

対話型進化計算と幾何モデラによる相補型デザイン システムの試作と評価

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/2324/4482094>

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.179-186, 2001-10.
Information Processing Society of Japan(IPSJ)

バージョン :

権利関係 :



対話型進化計算と幾何モデラによる 相補型デザインシステムの試作と評価

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, {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 4-9-1, takagi@kyushu-id.ac.jp

あらまし コンピュータグラフィックス (CG) で用いる 3 次元モデルの制作には, 相応の経験と専門的な操作技能に加えて, 魅力的な形がデザインできる芸術的センスも求められる. 本論文では, 対話型進化計算 (IEC) による新しい形の探索と, 幾何モデラによる形状の洗練化機能を相補的に利用しながら, 容易に CG モデルが作成できる造形システムの構成法を提案する. 提案システムでは, 一群の CG モデルを染色体に符号化し, 利用者の付与する適合度に応じて遺伝的アルゴリズム (GA) で進化させる. GA で生成されたモデルを, 幾何モデラでより高品質に仕上げる機能も提供する. 写実性と創造性を問う 2 種類の主観評価実験を通じて, 提案手法の有効性についても評価する.

キーワード 3 次元モデリング, 対話型進化計算, コンピュータグラフィックス, デザイン支援.

Prototyping and Evaluation of a Complementary Design System Using Interactive Evolutionary Computation and a Geometric Modeler

Hiroaki NISHINO[†], Hideyuki TAKAGI[‡], and Kouichi UTSUMIYA[†]

[†]Department of Computer Science and Intelligent Systems, Oita University
700 Dannoharu, Oita, 870-1192 Japan, {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, takagi@kyushu-id.ac.jp

Abstract 3D model creation for computer graphics does not only require proper experiences and professional modeling skills, but also an artistic sense to design appealing shapes. We propose a modeling system architecture for aiding new shape creation without demanding such special skills of users. The proposed system stimulates complementary usage of those functions to explore new shapes by using *interactive evolutionary computation* (IEC) and to elaborate the shapes with a geometric modeler. It encodes a set of 3D models into corresponding chromosomes, evolving them with Genetic Algorithm according to fitness values rated by a user. We also describe subjective tests considering two design aspects, realism and creativeness, to evaluate the proposed method.

Key Words 3D modeling, Interactive Evolutionary Computation, Computer graphics, Design Support.

1. はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) の利用分野の急速な拡大とともに、多様な3次元造形ツールがパソコン上で利用できるようになった。しかし、CGモデルの制作には相応の経験と専門的な操作技能に加えて、見る人の感性を刺激する魅力的な形がデザインできる芸術的センスも求められる。計算機に不慣れなデザイナー、あるいは図学やデッサンに疎い技術者でも、現実感のあるモデルを作りながらCGの表現力を体験したり、新しい形を描出する美的センスを磨いたりすることが可能なツールの実現が望まれている。

これまで、CGモデルの制作支援を目的として、両手で仮想物体を直接操作できる3次元モデラ[1][2]、全天周ディスプレイを用いた没入型モデラ[3]、ジェスチャによる造形法[4]、2次元のスケッチ入力から立体モデルを生成する3次元造形ツール[5]等が提案されてきた。これらは、空間型インタフェースの提供や絵画スケッチの3次元形状入力への応用による造形操作の簡易化を目的としており、新しいモデル形状の発想や概念設計を支援することはできない。

一方、対話型進化計算 (Interactive Evolutionary Computation; 以下 IEC) [6] を CG 作品の制作に応用した例として、アートイメージの生成[7][8][9]、CG イメージの陰影設定[10]、顧客向けデザイン支援[11]、シームレステキスト生成[12]、インテリアデザイン[13]などがある。これらは、IECによる進化シミュレーションに対応づけしやすい、抽象的なイメージからの作品制作を目的としている。利用者は、完成イメージを明確に持っていないくても、システムが提示する候補モデルに適合度を付与しながら新規性に富む作品がデザインできる。一方、目的形状が明らかな場合やモデルの細部を編集したい場合には、適合度付与という間接操作でその形へ明示的に近づけることが難しいという欠点もある。

