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

インタラクティブ進化計算

高木，英行
九州大学大学院芸術工学研究院

https://hdl.handle.net/2324/4488444

出版情報：Journal of the Japan Society for Simulation Technology. 23 (3), pp.21-26, 2004.
Japan Society for Simulation Technology
バージョン：
権利関係：Copyright © 2004 Japan Society for Simulation Technology. All rights reserved.

KYUSHU UNIVERSITY

小特集

インタラクティブ進化計算

高 木 英 行*

ABSTRACT In this paper, we introduce interactive evolutionary computation (IEC) and overview its research on applications and interface. First, we discuss the technical aspect of the IEC and why the IEC becomes popular from historical point and new concept, Humanized Computational Intelligence point of view. Then, we overview IEC application-oriented research and IEC interface research to reduce human fatigue problem. After this overview, we pick up some IEC research and introduce them in a little detail.

1. はじめに

システム最適化は昔から広く行われてきた技術で，設計やシミュレーションの要とも言える．最適化には必ず性能評価を測る尺度が必要で，この尺度が最適化の方向，探索の方向を決定する．制御，信号処理，パターン認識など，ほとんどのシステム最適化では数値的ゴール・仕様と実際のシステム出力との誤差を計測し，誤差最小化規範でシステムパラメータを最適化する．このような数値的ゴールを与えることができない場合，最適化手法が適用できず，最適化の対象外とされてきた．

しかし，画像・音楽の生成・処理システムや人工現実感や振動生成などの，人間が見たり聞いたり触ったりしないと評価できないシステムの場合，望ましい出力の基準を持ち合わせる人間のみが評価できる．このように性能評価を測る尺度が心理尺度である場合には，従来の最適化手法をそのまま適用することができないため，主観的な評価値に基づいた最適化の枠組みが必要になる．

インタラクティブ進化計算(IEC，対話型進化計算)は，このような枠組みの中で最適化手法に進化計算を用いる手法である(**図1**)．評価尺度である適応度関数を人間そのものに置き換えた進化計算手法と言える．すなわち，進化計算が複数の最適解候補を生成する．個々の解に対応するシステム出力がユーザに提示され，ユーザは知識，好みなどに基づいた主観的評価値を進化計算へ返す．進化計算は1世代分の評価値を基に，次世代の解候補を生成する．ユーザが満足できる解が得られるまでこの作業を繰り返す．

進化計算には，遺伝的アルゴリズム，進化的戦略，進化的プログラミング，遺伝的プログラミングがあるが，どの手法でもIECは構成できる．人間－機械のインタラクション系に進化計算が使われている場合もIECと呼ばれることがあるが，通常IECと言えば，図1のように人間の評価値に基づいて進化計算が対象システムを最適化する場合を指す．

IECで用いる進化計算には少ない個体(解候補)数で早い時期での収束が求められる．これはIECユーザの疲労問題，人間の評価判断時間，ディスプレイの個体提示数の制約などによるものである．現実的な話，IECユーザが評価できるのは，10～20個体程度で，せいぜい10～20世代程度までであろう．

通常の進化計算の感覚ではあまりにも探索点が少なすぎて収束するのが信じられない，と思われる読者も多かろうと思う．また人間の評価は揺らぐだろうがそれでも収束するのかという懸念もお持ちだろう．しかし，現実にIECが使える技術であることは応用の数が示している．なぜだろうか？それは両者が求める探索精度が異なるからである．IECでは人間の評価判断で

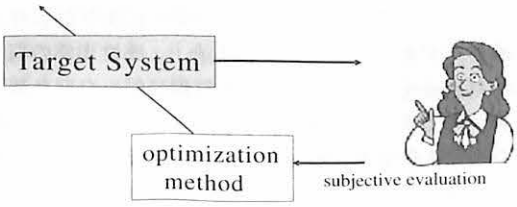


図1 インタラクティブ進化計算の枠組み

Interactive Evolutionary Computation. By *Hideyuki Takagi* (Faculty of Design, Kyushu University).

