

適合度空間のランドスケープ可視化とユーザの能動的探索による進化計算の高速化

林田, 憲昌
九州芸術工科大学

高木, 英行
九州芸術工科大学

<https://hdl.handle.net/2324/4482093>

出版情報 : MPSシンポジウム論文集 : 進化的計算シンポジウム. 2001, pp. 41-48, 2001-10. 情報処理学会
バージョン :
権利関係 :



適合度空間のランドスケープ可視化と ユーザの能動的探索による進化計算の高速化

林田 憲昌 高木 英行

九州芸術工科大学

takagi@kyushu-id.ac.jp, <http://www.kyushu-id.ac.jp/~takagi/>

概要

本研究では、多次元データの2次元視覚化を用いることによって、人間が能動的に進化計算 (EC) および対話型進化計算 (IEC) の探索に参加することを可能にした、Visualized EC/IEC を提案している。2次元平面上においては、人間は EC には解釈できない探索空間における個体の大まかな分布を把握することが可能なため、最適解の位置を推測できる。初めに、4つの写像方法について、計算速度や収束率、視覚的な印象といった点から5つのベンチマーク関数を用いて比較した結果、自己組織化写像 (SOM) が本提案手法に適していると考えられる。SOM を用いた Visualized GA を用いた実験では、通常の GA よりも少なくとも約5倍早く収束するという結果を得ることができた。

Acceleration of EC Convergence with Landscape Visualization and Human Intervention

Norimasa Hayashida

Hideyuki Takagi

Kyushu Institute of Design

takagi@kyushu-id.ac.jp, <http://www.kyushu-id.ac.jp/~takagi/>

Abstract

We propose Visualized EC/IEC as an evolutionary computation (EC) and interactive EC (IEC) with visualizing individuals in a multidimensional searching space in a 2-D space. This visualization helps us envision the landscape of an n -D searching space, so that it is easier for us to join an EC search by indicating the possible global optimum estimated in the 2-D mapped space. We first compare four mapping methods from the points of view of computational time, convergence speed, and visual easiness to grasp whole EC landscape with 5 benchmark functions. Then, we choose self-organizing maps for the projection of individuals onto a 2-D space and experimentally evaluate the effect of visualization using a benchmark function. The experimental result shows that the convergence speed of GA with human search on the visualized space is at least five times faster than a conventional GA.

1 はじめに

現在、インタラクティブ進化計算 (IEC) は、補聴器のフィッティングや、音声の歪改善、3次元CGのライティングといった様々なアプリケーションに用いられている [10, 11, 19, 14]。しかし、それらはいずれもユーザの負担が大きいうという共通した課題を抱えており、IECをより実用的なものにするためにはインターフェイスを改善していかなければならない。

従来の IEC では、EC のみが探索を行い、人間は

その探索結果をひたすら評価するだけという受動的なものであるために収束率が低下し、その結果としてユーザが受ける心理的・肉体的負担が大きくなっている。

本研究では、ユーザ自らが能動的に最適解の探索に参加できるようなシステムを構築することにより、ユーザの心理的負担の緩和と、収束の高速化による肉体的負担の軽減を目指している [12, 13, 3, 2]。このようなコンセプトに基づき提案された手法のひとつがオンライン知識組み込みである。これは被験者が

探索の最中に思い浮かんだ知見をインターフェイスを通して探索に反映させる方法である。例えば、進化計算の探索結果が優れていると思われる特定のパラメータを、操作者が固定することによって探索空間を限定するという手法を用いる。主観評価実験により、この手法の有効性は既に認められている [12]。

本研究では、オンライン知識組み込みと同様のコンセプトに基づいた Visualized EC/IEC という手法を提案している。これは、多次元空間を 2 次元に写像し、過去の EC の探索結果を提示することで、操作者が EC の探索に関与することを可能とするものである [13, 3, 2]。

ユーザによる介入に要する時間は EC の探索に比べて長いので、Visualized EC は評価値の計算に非常に時間がかかる場合にしか適用できない。しかし、そのようなタスクは多く存在し、例えば地質学におけるシミュレーションでは、各世代において全個体の評価値を計算するのに 30 分～2 時間もかかる [1]。一方 Visualized IEC は、人間が個体群の評価を行うのに時間がかかるため、あらゆる場合において適用できる。そのため、ここでは評価実験を除いては Visualized IEC を中心に扱っていくことにする。