本論文では、図1に示すように関数型幾何モデラと IEC を相補的に利用できるようにすることで、様々な利用者や機能要求に対応可能な汎用造形ツールを提案する。初心者やモデラに不慣れな利用者は、主に IEC によるモデル形状の生成・進化機能を利用することで、モデラ操作の習熟を待たずに CG モデルが制作できる。モデラの習熟者は、IEC で新規性・意外性のある形を探索しながら、見つかった形をモデラで洗練化して高品質

に仕上げることもできる。IEC の利点である「大域空間からの最適解 (CG モデル) 探索能力」を新規形状の生成に利用しながら、「最適解近傍での収束が遅い」という欠点は幾何モデラで直接編集する機能で補間する。このような、IEC の利害得失を勘案した相補的なアプローチとその評価は、従来研究ではほとんど行われていない。

さらに本論文では、主観評価実験を行って提案手法を評価・検証する。写実性と創造性を問う二種類のテーマについて IEC および幾何モデラによる造形実験を行い、各造形法の有効性と操作性の比較評価を通じて提案手法を検証した。

2. システムの実現法

2.1 幾何モデラの機能

提案システムの基盤となる幾何モデラは、図1左側に示すように複数の基本形状 (同図の $P_1 \sim P_6$) を組合せ、形状間の四則演算や変形を行いながら滑らかに混合して CG モデルを制作する[14]。1つの基本形状は超2次関数で定義され、これに図2の変形操作を加えながら、粘土細工のような感覚でモデルが作成できる。複数形状の混合は、陰関数法を用いて行う。図3に本モデラで制作した3次元モデルの例を示す。

2.2 IEC による造形支援機能

2.1の幾何モデラで造形されるCGモデルを、IECで生成・進化させる機能を実現した。遺伝子コーディングした3次元モデルに選択・交叉・突然変異という遺伝的アルゴリズム (GA) 操作を施して利用者が好む形に進化させて行く[15]。利用者は、システムが生成するモデル形状の中から、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を与える。システムは、適合度が高い形の特徴を継承しながら GA 操作を実行して新しいモデルを生成する。この「利用者による形の評価と GA による新形状の生成」を利用者が満足する形が出現するまで繰返す。

2.3 3次元モデルの遺伝子コーディング

新しい3次元モデルをGAで導出するために、図4のように遺伝子コーディングを行う。同図は、図1に示したピーマンモデルのコーディング例を示している。個々の3次元モデルが1つの個体を形成し、そのモデル形状を定義するパラメータ値を染色体にコーディングする。各基本形状 P_i ($i=0, \dots, 6$) は、表1に示す9種類のパラメータで定義される[14]。

