

対話型進化計算による3次元モデル制作支援機構

西野, 浩明
大分大学工学部知能情報システム工学科

高木, 英行
九州芸術工科大学芸術情報設計学科

宇津宮, 孝一
大分大学工学部知能情報システム工学科

<https://hdl.handle.net/2324/4482074>

出版情報 : 電子情報通信学会技術研究報告. IE, 画像工学. 100 (461), pp.1-8, 2000-11-14. 電子情報通信学会
バージョン :
権利関係 : Copyright (C) IEICE

対話型進化計算による3次元モデル制作支援機構

西野 浩明[†] 高木 英行[‡] 宇津宮 孝一[†]

[†] 大分大学 工学部

知能情報システム工学科

〒870-1192 大分市旦野原700番地

E-mail: {hn, utsumiya}@csis.oita-u.ac.jp

[‡] 九州芸術工科大学 芸術工学部

芸術情報設計学科

〒815-8540 福岡市南区塩原4丁目9-1

E-mail: takagi@kyushu-id.ac.jp

あらまし 3次元幾何モデルを容易に制作するための1つの手法を提案する。設計の初期段階で、利用者が新しい形の創作を行う過程を効率良く支援する手段に対話型進化計算法(IEC)を導入して、進化過程のシミュレーションを美しい形の生成に利用する。システムが生成する複数の形状に対して利用者が主観的な好みを点数化して与えると、より利用者好みの形をシステムが生成する。3次元モデリングの未経験者でも、斬新な形を造ることができる。専門家向けには、陰関数法によるモデリング機能を提供することで、3次元モデルの内部パラメータを直接編集しながらより高品質な形に仕上げることも可能である。提案手法の有効性を示す初期実験結果についても紹介する。

キーワード 3次元モデリング, 対話型進化計算法, 陰関数モデリング, コンピュータグラフィックス

3D Modeling Support Mechanism by Using Interactive Evolutionary Computation

Hiroaki NISHINO[†]

Hideyuki TAKAGI[‡]

Kouichi UTSUMIYA[†]

[†] Department of Computer Science and
Intelligent Systems

Oita University

700, Dannoharu, Oita 870-1192 Japan

E-mail: {hn, utsumiya}@csis.oita-u.ac.jp

[‡] Department of Art and Information Design,
Kyushu Institute of Design

4-9-1, Shiobaru, Minami-ku,

Fukuoka 815-8540 Japan

E-mail: takagi@kyushu-id.ac.jp

Abstract We propose a new approach to easily creating 3D geometric models. A technique called *interactive evolutionary computation* (IEC) is introduced to efficiently support a process of users' new shape creation in an early design stage. The proposed IEC-based design system generates aesthetically pleasing shapes through the simulation of evolutionary processes. The users only need to subjectively specify the degree of "likes or dislikes" for shapes generated by the system, and the system creates more preferred models for them. The system allows even beginners with little knowledge and experiences of the 3D modeling to acquire innovative shapes. It also provides skilled experts with an advanced geometric modeling interface based on the implicit surface method. The experts can directly modify the internal parameters of the 3D models to make them more elaborate ones. The result of a preliminary experiment is presented to show the potential of the proposed modeling method.

key words 3D modeling, Interactive Evolutionary Computation, Implicit modeling, Computer graphics

1. はじめに

バーチャルリアリティ(VR)技術はこの10年間で飛躍的な成長を遂げ、製品設計、製造、教育、娯楽、芸術などの多くの分野に応用されるようになった。リアルな映像生成や描画機能、実時間アニメーションなどもパソコンとインターネットを通じて容易に利用可能な大衆向けの技術となった。VRMLやJavaのように、3次元データをネットワーク上で共有・流通させるソフトウェア環境も成熟した。

このような状況で、デザイナーが製品の設計から試作、評価までを仮想環境の中で継目無く行うことが可能なデジタルプロトタイピングは、適時な製品開発やコスト削減が実現できる有望なVR応用として期待されている。特に、近年の新製品開発においては、効率性や性能もさることながら、顧客の感性を刺激するような形や製品センスが重視される傾向にある。しかし、従来の造形技法から脱却して、人を惹きつけるような魅力ある形をデザインするのは依然として難しい問題である。