本研究では初めに Visualized IEC を提案し、次に 4 つの写像方法について、どの手法が Visualized IEC に適しているのかを 5 つのベンチマーク関数を用いて比較する。そして最後に、収束率について通常の EC と比較を行う。なお、評価実験においては、EC として遺伝的アルゴリズム (GA) を用いており、本論文では Visualized GA/IGA という表現を用いる場合もある。

2 Visualized IEC

2.1 Visualized IEC とは？

Visualized IEC とは、EC と人間、それぞれの探索法が持つ異なる長所を組み合わせた手法である。EC は直接的に多次元空間の探索を行うことができ、その能力は人間よりもはるかにすぐれている。しかしながら一方で、人間は、2 次元平面上においては、EC には解釈できない探索空間における個体の大まかな分布というものを把握する能力に長けており、探索の方向性といったものを指示できる。

従来の IEC では、EC が探索を行い、操作者は個体の評価のみを行う。また一方で、2 次元視覚化を利用した 3 次元 CG 作成支援ツール [7] や、ヴァイオリンの音色を評価するシステム [6] などがすでに提案されているが、これらのアプリケーションでは操作者の手により探索と評価の両方が行われている。Visualized IEC では、人間と EC が協力し、それぞれの長所を生かした探索を行うことによって収束の高速化を目指している。

2.2 多次元データの 2 次元視覚化

人間は、多次元のパラメータを持つ個体間の関係性を把握することが不得意であり、探索空間から何らかの情報を得たり与えたりすることは困難である。しかし、そのパラメータ間の関係性を基に 2 次元にまで次元数を落とし視覚化することで、個体間の大まかな関係性を把握することが容易になる。もちろん、次元数を落とすことにより個体が持つ情報のいくらかは失われてしまうが、個体間の関係性は保持されるため、探索空間全体の把握が可能となり、何らかのインタラクションを与える際には都合がよい。また、個体間の関係性が保持されるため、2 次元平面上においては、評価値の高い個体の周辺に評価値の高い個体が集まる可能性が高くなっている (図 1)。

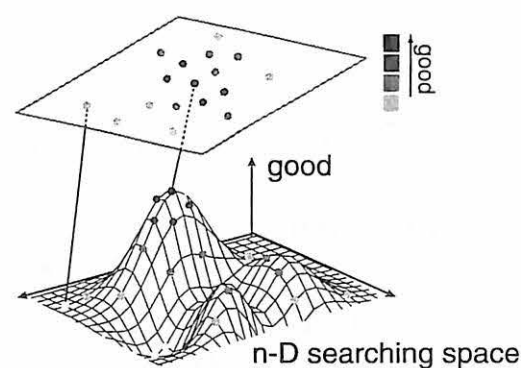


図 1: 写像のイメージ。データ間の関係性を保持したまま 2 次元平面上に写像される。

2 次元可視化法にはすでに様々な手法が提案されており、主成分分析法や、Sammon's Non-linear Mapping (NLM) [9]、Self-Organizing Maps (SOM) [18]、VISOR [4]、TOPAS [5] といった手法や、Genetic Programming を用いる方法 [16] などがある。いずれも Visualized IEC に適用することは可能であるが、それぞれが持つ特徴が異なるため、どの手法が最も Visualized IEC に適しているかを実験により比較する必要がある (3 節参照)。

2.3 Visualized IEC の構築

IEC とは、音や CG の生成といった人間の感性に依存するようなタスクのパラメータを EC が最適化し、その出力結果をユーザが自身の感性に基づいて評価し、その値を EC に渡すことによってユーザにとって最適な出力結果を得ることができるというものである (図 2(上) 参照)。

Visualized IEC では音や CG に加えて、EC が過去に探索した個体群をそのパラメータを基に写像し、2 次元平面上に提示する (図 2(下) 参照)。各個体をその評価値を基に分類し、例えば、グレイスケールや異なる色・大きさをを用いるといった方法で表すことにより、探索空間の形状を視覚化している。ユー

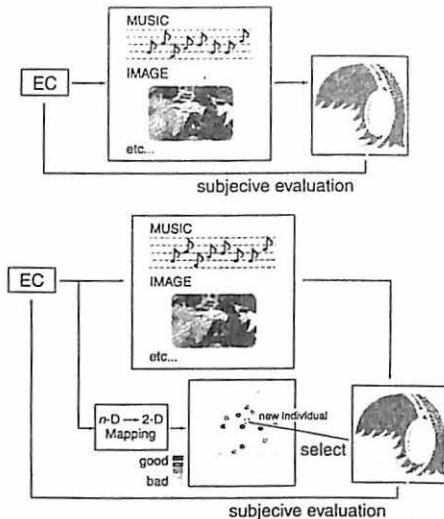


図 2: IEC(上) と Visualized IEC(下)

