対話的進化手法によるマシンデザイン支援システム

非会員 越 智 敬 之 (慶應義塾大学)

正 員 萩 原 将 文 (慶應義塾大学)

Machine design support system using interactive evolutionary techniques

Takayuki Ochi, Non-member, Masafumi Hagiwara, Member (Keio University)

In this paper, we propose a machine design support system using evolutionary techniques. The proposed system creates “machine” which consists of multiple parts. It is composed of two phases: the fundamental-parts-generation-phase, and the machine-generation-phase where the generated parts are combined. On each phase, we use evolutionary techniques, Genetic programming. The system generates parts themselves, uses functional parts in advance, and expresses shape's structure by tree structure. Therefore it is possible to generate various and functional designs. We have implemented the system on PC, and carried out experiments to confirm that various novel objects can be obtained.

キーワード：遺伝的アルゴリズム, 遺伝的プログラミング, 対話的進化手法, デザイン支援

Keywords: genetic algorithm, genetic programming, interactive evolutionary computation, design support

1. はじめに

道具や機械を新しく作成するには、設計やデザインという作業が必要不可欠であり、設計者の発想やアイデアが非常に重要な要素になる⁽¹⁾。しかしこれらの作業は、人間の知的活動の中で最も高度な活動のひとつであり⁽²⁾、設計者への負担は非常に大きい。モデラーやCADなどのデザイン作成ツールが多数存在しているが⁽¹⁾⁽³⁾、新しいデザインを提示することでデザイナーやユーザに対し発想支援を行なうというツールは極めて少ない。したがって、知的作業としての設計やデザインの支援ならびに自動化への需要は大きい⁽²⁾。

ここで、新しいアイデアを生み出す方法としても有効な手法として、最適化問題などに用いられる進化的手法がある^{(2)(4)~(8)}。進化的手法とは、生物が新しい機能を獲得する仕組みを工学的に模擬したものであり、例として遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) などがある^{(9)~(11)}。その応用例として、フレーム構造物設計⁽¹²⁾、機の形状デザイン⁽¹³⁾などの研究がある。しかしこれらは、基本的に用いる部品の組み合わせ最適化を目的としており、アイデア発想という観点とは異なる。

進化的手法では個体の適応度というものが重要となってくる。しかし、設計やデザインにおいて得られた結果をプログラムによって自動的に求めることは難しく、この分野への進化的手法の導入の難しさにつながっている。そこで、個体の評価を人間が行う対話型進化計算法というアプロー

チが提案されている⁽¹⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。その応用例として、服飾デザイン⁽¹⁶⁾、ライティングデザイン⁽¹⁷⁾などの研究がある。しかし、これらの場合、望ましいパラメータの探索を目的としており、得られる結果の多様性には欠けている。

佐藤らは、多様性を持つ設計の一例として道具設計を取り上げ、対話型進化的手法を用いた道具の形状デザイン支援システムを提案した⁽⁴⁾。しかし、部品数ならびにそれらの接続構造が固定されているために、限られた形状の道具しか作成できないという問題点があった。

これに対し小谷らは、部品の数と接続構造の制限がない道具を同じく対話型進化的手法によって作成し、佐藤らのシステムを発展させた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。このシステムでは、部品種類数を増やすとともに木構造によって部品同士の接続構造を表現している。しかし、自由度が高まった反面、無意味な道具も多く出てきてしまうという欠点があった。

そこで本論文では、小谷らのシステムをさらに発展させる。まず、建設用機械にヒントを得て作成した機能付きモジュールを初期形状としてあらかじめ導入する。また、ユーザの行うことができる操作の自由度を拡大し、木構造を直接操作できるようにする。これにより、機能を持った多様性のある形状デザインを対話型進化的手法を用いてより効果的に生成できるようになる。

以下、2ではマシンの構造を説明する。3ではシステムの概要ならびに適用した進化的手法を説明する。そして4で、実際にPC上にシステムを実装し、計算機実験を行い考察する。

図1 マシンの階層構造

Fig. 1. Hierarchical structure of "machine."

