

対話型進化計算を用いた3次元造形システム

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/2324/4482075>

出版情報 : pp.1-, 2001-03-08. Information Processing Society of Japan(IPSJ)
バージョン :
権利関係 : 利用は著作権の範囲内

対話型進化計算を用いた3次元造形システム

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として対話型進化計算法(IEC)を導入し、進化過程のシミュレーションを3次元形状の生成に応用する。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

A 3D Modeling System 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.

Keywords 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。その中でも、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実用的なVRの応用として期待されている。

近年の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CADツールを用いて斬新な形を設計するためには、相応の経験と専門的な操作技能が要求される。複雑な造形操作に依らないで、デザイナーが新しい形の着想やイメージ創りを手軽に行えるような設計環境が望まれている。

本論文では、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造形システムを提案する。図1に提案するシステム概念を示す。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。提案手法では、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しながら、従来のツールでは制作が難しい自然で意外性のある形を容易に作ることができる。利用者は、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適合度(fitness value)を与える。システムは、高い適合度が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、CGやCADに関する知識や使用経験のない利用者でも、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の基本機能に関

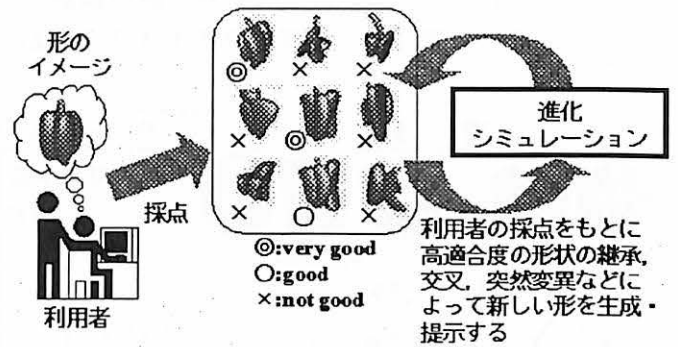


図1. IECモデリングの概念

する理解と操作の習熟が求められるため、初心者や計算機に不慣れなデザイナーが本モデラを自在に使いこなすのは難しいという問題があった。そこで我々は、上述のIECによる造形機能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・経験のない利用者でも容易に3次元形状が創作できる機能を実現した。

2. 関連研究と問題点

IECは、人間の主観的な評価を適合度に反映しながら進化的に最適解を探索するため、予め評価関数を定義するのが困難な問題や、評価が個人の好みや感性に依存する応用システムの構築に適している。IECはこれまで、芸術、工学、娯楽などを中心に応用されてきたが、その中でもグラフィックアート分野ではさまざまな試みがなされている。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]と畝見[6]は、品種改良のアプローチをIECに組込んだグラフィックアート制作システムを開発した。その他にも、3次元CGレンダリング[7]、動植物のCG生成[8]、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作品の制作に数多く応用されている。これらの詳細なサーベイは文献[1]を参照されたい。

上述の関連研究の多くは、その表現能力が特定の対象物に限定されており、汎用的なデザイン支援ツールとして利用するのは難しい。特に、進化計算による最適化問題に対応づけやすい抽象的なイメージや動植物類などを扱うものが多く、制作対象ごとに遺伝子構造や描画方法を決定しなければならない。また、いずれのシステムでも、利用者には許される唯

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。このため、初心者利用には適している反面、専門家による形の詳細化や洗練化

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[3]。各基本形状は、その大きさや空間中での位置と向き、角張り具