ずは自分が求めるイメージに近い個体、つまり評価値の高い個体が集中していそうな領域の1点を選択し新たな個体を生成する。多次元空間上で近傍に存在する個体は2次元平面上でも近傍に位置するように写像されているため、新たに生成される個体もまた、操作者の求める個体と類似することが期待される。新たに生成された個体は、評価値の低い個体と入れ替えられ、進化計算側は通常の演算を行う。

このような手法を用いることにより、毎世代ごとに優秀な個体がユーザの手によって追加される可能性が高く、収束が早まることが期待できる。

3 写像法の比較評価実験

ここでは、NLM[9]、VISOR[4]、SOM[18]の4つの写像法について、どの手法がVisualized EC/IECに最も適しているのかを探るために、5つのベンチマーク関数(表1)を用いて写像性能や計算時間といった面から比較する[8]。

3.1 計算時間による比較

4つの写像法を用いて2500点を写像するのにかった各世代ごとの平均計算時間(CPU Time)を比較した結果を表2に示す。なお、本実験に用いたPCのCPUはPentium II 400MHzで、OSはRed Hat Linux 6.1Jである。

ただし、TOPASについては大幅に時間がかかったため、データ数を減らし、Schaffer F2を用いて実験を行ったところ、表3のようになった。データ数を n 、時間を t とした場合の近似関数は、 $t = 10^{-6} * n^{3.9851}$ で表され、計算の複雑さは $O(n^4)$ であると考えられる。これは実際のプログラムにおいて4重ループが存在することからも推測できる。これより、2500点

表 1: ベンチマーク関数

関数名	数式
DeJong F1	$\sum_{i=1}^3 x_i^2$
DeJong F3	$\sum_{i=1}^5 [x_i] + 26.0$
DeJong F5	$[\frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^5 (x_i - a_{ij})^6}]^{-1}$
Schaffer F1	$0.5 + \frac{(\sin \sqrt{\sum_{i=1}^4 x_i^2})^2 - 0.5}{1.0 + 0.001(\sum_{i=1}^4 x_i^2)^2}$
Schaffer F2	$(\sum_{i=1}^5 x_i^2)^{0.25} * [\sin^2(50(\sum_{i=1}^5 x_i^2)^{0.1}) + 1.0]$

を写像するには約452日かかると予想される。

表 2: 各ベンチマーク関数において3種類の手法を用いて写像した場合に要した時間(秒)

	SOM	NLM	VISOR
DeJong F1	3	1376	1
DeJong F3	4	1342	1
DeJong F5	3	6119	1
Schaffer F1	4	1328	1
Schaffer F2	4	2708	1

実験結果より、(1)NLMとTOPASはVisualized EC/IECに用いるには時間がかかりすぎる、(2)VISORが最も早い、SOMの計算速度も許容範囲である、といったことが言える。よって、以降の2つの実験にはVISORとSOMのみを用いることにする[8]。

3.2 見やすさによる比較

SOM、VISORの2つの手法について見やすさの点から比較する。28人の学生に、各写像法を適用したVisualized GAを使って表1に示した5つの関数の最適解を探索してもらい、どちらの手法を用いた場合の方が直感的に探索空間全体を把握しやすく容易に優秀な個体を見つけることができたかを比較させ、符号検定を行った。実験結果を表4に示す。

図3はSchaffer F2の最適解を探索した際の、5世代目における2次元平面上に写像されたデータの様子を表したものである。それぞれ2500点が写像されており、各点はその評価値に基づいて異なる色で表されている。SOMを用いた場合にはデータが広く散らばっているのに対し、VISORでは局所的に点が

表 3: Schaffer F2 において TOPAS を用いて写像した場合に要した時間 (秒)

データ数	CPU time	データ数	CPU time
100	139	220	2784
120	237	240	3941
140	487	260	6263
160	813	280	8379
180	1279	300	10870
200	1921		

表 4: 28 人の学生に、SOM と VISOR のどちらの手法を用いた場合の方が容易に優秀な個体を見つけることができたかを比較させ、符号検定を行った結果。** は ($p < 0.01$) を意味する

関数名	SOM	VISOR	SAME	sign test
DeJong F1	27	0	1	**
DeJong F3	23	2	3	**
DeJong F5	22	1	5	**
Schaffer F1	25	2	1	**
Schaffer F2	25	0	3	**