2. マシンの構造

〈2・1〉 マシンの階層構造 本論文における「マシン」とは、提案システムで最終的に作成される形状デザインのこと、一般的な道具や機械に相当するものである。ここで、図1に示したマシンの構造に注目してみると、部品1と部品2、部品3と部品4が結合することによりそれぞれ部品Aと部品Bができる。そして、部品Aと部品Bが結合することによりマシンができる。このように、マシンの構造は階層構造であるといえる。

なお本論文では、マシンの部分構造を「部品」、機能を持たせた部品を「モジュール」、これ以上分解できないところまで分解した部品を「基本部品」、マシンや部品などの3次元で表現されるもの全般を「形状」と呼ぶことにする。

〈2・2〉 マシンの木構造表現 道具のように複雑な構造を持つ形状を、進化的手法における遺伝子にコーディングすることは、一般に難しい問題である。提案システムでは、文献^{(4)~(7)}と同様に、木構造表現によりマシンを表現する。木構造表現を用いると、終端ノードと非終端ノードの2つのノードとそのつながりによって、マシンの構造を表現することができる。そして、進化的手法のアルゴリズムとして、構造的な遺伝子型を用いた遺伝的プログラミング (Genetic Programming: GP)^{(18)~(20)}を用いる。

〈2・2・1〉 終端記号 終端ノードで定義される終端記号は、基本部品の形状パラメータを表している。したがって、基本部品の種類によって終端記号に含まれるパラメータに違いがある。終端記号の持つ情報を以下に示す。

- P_{type} : 基本部品の種類を表すパラメータで、基本部品が n 種類ある場合、 $1, \dots, n$ のいずれかの値を取る。
- P : 種類 P_{type} の基本部品の形状を表すパラメータの集合である。したがって、種類によって含まれるパラメータの種類や数は異なる。たとえば、基本部品の種類が立方体である場合は、 P の要素は一辺の長さだけとなる。

〈2・2・2〉 非終端記号 非終端ノードで定義される非終端記号は、部品同士の結合に関するパラメータを表している。ここでいう部品とは、その非終端ノードの下につな

図2 システム概要

Fig. 2. Outline of the proposed system.

がっている2つの二分木それぞれが表している形状のことを指している。

- cp_0, cp_1 : 結合する2つの部品それぞれの結合点の座標を表すパラメータである。
- θ, ϕ, γ : 結合する2つの部品間の相対的な角度を表すパラメータである。それぞれ、 x 軸、 y 軸、 z 軸周りの回転角を表している。
- $axis$: 2つの部品が結合する際に起こす相対的な動作の軸を表すパラメータである。このパラメータは、 x 軸、 y 軸、 z 軸の合計3つの角度の要素を持っている。
- C_{type} : 結合の種類を表すパラメータである。結合の種類には、固定、360度回転、振り子回転、スライドの4種類がある。固定は、相対的な動作がない結合である。360度回転は、一方の部品が他方の部品に対して、 $axis$ 周りに回転する結合である。振り子回転は、一方の部品が他方の部品に対して、 $axis$ 周りにある範囲の角度の中で振り子のように往復する結合である。スライドは、一方の部品が他方の部品に対して、 $axis$ 方向に上下にスライドする結合である。
- C_{style} : 2つの部品の接合タイプを表すパラメータである。ここでいう接合タイプとは、2つの部品をどのような関係を持たせて結合するかを決めるもので、埋込接合、面接合、点接合の3種類の接合タイプの中から1つが選ばれる。

3. 対話型進化的デザイン支援システム

〈3・1〉 システムの概要 提案システムは、基本部品生成ステージ、機能付き部品であるモジュールを生成するモジュール生成ステージ、基本部品やモジュールを結合してマシンを生成する統合ステージの3つの段階から成る。提案システムでユーザがマシンを生成するまでの一連の流れを図2に示す。

以下、〈3・2〉で各ステージの概要、〈3・3〉で各ステージで用いられる進化的手法について説明する。

図 3 各ステージの流れ
Fig. 3. Flow on each stage.

