものというのがこれまでの常識であった . 本論文でこれまで紹介した IEC にしても , EC 過程のうちの評価の部分のみが人間で実行されるだけであった . この新しい IEC は 2 つの社会システムの応用されている .

Free Knowledge Exchange は新しいアイデアを得るための web 上のフォーラムで , その処理過程は IGA に基づいている [90] . 自然言語のことは (遺伝子) で構成される質問と回答の文章 (染色体) から知識ベース (個体群) が形成されている . フォーラム参加者は投稿された回答を比較して組合せ (交差) 新しい回答を書き込んだり , 他の回答から思いついたり修正したりして作った (突然変異) 新しい回答を書き込む . 各回答はその回答に賛意を表すフォーラム参加者数で評価される (フィットネス値の人間評価) . 新しい回答や意見 (子個体) はこの過程から生まれる .

Teamwork for the Quality Education は工学教育のカリキュラム改革の一環として提案された授業演習で , 授業面 , 貢献と設計 , 夏期実習の 3 項目についてのチーム毎の競争に基づいており , 1997 年の春学期と秋学期にイリノイ大学の General Engineering 学部で実施された . オリジナル文献 [43] ではこのプロジェクトルールと GA との関係が明示的には述べられていないが , 文献 [90] ではその関係を指摘している . 学生 (遺伝子) からなるチーム (染色体) が各チームへの評価 (フィットネス値の人間評価) を高めるよう , 各学期 (世代) 単位で競争する . 最初のチームメンバーはドラフトで決められる (初期化) が , チームの競争 (選択) は , 次学期始めに , チームメンバーの交代 (交差) と他チームの活動の一部流用 (突然変異) を通して行われる , とされる .

U. IEC of Broad Definition

本論文ではスペース的にも狭義の IEC のみに焦点を当てているが , 2 , 3 の広義の IEC も紹介する .

一番多い広義の IEC は多目的最適化に GA を導入する研究であろう . Interactive の用語がタイトルに入った多目的最適化の多くはこれに相当する . しかし中には , 多目的の評価に主観的評価も組み合わせる場合 [220] や評価の重み付けが主観的に決められる場合 [195] などの , 狭義の IEC 研究もある .

スケジューリングへの応用は看護婦勤務表作成支援システムに見られる [62] . GA は与えられた評価関数に基づいて最適看護婦勤務表を作成するが , よく見るとまずい点もある , という場合もある . これは , 評価関数がユーザ仕様をすべて満たしていないためである . このような場合は , 得られた結果を見て人間が新たに気づいた勤務上の制約条件を加えて , さらに GA 探索を行うことになる . つまり , 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うのであるが , 主観評価値を直ちにフィットネス値にするので

はなく , 得られたスケジューリング結果を主観評価し , その結果に基づいてフィットネス関数の修正を行う .

計算生物学は製薬業界の新しい手法で , 例えば biomolecules 同士を結合させて新しい分子を生成するシミュレーションに GA が使われている . GA は最もタイトに分子結合する組合せ (分子システムの自由エネルギーが最小になる組合せ) を (x, y, z) 空間の分子の回転などの 6 つのパラメータを変化させて探索する . GA で数世代探索したのち , 人工現実感空間 , CAVE , 内で人間がマニュアルで 2 つの分子を結合させ , 新個体として加えるというものである [105] . ユーザの評価に基づいて進化する狭義の IEC ではないが , 面白い GA 応用のインタラクションシステムである .

巡回セールスマン問題 (TSP) の解を求める場合 , 規模が大きくなるにつれて GA でも計算に時間がかかる . そこでユーザに最終的な TSP 全体を対話的に小さな TSP に分解するを許し , 個々の TSP 解を視覚的につなぎ合わせることで計算時間を短縮しようとする提案がある [111] .

British Aerospace 社との共同で開発している Parmee らの *interactive evolutionary design environment* も設計チームと GA を内蔵したシステムとのインタラクションを通じて設計を行うシステムである [166], [167], [168], [169], [170], [171], [172], [173].

IV. NON-APPLICATIONAL RESEARCHES

IEC 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 . 以下の第 2 , 第 3 の課題のかなりの部分がこの第 1 の課題に関わっている .

第 2 の課題は , 個体数と探索世代数でいかに収束させるかである . 比較評価の際の肉体的および心理的疲労軽減のため , および , 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ため , 通常の EC 探索に比較して個体数と探索世代数を , 非常に少なくせざるを得ない . これは , 収束悪化につながる . このような状況でも収束する手法が必要である .

第 3 の課題は , IEC の出力が音や動画像のように時間変化する場合 , いかに疲労なく短時間で評価させるかである . 時間変化する解候補は時系列提示せざるを得ない . 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し , 空間比較できないため評価に時間がかかる . 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 .

反面 , IEC 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 , IEC 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。IEC の広い実用化のためには、疲労問題をなんとかしてでも解決しなければならない。応用以外の IEC 研究のほとんどは、これらの解決を目指した、IEC インタフェースに関する研究である。

A. Discrete Fitness Value Input Method

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 点か 63 点かを区別しようとする方法では、選択する点数幅が大きいと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 [197], [198], [199], [200], [201], [147], [205]。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、IEC 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 [198], [201], [147]。

B. Prediction of Fitness Values

IEC の第 2 の問題解決のため、少ない個体数でも早く収束するよう、フィットネス値の予測機能を入れる方法が提案されている。予測ができれば、通常の EC 並の個体数を用意して探索性能を上げ、予測でユーザの評価が高いと予想される個体のみを実際にユーザに提示することでユーザの評価の負荷軽減を図ることができる。ユーザの評価特性を学習して評価値を予測するには、EC 探索空間の距離を使う方法と NN を使う方法とが提案されている。

典型的な距離ベースの予測方法の例は、個体間の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 演算を行い、そのうち上位 10 個体のみを操作者に提示するものである [126], [127]。このユークリッド距離を求める工夫として、ユーザが評価した個体を中心とするクラスタリングを行い、評価した 1 個体からのクラス内の未評価個体への距離に基づいてフィットネス値を予測することで性能を上げようとする試みもある [104]。

別の距離ベース予測にルールベースを使うものもある。IEC の評点方法には、提示されたすべての個体に評点を与える方法と良いものだけを選ぶ模擬育種法とがある。前者は探索精度が高いがユーザ疲労が大きくなりがちで、後者はその逆の特性を持っている。この折

衷案として、2 値評価を行うが、選ばれなかった他の個体をすべて 0 点とするのではなく、一定のバイアス値を与えたり、染色体間距離でバイアス値を決めたり [57]、選ばれた個体との類似度と世代間距離からファジィ推論によってからフィットネス値を与える方法 [135], [136] が提案されている。さらに、類似度も顔パラメータ空間での類似度から多次元尺度構成法で求めた心理空間での類似度へと写像し、IEC の評価の軽減と探索性能向上との両立を求めている [192], [193], [194]。

III-M 節で述べたロボット制御では、フィットネス予測モデルを生成する IEC とそのモデルを使った非 IEC の 2 段階のフェーズを通じて障害物回避制御を獲得する。IEC を行うフェーズでは、好ましくない動きをするロボット行動には光を当てて評価をする。次に、この過程で得られたロボット行動に対するユーザの好みをルールとして獲得し、ユーザ好みモデルとする。このモデルを使って、通常の EC でシミュレーションを続ける [33]。この結果、人間の評価時間が短くなるので疲労問題が軽減できる。

単にフィットネスを予測するだけでなく、提示インタフェースの改善やスクリーニングにその予測フィットネスが使われている。1 つは、ユークリッド距離と NN の双方でユーザの評価特性を学習し、次世代の提示個体のフィットネス値が予測して予測フィットネス値順に提示する提案である [202], [146], [148], [149], [150], [205]。ユーザが隣接する個体どうしの比較で大雑把な評価ができるようになるため比較評価が容易になると期待される。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。スクリーニングへの応用は、非音楽的なメロディーを NN に学習させ、評価に値しないようなメロディーをユーザに提示しないことでユーザの疲労問題に対処するものである [16]。

このフィットネス予測にはまだ検討余地が多々ある。1 つの検討課題は人間の評価尺度に合った尺度構成である。ユークリッド距離ベースの予測では、パラメータ間の評価の重要性の差が無視される。例えば、眉毛や口が顔の表情に与える影響は、髪型や鼻の形状より大きいので、これらの評価の違いは距離尺度に反映できないと予測精度は悪くなる。NN のような非線形尺度や重み付きユークリッド距離のような尺度が必要である。第 2 の課題は、IEC ユーザの評価尺度は絶対尺度ではなく、各世代毎の相対尺度であることが多い点である。つまり遠い過去の世代の評価値と近い過去の世代の評価値は、距離計算や NN の学習に同じ学習データとして扱うとノイズを含むことになる。上記の提示順への予測値反映では、シミュレーションでは有意な予測効果が見られ、効果も示されている。しかしこの効果は、まだ心理的疲労を軽減するまでには至っておらず、改善の余地がある [150]。また非音楽的であることの学習は相当難しいとの結果がでており [16]、予測対象の考慮も必要であろう。

C. Interface for Dynamic Tasks

IEC の第 3 の課題として示したように、音や動画などを出力するシステムを最適化するタスクの場合、空間的に同時提示できないため、ユーザの比較評価時の疲労が大きくなる。音声処理をタスクにして、どのよ

うな提示をすれば IEC ユーザの疲労軽減が可能研究されている。

第 1 の検討は提示音源数である。提示する処理音のオリジナル音を 1 つにすれば比較評価が容易になるが、単調になって疲れやすい; ソースを増やせば単調感はなくなるが比較が難しいため収束が悪くなる、ことが予想される。(1) すべて同じソースの提示, (2) 個体毎に異なるソース提示, そして (3) 同一世代内の個体は同一ソースだが世代毎に異なる提示, の 3 種類に対し操作性と収束性について主観評価実験を行った結果, (3) が有意に良いことが示された [234], [235]。