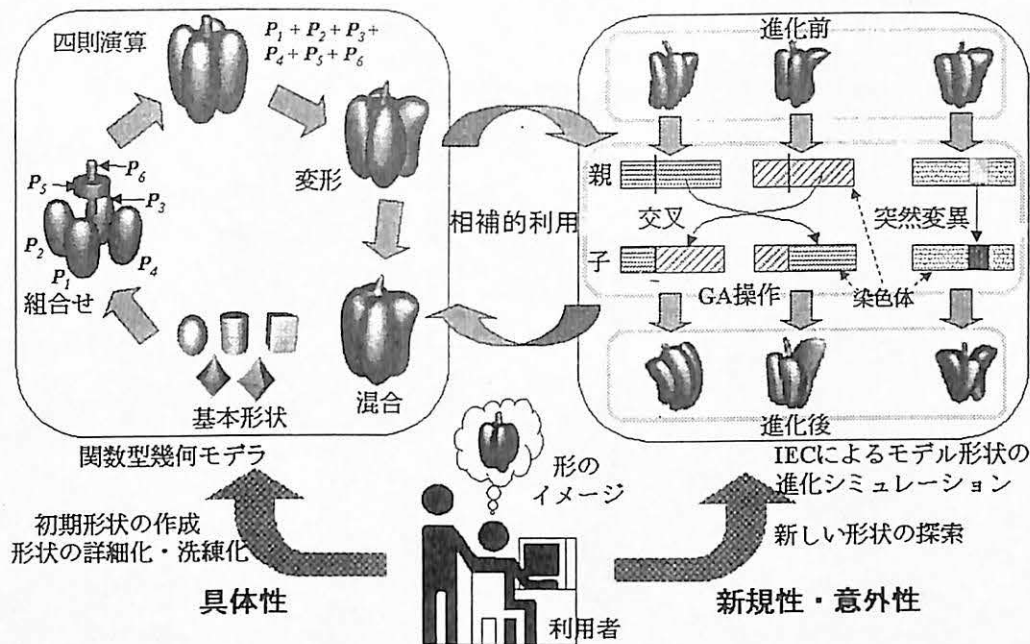


図1：提案システムの概念

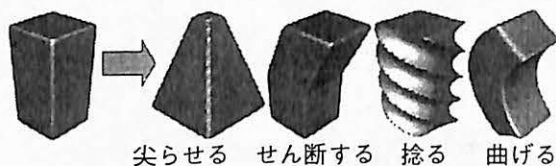


図2：基本形状の変形操作

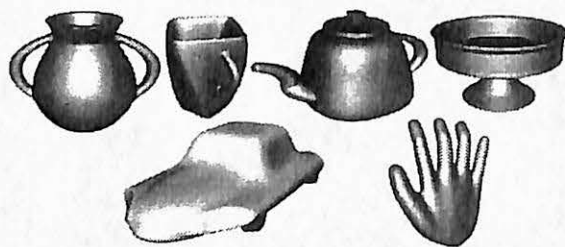


図3：モデルの制作例

GA操作の対象にするパラメータは、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で、回転や捻り変形などが不適切であると判断すれば、本機能を用いて予めGA操作から除外できる。図4の例では、大きさ（円環体のトラス半径 r_a 以外の3パラメータ）、角張り具合、尖り変形、曲げ変形に関する計8個のパラメータをGA操作の対象に選んでいる。

形状パラメータ値からビット列への変換は、以下の式を用いて行う。

$$G = \left\lceil \frac{2^8 - 1}{P_{\max} - P_{\min}} \times (P - P_{\min}) \right\rceil \quad (1)$$

G はパラメータ P の遺伝子コード、 $P_{\max}$ と $P_{\min}$ はパラメータ P の最大・最小値、 $\lceil \cdot \rceil$ はガウス記号を表す。

IECは一定数の個体を常に維持しながらGAによる進化シミュレーションを実行する。GA操作で生成される新しい（子）世代は、現在の世代から選ばれた2つの（親）個体の染色体を交叉して作られる。このとき、高適合度の個体が親になる確率が高いため、世代更新の度に利用者の評価が高い形に収束していく。利用者の意図する形に収束してきたモデルが淘汰の対象にならないように、高適合度の個体はエリートとして次世代にそのまま継承されるようにした。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選択法[16]で選ばれた親個体を交叉して生成する。

また、形の収束を保証しながら新規性や特異性のある変化も維持するために、突然変異を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。

IECでは候補解の評価を人間が行うため、一世代の個体数を高々20程度に設定するのが一般的である。後述するように、本システムでも個体数を最大20としてインタフェースの設計と実験を行った。