*九州大学大学院芸術工学研究院

区別を付けられないものはすべて同じある．たとえシステム出力の差が認識できても評価の区別がつかなければ同じである．例えば，歴代のカローラの形状の区別は誰でも付くが，「カローラ」というデザインコンセプトでは皆同じである．すなわち，通常進化計算が最適解1点を目指すのに対して，IECは最適解近傍へいかに早く辿り着くかが求められる技術である．

人間の評価はn段階評価値を行う．100点満点でもよいが，人間の評価の分解能がそれほど高いわけではないので，評価判断の疲労軽減の観点からはnが小さいほどよい．究極は人工交配のような選ぶか選ばないか($n=2$)の2段階評価で模擬育種と呼ばれる．しかし，nが小さくなるに連れて小さな評価の差異を無視する量子化誤差が増えるため，収束の悪化も懸念され，疲労の観点からはトレードオフ問題になる．この問題を主観評価実験で確かめた研究もある．

IECの最大の課題は，IECユーザの疲労問題である．コンピュータ相手に毎世代多くの個体数を評価し続けるには限界がある．この問題への取組みは第3節で述べる．

2. 人間要素の重要性

IEC技術が必要になってきた背景の1つに人間要素が重要視されてきたことがある．この事情を知能情報の分野で見てみよう．

1980年代後半は，ファジィシステム，ニューラルネット，進化計算の3本柱が立ち上がった時期であり，90年代にかけて産業システムや民生機器に応用された．また，90年代前半にはこれらの融合化技術も盛んになり，各種システムに利用され始めた．当時の電器店ではファジィやニューロの名前を目にしないことはない盛況ぶりであった．

では，今後この分野ではどのような展開が見られるであろうか．筆者は人間要素を取り込んだ知能情報技術が重要になってくると考えている．人間には知能の側面と感性の側面があるが，これまでの知能情報の技術は知識工学に代表されるように，推論，知識獲得・表現，連想・学習などの知能の側面を主に扱ってきた．しかし，好み，主観，直感などの感性は工学的に扱うためのモデル化が難しいこともあり，感性工学の取り組みはあるものの，これまで知能面に偏った取り組みであったと言わざるを得ない．しかし，今後は感性面も含めた人間要素がもっと要求されるようになると考えられる．

例えば，制御やロボットを考えてみよう．位置，速度，障害物等の計測可能な物理的データを扱っている限り，従来の制御工学や機械工学で対応できる．しかし，最近の民生用ロボットが求められるのは，「かわいい」動きや反応，癒し効果がある表情や動き，優しさを感じさせる振る舞い，等である．これらは人間要素の考慮なしでは設計不可能である．

データマイニングでも同様である．データを視覚化したりデータから知識を取り出したりする手法は既にある．しかし，獲得した知識の質の良し悪しはその分野の専門家でないと分からない．より質の高い知識をマニュアルで獲得する場合はもちろんのこと，知識の洗練化を自動化する場合も質の良し悪しが判断できる人間の協力なしではできない．

数式ベースが主流の信号処理は，人間の感性を組み込むことは一見すると縁が薄いように思われるかもしれない．しかし，雑音除去，歪補正，補聴器フィッティング，医療画像強調など，最終的には人間の視聴覚を通した判断がすべて，という応用は多い．補聴器の例が典型的であるが，ユーザの聴覚特性の計測は極一部しかできないし，単語や音韻明瞭度のように数値計測可能な尺度だけでフィッティングを評価することはできず，最終的にはユーザの聞こえの「好み」も重要な評価要素となる．

以上の例からも分かるように，これからの要求を満たすためには，人間要素を扱うことができるよう従来の工学技術を拡張する，あるいは，従来の工学技術と人間とを組み合わせる枠組みが必要になる．このような知能化技術を筆者はHumanized Computational Intelligenceと呼んでいるが，この技術が，80年代の主要知能化技術の実用化，90年代の融合化技術，に続く人間との融合化・協調化技術の流れになっていくと思われる．近年の工学における人間中心技術・ユーザインタフェースデザイン，ユニバーサルデザインなどもこの人間要素を重視する流れと言えよう．

IECは，人間の好み，知識，判断能力などを直接取り込み，Humanized Computational Intelligenceを実現する一手段である．

3. IEC研究の全体像

IEC研究の全体像を概観するには，251編のIEC論文を集めた解説論文[1]をお奨めしたい．筆者のサイトには日本語訳もあるので，ご興味ある読者はご参考願いたい．本節で紹介する種々の研究の参考文献はこの解説論文[1]に譲って全体像を簡単に概観し，次節で少し詳しい事例紹介を行う．