本稿では、計算機の初心者から専門のデザイナーまでを対象に、新規性に富む3次元モデルが容易に制作可能なデジタル設計環境を提案する。図1に提案するシステムの概念を示す。利用者が試行錯誤しながら新しい形の着想に至る過程を支援する手段として、対話型進化計算法(Interactive Evolutionary Computation; 以下IEC)[1]を導入する。IECを用いたモデリングでは、染色体としてコーディングされた個々の3次元モデルに対して、選択・淘汰・突然変異といった生物の進化過程に見られる現象を模擬することで、従来のツールでは制作が困難な自然で意外性のある形を容易に造り出すことが可能である。利用者の役割は、システムが生成・提示する複数の形状の中から、自分の好みや目的の形に近いものを選択してそれらに高い得点を与えるという作業だけである。システムは、高得点を与えられた形を継承しながら進化シミュレーションを実行して

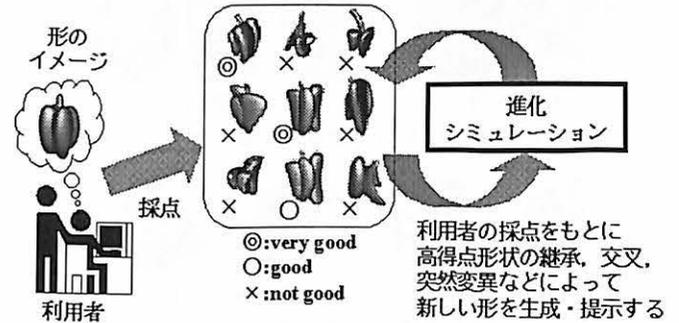


図1 IECによるモデリングの概念

新しい形状を生成する。この「形の採点と新形状の生成」を利用者が満足する形が出現するまで繰り返す。したがって、コンピュータグラフィックス(CG)に関する知識や経験がない利用者でも、事前に操作練習などを行わずに新たな形のデザインが可能となる。

我々はこれまで、複数の基本形状を変形・混合しながら複雑な3次元形状を直観的に生成可能な陰関数表現による3次元モデラを開発してきた[2][3]。しかし、利用者には幾何モデリングに関する基本機能の理解と操作の習熟が求められるため、初心者が本モデラを自在に使いこなすのは難しい。そこで我々は、上述のIECインタフェースを陰関数モデラに統合化し、内部の仕組みやモデリングに関する知識・経験が皆無の初心者でも、容易に魅力ある3次元形状が創作できる機能を実現した。開発したIECモデラは、製品の意匠設計から芸術作品の創作、初学者向け造形教育など、広範な分野への応用が期待できる。

2. 関連研究と問題点

IECは、人間の主観評価に依存するアプリケーションシステムを構築するための進化計算(evolutionary computation; EC)技術の1つである。IECは、これまでに芸術、工学、娯楽などの分野で主に応用されてきた[1]。その中でもグラフィックアート分野では、IEC研究の初期段階よりさまざまな試みがなされてきた。Dawkins[4]は、「boimorph」と呼ばれる生物に見られるような複雑な構造の2次元線画を、計算機による進化シミュレーションを用いて生成した。Sims[5]と畝