第 2 の検討は, 過去の記憶中の音との比較を強いられる事を軽減するため, 過去のエリート個体を明示し, 常に再生比較できるようにすることの効果である。主観評価実験の結果有意に効果があることが示された [234], [235]。

第 3 検討は GUI の改善で, 1 世代の 20 個体から任意の処理音を再生できるようにする GUI と強制的に 1 つずつ再生する GUI [248] である。前者は比較評価が自由である意味では操作性が向上しているが, 再生音の選択によるマウス操作が増える。後者は, 評価すると自動的に次の処理音が再生されるため GUI がシンプルで選択操作と比較作業がないが, 任意の音を比較することができない。このトレードオフの効果を主観評価実験で評価した結果, 後者の方が有意に効果があることが示された [235]。

また, III-C 節の *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 [13]。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。

音と違って, 動画の場合, 2 つならば同時再生でも比較がある程度できるので, 人物 CG の歩行動作軌跡最適化の動画を対比較にし, 一部の通常 GA でも使われているトーナメント選択と組み合わせると IEC 疲労対策とする試みがある [110]。トーナメント選択は n 個の動画個体数に対して 1 世代あたり $n - 1$ 回の対比較で済み, トーナメント順位からフィットネス値を決定する。トーナメント選択の長所は対比較回数も少なく, 1 個体毎に絶対評価をするより対比較の方が疲労が少ないことであり, 短所は試合のトーナメントと同様第 1 位以外の評価値の信頼度が低くなることである。

D. Acceleration of EC Convergence

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, IEC 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 IEC の世代数は, せいぜい 10 とか 20 といっ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 IEC 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 [60], IEC に適用した例が報告されている [149], [61], [205]。7 つのベンチマーク関数に

対して特に初期世代での高速収束効果が示された。この手法はフィットネス評価時間が単峰性関数当てはめ計算時間より長いすべての通常 EC にも適用可能である。例えば, 前述の地球物理学のシミュレーションでは条件によって 1 個体生成に 30 分 ~ 1 時間かかる場合もあり, 高速化のための時間がかかっても早期に収束を早めることが優先される。しかしながら, 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。

IEC 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 [86], [87], [88]。

E. Combination of IEC and Non-IEC

IEC における利用者の負荷を軽減するために, 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 [64], [228]。これによって, IEC 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。

III-K 節の田淵らも, 通常はフィットネス関数に基づく GP を行っているが, 100 世代に 1 回程度の割合で人間が評価を加える IGP を行う組合せ方式を行っている [196]。

F. Active Intervention

IEC ユーザはコンピュータ側から提示された音や画像に対して評価を与えるだけであり, 探索自体は EC が行う。EC 探索に人間が能動的に関わり収束を高速化させようというアプローチが本節の研究である。能動的に関与することと収束の高速化は, 疲労問題の軽減にもつながる。2 つの提案がある: オンライン知識組み込みと Visualized IEC である。

オンライン知識組み込みは, ユーザが単に評価点を与えるだけでなく, 探索途中で気づいた EC 探索上の意図をもっと積極的に探索に反映させることである。モニタージュ生成では, 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る [25], [85], [211]。マスクした遺伝子を EC 探索から外すということは探索空間の次元数を減少させることができるので, EC 探索が早くなる反面, 全体印象だけでなく, 部分部分に神経を使う必要があるとか, 特性部分を指定するための操作が増えるというマイナス要因もある。主観評価実験でこのトレードオフを評価した結果, オンライン知識組み込みも単位あたりの操作時間は 3 割ほど遅くなるものの, 収束はそれ以上に早くなることと, 得られたモニタージュ顔画像の方がターゲット顔画像に有意に近かいという結果が得られた [85], [211]。もっと直接的に, パラメータを直接エディットする機能を持たせた III-A 節の SBART のような例もある。

Visualized EC または Visualized IEC は, n -D 探索空間を 2-D に写像することで, EC 探索ランドスケープを視覚化して探索空間のランドスケープを人間が推測できるようにし, その 2 次元空間上で最適解が存在する

であろう位置を人間が視覚的に選択することで新たなエリートとする方法である [52], [215], [53] . Visualized EC または Visualized IEC は EC と人間の異なった探索能力を組み合わせるものである ; EC は n 次元空間を直接アルゴリズムに基づいて探索するという意味で信頼性がある ; 人間は 2 次元空間であれば等高線を見るのが如く大局的な判断が容易である . Visualized IEC の特徴は , うまくいけば人間が選んだ個体が探索に大きく寄与し , うまくいかなかった場合でも多くの個体の 1 つがだめになるだけであり , *low risk, high return* が期待できることにある .

ベンチマーク関数を用いて , 人間の評価の不安定さを排除するため通常の GA と Visualized GA で比較評価した . 2 次元写像には自己組織化写像を用いた . 図 11 に示すように , 少ない個体 (20 個体) で通常 GA の 100 個体 ~ 1000 個体探索に匹敵する収束性能が確認できた [52], [215], [53] .

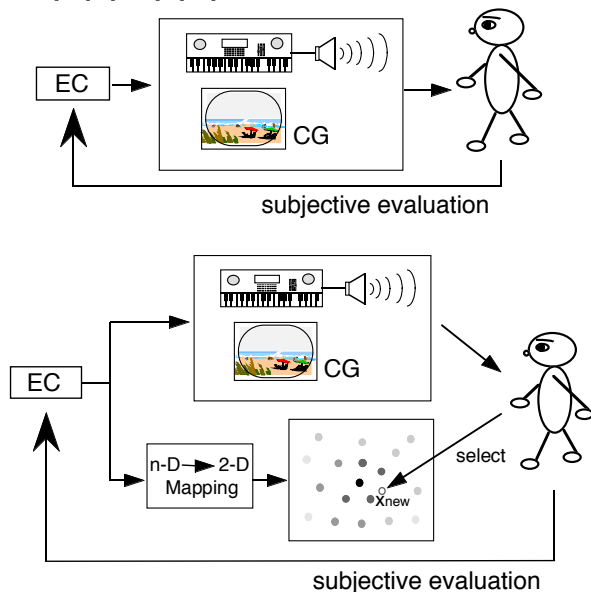


Fig. 11. Normal IEC (upper) and Visualized IEC (lower). Visualized IEC maps individuals in n -D EC searching space to 2-D space and visualizes the distribution of fitness values.

G. Theoretical Research

GA をマルコフ過程としてモデル化する研究がみられるが , IEC 過程を確率モデルで表現しようとする研究がある [177] . まだスタート段階で大きな成果は得られていないようであるが , IEC の研究のほとんどが応用インタフェース研究である中で , ユニークな研究である .

V. CONCLUSION

本解説では , IEC 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 .

これまでの知能科学 , 特にソフトコンピューティングと呼ばれる分野の流れを振り返ると , 60 年代頃に種がまかれた NN , ファジシステム , EC などの個々の技術が 80 年代に個々に花を咲かせたと言えよう [219] . そして 80 年代末にそれぞれの技術の融合化あるいは

協調的組み合わせモデルが提案され , 90 年代に実用という形で社会に広がっていった . 大きく言えば , 80 年代は個々のモデルの時代 , 90 年代は融合化の時代というのが大きなトピックであった .

では 2000 年代の知能科学の研究方向はどうであろうか . いろいろ考えられるであろうが , 90 年代からの感性研究の高まりがこれら知能科学の技術と融合化され , 技術の人間化として 1 つの研究方向を形成していくと思われる . その技術の人間化の一実現方法に , 人間の評価能力とコンピュータの最適化能力とを融合させたインタラクティブ EC がある .

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 IEC のアプローチがより期待される . IEC が「技術の人間化」「人間にやさしい技術」の一助になることが期待される .

ACKNOWLEDGEMENTS

このサーベイ論文作成にあたっては , IEC 論文情報や論文を提供いただいた方々 , コメントをいただいた方々 , 文献 DB 作成の協力をいただいた方々 , 校正にご協力いただいた方々など , 多くのご協力を得ました . 特に , 論文情報やコメントでお世話になりました寺野隆雄教授と畠見達夫助教授 , および IEC 文献 DB 作りに協力をいただいた学生の大西圭君には感謝申し上げます .

REFERENCES

- [1] P. J. Angeline, "Evolving fractal movies," in *1st Annual Conf. on Genetic Programming*, (Stanford, CA, USA), pp. 503–511, July 1996.
- [2] T. Anzai and T. Onisawa, "Acquirement of understandable fuzzy rules," in *15th Fuzzy System Symposium*, (Osaka, Japan), pp. 467–470, June 1999. (*in Japanese*).
- [3] K. Aoki, H. Takagi, and N. Fujimura, "Interactive GA-based design support system for lighting design in computer graphics," in *Int. Conf. on Soft Computing (IIZUKA '96)*, (Iizuka, Fukuoka, Japan), pp. 533–536, World Scientific, September/October 1996.
- [4] K. Aoki and H. Takagi, "3-D CG lighting design support system using interactive GA," in *IEICE A-15-30*, pp. 16–1–1608, Mar. 1997. (*in Japanese*).
- [5] K. Aoki and H. Takagi, "3-D CG lighting with an interactive GA," in *1st Int. Conf. on Conventional and Knowledge-based Intelligent Electronic Systems (KES'97)*, (Adelaide, Australia), pp. 296–301, May 1997.
- [6] K. Aoki and H. Takagi, "Lighting design support on 3-D CG," in *13th Fuzzy System Symposium*, (Toyama, Japan), pp. 311–314, June 1997. (*in Japanese*).
- [7] K. Aoki and H. Takagi, "Interactive GA-based design support system for lighting design in 3-D computer graphics," *Trans. of IEICE*, vol. J81-DII, no. 7, pp. 1601–1608, 1998. (*in Japanese*).
- [8] E. Baker, "Summary: Evolving line drawings," in *5th Int. Conf. on Genetic Algorithm (ICGA '93)*, (Urbana-Champaign, IL, USA), p. 627, CA, USA: Morgan Kaufmann Publisher, 1993.
- [9] E. Baker and M. Seltzer, "Evolving line drawings," in *Graphics Interface '94* (W. A. Davis and B. Joe, eds.), (Banff, Alberta, Canada), pp. 91–100, CA, USA: Morgan Kaufmann Publisher, May 1994.
- [10] S. Baluja, D. Pomerleau, and T. Jochem, "Simulating user's preferences: Towards automated artificial evolution for computer generated images," Tech. Rep. CMU-CS-93-198, CMU Computer Science Technical Reports, Oct. 1993.
- [11] S. Baluja, D. Pomerleau, and T. Jochem, "Towards automated artificial evolution for computer-generated images," *Connection Science*, vol. 6, no. 2&3, pp. 325–354, 1994.