3.1 IEC応用研究

IEC研究は2次元コンピュータグラフィックス(CG)で生物進化を表現した*Dawkins*のbiomorph (1986)に始まる．が実質的には1990年代に入ってから研究が始まったと言って良い．90年代の前半は，CG，音楽，デザイン生成というアート応用が中心であったが，90年代後半になると，工学的な応用や教育・ゲームなどの応用が盛んになってきた．

IEC応用はアート応用，工学応用，その他に分類できる．アート系では，グラフィックアート生成，音楽生成，CG形状の生成，CGライティングデザイン，工業デザイン，ウェブページデザインや商業デザインなどが含まれる．代表的な生成方法としては，遺伝的プログラミングで数式を生成し，画素座標(x, y)を代入して1つの数値を得，この数値を当該画素の色や輝度に対応させる方法で，グラフィックスアートに用いられる．第2の代表的な方法としては，色，フォントサイズ，種類，位置，等の最適組合せ問題とする方法で，エディトーリアルデザインに用いられる．モンタージュ生成もIECには有用な方法である．我々は顔の識別に個々の部位の特徴を覚えているわけではないので通常のモンタージュ生成は困難であるが，全体の顔の印象の類似判断だけでモンタージュ生成できるIECの方法はモンタージュ生成に適した方法と言える．

IECの工学応用には，音声処理，音声合成，画像強調，補聴器フィッティング，人工現実感，印象によるデータベース検索，データマイニング，制御・ロボット，などがある．誰も他人の聞こえが分からず，計測できる聴覚特性も極一部であることから，他人の聞こえを想像しながら経験に基づいて補聴器フィッティングする現在の方法には原理的な制約がある．IECを用いると本人の聞こえに基づいて最適化することができるので，この原理的な問題を解決できる可能性がある．

IECのその他の応用には，教育やゲームやセラピー応用がある．通常，アート的な感性教育を行う場合，絵を書かせたり物を作らせたりするが，この場合の感性は技能のフィルタを通って観察されることになる．IEC技術を用いれば，与えたデザインコンセプトに対する心象イメージに基づいて評価することでイメージの具現化を図る．この方法であれば技能の良し悪しを切り離して感性表現が可能になることから，IECを感性教育に応用することができる．イラストの組合せを通して低学年児の作文ストーリ生成支援を行う研究もある．また，上述したすべてのIEC応用が，対象システムを最適化するものであったが，最適化したシステム出力を観察することで，最適化したIECユーザの心理尺度を観察するという研究もある．

3.2 インタフェース研究

応用と対をなすIEC研究は，90年代後半から取り組み始められたIECユーザの疲労問題を主対象とするインタフェース研究である．進化計算は複数の探索点情報から次の探索点を探す多点探索あるいは個体ベースの探索手法であり，複数の個体への評価をもって一世代の探索とし，これを繰り返す．したがってIECユーザには多くの個体の比較・評価が求められ，疲労問題が避けられない．この分野の研究には，入出力のインタフェース，評価予測，高速化，評価だけでなく探索へもIECユーザが加わる方法，などがある．

離散的評価値入力は，第1節で述べた評価精度を下げることで評価に対するストレスを軽減する方法である．主観評価実験結果とシミュレーション結果からは，粗い評価を許すことによる量子化ノイズ増に起因する収束の遅れは，評価世代数が少ないIECのような場合への影響は少なく，大雑把に評価できる心理疲労軽減効果は大きいことが示された．

評価値予測は，IECユーザの評価特性を学習して評価値予測器を作成する方法である．予測ができれば，ランダム提示よりも評価比較がしやすいように個体を提示することで疲労軽減を図ったり，予測器をフィットネス関数として裏で多数の個体数で通常進化計算を実行し，上位n個体をIECユーザに提示することで収束速度を向上させようとする方法である．初期世代の少ない個体しか予測のための学習に使えないため予測精度は粗いが，ないよりはまし，という戦略である．

複数の個体を評価するIECユーザにとって，静止画像のように空間比較ができる場合はよいのだが，音やアニメのような対象を扱う場合は時系列提示をせねばならないので比較のための疲労が大きくなる．そのための提示インタフェースの改善や音楽生成の際に，メローディ全体の比較評価ではなく，提示途中のフレーズに対して良し悪しの2値評価をすることで評価疲労を軽減させる方法などもある．