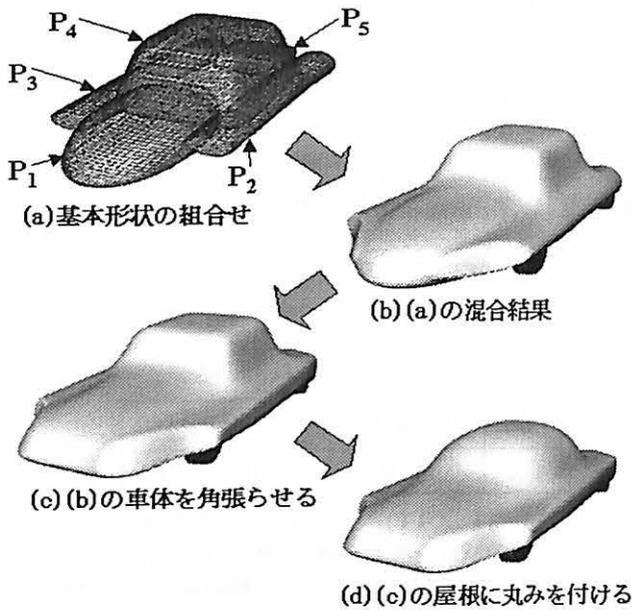


図2 陰関数モデラによる車体設計例

見[6]は、品種改良のアプローチを IEC に対応づけてグラフィックアート制作システムを開発し、斬新なイメージを描くことに成功した。その他にも、3次元 CG レンダリング[7]、動植物の CG 生成[8]、3次元 CG イメージの陰影設定[9]、シームレステクスチャの生成[10]など、CG 作品の創作に数多く応用されてきた。これらの詳細なサーベイは文献[1]を参照されたい。

上述の関連研究における共通の問題点として、専門のデザイナーや芸術家に対する有効性が挙げられる。いずれのシステムも CG 理論やシステムの内部構造に関する知識や理解度に関係なく作品の制作が可能のため、特に初心者が利用するのに適している。一方、利用者に許される唯一の操作は、システムが生成する結果を主観的に評価することだけであるため、専門家の詳細な編集・加工作業を支援することができない。

本システムの特徴は、IEC で自然かつ意外性のある形を生成する機能を従来の3次元モデラに統合化することで、初心者から専門家までそれぞれのスキルや知識に応じた作品制作が可能になることである。初心者はシステムが提示するさまざまな形を評価しながら目的のモデルを作成するのに対して、専門家は IEC の出力結果にさらに細かい編集操作を行うことで、意図したようにモデルの形状品質を高めることができる。

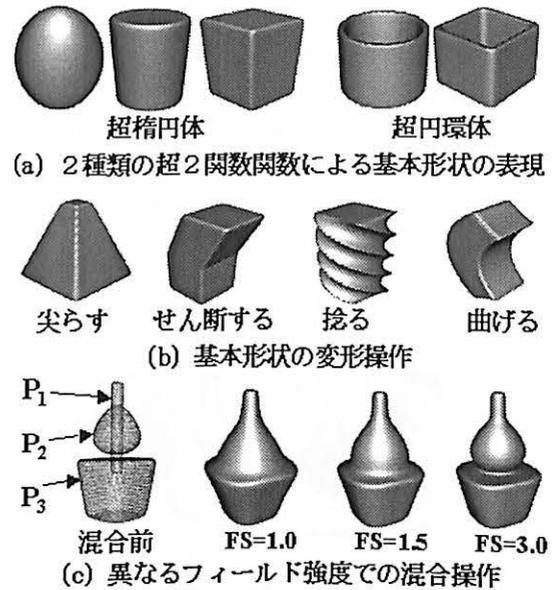


図3 陰関数モデラの基本機能

3. 陰関数モデラの機能

IEC によるモデリング機能は、我々が従来から開発してきた陰関数モデラを基盤として実現した。このモデラは、図2に示すように複数の基本形状(primitive shape)を滑らかに混合しながら目的物の概形作成や変形を直観的に行えるという特徴をもつ[2]。図2は本モデラを用いて車体設計を行った例で、(a)は使用した5つの基本形状 $P_1 \sim P_5$ 、(b)は(a)の混合結果、(c)は(b)の車体を角張らせた結果、(d)は(c)の屋根に丸みをつけた結果をそれぞれ表す。市販の CAD ツールは専門のオペレータによる製品の詳細設計に適しているのに対して、我々のモデラは設計の初期段階でイメージの着想や概形のスケッチを行うのに最適である。基本形状の変形や混合を行いながら、粘土細工のような感覚でイメージする3次元モデルの制作を行うことができる。

1つの基本形状は、図3(a)に示すように、固形状の形を表す超楕円体と中空形状を表す超円環体の2種類の超2次関数で定義される[11]。各基本形状は、表1に示すように、大きさや空間中での向き、角張り具合、変形度合いなどを決定する計18個の関数パラメータをもつ。図3(b)の変形操作では、表1中の d パラメータの値を調節しながら変形量を制御する。