- [12] W. Banzhaf, "Interactive evolution," in *Handbook of Evolutionary Computation* (T. Back, D. Fogel, and Z. Michalewicz, eds.), ch. C2.10, pp. 1–5, Oxford University Press, 1997.
- [13] J. A. Biles, "GenJam: A genetic algorithm for generating jazz solos," in *Int. Computer Music Conf. (ICMC'94)*, (Aarhus, Denmark), pp. 131–137, 1994.
- [14] J. A. Biles, "Al Biles Virtual Quintet, *genjam*." Compact disk DRK-144, 1995.
- [15] J. A. Biles and W. Eign, "GenJam *populi*: Training an IGA via audience-mediated performance," in *Int. Computer Music Conf. (ICMC'95)*, (Banff, Canada), pp. 347–348, 1995.
- [16] J. A. Biles, P. G. Anderson, and L. W. Loggi, "Neural network fitness functions for a musical IGA," in *IIA'96/SOCO'96. Int. ICSC Symposia on Intelligent Industrial Automation And Soft Computing*, pp. B39–44, 1996.
- [17] J. A. Biles, "Interactive GenJam: Integrating real-time performance with a genetic algorithm," in *Int. Computer Music Conf. (ICMC'98)*, (Ann Arbor, MI, USA), pp. 232–235, Oct. 1998.
- [18] J. A. Biles, "Life with GenJam: Interacting with a musical IGA," in *IEEE Int. Conf. on System, Man, and Cybernetics (SMC'99)*, (Tokyo, Japan), pp. 652–656, Oct. 1999. vol.3.
- [19] J. A. Biles, "GenJam in perspective: A tentative taxonomy for genetic algorithm music and art systems," in *Genetic and Evolutionary Computation Conf. Workshop Program (GECCO2000)*, (Las Vegas, NV, USA), pp. 133–135, July 2000.
- [20] J. A. Biles, "GenJam: Evolution of a jazz improviser," in *Creative Evolutionary Systems* (P. J. Bentley and D. W. Corne, eds.), Morgan Kaufman, 2000.
- [21] F. Boschetti, L. Moresi, and K. Covin, "Interactive inversion in geological applications," in *Int. Conf. on Knowledge-based Intelligent Information Engineering Systems (KES'99)*, (Adelaide, Australia), pp. 276–279, Aug./Sept. 1999.
- [22] F. Boschetti and L. Moresi, "Comparison between interactive (subjective) and traditional (numerical) inversion by genetic algorithms," in *Congress on Evolutionary Computation (CEC2000)*, (La Jolla, CA, USA), pp. 522–528, July 2000.
- [23] F. Boschetti and H. Takagi, "Visualization of EC landscape to accelerate EC conversion and evaluation of its effect," in *Congress on Evolutionary Computation (CEC2001)*, (Seoul, Korea), May 2001.
- [24] F. Boschetti and L. Moresi, "Interactive inversion in geosciences," *Geophysics*, (in press).
- [25] C. Caldwell and V. S. Johnston, "Tracking a criminal suspect through "face-space" with a genetic algorithm," in *4th Int. Conf. on Genetic Algorithm (ICGA'91)*, (San Diego, CA, US), pp. 416–421, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers, July 1991.
- [26] S.-B. Cho, "Applying interactive genetic algorithm to content-based image retrieval: A preliminary result," in *Workshop on Interactive Evolutionary Computation*, (Fukuoka, Japan), pp. 19–24, Mar. 1998. (*in Japanese*).
- [27] S.-B. Cho and J.-Y. Lee, "Emotional image retrieval with interactive evolutionary computation," in *Advances in Soft Computing—Engineering Design and Manufacturing* (R. Roy, T. Furuhashi, and P. Chawdhry, eds.), pp. 57–66, Springer-Verlag, London, 1999.
- [28] S.-B. Cho, "A human-oriented interface for emotional media manipulation with an a-life technology," *Three Dimensional Images*, vol. 13, no. 3, pp. 71–76, 1999.
- [29] S. Das, T. Franguiadakis, M. Papka, T. A. DeFanti, 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, IEEE, June 1994.
- [30] R. Dawkins, *The Blind Watchmaker*. Essex: Longman, 1986.
- [31] R. Dawkins, "The evolution of evolvability," in *Artificial Life* (C. G. Langton, ed.), pp. 201–220, Addison-Wesley, 1989.
- [32] T. Disz, M. E. Papka, and R. Stevens, "UbiWorld: An environment integrating virtual reality, supercomputing and design," in *6th Heterogeneous Computing Workshop (HCW'97)* (D. Hensgen, ed.), (Geneva, Switzerland), pp. 46–57, IEEE Computer Society Press, Apr. 1997.
- [33] G. Dozier, "Evolving robot behavior via interactive evolutionary computation: From real-world to simulation," in *16th ACM Symposium on Applied Computing (SAC2001)*, (Las Vegas, USA), pp. 340–344, Mar. 2001.
- [34] I. K. C. Eckert and M. Stacey, "Interactive generative systems for conceptual design: an empirical perspective," (*AI EDAM*) *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 13, no. 4, pp. 303–320, 1999.
- [35] H. Esbensen, "EXPLORER: An interactive floorplanner for design space exploration," in *European Design Automation Conf. (EURO-DAC'96) with EURO-VHDL'96 and Exhibition*, (Geneva, Switzerland), pp. 356–361, Sept. 1996.
- [36] B. Filipic and D. Juricic, "An interactive genetic algorithm for controller parameter optimization," in *Int. Conf. on Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms*, (Innsbruck, Austria), pp. 458–62, Apr. 1993.
- [37] M. Fujii and T. Furuhashi, "A study of interactive between humans and systems using fuzzy classifier system," in *Workshop on Interactive Evolutionary Computation*, (Fukuoka, Japan), pp. 37–41, Mar. 1998. (*in Japanese*).
- [38] S. Fujii, H. Takagi, M. Ohsaki, and Y. Arai, "Knowledge acquisition for compensation for hearing impairment based on IEC Fitting," in *Technical Report of ASJ, H-99-121*, (Kumamoto, Japan), Dec. 1999. (*in Japanese*).
- [39] S. Fujii, H. Takagi, M. Ohsaki, M. Watanabe, and S. Sakamoto, "Evaluation and analysis of IEC Fitting," in *7th Western Pacific Regional Acoustics Conf. (WESTPRAC VII)*, (Kumamoto, Japan), pp. 369–372, Oct. 2000.
- [40] H. Furuta, K. Maeda, and E. Watanabe, "Application of genetic algorithm to aesthetic design of bridge structures," *Microcomputers in Civil Engineering*, vol. 10, no. 6, pp. 415–421, 1995.
- [41] R. Gatarski, "Evolutionary banners exploring a generative design approach," in *Generative Art (GA'98)*, (Milan, Italy), pp. 221–240, Dec. 1998.
- [42] R. Gatarski, "Evolutionary banners: An experiment with automated advertising design," in *Conference on Telecommunications and Information Markets (CO-TIM'99)*, (Providence, R.I., USA.), Sept. 1999.
- [43] D. E. Goldberg, W. B. Hall, L. Krussow, E. Lee, and A. Walker, "Teamwork for a quality education: Low-cost, effective educational reform, through department-wide competition of teams," IlliGAL Report 98005, University of Illinois, Urbana-Champaign, Feb. 1998.
- [44] J. Graf and W. Banzhaf, "Interactive evolution of images," in *4th Annual Conf. on Evolutionary Programming* (J. R. McDonnell, R. G. Reynolds, and D. B. Fogel, eds.), (San Diego, CA, USA), pp. 53–65, MIT Press, Mar. 1995.
- [45] J. Graf, "Interactive evolutionary algorithms in design," in *Int. Conf. on Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms*, (Alès, France), pp. 227–230, Apr. 1995.
- [46] J. Graf and W. Banzhaf, "Interactive evolution for simulated natural evolution," in *Artificial Evolution. European Conf. (AE'95). Selected Papers*. (J. M. Alliot, E. Lutton, E. Ronald, M. Schoenauer, et al., eds.), pp. 259–272, Berlin, Germany: Springer-Verlag, Sept. 1995.
- [47] J. Graf and W. Banzhaf, "An expansion operator for interactive evolution," in *IEEE Int. Conf. on Evolutionary Computation (ICEC'95)*, vol. 2, (Perth, WA, Australia), pp. 798–802, IEEE, Nov./Dec. 1995.
- [48] J. Graf, "Interactive evolution: A prototyping framework for engineering," *Microcomputers in Civil Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 185–193, 1996.
- [49] G. R. Greenfield, "New directions for evolving expressions," in *1st Annual Conf. of BRIDGES: Mathematical Connections in Art, Music, and Science*, (Winfield, Kansas, USA), July 1998.