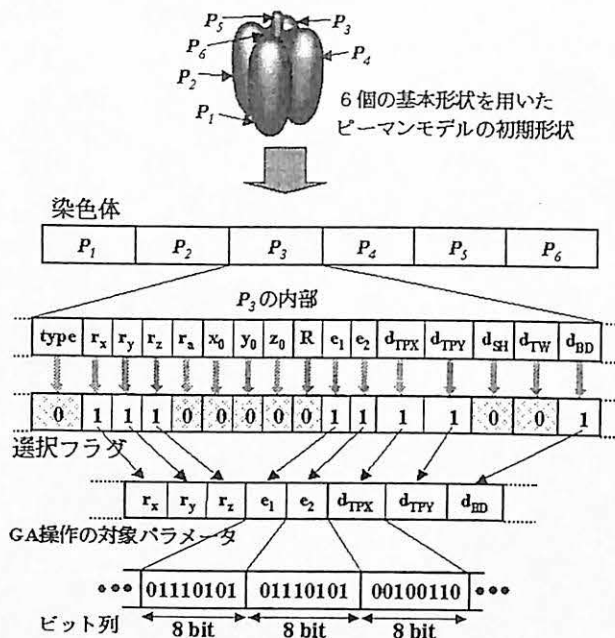


図4：3次元モデルの遺伝子コーディング

表1：基本形状の定義パラメータ

No.	パラメータ名	意味
1	<i>type</i> (int)	基本形状の型
2	r_x, r_y, r_z, r_a (float)	大きさ
3	x_0, y_0, z_0 (float)	位置
4	R (4×4 matrix)	向き
5	e_1, e_2 (float)	角張り具合
6	d_{TPX}, d_{TPY} (float)	尖り変形の程度
7	d_{SH} (float)	せん断変形の程度
8	d_{TW} (float)	捻り変形の程度
9	d_{BD} (float)	曲げ変形の程度

2.4 造形手順と利用者インタフェース

図5に造形手順の概要を示す。最初に、モデリングの初期形状として、楕円体、円柱形、直方体等の単純形状を配置しながら、造形対象物の形を単純化したモデルを作っておく。ピーマンの例では、図4上部に示したように、4個の楕円体($P_1 \sim P_4$)でピーマン本体を、細い円柱(P_5)と平たい円柱(P_6)で茎部分をそれぞれ定義する。

次に、進化計算の条件設定を行う。ここでは、2.3で述べた選択フラグ、式(1)で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等の設定を行う。GA操作の対象外パラメータは、初期形状の値をそのまま使用する。

以上の準備の後、造形フェーズでモデルを制作する。図6に幾何モデラおよびIECモデラのGUIを示す。幾何モデラで作成した初期形状をIECで新しい形に進化させながら、意図する形状に収束してきた個体を幾何モデラで仕上げる。このような、「IECによる新たな形の探索と幾何モデラによる形状の洗練化」を目的の形が完成するまで繰り返す。

両インタフェースは、モデルデータベースを介して制作途中のCGモデルを共有する。IECで進化していくモデル群の染色体情報は、逐一、同データベースに蓄積される。そこで、進化中のモデルの中から特定の形を選び、そのモデルを幾何モデラに読込んで造形作業を行うことが可能である。モデルの染色体情報は、幾何モデラがパラメータ値に復号化して読込むため、利用者は個別のパラメータ値を直接編集しながら形を整えることができる。直接編集の後、同モデルをデータベースに戻し、その形をエリート個体としてIECによる進化計算を続けることもできる。

パラメータ値の変更、染色体情報の読書き、適合度設定などの操作は全てマウスで実行できる。また、パラメータ値の変更にとまらぬモデル形状の変化や、GAによる形状進化の結果は、利用者の操作に応じてリアルタイムに更新・描画されるため、常に最新結果を確認しながら両モデラによる造形作業を進めることができる。

IECモデリングで意図する形が得られるか否かは、利用者による候補形状の適切な評価に依存する。そのためには、各世代中の目的形状に近い形を利用者が容易に選択・指示できなければならない。そこで、図6のGUIを設計・開発した。利用者は、リスト形式で同時に表示される全候補モデルを眺めながら、各モデルの良し悪しを決定できる。適合度は、各モデルの表示画面の下部に配置されたボタンをマウスで押下して設定する。