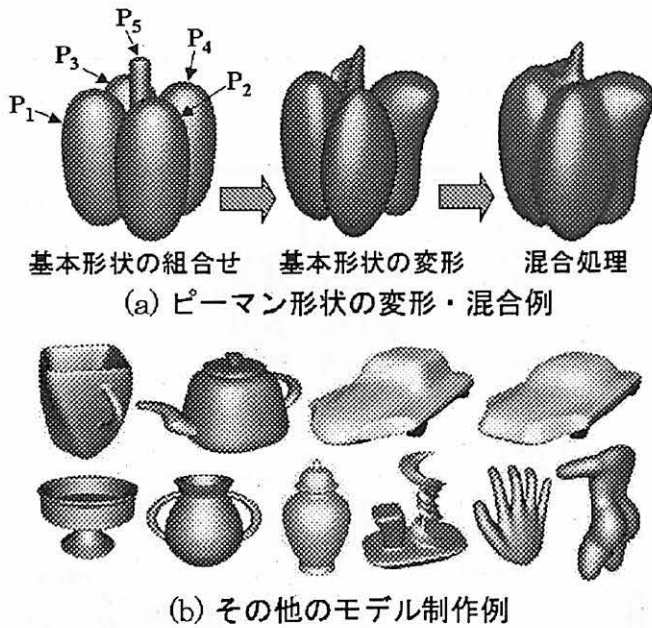


図2. 陰関数モデラによる3次元モデル制作例

に対する要求を満足するのは難しい。

提案システムでは、IECによる造形機能を従来型の陰関数モデラに統合化することで、さまざまな対象物を同一の造形手法と条件から制作できる環境を実現した。さらに、IECと陰関数モデラを相補的に使うことで、初心者から専門家までそれぞれのスキルや利用目的に応じた作品制作も可能になる。

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に実現した。このモデラは、図2(a)に示すように複数の基本形状(primitive shape)を変形しながら滑らかに混合して目的物の概形作成を直観的に行えるという特徴をもつ[2]。図2(b)は本モデラを用いて制作した3次元モデルの例である。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、本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

パラメータ	機能
基本形状の型 type	 超楕円体 超円環体
大きさ (r_x, r_y, r_z, r_a^*)	大きさ 位置 (x_0, y_0, z_0)
位置 (x_0, y_0, z_0)	向き $R = \begin{bmatrix} m & m & m & 0 \\ m & m & m & 0 \\ m & m & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ モデル座標系
向き R (回転行列)	
角張り具合 (e_1, e_2)	 = (2.0, 2.0) (2.0, 1.0) (1.0, 1.0) (0.1, 1.0) (0.1, 0.1)
変形強度 d_{TPX}, d_{TPY} : 尖らせる d_{SH} : せん断する d_{TW} : 捻る d_{BD} : 曲げる	 尖らせる せん断する 捻る 曲げる

* r_a : 超円環体のトーラス半径

(a) 基本形状を定義するパラメータ

パラメータ	機能
フィールド強度 (FS)	FS=3.0
変形強度 D_{TPX}, D_{TPY} : 尖らせる D_{SH} : せん断する; D_{TW} : 捻る D_{BD} : 曲げる	FS=1.5
	FS=1.0

(b) 混合形状を定義するパラメータ

図3. 陰関数モデラの基本機能

合、変形度合いなどを決定するパラメータで定義される。

さらに複雑な形は複数の基本形状を混合して生成する。図3(b)は、5個の基本形状 $P_1 \sim P_5$ を混合して作成した「ピーマン」形状を表す。混合時には、同図に示す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(b)では、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。

図4に開発した陰関数モデラのGUIと操作法を示す。パラメータ値の編集や視点位置の変更などは

全てマウスだけで操作できる。変更したい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、モデル形状の変化もそれに依りてリアルタイムに描画される。