表1 図3(c)の徳利形状に使用した3つの基本形状のパラメータ値

	type	r_x	r_y	r_z	r_a	e_1	e_2	d_{TPX}	d_{TPY}	d_{SH}	d_{TW}	d_{BD}	x_0	y_0	z_0	yaw	pitch	row
P_1	0	0.3	0.3	1.0	0.	0.1	1.0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.2	0.	0.	0.
P_2	0	1.0	1.0	1.35	0.	1.0	1.0	-0.35	-0.35	0.	0.	0.	0.	0.	0.75	0.	0.	0.
P_3	0	1.25	1.25	1.4	0.	0.15	0.65	0.15	0.15	0.	0.	0.	0.	0.	-2.12	0.	0.	0.

type: 基本形状の型 (0: 超楕円体, 1: 超円環体) r_x, r_y, r_z, r_a : 大きさを決めるスケールパラメータ
 e_1, e_2 : 角張り具合を決める形状パラメータ
 d_{XX} : 変形強度パラメータ (TPX, TPY: 尖らせる; SH: せん断する; TW: 捻る; BD: 曲げる)
 x_0, y_0, z_0 : ローカル座標系の原点 (空間中の位置) yaw, pitch, row: 姿勢 (向き) パラメータ

表2 徳利形状の混合パラメータ値

D_{TPX}	D_{TPY}	D_{SH}	D_{TW}	D_{BD}	FS
0.	0.	0.	0.	0.	3.0

D_{YY} : 変形強度パラメータ (TPX, TPY: 尖らせる; SH: せん断; TW: 捻る; BD: 曲げる)
 FS: 混合演算時のフィールド強度

さらに複雑な形は、複数の基本形状に対して混合演算を行うことで生成できる。図3(c)は、3個の基本形状 P_1, P_2, P_3 を混合して作成した「徳利」形状を表す。混合時には、表2に示す6個のパラメータを用いて基本形状間の混合の度合いや混合済み形状全体の変形動作を制御する。図3(c)は、異なるフィールド強度(FS)値による混合度合いの調節例を示している。表1および2は、図3(c)の徳利形状を定義する実際のパラメータ値を表している。

4. IECモデリング機能の実現

4.1 IECモデリングの原理

前節の陰関数モデラを用いて思い通りの形や変形パターンを造るには、各パラメータの役割と幾何モデリングに関する理解が必要になる。したがって、初心者はモデラ操作法に習熟することを余儀なくされ、目的とする形の制作に集中することができない。そこで、IECによる形状制作・変形インタフェースを組込むことで、システムの細部を知らない初心者でも思い通りの形を容易に創作できる、IECを基盤とする3次元モデリング法(以下、IECモデリング)を実現した。

提案するIECモデリングは、図4に示すように探索空間(search space)と解空間(solution space)の独立する2つの空間から構成される[12]。新た