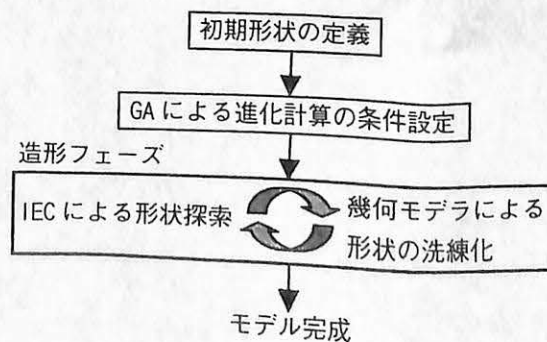


図5：造形手順

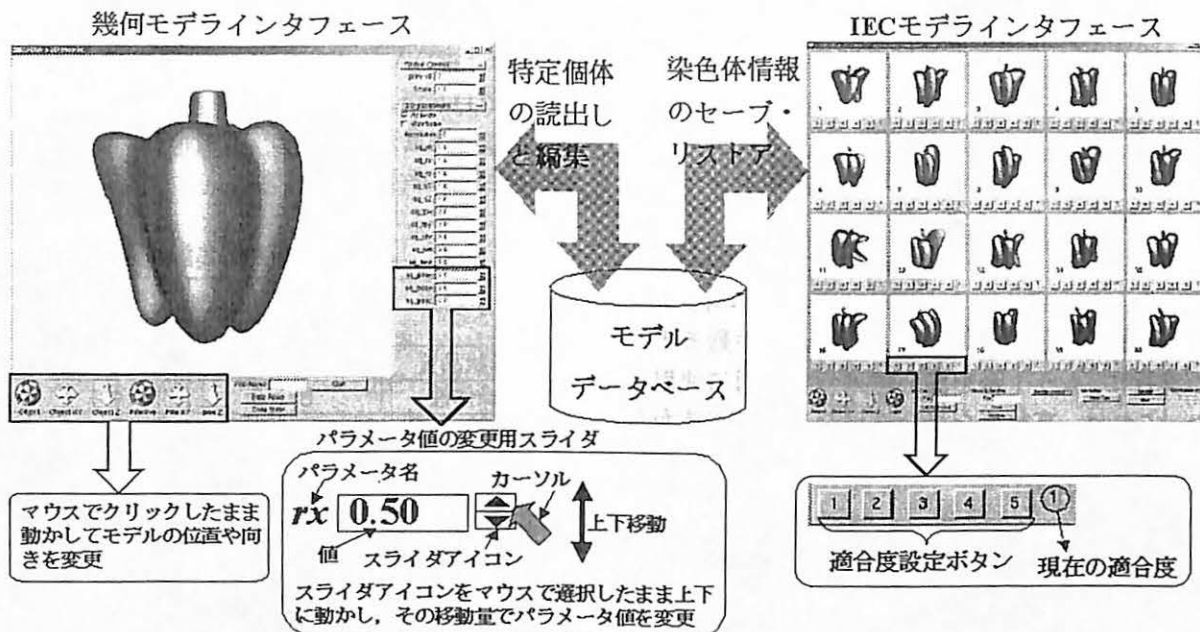


図6：幾何モデラとIECモデラの利用者インタフェース

3. 主観評価実験

3.1 造形課題

幾何モデラによる手動変形法（以下、手動法）とIEC法を相補的に利用する効果を検証するために、同一テーマに対して各々の手法で造形を行った結果を比較する主観評価実験を行った。大学でのCG導入教育を想定して、芸術工学部の学生20名の被験者に対して造形実験を行った。造形対象には、「誰でも容易にその形を想像できる、単純な形だが市販のCADで自然な形に仕上げるのは難しい、絵画デザイン等にも多用されイメージを膨らませるのに必要な変化やばらつきをもつ」等の理由からピーマンを選んだ。

写実性および創造性の2つの局面を問う以下の2テーマを制作課題として設定した。

- (1) 写実的テーマ：図7の実物ピーマンの写真を提示して、これになるべく近い形を制作してもらう。
- (2) 創造的テーマ：「猛々しいピーマン」という抽象的な表現からイメージする形を制作してもらう。



図7：写実的テーマの造形課題

3.2 実験の手順と環境

全被験者に対して、上記のテーマ毎にIEC法および手動法を用いてモデルを制作してもらい、各テーマ終了後に以下の観点から2つの造形手法を5段階で比較評価してもらった。

- ・形状品質：どちらの手法がよりテーマに近い形に出来上がったか。
- ・操作性：どちらの手法が使い易かったか。

全体をA, Bの2グループ（各10名）に分け、表2に示す日程で実験を行った。Aグループの被験者は、写実的テーマをIEC法、手動法の順序で制作した後に比較評価を行い、次に創造的テーマも同様の手順で実施した。その後1週間を置いて同じテーマで造形手法の順序を逆にして実験を行った。Bグループの被験者は、Aグループと造形手法の適用順序を全て逆にして実験を行った。1週間の間隔は、順序効果の影響を抑えるために、これまでの造形実験等の経験を踏まえて設定した。

IEC・手動法とも、図4のモデルを初期形状に用いた。IEC法の実行条件は以下の通りである。

- ・各世代の個体数は20。
- ・大きさ（表1の r_a 以外）、角張り具合、尖り変形、曲げ変形という全8パラメータ／基本形状×6基本形状＝計48パラメータをGAの操作対象。
- ・ルーレット選択とエリート戦略を適用。
- ・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).