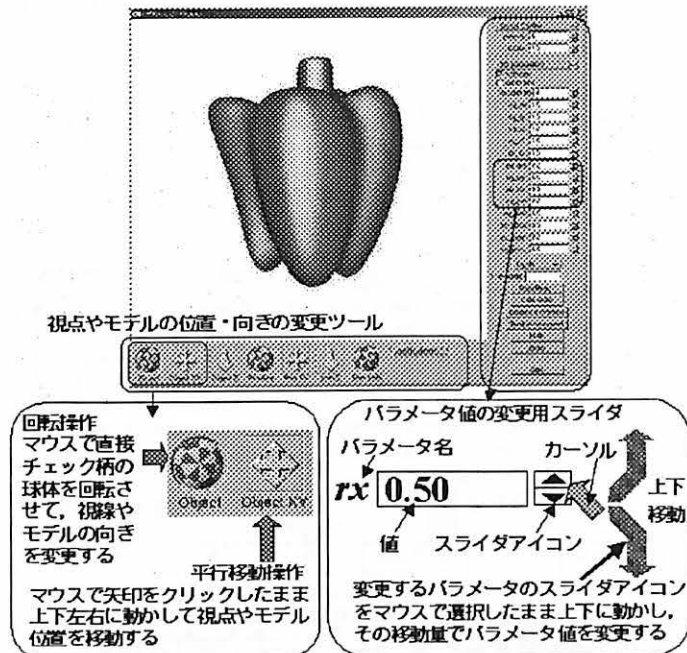


図 4. 陰関数モデラの GUI と操作法

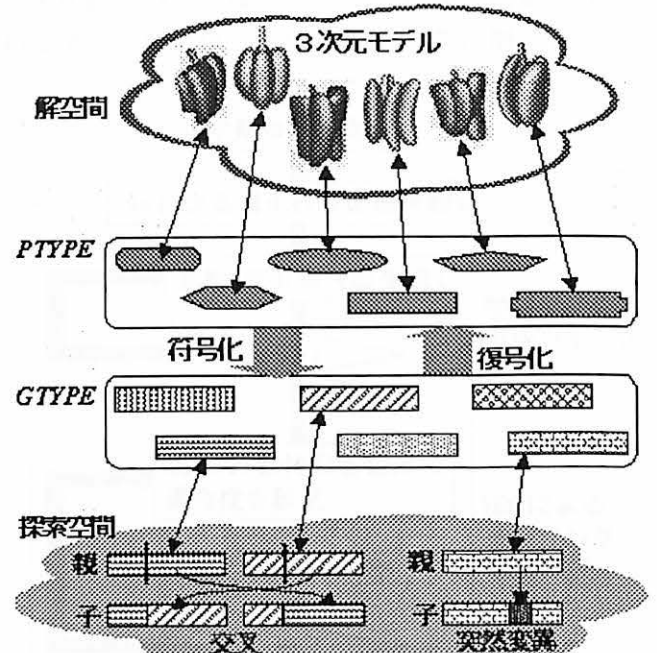
4. IEC モデリング機能の実現

4. 1 IEC モデリングの原理

3章で述べた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、モデラ操作に慣れていない利用者が目的形状の制作に集中するのは難しい。そこで、IEC による形状制作・変形インタフェースを組込んで、システムの細部を知らない利用者でも思い通りの形を容易に創作できる IEC モデリング法を実現した。

提案する IEC モデリングは、図 5 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[11]。新たな形状を導出する進化シミュレーションには、進化的計算技法の 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 次元モデルで構成される。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、対応する実モデルである PTYPE (phenotype)と 1 対 1 の関係にある。一対の 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。新しい世代(子の GTYPE)



GAによる進化シミュレーション
図 5. IEC モデリングの原理

は、現在の世代から選ばれた 2 つの親 GTYPE を交叉して作られる。このとき、適合度の高い GTYPE が親になる確率が高いため、高い評価を与えた形状の特徴が継承されやすく、世代更新の度に特定の形に収束していく。ただし、形の継承と収束を保証しながら新規性や特異性のある変化も維持させるために突然変異も確率的に発生させる。これにより、高適合度の形状とは異なる特徴をもつモデルが常に各世代中に発生するようになり、利用者の発想が画一的な形に偏ることを防ぐ効果がある。

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 6 にピーマン形状の PTYPE と GTYPE の例を示す。PTYPE は 5 個の基本形状 $P_1 \sim P_5$ と 1 個の混合演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 中で GA 操作の対象に選択されたパラメータ値を符号化したビット列で表現される。PTYPE 中のどのパラメータを GA 操作の対象にするかは、利用者が選択フラグを通して指定する。例えば、ピーマン形状

の造形には大きさ (図 3(a)の r_x, r_y, r_z), 角張り具合 (同 e_1, e_2), 変形 (尖らせる: d_{TPX}, d_{TPY} , 曲げる: d_{BD}) に関するパラメータを GA 操作で進化させる。基本形状の回転や捻り変形など, 明らかにピーマン形状の生成に不適切なパラメータは, 本機能を用いて予め GA 操作の対象外とすることができる。