- [50] G. R. Greenfield, "Evolving expressions and art by choice," *Leonard*, vol. 33, no. 2, pp. 93–99, 2000.
- [51] F. Gruau and K. Quatramarau, "Cellular encoding for interactive evolutionary robotics," Cognitive Science Research Paper 425, University of Sussex, July 1996.
- [52] N. Hayashida and H. Takagi, "Introduction of an active selection to the interactive evolutionary computation by using multi-dimensional data visualization," in *SOFT Kyushu Chapter Meeting*, (Saga, Japan), pp. 17–20, Dec. 1999. (*in Japanese*).
- [53] N. Hayashida and H. Takagi, "Visualized IEC: Interactive evolutionary computation with multidimensional data visualization," in *Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON2000)*, (Nagoya, Japan), pp. 2738–2743, Oct. 2000.
- [54] M. Herdy, "Evolution strategies with subjective selection," in *Int. Conf. on Evolutionary Computation (ICEC/PPSN IV)*, (Berlin, Germany), pp. 22–26, 1996.
- [55] M. Herdy, "Evolutionary optimization based on subjective selection – evolving blends of coffee," in *5th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing EUFIT'97*, (Aachen), pp. 640–644, Sept. 1997.
- [56] D. Horowitz, "Generating rhythms with genetic algorithms," in *Int. Computer Music Conf. (ICMC'94)*, (Aarhus, Denmark), pp. 142–143, 1994.
- [57] F.-C. Hsu and J.-S. Chen, "A study on multi criteria decision-making model: Interactive genetic algorithms approach," in *IEEE Int. Conf. on System, Man, and Cybernetics (SMC'99)*, (Tokyo, Japan), pp. 634–639, Oct. 1999. vol.3.
- [58] T. Igarashi, S. Matsuoka, and T. Masui, "Adaptive recognition of implicit structures in human-organized layouts," in *11th IEEE Int. Symposium on Visual Languages* (V. Haarslev, ed.), (Darmstadt, Germany), pp. 258–66, IEEE Comput. Soc. Press, Sept. 1995.
- [59] M. Inada and T. Terano, "Analyzing clinical data using interactive evolutionary computation and inductive learning," in *26th Intelligent System Symposium of SICE*, (Yokohama, Japan), Mar. 1999. (*in Japanese*).
- [60] T. Ingu, H. Takagi, and M. Ohsaki, "Improvement of interface for interactive genetic algorithms -proposal for fast GA convergence-," in *13th Fuzzy System Symposium*, (Toyama, Japan), pp. 859–862, June 1997. (*in Japanese*).
- [61] T. Ingu and H. Takagi, "Accelerating a GA convergence by fitting a single-peak function," in *IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE'99)*, (Seoul, Korea), pp. 1415–1420, Aug. 1999.
- [62] T. Inoue, T. Furuhashi, M. Fujii, et al., "Development of nurse scheduling support system using interactive EA," in *IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'99)*, (Tokyo, Japan), pp. 533–537, October 1999. vol.5.
- [63] Y. Ishino, K. Yoshinaga, and T. Terano, "Data analyses using simulated breeding and inductive learning techniques," in *21st Intelligent System Symposium*, (Tokyo, Japan), pp. 1–6, May 1995. (*in Japanese*).
- [64] Y. Ishino and T. Terano, "Marketing data analysis using simulated breeding and inductive learning techniques," *J. of Japan Society for Artificial Intelligence*, vol. 12, no. 1, pp. 121–131, 1997. (*in Japanese*).
- [65] Y. Ishino, K. Hori, and S. Nakasuka, "Interactive knowledge acquisition for concept development of consumer products," in *3rd Int. Conf. on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems (KES'99)*, (Adelaide, SA, Australia), pp. 272–275, Aug./Sept. 1999.
- [66] Y. Ishino, K. Hori, and S. Nakasuka, "Strategic concept formation of consumer goods based on knowledge acquisition from questionnaire data," in *IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'99)*, (Tokyo, Japan), pp. 533–537, Oct. 1999. vol.5.
- [67] K. Isono, M. Oda, and S. Akamatsu, "A facial image generating system based on a genetic algorithm-gene rating subjective impression," *Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers D-II*, vol. J82D-II, no. 3, pp. 483–493, 1999. (*in Japanese*).
- [68] E. Ito and S. Ishizaki, "Creative design support system using evolutionary computation," in *2nd Int. Conf. on Cognitive Science (ICCS'99)*, (Tokyo, Japan), pp. 657–660, 1999.
- [69] M. Iwai, "Adjustment of FM operator tones by genetic algorithm," in *Summer Program Symposium on Amusement and Computer*, July 1994. (*in Japanese*).
- [70] T. Iwasaki, A. Kimura, Y. Todoroki, Y. Hirose, H. Takagi, and T. Takeda, "Interactive virtual aquarium (1st report)," in *5th Annual Conf. of the Virtual Reality Society of Japan*, pp. 141–144, Sept. 2000. (*in Japanese*).
- [71] I. Kamihira, M. Yamaguchi, and H. Kita, "Online adaptation of vehicles by means of an evolutionary control system," in *IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'99)*, (Tokyo, Japan), pp. 553–558, Oct. 1999.
- [72] S. Kamohara, H. Takagi, and T. Takeda, "Control rule acquisition for arm wrestling in virtual reality," in *12th Fuzzy System Symposium*, (Tokyo, Japan), pp. 487–490, June 1996. (*in Japanese*).
- [73] S. Kamohara, H. Takagi, and T. Takeda, "Control rule acquisition for an arm wrestling robot," in *IEEE Int. Conf. on System, Man, Cybernetics (SMC'97)*, vol. 5, (Orlando, FL, USA), pp. 4227–4231, Oct. 1997.
- [74] S. Kato, "Feature selection in flexible retrieval," *Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers D-II*, vol. J80D-II, no. 2, pp. 598–606, 1997. (*in Japanese*).
- [75] S. Kato and S. Iisaku, "An image retrieval method based on a genetic algorithm," in *Twelfth Int. Conf. on Information Networking (ICOIN-12)*, (Tokyo, Japan), pp. 333–336, Jan. 1998.
- [76] N. Katsuyama and H. Yamakawa, "A study on heredity and evolution of designs considering KANSEI by using genetic algorithms," in *Japan Society of Mechanical Engineering 3rd Annual Meeting of Design Engineering & System*, (Tokyo, Japan), pp. 43–47, May 1993. (*in Japanese*).
- [77] Y. Katurada and Y. Maeda, "Support system for automatically emotional generation using interactive EC," in *16th Fuzzy System Symposium*, (Akita, Japan), pp. 297–300, Sept. 2000. (*in Japanese*).
- [78] H.-S. Kim and S.-B. Cho, "Development of an IGA-based fashion design aid system with domain specific knowledge," in *Proc. of IEEE SMC'99*, (Tokyo, Japan), pp. III-663–III-668, Oct. 1999.
- [79] H.-S. Kim and S.-B. Cho, "Genetic algorithm with knowledge-based encoding for interactive fashion design," in *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer Valg, 2000. no. 1886, pp. 404–414.
- [80] H.-S. Kim and S.-B. Cho, "An emotion-based fashion design aid system using interactivity," *the Korea Information Science Society (B)*, vol. 27, no. 9, pp. 942–951, 2000. (*in Korean*).
- [81] H.-S. Kim and S.-B. Cho, "Knowledge-based encoding in interactive genetic algorithm for a fashion design aid system," in *Proc. of GECCO, Poster Papers*, p. 757, July 2000.
- [82] H.-S. Kim and S.-B. Cho, "Application of interactive genetic algorithm to fashion design," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 13, no. 6, pp. 635–644, 2000.
- [83] A. Kimura, T. Iwasaki, Y. Kitajima, H. Takagi, and T. Takeda, "Development of fish shape generator based on interactive evolutionary computation," in *Joint Technical Meeting of Kyushu Chapters of Electric Related Societies*, (Fukuoka, Japan), p. 525, September 2000. (*in Japanese*).
- [84] K. Kishi and H. Takagi, "Developing montage system for study on interactive evolutionary computation," in *SOFT 3rd Workshop on Evaluation of Heart and Mind*, (Gamagooi, Aichi, Japan), pp. 15–18, Nov. 1998. (*in Japanese*).
- [85] K. Kishi and H. Takagi, "Evaluation of on-line knowledge embedding for interactive evolutionary computation," in *15th Fuzzy System Symposium*, (Osaka, Japan), pp. 379–380, June 1999. (*in Japanese*).
- [86] A. Kitamoto and M. Takagi, "Learning criteria for similarity-based image retrieval using simulated breed-