集まっている場所がいくつかある。これより、SOM が VISOR に比べて、高次元空間における情報を 2 次元平面上においてもより多く保持しているのではないかと推測される。このため、SOM を用いた場合の方が探索空間の情報を把握しやすく、被験者が容易に優秀な個体を見つけることができたのではないかと考えられる [8]。

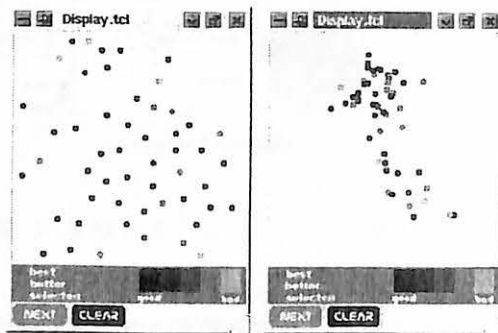


図 3: GA の探索空間を視覚化した例。SOM を用いた場合 (左) と VISOR を用いた場合 (右)。

3.3 収束率による比較

2 種類の写像法を適用した Visualized GA の収束率の比較を、表 1 に示した 5 つのベンチマーク関数

を用いて行った。GA のパラメータは、交差率 0.9、突然変異率 0.02、個体数 20 に統一し、32bit の実数コーディングを用いている。また、毎世代ごとに各写像法を用いてあらかじめ 10,000 点を写像している。28 人の学生を用いて実験を行い、その平均値をとった。

図 4 に 2 種類の Visualized GA の収束率の平均値を示す。いずれも 5 世代目までしか示していないが、これは、Visualized GA では収束率の違いが 5 世代目までに顕著に現れるからであり、また、主観評価実験においては被験者の負担が大きくなりすぎないことが重要だからである。

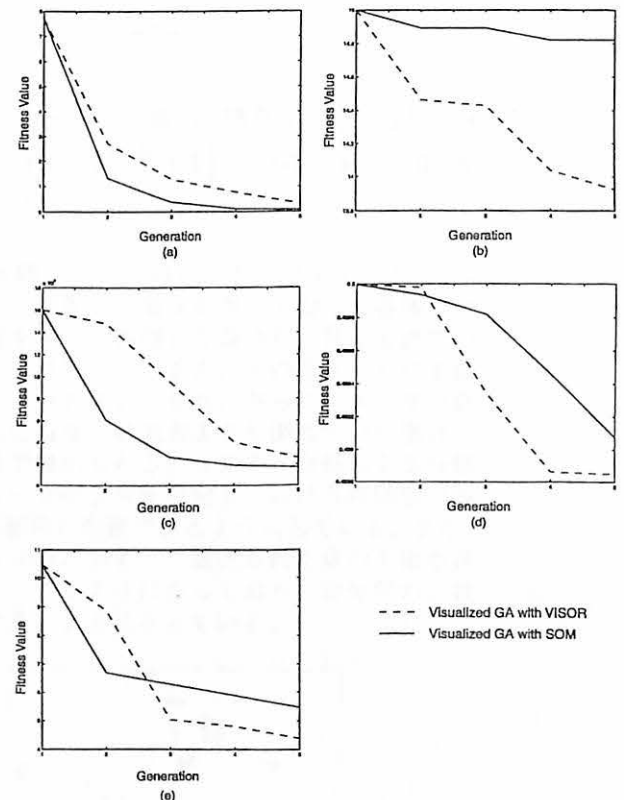


図 4: 2 種類の Visualized GA の収束率の平均値。(a) DeJong's F1, (b) DeJong's F3, (c) DeJong's F5, (d) Schaffer's F1, (e) Schaffer's F2.

また、2 種類の Visualized GA の 5 世代目における最適値を比較し、符号検定を行った。表 5 に結果を示す。図 4(c) と検定結果が一致していないように思われるが、これは、グラフは 28 人の被験者の平均値であるため、飛び抜けて良い、あるいは悪い被験者の影響を受けてしまっているからである。また、DeJong F3 において "SAME" だった人が 18 人もいるのは、5 世代では全く収束させることができなかったためである。

以上より、2 種類の Visualized GA の善し悪しはタスクによって異なると考えられる [8]。

表 5: 28 人の学生に SOM と VISOR を適用した VisualizedGA を用いて探索を行わせ、その収束率を比較し、符号検定を行った結果。** および * はそれぞれ ($p < 0.01$)、($p < 0.05$) を意味する

関数名	SOM	VISOR	SAME	sign test
DeJong F1	23	5	0	**
DeJong F3	3	7	18	
DeJong F5	20	8	0	*
Schaffer F1	20	8	0	*
Schaffer F2	8	20	0	*