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

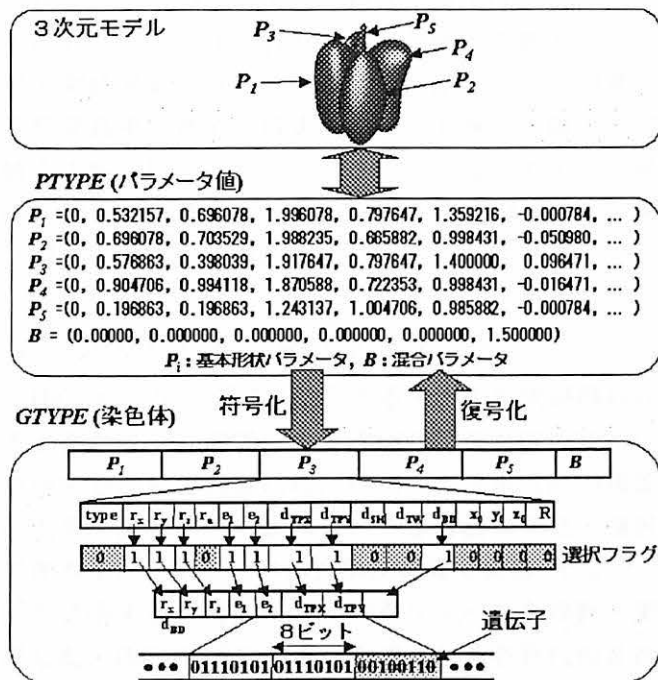


図 6. 3次元モデルの遺伝子コーディング

号化される。

$$G = \dots \times (P - P_{\min}) \quad (1)$$

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, $[\]$ はガウス記号をそれぞれ表す。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。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 GA 操作に選択された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 6 のピーマン形状を表す染色体の長さは 46 バイト ($8 \times 5 + 6$) となる。

4. 2 処理手順

IEC モデリングの処理手順を図 7 に示す。最初に, モデリングに用いる初期形状を定義する。図 8 (a) は, ピーマン形状の造形に用いた初期形状の例である。4 個の楕円体からピーマンの本体を, 細い円柱

形で茎の部分それぞれ定義する。

次に, 進化計算の条件設定を行う。ここでは, 4.1 節で述べた GA 操作の対象にする形状パラメータの選択と, 式(1)の符号化に用いる各パラメータの最大・最小値, GA 操作で用いる交叉率や突然変異率の設定を行う。GA 操作の対象外となったパラメータ値は, 初期形状の値をそのまま使用する。

条件設定の完了後にモデルの初期世代を生成する。初期世代の個体は, GA 操作の対象に指定されたパ

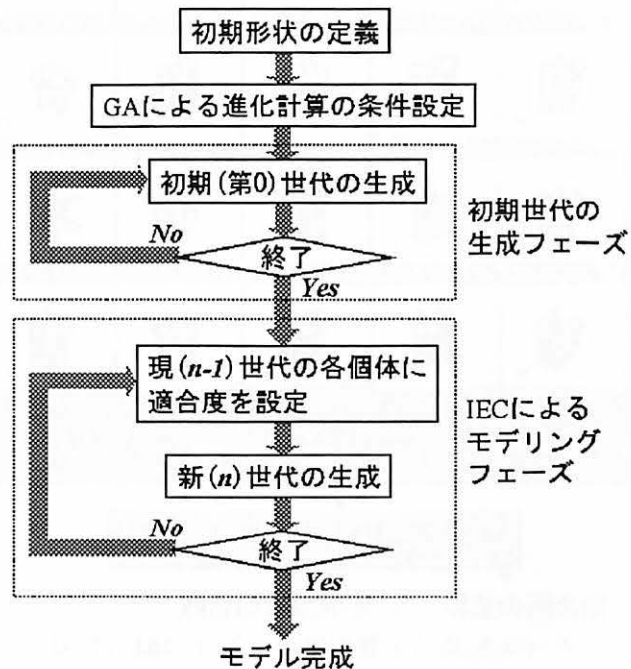
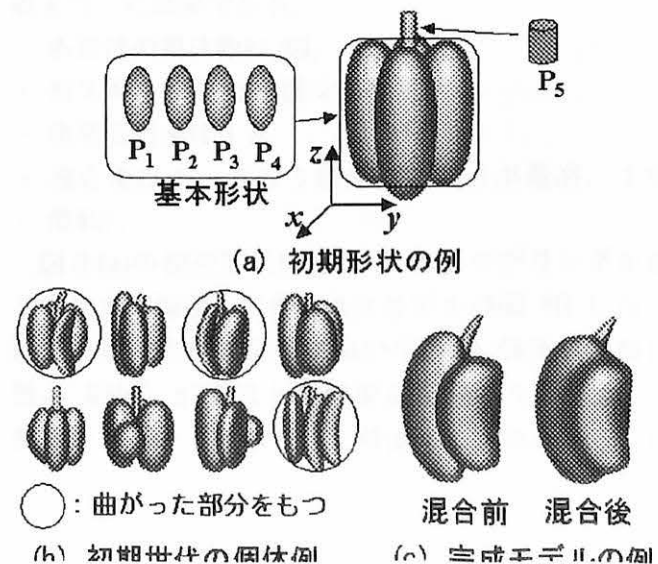