- ing by pipeline-type genetic algorithms,” in *Technical Report of IEICE, HIP96-4*, pp. 17–22, June 1996. (in Japanese).
- [87] A. Kitamoto and M. Takagi, “Interactive image browsing using pipeline-type genetic algorithm,” in *Workshop on Interactive Evolutionary Computation*, (Fukuoka, Japan), pp. 31–36, Mar. 1998. (in Japanese).
- [88] A. Kitamoto and M. Takagi, “Interactive image browsing using queue-based genetic algorithm,” *J. of Japanese Society for Artificial Intelligence*, vol. 13, no. 5, pp. 728–738, 1998. (in Japanese).
- [89] M. Korenaga and M. Hagiwara, “An interior layout support system with interactive evolutionary computation,” *Transactions of the Information Processing Society of Japan*, vol. 41, no. 11, pp. 3152–3160, 2000. (in Japanese).
- [90] A. Kosorukoff and D. Goldberg, “Genetic algorithms for social innovation and creativity,” IlliGAL Report 2001005, University of Illinois, Urbana-Champaign, Jan. 2001.
- [91] J. Kotani and M. Hagiwara, “An evolutionary design-support-system with tree structure representation,” in *16th Fuzzy System Symposium*, (Akita, Japan), pp. 327–330, Sept. 2000. (in Japanese).
- [92] J. Kotani and M. Hagiwara, “An evolutionary design-support-system with structural representation,” in *IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation 2000 (IECON2000)*, (Nagoya, Japan), pp. 672–677, Oct. 2000.
- [93] N. Kubota, K. Watanabe, and F. Kojima, “Trajectory generation of human-friendly robots using interactive genetic algorithm,” in *15th Fuzzy System Symposium*, (Osaka, Japan), pp. 355–358, June 1999. (in Japanese).
- [94] N. Kubota, K. Watanabe, and F. Kojima, “Interactive genetic algorithm for trajectory generation of human friendly robots,” *Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, vol. 66, no. 647, pp. 2274–2279, 2000. (in Japanese).
- [95] N. Kubota, Y. Nojima, N. Baba, F. Kojima, and T. Fukuda, “Evolving pet robot with emotional model,” in *Congress on Evolutionary Computation (CEC00)*, (La Jolla, CA, USA), pp. 1231–1237, July 2000.
- [96] K. Kuriyama and T. Terano, “Interactive story composition support by genetic algorithms,” in *World Conf. on Artificial Intelligence in Education. (AI-ED’97)*, (Kobe, Japan), pp. 615–617, Aug. 1997.
- [97] K. Kuriyama, T. Terano, and M. Numao, “Authoring support by interactive genetic algorithm and case based reasoning,” in *Workshop on Interactive Evolutionary Computation*, (Fukuoka, Japan), pp. 13–18, Mar. 1998. (in Japanese).
- [98] K. Kuriyama, T. Terano, and M. Numao, “Authoring support by interactive genetic algorithm and case base retrieval,” in *IEEE 2nd Int. Conf. on Conventional and Knowledge-based Intelligent Electronic Systems (KES’98)*, (Adelaide, SA, Australia), pp. pp.485–488, Apr. 1998.
- [99] K. Kuriyama, T. Terano, and M. Numao, “Authoring support by interactive genetic algorithm and case base retrieval,” in *Asia Fuzzy System Symposium*, (Masan, Korea), pp. pp.485–488, June 1998.
- [100] J.-Y. Lee and S.-B. Cho, “Interactive genetic algorithm for content-based image retrieval,” in *Asia Fuzzy System Symposium (AFSS’98)*, (Masan, Korea), pp. pp.479–484, June 1998.
- [101] J.-Y. Lee and S.-B. Cho, “Interactive genetic algorithm with wavelet coefficients for emotional image retrieval,” in *Proc. Int. Conf. on Soft Computing*, (Iizuka, Fukuoka, Japan), pp. 829–832, Oct. 1998.
- [102] J.-Y. Lee and S.-B. Cho, “Application of interactive genetic algorithm to image retrieval based on emotion,” *the Korea Information Science Society (B)*, vol. 26, no. 3, pp. 422–430, 1999. (in Korean).
- [103] J.-Y. Lee and S.-B. Cho, “Incorporating human preference into content-based image retrieval using interactive genetic algorithm,” in *Proc. of GECCO’99, Poster Papers*, p. 1788, July 1999.
- [104] J.-Y. Lee and S.-B. Cho, “Sparse fitness evaluation for reducing user burden in interactive genetic algorithm,” in *Proc. of FUZZ-IEEE’99*, pp. II–998–II1003, Aug. 1999.
- [105] D. Levine, M. Facello, P. Hallstrom, et al., “Stalk: an interactive system for virtual molecular docking,” *IEEE Computational Science and Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 55–65, 1997.
- [106] M. A. Lewis, A. H. Fagg, and A. Solidum, “Genetic programming approach to the construction of a neural network for control of a walking robot,” in *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 3, (Nice, France), pp. 2618–2623, May 1992.
- [107] I. S. Lim, “Evolving facial expressions,” in *IEEE Int. Conf. on Evolutionary Computation (ICEC’95)*, (Perth, WA, Australia), pp. 515–520, Nov./Dec. 1995. vol.2.
- [108] I. S. Lim, “Evolutionary art in virtual world,” in *2nd EUROGRAPHICS Workshop on Virtual Environments*, (Monte Carlo, Monaco), 1995.
- [109] I. S. Lim and D. Thalmann, “Pro-actively interactive evolution for computer animation,” in *Eurographics Workshop on Animation and Simulation (CAS’99)*, (Milan, Italy), pp. 45–52, Sept. 1999.
- [110] I. S. Lim and D. Thalmann, “Tournament selection for browsing temporal signals,” in *ACM Symposium on Applied Computing (SAC2000)*, (Como, Italy), pp. 570–573, Mar. 2000.
- [111] S. J. Louis and R. Tang, “Interactive genetic algorithms for the traveling salesman problem,” in *Genetic and Evolutionary Computation Conf. (ICGA-99)*, (Orlando, FL, USA), pp. 1043–1048, July 1999. vol.1.
- [112] H. H. Lund, L. Pagliarini, and P. Miglino, “Artistic design with GA & NN,” in *1st Nordic Workshop on Genetic Algorithms and Their Applications (1NWGA)*, (Vaasa, Finland), pp. 97–105, Jan. 1995.
- [113] H. H. Lund and O. Miglino, “Evolving and breeding robots,” in *1st European Workshop on Evolutionary Robotics (EvoRobot98)*, (Berlin, Germany), pp. 192–210, Springer-Verlag, Apr. 1998.
- [114] H. H. Lund, O. Miglino, L. Pagliarini, A. Billard, and A. Ijspeert, “Evolutionary robotics – a children’s game,” in *IEEE Int. Conf. on Evolutionary Computation (ICEC’98)*, pp. 154–158, May 1998.
- [115] J. Martinez and S. Marchand, “Towards intelligent retrieval in image databases,” in *Int. Workshop on Multi-Media Database Management Systems*, (Dayton, OH, USA), pp. 38–45, Aug. 1998.
- [116] T. Masui, “Interactive graphic object layout with genetic algorithms,” in *Human Interface, 41-6*, pp. 41–48, Mar. 1992. (in Japanese).
- [117] T. Masui, “Graphic object layout with interactive genetic algorithms,” in *IEEE Workshop on Visual Languages*, (Los Alamitos, CA, USA), pp. 74–80, 1992.
- [118] T. Masui, “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. 103–8, ACM, Nov. 1994.
- [119] J. McCormack, “Interactive evolution of L-system grammars for computer graphics modelling,” in *Complex Systems: from Biology to Computation* (D. G. Green and T. Bossomaier, eds.), pp. 118–130, Amsterdam, Netherlands: IOS Press, Aug./Sept. 1993.
- [120] T. Miyazaki and M. Hagiwara, “A poster creating support system to reflect Kansei,” *Transactions of the Information Processing Society of Japan*, vol. 38, no. 10, pp. 1928–1936, 1997. (in Japanese).
- [121] N. Monmarché, G. Nocent, M. Slimane, G. Venturini, and P. Santini, “Imagine: a tool for generating HTML style sheets with an interactive genetic algorithm based on genes frequencies,” in *IEEE Int. Conf. on System, Man, and Cybernetics (SMC’99)*, (Tokyo, Japan), pp. 640–645, Oct. 1999. vol.3.
- [122] T. Morita, H. Iba, and M. Ishizuka, “Generating emotional voice and behavior expression by interactive evolutionary computation,” in *62nd Annual Meeting of Japan Society for Information Processing*, (Yokohama, Japan), pp. 45–46, Mar. 2001. (in Japanese).
- [123] A. Moroni, J. Manzolli, F. von Zuben, and R. Gudwin, “Evolutionary computation applied to algorithmic composition,” in *Congress on Evolutionary Computation*