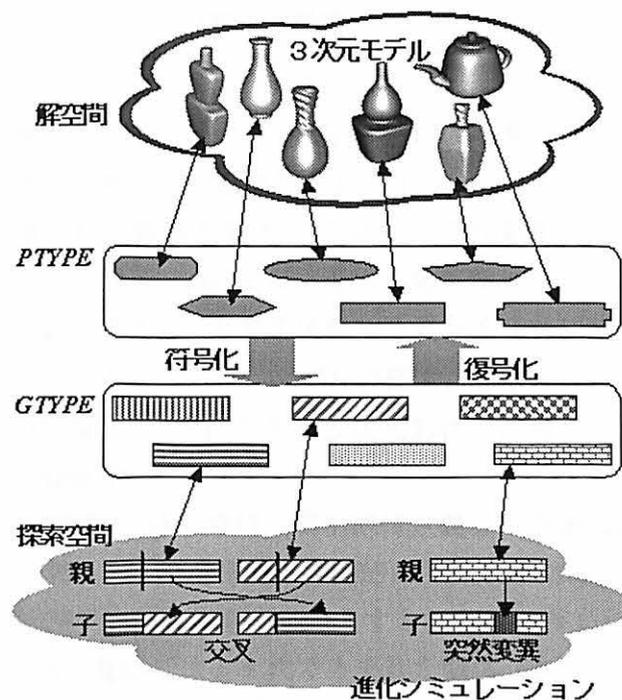


図4 IECモデリングの原理

な形状を導出する進化シミュレーションには、EC技術の1つである遺伝的アルゴリズム(GA)を用いる。探索空間は符号化された3次元モデルの集合からなり、解空間は対応する実際の3次元モデルを含む。探索空間中の各々の符号化された3次元モデルはGTYPE(genotype)と呼ばれ、対応する実際の3次元モデルであるPTYPE(phenotype)と1対1の関係にある。一对のPTYPEとGTYPEを個体(individual)と呼ぶが、IECは一定数の個体を常に維持しながら進化シミュレーションを実行する。進化シミュレーションの過程で次々に生み出される個体の集合は世代(generation)と呼ばれる。

1つのPTYPEはその形状を定義するパラメータ値の集合である。図5に前節で述べられた徳利形状のPTYPEとGTYPEの例が示されている。PTYPEは3個の基本形状 P_1, P_2, P_3 と1個の混合演

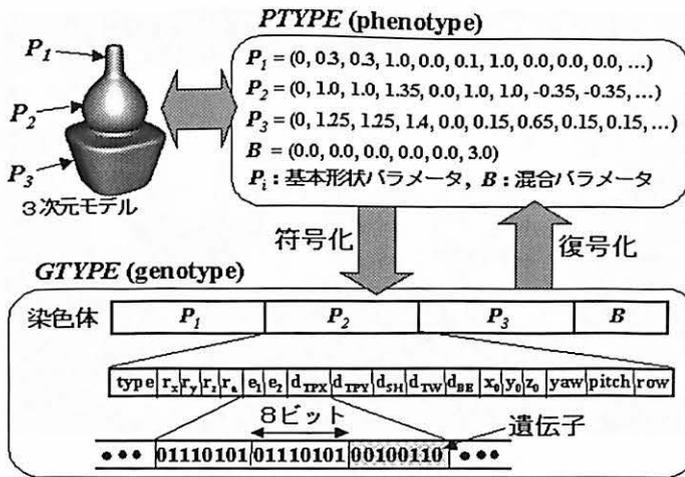


図5 3次元モデルの染色体設計

算をそれぞれ定義するパラメータ群より構成され、対応する GTYPE は PTYPE 中の全パラメータを符号化したビット列で表現される。PTYPE 中の各パラメータは、以下の式を用いて遺伝子 (gene) と呼ばれる 8 ビット単位の文字列に符号化される。

$$G = P_{\min} + \frac{P - P_{\min}}{\Delta} \quad \left(\Delta = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{256} \right)$$

ここで、 G は遺伝子、 P はパラメータ値、 P_{\max} と P_{\min} はパラメータの最大・最小値をそれぞれ表す。複数の遺伝子から構成される 1 つの GTYPE を染色体 (chromosome) と呼ぶ。したがって、1 つの染色体の長さは、 $p \times n + b$ バイトで表される。ここで、 p は基本形状パラメータの数、 n は基本形状の数、 b は混合パラメータの数をそれぞれ表す。例えば、図 5 の徳利形状を表す染色体の長さは 60 バイト ($18 \times 3 + 6$) となる。

4. 2 処理手順

IEC モデリングの処理手順を図 6 に示す。最初に、モデリングに用いる初期形状とそれを構成する基本形状数を定義した後、GTYP の初期世代を生成する。次に、得られた個々の GTYP を PTYP に復号化し、その 3 次元形状を描画する。利用者は、個体数分提示されるグラフィックモデルの各々に適合度 (fitness value) を与えて自分が好む、あるいは目的形状に近いモデルを選択する。高い適合度が与えられた個体がエリートとして次の世代に継承される。エリート個体の割合は交叉率で指定するが、同値を 80% とすると 20% の

```

define an initial shape
randomly generate an initial set of GTYPES
do {
  decode GTYPES to PTYPES for rendering 3D
  models
  rate fitness value for each model (PTYPE) by
  user to select elite individuals
  generate a new set of GTYPES by using
  selected elite individuals
} while (there is no acceptable solution)