3.4 考察

実験結果より、(1)VISOR は SOM よりも計算時間が短い、(2)SOM を用いた場合の方が探索空間の形状を把握しやすい、(3) 収束率に関してはタスクに依存する、といったことが言える。本研究ではユーザの負担を軽減することを目的としていることから、良い個体を探索しやすいということがより重要であり、さらに計算速度も許容範囲であると言えることから、SOM を用いるのが妥当であると考えた。よって、以降の実験では SOM を用いることとする。

4 収束率の評価実験

4.1 実験方法

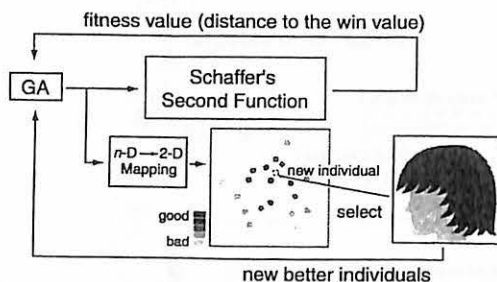


図 5: 実験システム

ユーザの介入により、EC の収束率がどの程度改善されるのかを評価するための実験を行う。図 5 のような実験システムを用いて、任意の n 次元関数の最適値を探索し、通常の EC を用いた場合との収束率の違いを比較する。探索空間には、Schaffer の第 2 関数 (図 6) の次元数を変化させたものを用いる。実際の最適値は 0 である。この実験では、ユーザは個体の評価を行う必要がなく、2 次元平面上においてより優秀な個体を探索するのみである。そのため、本実験は Visualized IEC と IEC を比較するものではなく、Visualized EC と EC を比較するものとなっているが、これによってユーザの介入がどの程度収

束率に影響を及ぼすことができるのかを知ることができる。なお、ここでは EC に GA を用いているので、以下 Visualized GA と記述し、GA と比較している。

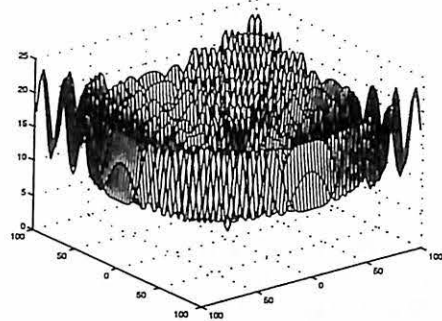


図 6: Schaffer の第 2 関数。 $(\sum_{i=1}^n x_i^2)^{\frac{1}{4}} * \left\{ \sin^2(50 * (\sum_{i=1}^n x_i^2)^{\frac{1}{10}} + 1) \right\}$, $-100 \leq x_i \leq 100$ かつ $n = \{3, 5\}$ 。

図 7 が実験システムのインターフェイスである。2 次元平面上の各点が個体を表しており、各個体はその評価値を基に 5 段階に分類され、異なる濃度の青色で表示されている。また、その世代における最適解はオレンジ色で表示され、さらに、ユーザが新たに生成した個体が最適解よりも優れていた場合にはピンク色で表示される。このような色による分類により、ユーザが 2 次元平面上における評価値の偏り具合を直観的に判断できるようにしている。また、濃度による分類に加えて、選択された点の正確な評価値が表示されるようになっており、個体間の比較が容易にできるようになっている。

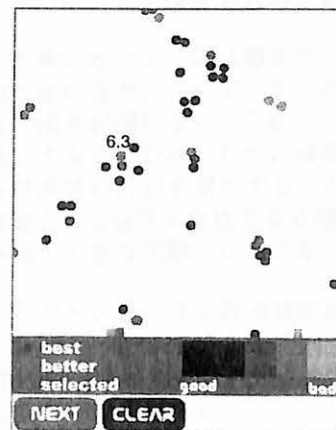


図 7: インターフェイス。図は 2 世代目の様子で、40 個体 (= 20 個体 × 2 世代) と新たに生成された個体が写像されている。

ユーザは、2 次元平面上においてどの領域に評価値の高い個体が集中しているかを判断し、その周

辺に新たな個体を生成する。実験では、最大で3点まで生成することができるものとし、その中から最も評価値の高い個体1点のみを次世代に渡すことができることにした。なお、3節で述べたように、写像法にはSOMを用いることにした。GAおよびSOMの各パラメータを表6に示す。各世代における最適値を求め、通常のGA演算を行った場合と比較する。なお、値は5人の被験者の平均をとっている。