図 7. IEC モデリングの処理手順

ラメータ値のみをランダムに増減して生成する。これを制作したい形状の特徴が現れるまで繰り返す。図 8 (b)は, 同図(c)の「曲がった」ピーマン形状を生成するのに適するような初期個体を含んだ例である。ここでは, 形の質よりもイメージする形状特徴を有する個体が存在すれば良く, 形の詳細化, 洗練化は



次の IEC モデリングフェーズで行われる。

IEC によるモデリングフェーズでは、得られた初期世代の個体の GTYPE を PTYPE に復号化し、その 3 次元形状を描画する。利用者は、個体の数だけ描画される各々のモデルに適合度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。高適合度の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 95% とすると 5% の個体がエリートとして次世代まで生き残る。残り 95% の個体は、現世代の中からルーレット法[12]で選んだ個体を親として交叉と突然変異を行って生成する。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。このような「モデルの描画、評価、新世代の生成」を目的とする 3 次元形状が出現するまで繰り返す。

5. システムインタフェース

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、利用者による適切な評価と選択操作に依存する。そのためには、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見出し・選択できるインタフェースの提供が重要である。そこで、図 9 に示すような利用者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、同図に示すようにリスト形式で一度に表示される。利用者は、予め設定された個体数の候補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を決定できる。適合度は、各モデルが表示されたサブウィンドウの下の対応するボタンをマウスで押下して設定する。

さらに、専門家によるモデルの洗練化にも対応することが求められる。このために、図 4 に示した陰関数モデラとの連携機能を開発した。利用者は、IEC インタフェースで表示されるモデル群の中から特定の形を陰関数モデラ内に呼出して、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 側に戻すことができる。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 [13]。

6. 造形実験

6. 1 実験 I

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。以下の理由からピーマンを課題形状として選んだ。

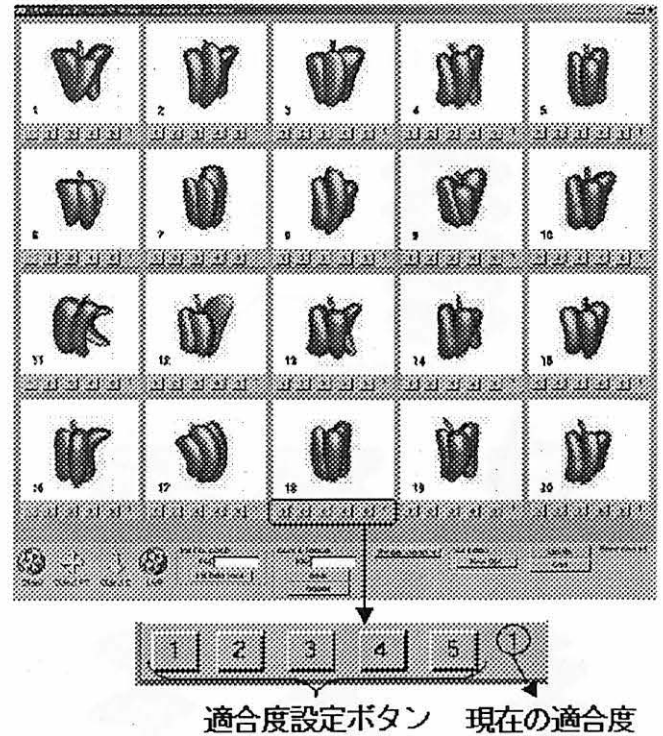


図 9. IEC モデラの利用者インタフェース

- (1) 特殊な背景知識を必要とせず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 10 は、以下の条件下でピーマン形状の造形実験を行った結果である。

- ・ 各世代の個体数は 20、
- ・ 交叉率は 95% 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)。

図 8 (a) の初期形状に対して IEC モデリングを第 5 世代まで繰り返して得られたモデルが図 10 に示されている。各世代生成において、19 個体 (全個体数の 95%) が交叉と突然変異を経て生成され、1 個体がエリート個体として新世代に継承される。図