図 4 インターフェース
Fig. 4. Interface of the proposed system.

〈3・2〉ステージの概要 提案システムの各ステージでは、それぞれ異なる進化的手法を用いて個体の生成を行う。以下にその詳細を示す。

- 基本部品生成ステージ：あらかじめ用意した基本部品の初期形状に進化的手法を適用することにより、基本部品の形状を進化させる。基本部品の種類により持つパラメータの種類や数が異なるため、1つの基本部品に対して1つのステージが必要となる。
- モジュール生成ステージ：あらかじめ何らかの簡単な機能を持った部品であるモジュールに進化的手法を適用して、モジュールの形状を進化させる。このステージにおける初期形状は、あらかじめ作っておいたモジュールの中からランダムに選ばれる。
- 統合ステージ：基本部品生成ステージで生成された基本部品や、モジュール生成ステージで生成されたモジュールが結合され、進化的手法が適用されることによりマシンが生成される。

したがって、提案システムでは n 個の基本部品生成ステージ、1 個のモジュール生成ステージ、1 個の統合ステージの計 $n + 2$ 個のステージがあることになる。

〈3・3〉進化的手法 上で述べた各ステージでは、用いられる進化的手法のアルゴリズムはステージによって異なるが、図 3 に示すように、その流れはほぼ共通となっている。また、全てのステージにおいて図 4 に示したような共通のユーザインタフェースを用いている。以下に、詳細を説明する。

- (1) 初期化: 各ステージごとにあらかじめ定められた方法により初期化され、初期個体が作成される。基

図 5 木構造の操作
Fig. 5. Operations of tree structures.

本部生成ステージでは、基本部品の種類に依存した方法により初期化される。モジュール生成ステージでは、あらかじめ用意された形状からランダムに選出され、初期化される。統合ステージでは、後述の部品プール内の部品をランダムに結合することにより初期個体が作成される。

- (2) 個体の形状提示: 図 4 に示すように、各世代においてすべての個体はコンピュータ画面上に表示される。また、モジュールとマシンに関しては、その木構造も画面上に表示することができるようになっている。
- (3) 個体の保存: ユーザはあらゆる個体を任意に部品プールに保存することができる。部品プールに保存

された個体は、統合ステージにおいて初期個体を作成するため、ならびに遺伝的操作を行うために用いられる。

- (4) 木構造の操作: 統合ステージでは、木構造を直接操作することが可能となっている。ここでは操作として、図5に示すように、個体の一部分のみを削除する「部分削除」と個体の一部分のみを保存する「部分保存」がある。
- (5) 個体の評価: ユーザは表示された各個体に対して、+1, 0, -1の3段階の離散値で評価することができる。評価+1を与えられた個体は次世代の全ての個体の親となる。評価-1を与えられた個体は淘汰されて次世代には残されない。評価0の個体はそのまま次世代に残される。ここでのユーザによる個体の評価は、GPにおける適応度として用いられ、各個体の進化に反映される。
- (6) ステージの切替: ユーザは任意に他のステージに切り替えることができる。また、望ましい個体を得ることができた場合には、自由に終了することができる。
- (7) 遺伝的操作: ユーザの評価にしたがって、対象ステージのすべての個体に対して遺伝的操作が適用され、次世代の個体集団が生成される。遺伝的操作の種類ならびにそれらの適用される確率はステージごとにあらかじめ定められている。基本部品生成ステージでは、それぞれ基本部品の種類に依存した遺伝的操作が適用される。モジュール生成ステージならびに統合ステージでは、二分木に対して遺伝的操作が適用される。用いる遺伝的操作は、交叉、突然変異、付加の3種類がある。なお付加とは、ある個体に、ランダムに選ばれた別の個体もしくは部品プール内の個体を結合する遺伝的操作である。