表 6: GA と SOM のパラメータ

GA		SOM	
個体数	20	学習回数	1000
交叉率	0.9	近傍関数	ステップ関数
突然変異率	1/80	近傍領域	5
世代数	10	学習率	0.4
ビット長	16	ユニット数	200 × 200

4.2 実験結果

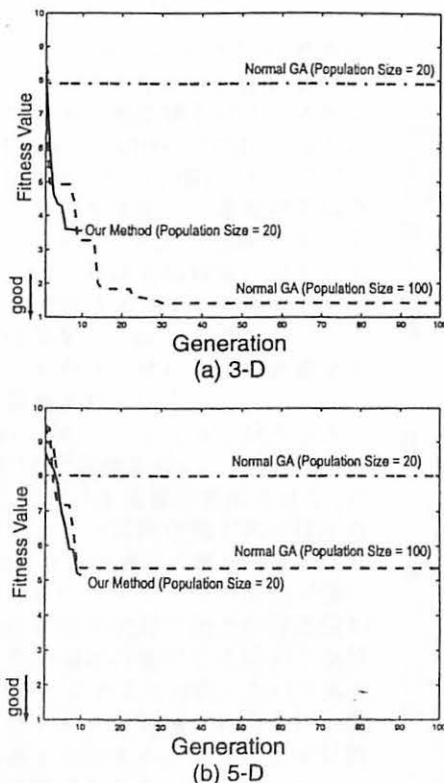


図 8: 実験結果。それぞれ (a) 次元数 3, (b) 次元数 5 の場合。

次元数 3、5 の場合についての実験結果を図 8 に示す。通常の GA に関しては比較のために個体数 20 の場合に加えて、100 の場合についても実験し、100

世代目まで演算させている。グラフより、個体数が同じならば次元数 3、5 いずれの場合においても Visualized GA を用いた方が明らかに収束が早まっている。通常の GA で 5 倍の個体数を用いた場合ともほぼ同等の収束率を実現することができた。

4.3 考察

実験より、本提案手法の効果にはやや個人差が見られたものの、全体的には通常の GA のみを用いた場合よりもはるかに早い収束を実現することができた。IEC においては、人間が持つ体力や集中力に限界があるため、各世代においてユーザが評価することのできる個体数は多くて 20 個体程度であり、せいぜい 20 世代目程度までしか続けられない。それゆえ、本提案手法を用いることによって得られる、少ない個体数で多くの個体数を用いたときと同程度、あるいはそれ以上に早い世代における収束というのは IEC において効果的であると言え、今後の本格的な応用が期待できる。

通常、探索空間の次元数が高くなるほど GA の収束率は悪くなるが、本提案手法を用いることにより、被験者によっては探索空間の次元数に関係なく、いずれの関数においても同じような収束の仕方をしており、場合によっては次元数が高いときの方が高い収束率を示すことさえあった。これより、本提案手法は探索空間の次元数の影響を通常の GA よりも受けにくいと考えられ、パラメータの多いデータ群から最適なものを見つけ出すというタスクにおいてより高い威力を発揮するものと期待できる。

実験において、特に個体数が少ない場合、つまり初期世代などにおいて、2 次元平面上にうまく評価値の偏りが現れないことがあり、ユーザの判断を困難にすることがあったが、最悪でもその世代における最適値の近辺を選択することにより、より高い評価値をもつ個体を生成できる確率が非常に高いため、さほど大きな問題にはならないと考える。

万が一、ユーザが評価値の低い個体を生成・選択してしまったとしても、それは単に悪い個体が 1 つ増えただけにすぎず、次の世代では自然淘汰されてしまうため問題ない。

実験において、最大の問題点と感じられたのは、SOM による写像の際に、学習にかなりの時間が費やされてしまう点にある。しかしこれは、各世代ごとに 40,000 もの点 (= 200 × 200, 表 6 参照) を写像しているからであり、マップサイズを縮小することによって大幅に計算時間が短縮されることが確認されている。よって、マップサイズと視覚的な面での折り合いをうまくつけ、データを間引くことで解決可能だと考えている。