8 (a)~(d)では、初期世代の生成から IEC フェーズでの適合度設定までの一連の処理において異なる形の特徴が選択されており、同一の初期形状と条件設定からでも異なるピーマン形状が生成できることを表している。各モデルの生成に要した時間はいずれも数分程度で、自然なピーマンの形が容易に作成できることが分かった。

今回用いたピーマンのような形を市販の CAD ツ

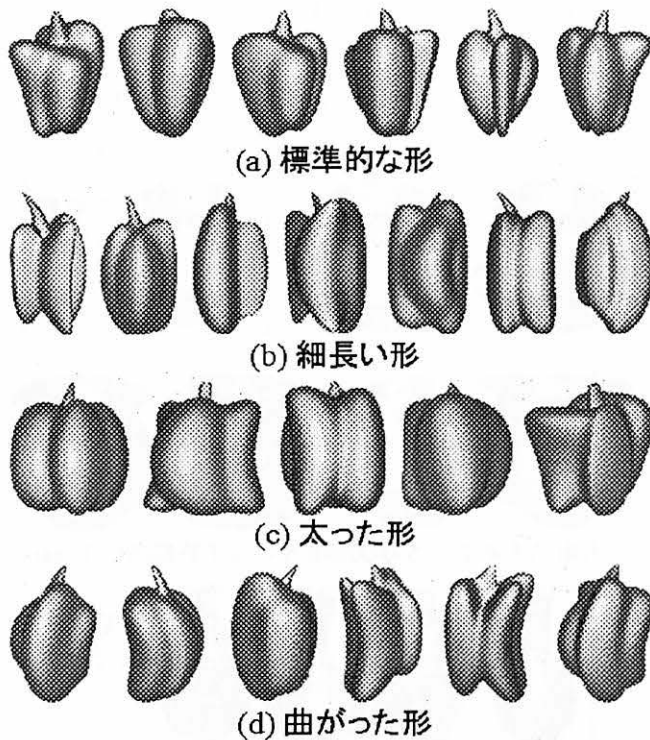


図 10. 造形実験例 (その 1)

ールで作成するには、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 実験 II

6.1 項のように、造形対象が明確な場合の支援機能だけでは、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利用者には不十分である。むしろ、漠然とした形からさまざまな候補形状を提示しながら利用者のイメージを刺激するような造形支援の形態が望まれる。このような要求への適合性を確認するために、図 11 に示す実験を行った。同図(a)のように上下に同一の楕円体形状を積み重ねた初期形状を用意して、図 3 (a)のパラメータ中で xy 平面上での大きさと位置、角張り具合、および変形

(尖らせる、捻る) の各パラメータを IEC でモデリングした。これは、陶芸の「手捻り」や「ろくろ」などの、上下方向に粘土を積層する造形法との類似性を想定したものである。

図 11(b)~(d)に得られたモデルの例を示す。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 項の実験と同じである。これらの形状は、全て第 5 世代までの繰返しで得られたもので、1つの造形に要した時間は 2~3 分であった。