各世代は, 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個体がエリートとして前世代からそのまま継承される.

実験環境として, 各被験者に2台のWindows-NTパソコン(MMX Pentium 233MHz, 64MBメモリ)を提供し, 1台をIECあるいは手動モデルの実行に, もう1台を混合結果の表示用に使用した. これは, 高負荷な混合処理をモデル本体から分離して造形操作のリアルタイム性を確保するためである[17].

表2: 実験の手順とスケジュール

順序	造形テーマ	グループ	
		Aグループ	Bグループ
1	写実的テーマ	IEC→手動	手動→IEC
2	創造的テーマ	IEC→手動	手動→IEC
1週間のインターバル			
3	写実的テーマ	手動→IEC	IEC→手動
4	創造的テーマ	手動→IEC	IEC→手動

3.3 実験結果

本実験では, 全被験者が各テーマに対して同一の造形法で2回ずつモデル制作を行っているため, その評価結果は以下の4通りに分類できる.

- 2度ともIEC(あるいは手動)法が良いと答えた人.
- 1度はIEC(あるいは手動)法が良いと答え, 他方は両者に差がないと答えた人.
- 2度とも差がないと答えた人.
- 2度とも違う回答をした人.

以上の集計結果に対して, Shefféの一对比較法(浦の変形)[18]で検定を行った. この内, 両者に差異が認められなかった(c)と, 順序効果が表れたと考えられる(d)は検定データより除外した.

表3は分類(a), 表4は(a)と(b)の集計結果をそれぞれ表している. 写実的テーマでは, 形状品質の質問に対して7(2)¹人が手動法, 0(1)人がIEC法を良い方法と回答した. これにより, 5%の危険率で有意な差が認められ, 写実的テーマには手動法が良いとの結果が得られた. 操作性に関しては, 手動法が8(1)人, IEC法が3(0)人となり, 検定上の有意差はないが, 手動法が良いという傾向が見

られた. 創造的テーマでは, 形状品質で4(3)人が手動法, 4(1)人がIEC法を, 操作性で4(1)人が手動法, 7(1)人がIEC法をそれぞれ良いと回答した. 検定上の有意差はないが, 操作性に関してIEC法が手動法を上回った.

表3: 分類(a)の集計結果

	写実的テーマ	創造的テーマ
	手動:IEC	手動:IEC
形状品質	7:0*	4:4
操作性	8:3	4:7

*危険率5%で有意差あり

表4: 分類(a), (b)の集計

	写実的テーマ	創造的テーマ
	手動:IEC	手動:IEC
形状品質	9:1*	7:5
操作性	9:3	5:8

*危険率5%で有意差あり

4. 考察

本実験では, 8パラメータ×6基本形状を可動にしてCGモデル生成を行った. このパラメータ数が十分多い場合には, GUIでの表示スペースの問題と手動による調整の煩わしさから, IEC法の優位性が容易に予想でき, 逆に十分少ない場合は手動法が優位になる. 3.3の実験結果はパラメータ数が48個の場合であり, この実験条件で結果が大きく変わり得る. また一般に, 利用者が表現しようとするモデル形状と特定のパラメータ調整による形の変化が一对一に対応する場合は, 手動での直接操作が可能となり, 手動法の優位性が強くなる. CGライティング[10]の例のように, 利用者が意図する表現形態と調整するパラメータの対応関係がわかりにくい場合にはIEC法が優位になる. 以上の2点に留意した上で, 前節の実験結果を考察する.

対象形状が提示された写実的テーマの場合は, 必要な変形操作を明示的に指示できる手動法が好まれる傾向にある. IECによる造形は, GAで生成されたモデルの中から課題に類似する形に高い適合度を付与するという間接操作となり, モデルを直接変形できないもどかしさが複数の被験者から指摘された. 表2, 3の写実的テーマの結果にこの傾向が顕著に表われている. 一方, 創造的テーマは, 「猛々しいピーマン」という抽象表現から具体的なモデル形状を発想する難しさに加えて, 手動法ではその形を3次元モデル化す

¹ 7(2)は, 7名が分類(a), 2名が分類(b)の回答数であったことを表す.