4. 計算機実験

提案したシステムを PC(CPU:PentiumIII 866MHz, メモリ:128MB) 上に実装した。コンピュータグラフィックス表示には OpenGL を用いた。

基本部品には、図6に示すような、多面体、多関節円柱、超2次関数モデルの3種を用いた。したがって実装したシステムには、3つの基本部品生成ステージ、1つのモジュール生成ステージ、1つの統合ステージの計5つのステージがある。各世代での個体数は10とした。また、進めてしまった世代を元に戻す Undo、Undo を取り消す Redo、直前の世代交代をやり直す Retry、初期化を手動で実行する Initialize などの機能も実装している。さらに、望ましい個体をデータファイルに保存、データファイルから読み出すこともできる。

以下に、基本部品生成ステージで実装した基本部品、モジュール生成ステージで実装した機能付きモジュールの詳細について説明する。

図6 基本部品の形状例

Fig.6. Examples of the fundamental parts.

〈4・1〉 実装した基本部品

〈4・1・1〉 多面体 これは、任意の形状をした多面体で、図6(a)に示すように、任意の形の面を複数持つ立体モデルである。初期個体としては、正4面体、正6面体、正8面体、正20面体、円柱疑似体の合計5種類を用いている。遺伝的操作は、以下に示す切断、伸縮の2つがある。

- 切断: 選ばれた多面体をランダムな面で切断することにより、新しい多面体を作成する遺伝的操作。
- 伸縮: 選ばれた多面体を、ランダムに決められた軸方向に伸縮する遺伝的操作。

また、遺伝的操作を適用したあとに、個体間の大きさに差が出ないように大きさの正規化が行なわれる。

〈4・1・2〉 多関節円柱 多関節円柱は、複数の折れ曲がりを持った円柱で、図6(b)に示すように、円柱が同一平面上で複数回折り曲げられる。

初期化において作成される初期個体は、ランダムな長さ、太さを持つ折れ曲がりのないまっすぐな円柱である。そして、遺伝的操作には折り曲げ追加、折り曲げ削除、長さ伸縮、太さ伸縮の4つがある。

〈4・1・3〉 超2次関数モデル 超2次関数モデルは、比較的少ないパラメータによって多様な形状を表現することができるという特徴がある⁽²¹⁾⁽²²⁾。図6(c)に、実装したシステムの超2次関数の例を示す。超2次関数は、以下の式で表わされる。

$$\begin{aligned} x &= a_1 \cos^{\epsilon_1} \eta \cos^{\epsilon_2} \omega \\ y &= a_2 \cos^{\epsilon_1} \eta \sin^{\epsilon_2} \omega \dots\dots\dots (1) \\ z &= a_3 \sin^{\epsilon_1} \eta \end{aligned}$$

ここで、 ϵ_1 、 ϵ_2 は形状を決定する形状パラメータ、 a_1 、 a_2 、 a_3 はそれぞれ x 軸、 y 軸、 z 軸方向の大きさを決定するスケールパラメータである。

初期化によって作成される初期形状は、各パラメータをランダムに取ったものである。そして、遺伝的操作には、以下に示す3種類がある。

- パラメータ交叉: 選ばれた2つの超2次関数のパラメータをランダムに交換する遺伝的操作。5つのパラメータのうちランダムに選ばれた複数個のパラメータが、2形状の間で交換される。

図 7 実装したモジュールの例
Fig. 7. An example of modules.