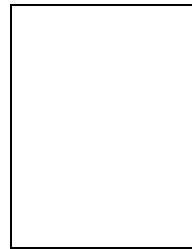
- (CEC'99), (Washington, DC, USA), pp. 807–811, July 1999. vol.2.
- [124] T. Mutoh, N. Komagata, and K. Ueda, “An experimental study for automatically generating image filter sequence by using simulated breeding,” in *Workshop on Interactive Evolutionary Computation*, (Fukuoka, Japan), pp. 7–12, Mar. 1998. (in Japanese).
- [125] S. Nabeta and T. Terano, “Design support system about time-varying multimedia titles by interactive genetic algorithm,” in *12th Annual Conf. of JSAI*, (Yokohama, Japan), pp. 489–490, June 1998. (in Japanese).
- [126] M. Nagao, M. Yamada, K. Suzuki, and A. Ohuchi, “Evaluation of the image retrieval system using interactive evolutionary computation,” in *Workshop on Interactive Evolutionary Computation*, (Fukuoka, Japan), pp. 25–30, Mar. 1998. (in Japanese).
- [127] M. Nagao, M. Yamamoto, K. Suzuki, and A. Ohuchi, “Evaluation of the image retrieval system using interactive genetic algorithm,” *J. of Japanese Society for Artificial Intelligence*, vol. 13, no. 5, pp. 720–727, 1998. (in Japanese).
- [128] Y. Nakanishi, “Applying evolutionary systems to design aid system,” in *ALIFE V, Poster Presentations*, pp. PP–25, 147–154, May 1996.
- [129] Y. Nakanishi, “Capturing preference into a function using interactions with a manual evolutionary design aid system,” in *Late Breaking Papers at Genetic Programming*, pp. 133–140, July 1996.
- [130] Y. Nakanishi, “Control and evaluation of interactive evolutionary system with a preference function: Applying genetic programming to design aid system,” *J. of Japanese Society for Artificial Intelligence*, vol. 13, no. 5, pp. 704–711, 1998. (in Japanese).
- [131] G. L. Nelson, “Sonomorphs: An application of genetic algorithms to growth and development of musical organisms,” in *4th Biennial Art & Technology Symposium*, (New London, CT, USA), pp. 155–169, Mar. 1993.
- [132] G. L. Nelson, “Further adventures of the sonomorphs,” in *5th Biennial Art & Technology Symposium*, (New London, CT, USA), pp. 51–64, Mar. 1995.
- [133] T. C. Nguyen and T. S. Huang, “Evolvable modeling: Design adaptation through hierarchical evolution for 3-D model-based vision.” TCGA File No.02852, (unpublished tech. report), 1993.
- [134] T. C. Nguyen and T. S. Huang, “Evolvable 3D modeling for model-based object recognition systems,” in *Advances in GP*, ch. 22, pp. 459–475, Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1994.
- [135] K. Nishio, M. Murakami, E. Mizutani, and N. Honda, “Efficient fuzzy fitness assignment strategies in an interactive genetic algorithm for cartoon face search,” in *6th Int. Fuzzy Systems Association World Congress (IFSA'95)*, vol. 1, (Sao Paulo), pp. 173–176, July 1995.
- [136] K. Nishio, M. Murakami, E. Mizutani, and N. Honda, “Fuzzy fitness assignment in an interface genetic algorithm for a cartoon face search,” in *Genetic Algorithm and Fuzzy Logic Systems, Soft Computing Perspectives* (E. Sanchez, T. Shibata, and L. A. Zadeh, eds.), vol. 7 of *Advances in Fuzzy Systems - Applications and Theory*, pp. 175–192, World Scientific, 1997.
- [137] H. Nishino, H. Takagi, and K. Utsumiya, “A digital prototyping system for designing novel 3D geometries,” in *6th Int. Conf. on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM2000)*, (Ogaki, Gifu, Japan), pp. 473–482, Oct. 2000.
- [138] H. Nishino, H. Takagi, and K. Utsumiya, “3D modeling support mechanism by using interactive evolutionary computation,” in *Tech. Report of IEICE, Vol.100, No.461, IE2000-78*, pp. 1–8, Nov. 2000. (in Japanese).
- [139] H. Nishino, H. Takagi, S.-B. Cho, and K. Utsumiya, “A 3D modeling system for creative design,” in *The 15th Int. Conf. on Information Networking (ICOIN-15)*, (Beppu, Japan), pp. 479–486, Jan./Feb. 2001.
- [140] T. Noda, H. Takagi, and M. Zhang, “Construction of a psychological factor space for an IGA-based image retrieval system and subjective test for the system,” in *15th Fuzzy System Symposium*, (Osaka, Japan), pp. 683–684, June 1999. (in Japanese).
- [141] T. Noda, D. Zhao, H. Takagi, and A. Teraoka, “Media database retrieval and conversion system based on impression,” in *SOFT Kyushu Chapter Meeting*, (Saga, Japan), pp. 1–4, Dec. 1999. (in Japanese).
- [142] T. Noda, D. Zhao, and H. Takagi, “Music database retrieval and media conversion system based on impression,” in *6th Int. Conf. on Soft Computing (IIZUKA2000)*, (Iizuka, Fukuoka, Japan), pp. 151–156, Oct. 2000.
- [143] U.-M. O'Reilly and G. Ramachandran, “A preliminary investigation of evolution as a form design strategy,” in *Artificial Life VI* (C. Adami, R. Belew, H. Kitano, and C. Taylor, eds.), (Los Angeles, CA, UAS), pp. 443–447, MIT Press, June 1998.
- [144] T. Obata and M. Hagiwara, “A color poster creating support system to reflect Kansei,” *Transactions of the Information Processing Society of Japan*, vol. 41, no. 3, pp. 701–710, 2000. (in Japanese).
- [145] G. Ochoa, “On genetic algorithms and Lindenmayer systems,” in *5th Int. Conf. on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN V)*, (Amsterdam, Netherlands), pp. 335–344, Sept. 1998.
- [146] M. Ohsaki and H. Takagi, “Application of interactive evolutionary computation to digital hearing aids fitting,” in *14th Fuzzy System Symposium*, (Gifu, Japan), pp. 193–194, June 1998. (in Japanese).
- [147] M. Ohsaki, H. Takagi, and K. Ohya, “An input method using discrete fitness values for interactive GA,” *J. of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 6, pp. 131–145, 1998.
- [148] M. Ohsaki and H. Takagi, “Reduction of the fatigue of human interactive EC operators-improvement of present interface by prediction of evaluation order,” *J. of Japanese Society for Artificial Intelligence*, vol. 13, no. 5, pp. 712–719, 1998. (in Japanese).
- [149] M. Ohsaki, H. Takagi, and T. Ingu, “Methods to reduce the human burden of interactive evolutionary computation,” in *Asia Fuzzy System Symposium (AFSS'98)*, (Masan, Korea), pp. 495–500, June 1998.
- [150] M. Ohsaki and H. Takagi, “Improvement of presenting interface by predicting the evaluation order to reduce the burden of human interactive EC operators,” in *IEEE Int. Conf. on System, Man, Cybernetics (SMC'98)*, (San Diego, CA, USA), pp. 1284–1289, Oct. 1998.
- [151] M. Ohsaki and H. Takagi, “Application of interactive evolutionary computation to optimal tuning of digital hearing aids,” in *Int. Conf. on Soft Computing (IIZUKA'98)*, (Iizuka, Fukuoka, Japan), pp. 849–852, World Scientific, Oct. 1998.
- [152] M. Ohsaki, T. Tsumura, H. Takagi, and M. Shimada, “Evaluation of IEC fitting system on speech hearing,” in *Annual Meeting of Acoustic Society of Japan, 1-2-19*, pp. 361–362, Mar. 1999. (in Japanese).
- [153] M. Ohsaki, T. Tsumura, H. Takagi, and M. Shimada, “Application of IEC fitting system to music hearing,” in *Annual Meeting of Acoustic Society of Japan, 1-2-20*, pp. 363–364, Mar. 1999. (in Japanese).
- [154] M. Ohsaki and H. Takagi, “Evaluation of an interactive EC-based fitting system for digital hearing aids,” in *15th Fuzzy System Symposium*, (Osaka, Japan), pp. 381–384, June 1999. (in Japanese).
- [155] M. Ohsaki, H. Takagi, M. Watanabe, and S. Sakamoto, “Development and evaluation of an IEC-based hearing aids fitting system for practical use – application to a conventional hearing aid,” in *Annual Meeting of Acoustic Society of Japan, 2-10-1*, pp. 331–332, Mar. 2000. (in Japanese).
- [156] M. Ohsaki and H. Takagi, “Design and development of an IEC-based hearing aids fitting system,” in *4th Asia Fuzzy System Symposium (AFSS'00)*, (Tsukuba, Japan), pp. 543–548, June 2000.
- [157] M. Ohsaki and H. Takagi, “Human interface of interactive evolutionary computation and its evaluation,” in *Genetic Algorithms 4* (H. Kitano, ed.), ch. 13, pp. 397–438, Sangyo Publisher, Aug. 30, 2000. (in Japanese).
- [158] T. Onisawa and T. Anzai, “Acquisition of intelligible fuzzy rules,” in *IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'99)*, (Tokyo, Japan), pp. 268–273, Oct. 1999. vol.5.