```

図 6 3次元モデル生成に用いる IEC アルゴリズム

個体がエリートとして次世代まで生残る。残り 80% の個体は、前世代中からルーレット法 [13] で選ばれた個体を親として交叉と突然変異を経て生成される。IEC では、通常、突然変異率を低めに設定するが、6 章の実験でも同値を 1% に設定している。以上の「モデルの描画、評価、次世代の生成」を、目的とする 3 次元形状が出現するまで繰り返す。

通常の GA では、明示的に定義した評価関数で PTYP の適合度を自動的に計算するため、利用者が進化計算過程に介入することはできない。一方、IEC では各世代で生まれた個体 (3 次元モデル) の評価を利用者自身が行うため、世代交代に伴って進化・変形していくモデルの形状を緩やかに制御することが可能である。特に、本論文の目的である「頭の中の漠然としたイメージの可視化」のような問題では、利用者の感性に応じて評価の尺度や方法が柔軟に変更できる機能が求められる。人間の主観評価に依存して進化計算が行われる IEC は、このような要求に最適なフレームワークである。

5. システムインタフェース

前節でも述べたように、IEC モデリングで目的とするモデル形状が得られるか否かは、利用者の適切な評価と選択操作に依存する。したがって、利用者が各世代内の複数のモデルから目的形状に近い形を容易に発見できるインタフェースの提供が重要である。さらに、専門家による細やかなモデリング操作にも対応することが求められ

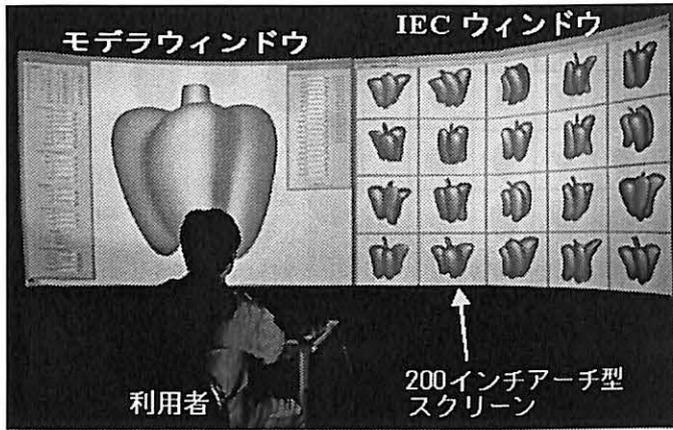
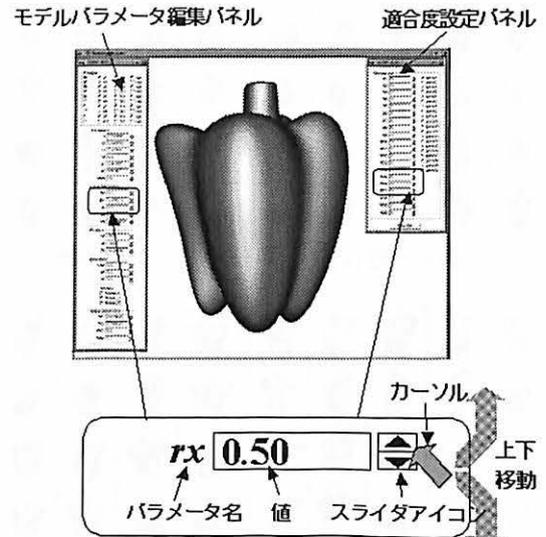


図7 システムの利用環境

る。そこで、図7に示すような2つの異なるウィンドウから構成されるインタフェースを設計・実現した。IECモデリングで生成される各世代の3次元モデル群は、図7の右側に示すようにリスト形式で同時に表示される。利用者は、20個までのモデルを同時に眺めて、相互に形を比較しながら各モデルの良し悪しが決定できる。図7の左側に表示されたモデラウインドウは、専門家が形状編集に利用する陰関数モデラの編集画面である。IECウィンドウのモデル群の中から特定の形をモデルウインドウ内に呼出して、直接パラメータ値を修正しながら細かい成形作業を行い、成形後にエリート個体としてIECウィンドウに戻すこともできる。このように、陰関数法による詳細な幾何モデリングを行う専門家には、IECによる形の進化を概念設計や新たなデザインへの着想支援に活用できる。