- 形状変異: 選ばれた超 2 次関数の形状パラメータをランダムに変更する遺伝的操作。
- スケール変異: 選ばれた超 2 次関数のスケールパラメータをランダムに変更する遺伝的操作。

〈4・2〉 実装したモジュール 〈3・1〉で述べたように、モジュール生成ステージでは、あらかじめ機能を持った結合済みの部品に進化的手法を適用することで、機能付きのモジュールを生成する。実装したシステムでは、建設や土木工事に用いられる機械の持つ機能を採用した。図 7 にその一例を示す。初期化において作成される初期個体としては、あらかじめ用意した計 9 種類のモジュールがランダムに用いられる。

モジュールは、マシンと同様に木構造表現によってその形状を表現している。したがって、統合ステージと同じように二分木に対して遺伝的操作を用いる。用いる遺伝的操作は、以下のスケール変異の 1 種類である。

- スケール変異: 個体の中の終端ノード 1 つがランダムに選ばれ、そのスケールをランダム化する遺伝的操作。

〈4・3〉 設計実験 本システムでマシンの形状デザインを行なってもらった。ここでは、設計の目的として「切る機能を持つマシンを作る」ならびに「潰す機能を持つマシンを作る」というテーマを与えた。表 1 にこの実験で用いたパラメータを示す。本システムを用いてデザインされたマシンの例を図 8-12 に示す。なお、図中のステップ数とは、その形状が現れる時点までの通算の形状提示回数である。

図 8, 9 に、「切る機能を持つマシンを作る」という目的で作成されたマシンの例を示す。図 8 は、重なりあった 2 枚の円盤上の刃が互いに逆方向に回転し、それが前後しているマシンである。アンケートによると被験者は、図中の左と下にある棒部分を握って刃部分を前後させることで対象物を切るマシンを発想できたとしている。2 枚の刃が逆回転していることで、切る機能を持っていることがより鮮明になっている。図 9 は、刃部分を 2 段階に大きく振りおろして対象物を切るマシンである。図中の右にある部分が挟むように振りおろすと同時に、その先についた刃部分も振りおろされ、勢い良く対象物を切るマシンとなっている。

図 10, 11 に、「潰す機能を持つマシンを作る」という目的で作成されたマシンの例を示す。図 10 は、対象物を掻き入れたのちにローラーで潰し、さらに擦り潰すというマシンである。対象物が斜めになっている部分に掻き入れられた

表 1 遺伝的操作で用いたパラメータ
Table 1. Parameters of genetic operations.

(a) 基本部品生成ステージ

多面体	
切断率	0.6
伸縮率	0.4
多関節円柱	
折り曲げ追加率	0.6
折り曲げ削除率	0.4
長さ伸縮率	0.4
太さ伸縮率	0.4
超 2 次関数モデル	
パラメータ交差率	0.8
形状変異率	0.15
スケール 変異率	0.15

(b) モジュール生成ステージ

突然変異率	0.8
-------	-----

(c) 統合ステージ

交差率	0.5
突然変異率	0.5
付加率	0.15

図 8 回転する二枚の刃を前後させて切るマシン
Fig. 8. Spinning cutter(88 steps).

図 9 刃を二段階に振りおろして切るマシン
Fig. 9. Scissors with wide swing(29 steps).

のちローラーで潰され、さらに図中の左に溜められて擦り潰されるマシンが発想できている。

図 11 は、対象物を押し潰したのち、さらに 2 つのローラーで潰すというマシンである。被験者は、図中の右にあるローラーのある部分を車ととらえ、整地する自動車タイプのマシンを発想できたとしている。

図 12 には、切る機能を持つマシンの形状デザインを行なっているときに得られた、異なる機能を持つマシン例を示す。これは、対象物を押し潰しながら切り刻むマシンで

図 10 対象物を掻き入れて、すり潰すマシン
Fig. 10. Grinding machine(68 steps).

図 11 対象物を押し潰し、ローラーで潰すマシン
Fig. 11. Pressing and grinding machine(97 steps).

図 12 対象物を押し潰しながら切り刻むマシン
Fig. 12. Chopping machine(86 steps).