- [159] T. Onisawa and T. Anzai, "Acquisition of intelligible fuzzy rules with interaction," in *16th Fuzzy System Symposium*, (Akita, Japan), pp. 451–454, Sept. 2000. (in Japanese).
- [160] T. Onisawa, W. Takizawa, and M. Unehara, "Composition of melody reflecting user's feeling," in *IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON2000)*, (Nagoya, Japan), pp. 2738–2743, Oct. 2000.
- [161] K. Otaba, K. Tanaka, and M. Hitafuji, "Image processing and interactive selection with Java based on genetic algorithms," in *3rd IFAC/CIGR Workshop on Artificial Intelligence in Agriculture*, (Makuhari, Japan), pp. 83–88, Apr. 1998.
- [162] L. Pagliarini, H. H. Lund, O. Miglino, and D. Parisi, "Artificial Life: A new way to build educational and therapeutic games," in *ALIFE V*, pp. 152–156, MIT Press, 1996.
- [163] L. Pagliarini, A. Dolan, F. Menczer, and H. H. Lund, "ALife meets web: Lessons learned," in *1st Int. Conf. on Virtual World (VW'98)*, (Berlin, Germany), pp. 156–167, Springer-Verlag, July 1998.
- [164] M. E. Papka and R. Stevens, "Ubiworld: An environment integrating virtual reality, supercomputing and design," in *5th IEEE Int. Symposium on High Performance Distributed Computing*, (Syracuse, NY, USA), pp. 306–307, IEEE Comput. Soc. Press, Aug. 1996.
- [165] I. C. Parmee, "The concrete arch dam: An evolutionary model of the design process," in *Int. Conf. on Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms*, (Innsbruck, Austria), pp. 544–551, Apr. 1993.
- [166] I. C. Parmee and C. R. Bonham, "The maintenance of search diversity for effective design space decomposition using cluster oriented genetic algorithms (COGAs) and multi-agent strategies (GAANT)," in *Adaptive Computing in Engineering Design and Control* (I. C. Parmee, ed.), (Plymouth, UK), pp. 128–138, 1996.
- [167] I. C. Parmee, "Strategies for the integration of evolutionary algorithms (COGAs) for the identification of high-performance regions design spaces," in *Evolutionary Algorithms in Engineering Applications* (D. Dasgupta and Z. Michalewicz, eds.), pp. 453–478, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1996.
- [168] I. C. Parmee and C. R. Bonham, "Supporting innovative and creative design using interactive designer/evolutionary computing strategies," in *Computation Models of Creative Design Conf.* (J. Gero and M. Maher, eds.), (Sydney, Australia), 1998.
- [169] I. C. Parmee and C. R. Bonham, "Cluster-oriented genetic algorithms to support interactive designer/evolutionary computing systems," in *Congress on Evolutionary Computation (CEC'99)*, vol. 1, (Washington, DC, USA), pp. 546–553, July 1999.
- [170] I. C. Parmee, "Exploring the design potential of evolutionary search, exploration and optimization," in *Evolutionary Design by Computer*, (San Francisco, CA, USA), Morgan Kaufmann, 1999.
- [171] I. C. Parmee and C. R. Bonham, "Towards the support of innovative conceptual design through interactive designer/evolutionary completing strategies," (*AI EDAM Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 14, no. 1, pp. 3–16, 2000.
- [172] I. C. Parmee, A. H. Watson, D. Cvetković, and C. R. Bonham, "Multiobjective satisfaction within an interactive evolutionary design environment," *Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 2, pp. 197–222, 2000.
- [173] I. C. Parmee, "Developing the framework for an interactive evolutionary design system," in *5th Joint Conf. on Information Sciences (JCIS2000)*, (Atlantic City, NJ, USA), pp. 991–994, Feb./Mar. 2000.
- [174] R. Poli and S. Cagnoni, "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.
- [175] F. Raynal, E. Lutton, P. Collet, and M. Schoenauer, "Manipulation of non-linear IFS attractors using genetic programming," in *Congress on Evolutionary Computation (CEC'99)*, (Washington, DC, USA), pp. 1171–1177, July 1999. vol.2.
- [176] A. Rowbottom, "Evolutionary art and form," in *Evolutionary Design by Computers* (P. Bentley, ed.), ch. 11, pp. 260–277, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 1999.
- [177] G. Rudolph, "On interactive evolutionary algorithms and stochastic Mealy automata," in *4th Parallel Problem Solving from Nature - PPSN IV. Int. Conf. on Evolutionary Computation*, (Berlin, Germany), pp. 218–226, Sept. 1996.
- [178] T. Sato and M. Hagiwara, "Tool creating support system using evolutionary techniques," in *15th Fuzzy System Symposium*, (Osaka, Japan), pp. 363–366, June 1999. (in Japanese).
- [179] T. Sato and M. Hagiwara, "IDSET: Interactive design system using evolutionary techniques," *J. of Computer-Aided Design*, (accepted).
- [180] Y. Sato, "Voice conversation using evolutionary computation of prosodic control," in *12th Symposium on Human Interface*, (Yokohama, Japan), pp. 469–475, Oct. 1996.
- [181] Y. Sato, "Voice conversation using evolutionary computation of prosodic control," in *Intelligent Processing of Manufacturing of Materials '97*, pp. 342–348, July 1997.
- [182] Y. Sato, "Voice conversation using evolutionary computation of prosodic control," in *Symposium on Artificial Life and its Applications*, pp. 71–78, Dec. 1997. (in Japanese).
- [183] R. Sawa and M. Hagiwara, "A system for evolving 3D machine structure using CG," in *16th Fuzzy System Symposium*, (Akita, Japan), pp. 321–324, Sept. 2000. (in Japanese).
- [184] M. Shibuya, H. Kita, and S. Kobayashi, "Generation of pass-motion by hands using interactive genetic algorithms," in *26th Intelligent System Symposium of SICE*, (Yokohama, Japan), Mar. 1999. (in Japanese).
- [185] M. Shibuya, H. Kita, and S. Kobayashi, "Integration of multi-objective and interactive genetic algorithms and its application to animation design," in *IEEE Int. Conf. on System, Man, and Cybernetics (SMC'99)*, (Tokyo, Japan), pp. 646–651, Oct. 1999. vol.3.
- [186] H. Shiraki and H. Saito, "An interactive image retrieval system using genetic algorithms," in *Int. Conf. on Virtual Systems and MultiMedia (VSM'96)*, (Gifu, Japan), pp. 257–262, Sept. 1996.
- [187] K. Sims, "Artificial evolution for computer graphics," *Computer Graphics, ACM SIGGRAPH Conf. Proc.*, vol. 25, pp. 319–328, July/Aug. 1991.
- [188] K. Sims, "Interactive evolution of dynamical systems," in *1st European Conf. on Artificial Life* (F. J. Varela and P. Bourguine, eds.), (Paris, France), MIT Press, Dec. 1991.
- [189] K. Sims, "Interactive evolution of equations for procedural models," *The Visual Computer*, vol. 9, no. 8, pp. 466–476, 1993.
- [190] J. R. Smith, "Designing biomorphs with an interactive genetic algorithm," in *4th Int. Conf. on Genetic Algorithms (ICGA'91)*, (San Diego, CA, USA), pp. 535–538, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers, July 1991.
- [191] H. P. S. Snijder and R. Daru, "GECAD: A creativity supporting sketching tool for genetic layout generation," in *14th Int. Congress on Cybernetics*, (Namur, Belgium), pp. 87–92, Aug. 1995.
- [192] F. Sugimoto, K. Nishio, and N. Honda, "A method of fitness assignment in interactive genetic algorithm using fuzzy reasoning based on psychological measure," *J. of Japanese Society for Artificial Intelligence*, vol. 13, no. 5, pp. 739–745, 1998. (in Japanese).
- [193] F. Sugimoto and N. Honda, "A human interface to search and draw facial images in mind by using psychometrical space model of faces," in *IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE'99)*, vol. 3, (Seoul, Korea), pp. 1585–1590, Aug. 1999.
- [194] F. Sugimoto and M. Yoneyama, "Robustness against instability of sensory judgment in a human interface to draw a facial image using a psychometrical space model," in *IEEE Int. Conf. on Multimedia and Expo*

- (*ICME2000*), vol. 2, (New York, NY, USA), pp. 635–638, July/Aug. 2000.
- [195] Y. Sun and Z. Wang, “Interactive algorithm of large scale multiobjective 0-1 linear programming,” in *Large Scale Systems: Theory and Applications 1992. 6th IFAC/IFORS/IMACS Symposium*, (Beijing, China), pp. 83–86, Oxford, UK: Pergamon, August 1992.
- [196] M. Tabuchi and T. Taura, “Methodology for interactive knowledge acquisition between genetic learning engine and human,” *J. of Japan Society for Artificial Intelligence*, vol. 11, no. 4, pp. 600–607, 1996. (*in Japanese*).
- [197] H. Takagi and K. Ohya, “Improvement of input interface for interactive genetic algorithms and its evaluation,” in *IEICE D-156*, p. 156, Mar. 1996. (*in Japanese*).
- [198] H. Takagi and K. Ohya, “Discrete fitness values for improving the human interface in an interactive GA,” in *IEEE 3rd Int. Conf. on Evolutionary Computation (ICEC’96)*, (Nagoya, Aichi, Japan), pp. 109–112, May 1996.
- [199] H. Takagi, K. Ohya, and M. Ohsaki, “Improvement of input interface for interactive genetic algorithms and its evaluation,” in *12th Fuzzy System Symposium*, (Tokyo, Japan), pp. 513–516, June 1996. (*in Japanese*).
- [200] H. Takagi, “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, June 1996.
- [201] H. Takagi, K. Ohya, and M. Ohsaki, “Improvement of input interface for interactive GA and its evaluation,” in *Int. Conf. on Soft Computing (IIZUKA’96)*, (Iizuka, Fukuoka, Japan), pp. 490–493, World Scientific, October and September 1996.
- [202] H. Takagi, “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, Sept. 1996.
- [203] H. Takagi, T. Unemi, and T. Terano, “Perspective on interactive evolutionary computing,” *J. of Japanese Society for Artificial Intelligence*, vol. 13, no. 5, pp. 692–703, 1998. (*in Japanese*).
- [204] H. Takagi and K. Aoki, “Interactive evolutionary computation: from creativity support to engineering applications,” in *Workshop on Interactive Evolutionary Computation*, (Fukuoka, Japan), pp. 1–6, Mar. 1998. (*in Japanese*).
- [205] H. Takagi, M. Ohsaki, and T. Ingu, “The methods to reduce the burden of human interactive EC operators,” in *Workshop on Interactive Evolutionary Computation*, (Fukuoka, Japan), pp. 47–52, Mar. 1998. (*in Japanese*).
- [206] H. Takagi, “Interactive evolutionary computation: System optimization based on human subjective evaluation,” in *IEEE Int. Conf. on Intelligent Engineering Systems (INES’98)*, (Vienna, Austria), pp. 1–6, September 1998.
- [207] H. Takagi, “Interactive evolutionary computation — cooperation of computational intelligence and human KANSEI —,” in *Int. Conf. on Soft Computing (IIZUKA’98)*, (Iizuka, Fukuoka, Japan), pp. 41–50, World Scientific, October and September 1998.
- [208] H. Takagi and M. Ohsaki, “Automatic optimization of hearing aids based on how user hears,” in *Annual Meeting of Acoustic Society of Japan, 1-2-18*, (Tokyo, Japan), pp. 359–360, Mar. 1999. (*in Japanese*).
- [209] H. Takagi, S. Kamohara, and T. Takeda, “Introduction of Soft computing techniques to welfare devices,” in *IEEE Midnight - Sun Workshop on Soft Computing Methods in Industrial Applications (SMCia/99)*, (Kusamo, Finland), pp. 116–121, June 1999.
- [210] H. Takagi, S.-B. Cho, and T. Noda, “Evaluation of an IGA-based image retrieval system using wavelet coefficients,” in *IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE’99)*, (Seoul, Korea), pp. 1775–1778, Aug. 1999.
- [211] H. Takagi and K. Kishi, “On-line knowledge embedding for an interactive EC-based montage system,” in *3rd Int. Conf. on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems (KES’99)*, (Adelaide, Australia), pp. 280–283, Aug./Sept. 1999.
- [212] H. Takagi and M. Ohsaki, “IEC-based hearing aids fitting,” in *IEEE Int. Conf. on System, Man, and Cybernetics (SMC’99)*, (Tokyo, Japan), pp. 657–662, Oct. 1999.
- [213] H. Takagi, “Auto-optimization for systems based on kanse: from art to engineering and amusement,” in *Fukuoka Academy-Industry Joint Plaza’99*, (Fukuoka, Japan), pp. 64–69, Oct. 1999. (*in Japanese*).
- [214] H. Takagi, T. Noda, and S.-B. Cho, “Psychological space to hold impression among media in common for media database retrieval system,” in *IEEE Int. Conf. on System, Man, and Cybernetics (SMC’99)*, (Tokyo, Japan), pp. 263–268, Oct. 1999.
- [215] H. Takagi, “Active user intervention in an EC search,” in *5th Joint Conf. on Information Sciences (JCIS2000)*, (Atlantic City, New Jersey, USA), pp. 995–998, Feb./Mar. 2000.
- [216] H. Takagi, T. Unemi, and T. Terano, “Interactive evolutionary computation,” in *Genetic Algorithms 4* (H. Kitano, ed.), ch. 11, pp. 325–361, Sangyo Publisher, Aug. 2000. (*in Japanese*).
- [217] H. Takagi and M. Ohsaki, “IEC Fitting: New framework of hearing aid fitting based on computational intelligence technology and user’s preference for hearing,” in *Poster session PB9, Int. Hearing Aid Research Conf. (IHCON2000)*, (Lake Tahoe, CA, USA), pp. 49–50, Aug. 2000.
- [218] H. Takagi, “Computational intelligence with human capability,” in *Int. Symposium on Computational Intelligence (ISCI2000)* (P. Sinčák and J. Vaščák, eds.), pp. 370–384, Košice, Slovakia: Springer-Verlag, Aug./Sept. 2000.
- [219] H. Takagi, “Fusion technology of neural networks and fuzzy systems: A chronicled progression from the laboratory to our daily lives,” *Int. J. of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 10, no. 4, pp. 647–673, 2000.
- [220] T. Tanino, M. Tanaka, and C. Hojo, “An interactive multicriteria decision making method by using a genetic algorithm,” in *36th Annual Conf. of the Institute of Systems, Control and Information Engineers (ISCIE)*, (Kyoto, Japan), pp. 335–336, May 1992. (*in Japanese*).
- [221] T. Tannai and M. Hagiwara, “Colorist: A color designing support system to reflect Kansei,” in *2nd Annual Conf. of JSKE2000*, p. 200, Sept. 2000. (*in Japanese*).
- [222] T. Terano and Y. Ishino, “Data analysis using simulated breeding and inductive learning methods,” in *IJCAI’95 Workshop on Data Engineering and Inductive Learning*, (Montreal, Canada), pp. 60–96, Aug. 1995.
- [223] T. Terano, Y. Ishino, and K. Yoshinaga, “Integrating machine learning and simulated breeding techniques to analyze the characteristics of consumer goods,” in *Evolutionary Algorithms in Management Applications* (J. Bithahn and V. Nissen, eds.), pp. 211–224, Springer-Verlag, 1995.
- [224] T. Terano, Y. Ishino, and K. Yoshinaga, “Integrating machine learning and simulated breeding techniques to analyze the characteristics of consumer goods,” in *Evolutionary Algorithms in Management Applications* (J. B. and V. Nissen, ed.), pp. 211–224, Springer-Verlag, 1995.
- [225] T. Terano and Y. Ishino, “Marketing data analysis using inductive learning and genetic algorithms with interactive- and automated-phases,” in *IEEE Int. Conf. on Evolutionary Computation (ICEC’95)*, (Perth, WA, Australia), pp. 771–776, Nov./Dec. 1995. vol.2.
- [226] T. Terano and Y. Ishino, “Knowledge acquisition from questionnaire data using simulated breeding and inductive learning methods,” *Expert Systems With Applications*, vol. 11, no. 4, pp. 507–518, 1996.
- [227] T. Terano and Y. Ishino, “Interactive knowledge discovery from marketing questionnaire using simulated breeding and inductive learning methods,” in *2nd Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. (KDD-96)*, (Portland, OR, USA), pp. 279–282, Aug. 1996.
- [228] T. Terano, “Evolutionary computation with interactive phases – a tutorial –,” in *Joint Symposium on System and Information*, (Sendai, Japan), pp. 59–64, Nov. 1997. (*in Japanese*).
- [229] T. Terano and Y. Ishino, “Interactive genetic algorithm based feature selection and its application to market-