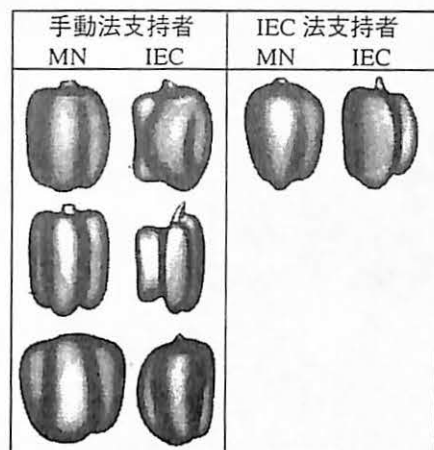
る造形操作へ変換する必要がある。特に、CG に不慣れな利用者にはこれらの作業が難しいため、システムが提案する候補形状を評価しながら形の具体化が可能な IEC 法を支持する意見が手動法を上回った。表 2、3 の創造的テーマにおける操作性項目がこの傾向を示している。

また、創造的テーマでは、「猛々しいピーマン」をある程度明確にイメージできた被験者が手動法を好んだのに対し、あいまい、あるいは全くイメージできなかった被験者は IEC 法を支持したことがアンケートより判明した。特に IEC 法の支持者からは、IEC が提示する候補形状の中から新しい形のヒントが得られたことが指摘された。

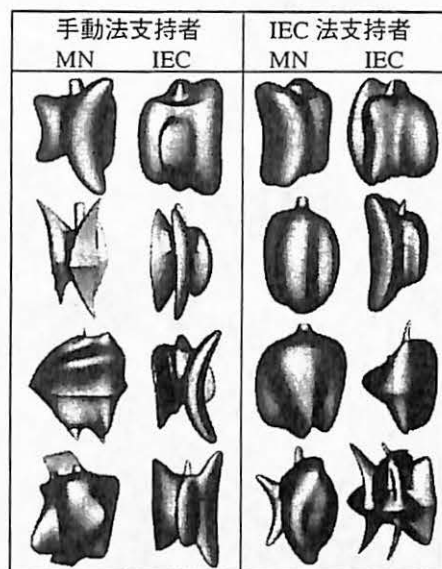
図 8 (a)、8 (b) に写実的および創造的テーマで制作された 3 次元モデルの例を示す。両図とも、被験者が支持した造形法によって 2 つに分類した。写実的テーマで IEC を支持したのは一人だけで、その被験者の結果が図 8(a) の IEC 支持者項に示されている。導入教育を想定した今回の実験では、使用可能な造形操作をピーマン制作に適した 48 個のパラメータ調整に制限した。このため、課題形状とその形を生成するのに必要な造形操作との対応がとり易く、手動法をより直観的な造形法に感じた被験者も多かった。写実的テーマの題材(図 7)と初期形状(図 4)の差異が小さく、手動法での造形が比較的容易であったことも手動法支持者が多かった原因と考えられる。

図 8 (b) の作品例に着目すると、手動法支持者が大幅な変形を施した奇抜な形を手動法で作成しているのに対して、IEC 支持者の手動法による作品は初期形状からの変化が少ない普通の形が多い。後者の原因として、手動造形に慣れていない、あるいは「猛々しいピーマン」のイメージが湧かない等が考えられるが、これらの被験者も IEC 法で変化の大きい個性的な形を作っている。したがって、手動変形に慣れていない利用者が複雑な造形操作を要するモデルを作成するのに、IEC 法が有効であったと考えられる。

両モデラを用いた相補型造形については、その初期実験結果を図 9 に示す。幾何モデラで作成した図 9 (a) の 3 種類の陶芸モデルを初期形状として、IEC で進化させた結果が同図(b)である。9 パラメータ (3 節の 8 パラメータ + 捻り変形) × 3 基本形状 = 計 27 パラメータを可動にして、前節の実験と同じ交叉率と突然変異率を用いた 5 世代までの進化結果を示している。