5 Visualized IEC の応用

実験により、本提案手法の有効性が認められ、本格的な IEC への応用が期待できる。そこで、ここでは本提案手法を実際のアプリケーションに導入した例について示す。

5.1 IEC 音声処理システムへの応用

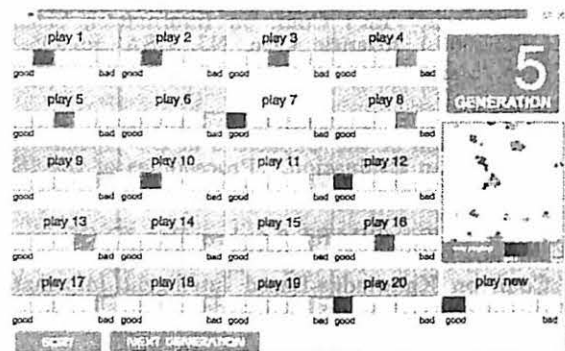


図 9: Visualized IEC を用いた音声処理システム

図 9 は Visualized IEC を組み込んだ IEC 音声処理システムのインターフェイスである。IEC 音声処理システムとは、主に音声の歪改善を行うシステムのことである [17]。125Hz、250Hz、500Hz、1kHz、2kHz、4kHz における増幅レベル [dB] の 6 つのパラメータを基にフィルタ特性を決定し、歪音声を処理する。処理音はインターフェイス上の play ボタンを押すことで提示され、ユーザは各処理音に対する評価値を各 play ボタンの下にあるボタンを用いて 5 段階で入力し、その評価値をもとに GA 演算が行うことによって各パラメータがユーザにとって最適な音声を得られるように調整されていく。

本システムではそれに加えて、GA が生成する各パラメータ群を基に SOM が写像を行い、各個体 (フィルタ) の 2 次元平面上における位置が表示される (図 9 の右側)。評価を行うボタンは評価値が高いほど濃い色で表されているが、2 次元表示の部分もまたこれと連動して、評価値の高いフィルタを示す点が濃い色で表示される。操作者は 2 次元平面上の評価値の偏り具合を判断し、良い個体の集中しているような位置をクリックすることで、その点に対応したパラメータにより決定されるフィルタで処理された音声提示され、同様に評価値を入力する。個体の生成は操作者が気に入るまで何度でもでき、next generation ボタンを押す前に、最後に生成し評価した個体が次の世代に渡される。

図 9 は 5 世代目の様子を表したもので、2 次元平面上には (20 × 5) 個体 + 操作者によって生成された個体が表示されている。図より、評価値の高い個体がある 1 カ所に多く存在していることがわかる。操作者はこの付近を探索することで、より自分にとっ

て聞き取りやすい音声を生成するフィルタを素早く見つけ出すことができると考えられる。

5.2 室内照明デザインシステムへの応用

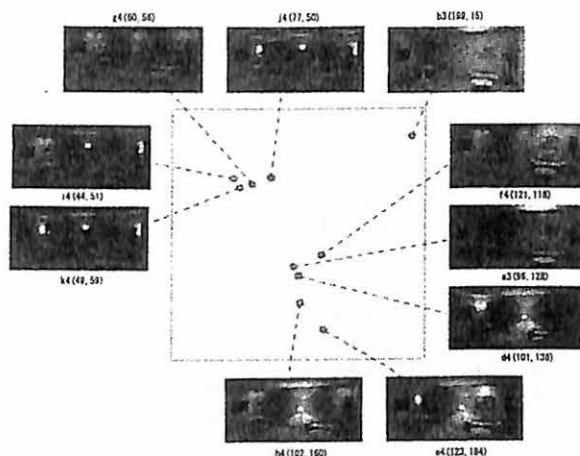


図 10: 2 次元平面上に写像された室内照明をシミュレートした CG

CG によって部屋の照明をシミュレートし、ユーザの趣味や目的に見合った照明の位置や明度を決定するシステムへの Visualized IEC の応用が現在進められている。図 10 は 7 次元のパラメータによって生成される CG を 2 次元平面上に写像した様子を示している。似通った CG が 2 次元平面上の近傍に集まる傾向が現れており、ユーザの理想とする照明の配置を探しだす手助けとなることが期待される。

6 まとめ

本研究では、IEC を用いたアプリケーションが抱える課題の 1 つである操作者の負担軽減のために、多次元データの 2 次元視覚化を用いた能動的探索法として Visualized IEC を提案している。

本論文では、初めに 4 つの写像法について比較を行い、SOM を用いることにした。次に、SOM を適用した Visualized GA と通常の GA の収束率を比較した結果より、本提案手法を用いることで 5 倍以上早い収束を実現できるものと考えられ、ユーザの負担軽減が期待できる。

今後の本格的な Visualized IEC の応用に向けて、2 つの例を示したが、いずれの場合においても、2 次元表示の部分に関しては理想的な結果が現れており、今後、実際に操作者がより素早く優秀な個体を得ることができるかを主観評価実験を行って検証していく必要があるだろう。