- ing data analysis,” in *Feature Extraction, Construction and Selection: A Data Mining Perspective* (H. Liu and H. Motoda, eds.), pp. 393–407, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
- [230] T. Terano and M. Inada, “Knowledge discovery from clinical data using interactive evolutionary computation,” in *42nd Knowledge-based Systems of JSAI*, vol. SIG-KBS, (Yokohama, Japan), Jan. 1999. (in Japanese).
- [231] S. Todd and W. Latham, “Artificial Life or surreal art?,” in *1st European Conf. on Artificial Life*, pp. 504–513, MIT Press, 1992.
- [232] S. Todd and W. Latham, *Evolutionary Art and Computers*. Harcourt, Brace, Jovanovich: Academic Press, 1992.
- [233] S. Todd and W. Latham, “The mutation and growth of art by computers,” in *Evolutionary Design by Computers* (P. Bentley, ed.), ch. 9, pp. 221–250, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 1999.
- [234] Y. Todoroki and H. Takagi, “User interface of an interactive evolutionary computation for speech processing,” in *SOFT Kyushu Chapter Meeting*, (Saga, Japan), pp. 13–16, Dec. 1999. (in Japanese).
- [235] Y. Todoroki and H. Takagi, “User interface of an interactive evolutionary computation for speech processing,” in *6th Int. Conf. on Soft Computing (IIZUKA2000)*, (Iizuka, Fukuoka, Japan), pp. 112–118, Oct. 2000.
- [236] N. Tokui and H. Iba, “Composition of rhythms with interactive evolutionary computation,” in *14th Annual Conf. of JSAI*, (Tokyo, Japan), pp. 81–82, July 2000. (in Japanese).
- [237] N. Tokui and H. Iba, “Music composition with interactive evolutionary computation,” in *3rd International Conference on Generative Art (GA2000)*, (Milan, Italy), pp. 215–226, Dec. 2000.
- [238] T. Unemi, “Genetic algorithms and computer graphics arts,” *J. of Japan Society for Artificial Intelligence*, vol. 9, no. 4, pp. 518–523, 1994. (in Japanese).
- [239] T. Unemi, “A user interface for simulated breeding using multi-field,” in *Workshop on Interactive Evolutionary Computation*, (Fukuoka, Japan), pp. 42–46, Mar. 1998. (in Japanese).
- [240] T. Unemi, “A design of multi-field user interface for simulated breeding,” in *Asia Fuzzy System Symposium (AFSS’98)*, (Masan, Korea), pp. pp.489–494, June 1998.
- [241] T. Unemi, “SBART2.4: Breeding 2D CG images and movies, and creating a type of collage,” in *3rd Int. Conf. on Knowledge-based Intelligent Information Engineering Systems (KES799)*, (Adelaide, Australia), pp. pp.288–291, Aug./Sept. 1999.
- [242] T. Unemi, “SBART 2.4: an IEC tool for creating 2D images, movies, and collage,” in *Workshop on Genetic Algorithms in Visual Art and Music*, (Las Vegas, NV, USA), pp. pp.21–23, July 2000.
- [243] T. Unemi and E. Nakada, “A support system for music composition based on simulated breeding,” in *28th Intelligent System Symposium*, pp. 141–146, Society for Instrument and Control Engineers, Mar. 2001. (in Japanese).
- [244] J. Ventrella, “Explorations in the emergence of morphology and locomotion behavior in animated characters,” in *Artificial Life IV.: 4th Int. Workshop on the Synthesis and Simulation of Living System*, (Cambridge, MA, USA), pp. 436–441, MIT Press, July 1994.
- [245] J. Ventrella, “Disney meets Darwin—the evolution of funny animated figures,” in *Computer Animation ’95*, (Geneva, Switzerland), pp. 35–43, IEEE Computer Society Press, Apr. 1995.
- [246] G. Venturini, M. Slimane, F. Morin, and J. P. A. de Beauville, “On using interactive genetic algorithms for knowledge discovery in databases,” in *7th Int. Conf. on Genetic Algorithm (ICGA’97)*, pp. 696–703, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers, July 1997.
- [247] V. Vucic and H. H. Lund, “Self-evolving arts – organisms versus fetishes,” *Muhely – The Hungarian J. of Modern Art*, vol. 104, pp. 69–79, 1997.
- [248] M. Watanabe, S. Sakamoto, M. Ohsaki, and H. Takagi, “Development of an IEC fitting system for commercial

- hearing aids,” in *Technical Report of ASJ, H-2000-6*, (Iwate, Japan), pp. 1–8, Jan. 2000. (in Japanese).
- [249] T. Watanabe and H. Takagi, “Enhancement of distorted speech using interactive GA,” in *11th Fuzzy System Symposium*, (Okinawa, Japan), pp. 183–186, July 1995. (in Japanese).
- [250] T. Watanabe and H. Takagi, “Recovering system of the distorted speech using interactive genetic algorithms,” in *IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC’95)*, vol. 1, (Vancouver, Canada), pp. 684–689, Oct. 1995.
- [251] M. Witbrock and S. Neil-Reilly, “Evolving genetic art,” in *Evolutionary Design by Computers* (P. Bentley, ed.), ch. 10, pp. 251–259, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 1999.



Hideyuki TAKAGI received the degrees of Bachelor and Master from Kyushu Institute of Design in 1979 and 1981, and the degree of Doctor of Engineering from Toyohashi University of Technology in 1991. His professional career includes a researcher at the Central Research Labs of Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. in 1981–1995, a Visiting Industrial Fellow of the UC Berkeley in 1991–1993, and an Associate Professor at Kyushu Institute of Design since 1995.

Dr. Takagi is interested in the cooperative technology of neural networks, fuzzy systems, and evolutionary computation and especially in interactive evolutionary computation. He made significant contribution to the start of neuro-fuzzy system since 1988.

Dr. Takagi received the Shinohara Memorial Young Engineer Award from Institute of the Electronics, Information and Communication Engineers in 1989, the Best Paper Awards from KES’97 and IIZUKA’98 conferences in 1997 and 1998, and the PC Best Paper Awards from ICOIN-15 conference in 2001.

Dr. Takagi has served as a Chair of IEEE SMC Technical Committee on Soft Computing since 1998 and an AdCom member of the IEEE SMC Society in 2001–2003. He has also served for Japan Society for Fuzzy Theory and Systems as a Chair of Kyushu Chapter in 1997–1999, and a member of Executive Committee in 1999–2001 and 2001–2003.