進化計算では，新演算方法の提案など多くの収束高速化手法が提案されている．これらの手法はすべてIECに利用できる．IECは世代数，個体数は通常の進化計算に比べて極端に少ないので，特に初期世代での収束に効果がある手法が求められる．例えば進化計算と山登り法との組合せはポピュラーな高速化の1つであるが，最後の詰め段階で用いる高速化手法はIECでは使いづらい．粗くても初期段階で効果がある手法が

よい．そのような1つに個体分布を単峰性関数で近似し，そのピーク座標を有力な解候補として個体に加える方法がある．この解候補への評価が芳しくなくても多くの解の1つの話であるし，有力な解であれば次世代の親個体として探索へ大きな影響力を発揮することになる．すなわちlow risk, high return戦略が取れる．

IECでは人間が評価，進化計算が最適化と分業をしている．しかし評価だけでは単調さによる疲労もあるし，途中で探索に有用な知見を得られても反映できない．そこで進化計算が担当している探索へもIECユーザが積極的に加われるようにすることで単調さによる疲労を軽減し，収束の高速化を図る方法が提案されている．筆者がオンライン知識組み込みと呼ぶ方法は，探索中によい部分解が得られたらその解を以後固定する仕組みを導入する方法である．ただしモンタージュや一部のCG形状パラメータのように解パラメータと提示像の部分とが一対一対応している場合にのみ有効な手法で，フィルタ係数と音色や画像処理結果のように一対一対応していないときには使えない．

Visualized IECは進化計算の探索空間を2次元空間に写像することで，探索ランドスケープを視覚化する手法である．IECユーザは個々の個体を評価するだけでなく，解の分布状況から最適解の位置を視覚化された空間中で視覚的に推定し，その推定最適解を次世代の探索に利用することで収束の高速化を図ることができる．

4. IECの応用事例

4.1 地質学的逆問題

オーストラリア西部は鉱業が盛んで，CSIRO研究所でも地質学者と地球物理学者がこの産業支援を行っている．ここでの地質学シミュレーションに，IECが使われている．

地質学的シミュレーションは，初期地質形状に加わる圧力，地質の密度，粘度，などの各種物理的パラメータを設定し，地下地形をメッシュで区切り時間と共にどのように変形するかを天気予報のシミュレーションと同様の計算をするものである．

このシミュレーションは実際の地下地形がどのようにして形成されたのかを解析するために使われる．例えば，**図2**右上は地球地殻が引っ張られるように力が加わった結果断層が生じた例と，地質学者のスケッチである．地質学シミュレーション結果が，このフィールド調査結果に等しくなれば，初期値として与えた物理パラメータがそのような地質結果を導いたのではないかとの推察を行う訳である．すなわち，仕様に合うシステム出力を出すようなシステムへの入力値を求める「逆問題」を解くのが，ここで紹介する地質学シミュレーションの目的である．

このシミュレータの出力がどれ程地質学者のフィールド調査に近いかの評価には，地質学的知識に基づいた判断が求められる．フィールド調査のスケッチとシミュレーション結果の画像的な類似が必ずしも地質学的類似を意味しない場合があるからである．このため，CSIROでは地質学者がシミュレーション結果を判断し，シミュレータへの入力物理パラメータ値を試行錯誤的に調整しながらシミュレーションを繰り返していた．この地質学的シミュレーションには計算パワーが要求されるため，試行錯誤による解探索では結果を得ることが困難であった．