ある。対象物を上部の板、左の回転板、右のローラーで押し潰し、さらに中央の上下する刃で切り刻むことができる。つまり、対象物を押し潰しながら切るという複雑な動作が可能マシンである。

なお、想定される機能がマシンに備わっているかどうかは、各世代ごとにユーザ自身が実際に個体の形状を見ることで判断している。つまり、望ましい個体を得たとユーザが判断し、世代交代を終了した時点で、生成されているマ

シンは、ユーザが想定する機能を有したものとなっている。

ここで、本システムで作成された形状と、小谷らのシステム⁽⁶⁾⁽⁷⁾で作成された形状を主観的に比較してみる。小谷らのシステムで作成された形状は、全体的に動きや部品数が少なく、ある一つの動きによって単純な機能が得られているものが多かった。これに対して本システムでは、異なる機能を持つ複数の部品が複雑に組み合わせられることにより、より多様で機能的な形状を作成できていることが確認されている。これは、あらかじめ機能を持ったモジュールを取り入れているためであるといえる。

また、形状が得られるまでのステップ数を比較してみると、本システムのほうが格段に少なくなっている。実際の数値で比較すると、小谷らのシステムでは平均 216 ステップであったのに対して、本システムは図 8-12 で平均 70 ステップとなっている。全部品のうちモジュールの占める割合は、平均 39% である。また、木構造の直接操作を使った回数は 1 形状あたり平均 5 回で、全ステップ数に占める割合は約 7% となっている。あらかじめ機能を持つモジュールを取り入れていること、ならびに木構造を直接操作可能であることにより、短いステップ数で目標のもの得ることができているといえる。

また、被験者の感想としては以下のようなものがあつた。

- モジュールにあらかじめ機能があるので、目標とする機能を持つマシンが短いステップ数で得られた。
- 木構造を直接操作できるので、早い段階でイメージしているものが得られた。
- モジュールが本来持っている機能とは異なる使われ方をした形状が得られ、先入観にとらわれない自由な発想ができる。

本システムでは、対話型の進化手法の利用により先入観にとらわれないユニークな形状を得ることができる。そして、機能を持つモジュールの使用やユーザによる木構造の直接操作により、短いステップ数で多様で機能的な新しいデザインを効果的に生成することが可能となっている。

5. む す び

本論文では、対話的進化手法を用いて、機能を持つ形状のデザインを支援するシステムを提案した。作成する形状として、部品が複数結合している 3 次元の形状を持つマシンを用いた。そしてマシンの構造を木構造で表現し、進化的手法として GP を適用した。機能を持つモジュールをあらかじめ導入している点、部品の生成から行う点、およびユーザが木構造を直接操作できる点により、少ない世代数で多様かつ機能的な形状が生成されることが確認された。また、ユーザの評価を取り入れた対話型進化的手法により、ユーザの希望にあった新しい形状を生成して提示することが可能になっている。被験者に対して本システムを使った設計実験を行ない、ユーザの目標とする機能を持ったマシンやユーザの発想を刺激するようなマシンが、少ない世代数で効果的に得られることが確認された。

今後の課題としては、木構造操作機能の拡大、より複雑で多機能な設計への対応などが挙げられる。

本研究の一部は、文部省の分子・超分子・超構造体理工学プロジェクトによっている。

(平成 13 年 5 月 21 日受付, 同 14 年 3 月 18 日再受付)