謝辞

本論文は、科研基盤研究 (C)(2) No.13680451 の補助を受けている。

参考文献

- [1] Boschetti, F. and Moresi, L.: "Comparison between interactive (subjective) and traditional (numerical) inversion by genetic algorithms," Congress on Evolutionary Computation (CEC2000), La Jolla, CA, USA, pp.522-528 (July, 2000).
- [2] Boschetti, F. and Takagi, H.: "Visualization of EC Landscape to Accelerate EC Conversion and Evaluation of its Effect," Congress on Evolutionary Computation (CEC2001), Seoul, Korea, (May, 2001).
- [3] Hayashida, N. and Takagi, H.: "Visualized IEC: Interactive Evolutionary Computation with Multidimensional Data Visualization," IEEE Int'l Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON2000), Nagoya, Japan, pp.2738-2743 (Oct., 2000).
- [4] König, A., Bulmahn, O., and Glesner, M.: "Systematic methods for multivariate data visualization and numerical assessment of class separability and overlap in automated visual industrial quality control," 5th British Machine Vision Conf., vol.1, pp.195-204 (Sept., 1994).
- [5] König, A.: "A survey of multivariate data projection, visualization and interactive analysis," 5th Int'l Conf. on Soft Computing and Information/Intelligent Systems (IIZUKA'98), Iizuka, Japan: World Scientific, Singapore, pp.55-59 (Oct., 1998).
- [6] König, A., Blutner, F. E., Eberhardt, M., and Wenzel, R.: "An acoustic data base navigator for the interactive analysis of psycho-acoustic sound archive," 5th Int'l Conf. on Soft Computing and Information/Intelligent Systems (IIZUKA'98), Iizuka, Japan: World Scientific, Singapore, pp.60-63 (Oct., 1998).
- [7] Marks, J., Andalman, B., Beardsley, P. A., et al: "Design Galleries: A general approach to setting parameters for computer graphics and animation," 24th Int'l Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'97), pp.389-400 (Aug., 1997).
- [8] Pratihari, D. K., Hayashida, N., and Takagi, H.: "Comparison of Mapping Methods to Visualize the EC Landscape," 5th Int'l Conf. on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems & Allied Technologies, Osaka, Japan, pp.223-227 (Sept., 2001).
- [9] Sammon, J. W.: "A nonlinear mapping for data structure analysis," IEEE Trans. on Computers C-18, no.5, pp.401-409 (1969).
- [10] Takagi, H.: "Interactive Evolutionary Computation: System Optimization Based on Human Subjective Evaluation," IEEE Int'l Conf. on Intelligent Engineering Systems (INES'98), Vienna, Austria, pp.1-6 (Sept., 1998).
- [11] Takagi, H.: "Interactive Evolutionary Computation - Cooperation of computational intelligence and human KANSEI -," 5th Int'l Conf. on Soft Computing and Information/Intelligent Systems (IIZUKA'98), Iizuka, Fukuoka, Japan: World Scientific, Singapore, pp.41-50 (Oct., 1998).
- [12] Takagi, H. and Kishi, K.: "On-line knowledge embedding for an interactive EC-based montage system," 3rd Int'l Conf. on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems, Adelaide, Australia, pp.280-283 (Aug./Sept., 1999).
- [13] Takagi, H.: "Active User Intervention in an EC Search," Int'l Conf. on Information Sciences (JCIS2000), Atlantic City, NJ, USA, pp.995-998 (Feb./Mar., 2000).
- [14] Takagi, H.: "Interactive Evolutionary Computation: Fusion of the Capacities of EC Optimization and Human Evaluation," Proceedings of the IEEE (2001).
- [15] Unemi, T.: "SBART 2.4: breeding 2D CG images and movies and creating a type of collage," 3rd Int'l Conf. on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems, Adelaide, Australia, pp.288-291 (Aug./Sept., 1999).
- [16] Venturini, G., Slimane, M., Morin, F., and Asselin de Beauville, J. P.: "On using interactive genetic algorithms for knowledge discovery in databases," 7th Int'l Conf. on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann Publisher, pp.696-703 (1997).
- [17] Watanabe, T. and Takagi, H.: "Recovering system of the distorted speech using interactive genetic algorithms," IEEE Int'l Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Vancouver, Canada, vol.1, pp.684-689 (Oct., 1995).
- [18] T. コホネン著, 徳高平蔵・岸田 悟・藤村喜久郎訳, 「自己組織化マップ」, シュプリンガー・フェアクラーク東京 (1996).
- [19] 青木研, 高木英行, 「対話型 GA による 3 次元 CG ライティングデザイン支援」, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J81-DII, No.7, pp.1601-1608 (1998).