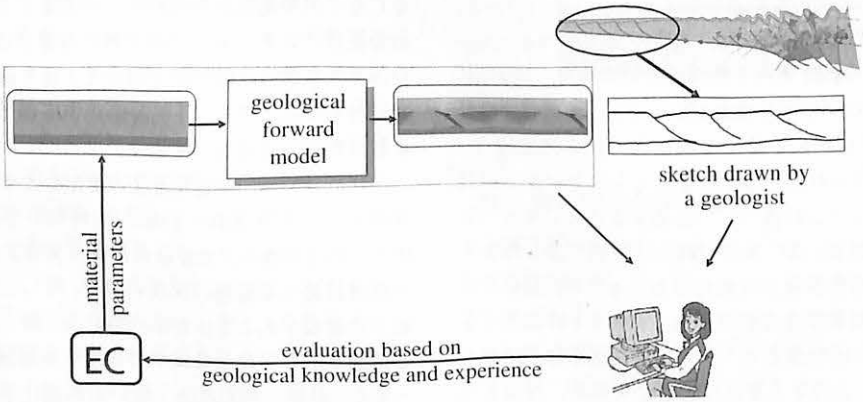


図2　IECベースの地質学的シミュレーション

この問題の解決策が，地質学者の視覚的評価に基づいて入力物理パラメータを最適化するIECの導入である[2]（図2）．1回のシミュレーションに30分から2時間かかるので，IECでは1世代当たりの計算が1日かかりになる場合もある．毎朝1世代分の個体を評価し，後は計算機任せなので，かえって作業効率が良いとも言える．CSIROでは，学生を雇用して従来の試行錯誤方式で2週間かかっても結果が得られなかったのが，このIEC方式では8世代目に解が得られるという「劇的な事件」の後，このIECベースのシミュレーションがCSIRO内で認識され，今では複数のプロジェクトが利用する他，この分野での応用に関して世界の中心になった．

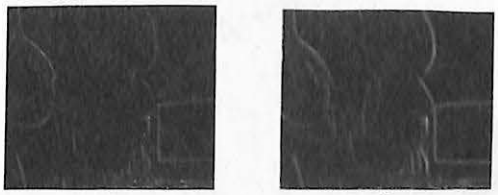
4.2 信号処理

信号処理応用の拡大と共に，信号処理ユーザが信号処理の専門家でない場合も増えて来ている．医療画像診断の専門家や補聴器ユーザ等がその例である．このような場合は，医療画像診断士や補聴器ユーザの視覚的，聴覚的評価に基づいて，最適なフィルタを設計できる必要があり，IECのよい応用分野となる．

まず信号処理の知識がなくても視覚的，聴覚的な評価のみでフィルタが設計できるのか，という疑問があると思う．**図3**はその評価実験の一事例である．図3(a)はエッジ抽出のための信号処理知識を用い，ラプラスフィルタで処理した例である．一方，図3(b)はIECを用い，視覚的にエッジ抽出らしくなるフィルタを生成した例である．その他，高域通過フィルタ，水平成分，垂直成分抽出フィルタなど複数の基本的信号処理フィルタ生成実験を行ったが，理想状態とまでは行かないにしても視覚的判断だけで相当の信号処理ができることがうかがえる[3]．

4.3 ロボット制御

民生用ロボットに求められる「面白い」「かわいい」動きは従来手法で最適化できないので，人間の評価をもとに自動的に設計できるようにする必要がある．例えばレゴロボットのユーザは制御理論もプログラミングも知らない子供であるが，面白いと評価する動きは子供の好みに依存するため，技術者が事前に設定しておくことはできないし，例え可能だとしても，技術者自身も子供同様，視覚的評価に頼らざるを得ない．



(a) (b)

図3 (a) ラプラスフィルタによるエッジ抽出，(b) IECを用い視覚評価のみに基づいて作成したフィルタによるエッジ抽出

レゴロボットの場合，本体周辺の6個のセンサ情報 x_i を線形加重し，車輪の6制御値 $y_j = \Sigma w_{ij} x_i$ を決定して動き制御を行う．子供が「気に入った」動きの設計は，レゴロボットの動きに対する子供の好き嫌いをフィットネス値として重み係数 w_{ij} を進化計算を最適化するIEC手法で行う．実験では，個体数9個の動き評価を5～7世代繰り返すだけで，子供が動き生成を行えることが示されており[4]，プログラミングレスプログラミングとして興味深い．

4.4 心の観察

従来のほとんどのIEC応用がシステム最適化・設計を目的にしていた．これに対し，IECユーザは心の評価尺度を基にシステム最適化を行ったのであるから，最適化されたシステムの出力を観察することで，IECユーザの主観評価特性を観察しようとする新しい試みがある．