(a) 写実的テーマの作品例



(b) 創造的テーマの作品例

MN: 手動法で作られた CG モデル

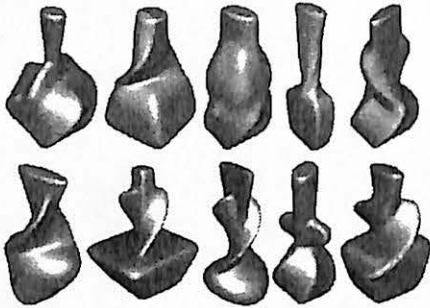
IEC: IEC 法で作られた CG モデル

図 8: 実験で制作された 3 次元モデルの例

図 9 (a) のように、幾何モデラで作成する CG モデルには規則性があり人工的な形になるが、同図 (b) のように IEC による進化を適用することで、規則性の少ないより自然な形が表現できることがわかる。このような、IEC で生成される形の意外性や新規性は、熟練者の造形内容が画一的になるのを防止する効果も期待できる。また、対象形状が複雑になると手動法でのモデル制作は熟練者でも難しいため、IEC による対話的なモデル作成機能は有用であると考えられる。これらの点については、実際の製品設計や工芸品制作の現場などで試用しながら、今後さらに詳しく検証していきたい。



(a) 幾何モデラで制作した陶芸モデル



(b) (a)を IEC で進化させた陶芸モデル

図9：相補型造形による陶芸モデルの制作

5. おわりに

本論文では、IEC による新しい形の探索・考案と、幾何モデラによる直接手動変形を相補的に利用できる造形システムの構成法について述べてきた。漠然としたイメージのモデル化を IEC で効率良く支援しながら、細かい修正を幾何モデラで補うことができる。写実性と創造性の2面を問う主観評価実験を実施して、具体的な課題に対しては幾何モデラによる手動造形が、新しい形の発想や創作には IEC による造形支援がそれぞれ有効であることが判明した。

今後は、製品の意匠設計や工芸品のデザインなどを題材として、実用化を念頭に置いたシステムの評価と改良を目指したい。ジェスチャや音声などの入力手段を組込んだ、より直観的で楽しく利用できるインタフェースの提供、およびネットワークを介した遠隔教育への応用についても検討して行きたい。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(課題番号 12680355 および 12680418)、および九州産業技術センター産学 R&D 推進助成金による。

参考文献

- [1] Kiyokawa, K., Takemura, H., Katayama, Y., Iwasa, H., and Yokoya, N.: VLEGO: A Simple Two-handed Modeling Environment Based on Toy Blocks, Proc. of ACM VRST'96, pp.27-34, 1996.
- [2] Shaw, C. and Green, M.: THRED: A Two-Handed Design System, ACM Multimedia, Vol.5, No.2, pp.126-139, 1997.
- [3] 橋本直己, 中嶋正之: CAVE における直観的操作手法と動的自由度制御を用いた3次元形状モデラ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.3, pp.487-494, 1999.
- [4] 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.
- [5] Igarashi, T., Matsuoka, S., Tanaka, H.: Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design, ACM SIGGRAPH 99 Conference Proceedings, pp.409-416, 1999.
- [6] Takagi, H.: Interactive Evolutionary Computation: Fusion of the Capacities of EC Optimization and Human Evaluation, Proceedings of the IEEE, 2001 (to appear).
- [7] Dawkins, R.: The Blind Watchmaker, Longman, Essex, 1986.
- [8] Sims, K.: Artificial Evolution for Computer Graphics, Proc. of SIGGRAPH'91, pp.319-328, 1991.
- [9] Unemi, T.: A Design of Multi-Field User Interface for Simulated Breeding, Proc. 3rd Asian Fussy System Symposium, pp.489-494, 1998.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 是永基樹, 萩原将文: 対話型進化計算によるインテリアレアウト支援システム, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.11, pp.3152-3160, 2000.
- [14] 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, pp.308-317, 2001.
- [15] Nishino, H., Takagi, H., Cho, S.-B., and Utsumiya, K.: A 3D Modeling System for Creative Design, Proc. of IEEE ICOIN-15, pp. 479-486, 2001.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 中川聖一, 高木英行: パターン認識における有意差検定と音声認識システムの評価法, 日本音響学会誌, Vol.50, No.10, pp.849-854, 1994.