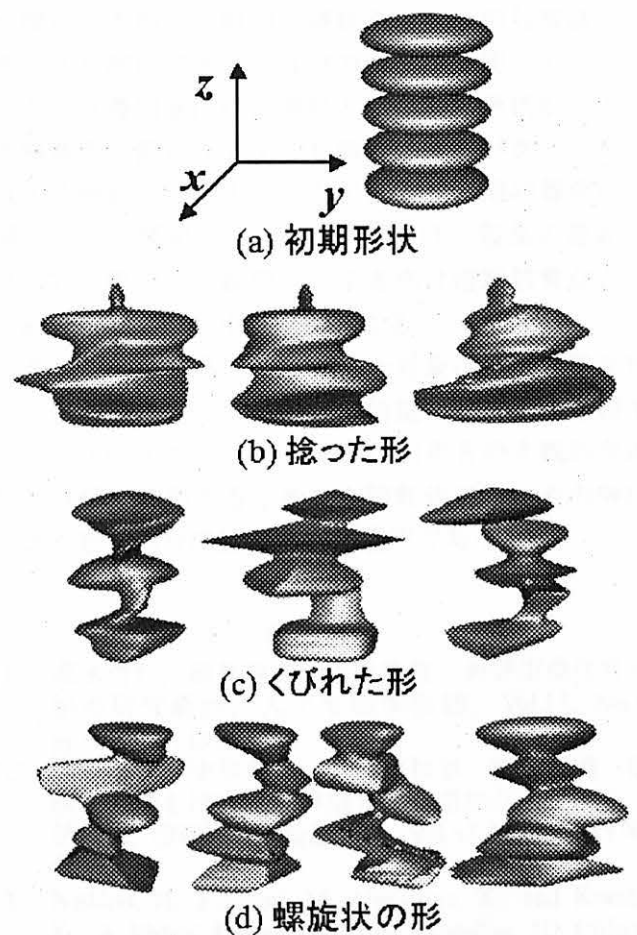


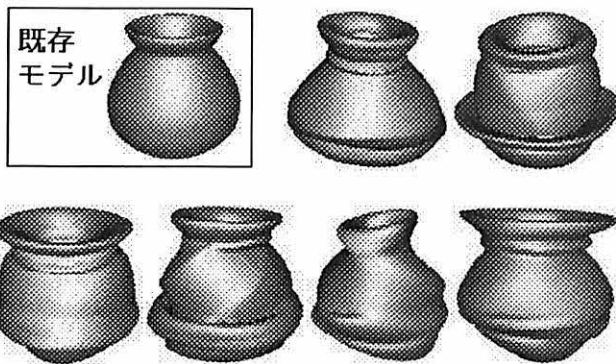
図 11. 造形実験例 (その 2)

さらに、初期状態からの造形に加えて、既存の形をもとに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。専門家がすでに作成したモデルの特徴を継承しながら別の形を生成できれば、新たな作品のイメージ構想にも有用である。このために、図 7 で述べた IEC の処理手順において、初期形状からランダムに生成する初期世代の代わりに、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。

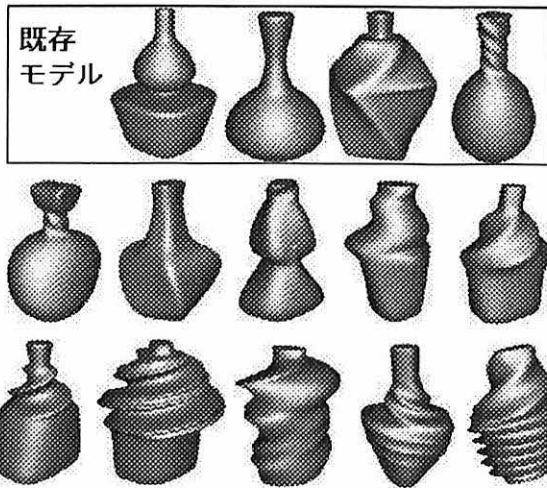
図 12(a)は、本機能を用いて中空の壺形状から新

たな変形パターンを幾つか生成したものの、同図(b)は4個の異なる陶芸モデルからIECモデリングを行った例である。図12(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、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12(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。

以上の実験から、利用者の目的やスキルに応じた



(a) 1つの既存モデルを初期形状として与えた場合



(b) 4つの既存モデルを初期形状として与えた場合

図12. 造形実験例(その3)

モデリング環境の提供が可能であることが分かった。初心者は、システムが生成する形状の評価という基本操作のみで新たなモデルが作成できる。基本操作や造形システムの仕組みに慣れてきた利用者は、進化計算の条件やパラメータ値の変更範囲の調整などを通じて造形処理をカスタム化できる。さらに、陰関数モデラを使いこなせる専門家でも、漠然とした

形から新しいモデル形状を探索する、新たな形の生成に既存モデルを利用する、IECで生成したモデルを直接編集しながら形を洗練化するなどの利用形態も可能になる。

7. おわりに

本論文では、デザイナーの頭の中にある漠然としたイメージを具体的なモデルとして可視化する手段として、IECを基盤とする造形インタフェースを提案した。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。従来のモデラを使ってデザインを行う専門家には、漠然とした初期形状からの造形機能や、既存モデルから新しい変形パターンを生成する機能を提供することで、新しい形の着想が支援できる。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。

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。

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] 西野浩明, 宇津宮孝一, 吉田和幸, 凍田和美: 陰関数表現を用いた協調型3次元造形システムの一構成法, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.2, 2000(掲載予定).
- [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] Bentley, P. et al.: *Evolutionary Design by Computers*, Morgan Kaufmann, 1999.
- [12] 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.
- [13] Nishino, H., Takagi, H., Cho, S., and Utsumiya, K.: A 3D Modeling System for Creative Design, Proc. of IEEE ICOIN-15, pp.479-486, 2001.