第1の取組みとして，「楽しい－悲しい」の感情表現幅の計測に応用した．統合失調者3名と健常者5名にIECベースのCGライティング支援システムを使って「楽しい」「悲しい」表情のライティングデザインを行ってもらった．次に，別の健常者33名を使って，被験者8名の「楽しい」および「悲しい」を個別にシェッフェの一対比較法で心理尺度構成を行い，検定を行った．**図4**は「楽しい」の8名を心理尺度値順に並べたもので，矢印はその間に危険率1%で有意な差があったことを示している．図中のPから始まるイニシャルが統合失調者である．この結果を見ると，統合失調者3名が作成した「楽しい」ライティングデザインは健常者が作成した「楽しい」ライティングほど楽しさ度合いを表現できていないことが分かる．一方，「悲しい」ライティングでは，このような差が見られなかった．このことから，今回の被験者の場合では，統合失調者の「楽しい－悲しい」表現幅が，健常者のそれよりも狭いことがうかがえた[5]．

今回の被験者数だけでは，統合失調症と感情表現幅の関係について結論を出すことは尚早であるが，少なくとも，IEC技術を用いて，心の尺度の観察という新しい応用の可能性は示されたと言えよう．

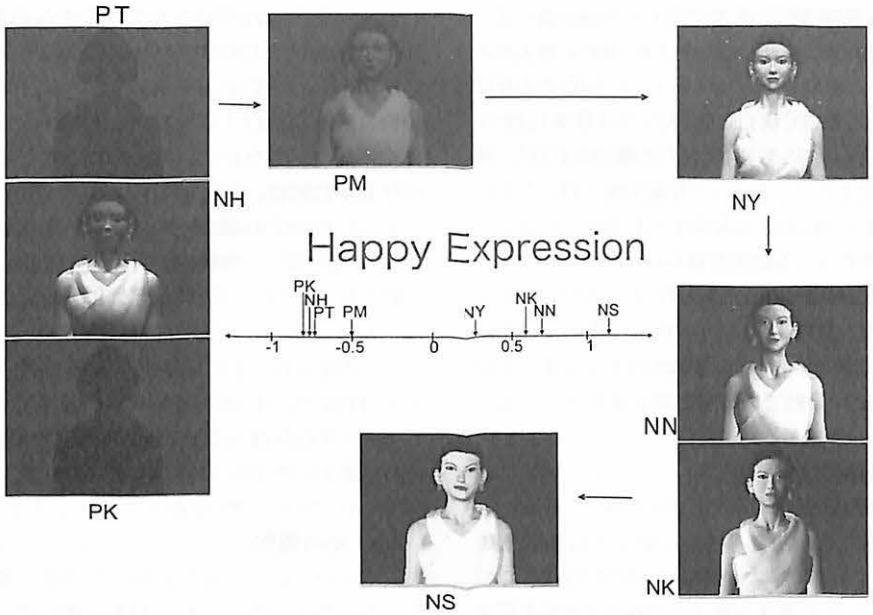


図4「楽しい」表情のCG像．危険率1%で有意差がある「楽しい」表情の境界を矢印で示している．

5. まとめ

本解説では，IEC技術の枠組み，位置付けに続いて，応用を中心に限られた紙面でできるだけ広い解説を行った．シミュレーションには，制御のように数式できれいに挙動を記述できる場合，複雑系のように挙動は予測できないが記述はできる場合，さらにはモデル化が困難であるが対象の人間が実在するような本解説の対象までいろいろある．人間が介在し，人間の主観評価を取り込まなければならない対象を扱う場合は，人間機能，好み，感性をモデル化して取り組むという解析的なアプローチだけでなく，その人間そのものをシステムに組み込む合成的なアプローチの検討に，本解説がお役に立てば幸いである．

参考文献

1) H. Takagi: Interactive Evolutionary Computation: Fusion of the Capacities of EC Optimization and Human Evaluation, Proceedings of the IEEE, **89**-9, 1275/1296 (2001)

2) C. Wijns, L. Moresi, F. Boschetti, and H. Takagi: Inversion in Geology by Interactive Evolutionary Computation, IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2001), Tucson, AZ, USA, 1053/1057 (Oct., 2001)

3) H. Takagi and N. Hayashida: Interactive EC-based Signal Processing, 4th Asia-Pacific Conf. on Simulated Evolution and Learning (SEAL2002), Singapore, 375/379 (Nov., 2002)

4) H. H. Lund and O. Miglino: Evolving and Breeding Robots, 1st European Workshop on Evolutionary Robotics (EboRobot98), Springer-Verlag, Berlin, Germany, 192/210 (1998)

5) 高木，高橋，青木: インタラクティブ進化計算による心の計測への応用可能性，第20回ファジィシステムシンポジウム，北九州，605/606 (2004年6月)