適合度の設定やパラメータ値の変更は、図8に示すようにマウスによるGUIスライダの操作で実行する。変更したい個体の適合度やパラメータ値のスライダアイコンをマウスでクリックしたまま移動させると、その移動量に応じて値が変更される。余分なキーボード操作は一切不要で、利用者はモデリング作業に集中することができる。両ウィンドウが同時に表示できるワイドな画面やデュアルモニタの利用が望ましいが、通常のモニタ画面でも切替えながら利用できるようにした。図7は、SGI社製Onyx2とElectrohome社製200インチアーチ型スクリーンを利用して開発したプロトタイプシステムの操作環境を示す。



変更するパラメータのスライダアイコンをマウスで選択したまま上下に動かし、その移動量でパラメータ値を変更する

図8 GUIインタフェース

6. 初期実験

6.1 初心者への利用実験

提案したIECモデリングの有効性を検証するために初期的な実験を実施した。まず、初心者によるモデル制作の支援能力を確かめるために、「ピーマン」の形を作る実験を行った。ピーマンを課題形状として選んだのは以下の理由による。

- (1) 特殊な背景知識を必要とせずに誰もが容易にその形状を頭に浮かべることができる、
- (2) 市販のCADツールで自然な形に仕上げるのはかなり難しい、
- (3) 絵画のデッサン等にも多用されイメージを膨らませるのに十分な変化やばらつきをもつ。

図9は、以下の条件下で実験を行った時の一事例である。

- ・ 各世代の個体数は20、
- ・ 交叉率は80%で一様交叉を使用、
- ・ 突然変異率は1%、
- ・ 適合度は1～5の5段階評価（5が最高、1が最低）。

各世代生成において、16個体（全個体数の80%）が交叉と突然変異を経て生成され、4個体がエリート個体として前世代から継承される。

モデリングに先立ち、図9(a)に示すように基本形状を用いて初期形状を定義する。4個の楕円



図9 ピーマン形状の造形実験結果

体からピーマンの本体を、細い円柱形で茎の部分
をそれぞれ定義する。この初期形状に対して IEC
モデリングを第 10 世代まで繰り返したものが図 9
(b)~(h)に示されている。同図から明らかなよう
に、初期の数世代における各個体の形の多くがラン
ダムな形状をしているのに対して、第 3 から 5
世代にかけてはピーマンらしい形が少数だが見
受けられるようになる。これらの「ピーマンらし
い」形に高い適合度を与えつづけると、第 7 世代
ではその多くがピーマンの形になってくる。さら
に第 10 世代まで繰り返すと、ほぼ全個体がピーマ
ンの形に収束した。

本実験を数人の初心者を対象に実施したが、
すべての被験者が 30~60 分でピーマン形状に収
束させることができた。時間のばらつきは、各世
代の形状評価に要する時間と適合度設定時のマ
ウス操作の熟練度に依存するもので、いずれの場
合も 8~10 世代程度の繰り返してピーマン形状へ
の収束が可能であった。適合度設定パネルをモデ
ラウィンドウ内に置いた結果、IEC ウィンドウ内
の個体形状を見ながら適合度を設定するのに不
具合を感じた被験者がいた。また、初心者向けに
はより簡易化した GUI の提供も重要である。

今回用いたピーマンのような形を市販の CAD
ツールで作成するためには、かなりの事前練習が
必須となる。IEC モデリングでは、数分の説明の
みで初心者でも直ぐにイメージする形を 3 次元

モデル化できることから、非常に強力なモデル制
作支援環境が提供できると考えられる。

6. 2 専門家への利用実験

前節のように目的の形を作るだけの支援機能
は、具体的な目標形状を従来のモデリング機能を用
いて制作できる専門家には十分でない。初期状
態から形を作り上げるだけではなく、既存の形か
ら新しい形状や変形パターンを派生させること
ができれば、専門家にも有用であると考えられる。
専門家によってすでに作成されたモデル形状の
特徴を継承しながら別の形を生成することで、新
たな作品のイメージ構想にも利用できる。このた
めに、図 6 で述べた IEC の処理手順に関して、初
期世代を全てランダムに生成するだけでなく、既
存モデルの変形パターンを IEC で生成できる機
能を追加した。