文 献

- (1) 寺岡照彦: “対話的なイメージ入力インタフェースに基づくデザイン発想支援,” 信学技報, NC98-18, pp. 63-70, 1998.
- (2) 小林重信: “進化的計算から進化的設計論への展開,” 信学技報, AI97-6, pp. 39-46, 1997.
- (3) 先田和弘, 井越昌紀: “工業デザインにおけるコンピュータ援用形状設計 (CAID),” 情報処理学会研究技報, Vol.53, No.107, 95-CG-77, pp.43-50, 1995.
- (4) 佐藤智也, 萩原将文: “進化的手法を用いた道具作成支援システム,” 第 15 回ファジイシンポジウム講演論文集, pp.363-366, 1999.
- (5) Tomoya Sato and Masafumi Hagiwara: “IDSET: Interactive design system using evolutionary techniques,” Journal of Computation Computer Aided-Design. (accepter for publication)
- (6) 小谷淳司, 萩原将文: “構造的表現を用いた進化的形状デザイン支援システム,” 電学論 C, vol.121-C, no.5, pp.933-939, 2001.
- (7) Junji Kotani and Masafumi Hagiwara: “An evolutionary design-support-system with structural representation,” Industrial Electronics Society, 2000. IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE, Vol.1, pp.672-677, 2000.
- (8) 澤亮治, 萩原将文: “CG を用いたマシンの 3 次元構造進化システム,” 電学論 C, vol.121, no.2, pp.461-467, 2001.
- (9) David E. Goldberg: “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning,” Addison Wesley, 1989.
- (10) 北野宏明編: “遺伝的アルゴリズム 1,2,3,” 産業図書, 1993, 1995, 1997.
- (11) Kenneth De Jong: “Evolutionary Computation: Where we are and where we're headed,” Lect Notes Comput Sci, Vol.1625, pp.230-231, 1999.
- (12) 南俊介, Alok Srivastava, Mark Jakiela: “GA による部品組み合わせ最適化に関する研究,” 日本機械学会第 73 期全国大会講演論文集, Vol.73, pp.399-400, 1995.
- (13) Peter J. Bentley and Jonathan P. Wakefield: “The Table: An Illustration of Evolutionary Design using Genetic Algorithms,” IEE Conference Publication, No.414, pp.412-418, 1995.
- (14) 高木英行, 畠見達夫, 寺野隆雄: “対話型進化計算法の研究動向,” 人工知能学会誌, Vol.13, No.5, pp.24-35, 1998.
- (15) Hideyuki Takagi: “Interactive Evolutionary Computation,” Methodologies for the Conception, Design and Application of Soft Computing 1998, Vol.1, pp.41-50, 1998.
- (16) 中西泰人: “選好関数を用いた対話型進化システムの制御と評価 - 遺伝的プログラミングのデザイン支援システムへの応用 -, ” 人工知能学会誌, Vol.13, No. 5, pp. 36-43, 1998.
- (17) 青木研, 高木英行: “3 次元 CG におけるライティングデザイン支援,” 第 13 回ファジイシンポジウム講演論文集, pp. 311-314, 1997.
- (18) John R. Koza: “Genetic Programming, on the Programming of Computers by Means of Natural Selection,” MIT Press, 1992.
- (19) John R. Koza: “Genetic Programming II, Automatic Discovery of Reusable Programs,” MIT Press, 1994.
- (20) 伊庭斉志: “遺伝的プログラミング,” 東京電機大学出版局, 1996.
- (21) 堀越力, 笠原久嗣: “超 2 次関数による 3 次元インデクシング,” 信学論, Vol.33-D-II, no.10, pp. 1716-24, 1990.
- (22) 安村禎明, 折本勝則, 馬場口登, 北橋忠宏: “超二次関数を用いた三次元形状の定量的・定性的モデルの獲得,” 人工知能学会誌, Vol.13, no.1, pp. 75-82, Jan.1998.

越 智 敬 之 (非会員) 平 13 慶大・理工・情報卒。現在, 同大大学院修士課程在学中。GA, GP, ニューラルネットワークの研究に従事。

萩 原 将 文 (正員) 昭 57 慶大・理工・電気卒。昭 62 同大大学院博士課程了。工博。同年同大助手。現在, 同大教授。1991 年より 2 年間アメリカ Stanford 大学訪問研究員。ニューラルネットワーク, ファジーシステム, GA の研究に従事。工学博士。1986 年丹羽記念賞, 1987 年電子情報通信学会学術奨励賞, 1990 年 IEEE 論文賞, 1994 年安藤記念学術奨励賞, 1996 年ファジイ学会著述賞受賞。