図 10(a)は、本機能を用いて中空の壺形状を初
期世代に加えてその変形パターンを幾つか生成
したもの、図 10(b)は初期世代に 4 個の異なる陶
芸モデルを加えてモデリングを行った例である。
個体数、交叉率、突然変異率、適合度値などの条
件は全て 6. 1 と同じである。これらの形状は、
全て第 5 世代までの繰り返して得られた形である。

図 10(a)のように単一のモデルを追加した
だけでも、かなり意外性のある形が生成できるこ
とがわかる。また、あらかじめモデラで造るモデル
には規則性があり人工的な形になるのに対して、



図 10 既存モデルを利用した造形実験結果

IEC モデリングで生成した形は不規則なため、より自然な形や変形パターンが表現できる。さらに、図 10(b)からモーフィングのような形状の補間演算では発現しないような形も生成できることがわかった。

7. おわりに

本稿では、IEC を基盤とする新たな 3 次元造形環境を提案した。モデリング経験のない初心者でも、システムが提示する形に主観的な評価を与えながら容易に目的形状が制作できる。また、モデルを使ってデザインを行う専門家には、既存モデルの形状特徴を基に自然な形や変形パターンを生成できる機能を追加して、新しい形の着想を支援できるようにした。

今後は、より多くの被験者を対象に造形実験を行い、提案システムの有効性を検証することが急務である。IEC モデリングの効率は利用者の主

観的な選択と評価に依存するため、主観評価実験とその解析による定量的な検証・考察が重要である。VR インタフェースによる対話法の改善[14]や分散環境への対応[15]なども検討して行きたい。

参考文献

- [1] 高木英行, 畝見達夫, 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.692-703, 1998.
- [2] Nishino, H., Utsumiya, K., Sakamoto, A., Yoshida, K., and Korida, K.: A Method for Sharing Interactive Deformations in Collaborative 3D Modeling, Proc. of ACM VRST'99, pp.116-123, 1999.
- [3] Nishino, H., Fushimi, M., Utsumiya, K., and Korida, K.: A Virtual Environment for Modeling 3D Objects Through Spatial Interaction, Proc. of IEEE SMC'99, Vol.6, pp.81-86, 1999.
- [4] Dawkins, R.: The Blind Watchmaker, Longman, Essex, 1986.
- [5] Sims, K.: Artificial Evolution for Computer Graphics, Proc. of SIGGRAPH'91, pp.319-328, 1991.
- [6] Unemi, T.: A Design of Multi-Field User Interface for Simulated Breeding, Proc. 3rd Asian Fussy System Symposium, pp.489-494, 1998.
- [7] Todd, S. and Latham, W.: Artificial life or surreal art?, 1st European Conf. on Artificial Life, MIT Press, pp.504-513, 1992.
- [8] Graf, J. and Banzhaf, W.: Interactive evolution for simulated natural evolution, Artificial Evolution. European Conf. (AE'95). Selected Papers. (Eds. by Alliot, J. M. et al.), Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp.259-272, 1995.
- [9] 青木研, 高木英行: 対話型 GA による 3 次元 CG ライティングデザイン支援, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-II, No.11, pp.1601-1608, 1998.
- [10] 山田辰美, 橋本秋彦, 安達文夫, 下原勝憲, 徳永幸生: 遺伝的アルゴリズムを用いたシームレステクスチャ生成方法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-D-II, No.7, pp.2017-2025, 1999.
- [11] Barr, A.H.: Superquadrics and Angle-Preserving Transformations, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.1, No.1, pp.11-23, 1981.
- [12] Bentley, P. et al.: Evolutionary Design by Computers, Morgan Kaufmann, 1999.
- [13] 安居院猛, 長尾智晴: ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂, 1993.
- [14] 西野浩明, 凍田和美, 宇津宮孝一: 両手ジェスチャで変形可能な 3 次元形状表現法, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.2, pp.698-701, 1999.
- [15] Nishino, H., Mori, Y., Utsumiya, K., Yoshida, K., and Korida, K.: A Collaborative Design Framework in a Distributed Virtual Environment, Proc. PDPTA'99, Vol.1, pp.348-354, 1999.