

遺伝的アルゴリズムとコンピュータグラフィクスアート

Genetic Algorithms and Computer Graphics Arts

畝見 達夫*
Tatsuo Unemi

* 創価大学工学部情報システム学科／国際ファジィ工学研究所
Dept. of Information Systems Science, Faculty of Engineering, Soka University./Laboratory for International Fuzzy Engineering Research.

1994年2月16日 受理

Keywords: genetic algorithm, computer graphics art, development system, artificial evolution, simulated breeding, interactive art.

1. ま え が き

遺伝的アルゴリズムのコンピュータグラフィクスアートへの応用について、最新活動の概要と技術的注目点について述べる。

コンピュータグラフィクスアートに生物的な要素を取り入れる試みは、その発祥の当初から行われてきたことだが、コンピュータの処理能力の発達に伴い、生物の進化、成長、行動などのモデルをコンピュータ上に構築し、モデルに基づくシミュレーションによって生物的な映像を作り出す動きがますます活発化している。これらの一部は、近年の人工生命研究[Langton 89, Langton 92]の一分野としても脚光を浴びつつある。

生物の形態形成のモデルあるいは動物の動作についての力学モデルは、画像や動画の計算に直接用いられ、多くの応用作品が制作されている[草原 93]が、ここでは、話題の範囲を遺伝的アルゴリズムによる進化モデルの応用に限り、二つのアプローチを紹介する。一つ目は、発達システムの進化のモデルを視覚化したものである。二つ目は、家畜や農作物の品種改良のように人間の主観的な選択により、画像を進化させる手法である。

2. 進化する発達システム

高等生物の体は多くの細胞の集まりからなる。これは、一つの細胞である受精卵が分裂と膨張と死滅を繰り返した結果である。どのような体に成長するかは細胞内に含まれる遺伝情報と周囲の環境条件によって決定される。体を構成する一つ一つの細胞は、どれもほぼ同じ遺伝子を持つにもかかわらず、内臓、皮膚、骨、といったさまざまな組織ができあがるのは、それぞれの細胞が自己の内部状態と周囲の状況から、次の成長の方法を決めているからである。生物は、環境に対する適応度に応じて自然選択にかけられ、子孫を残す際に、突然変異と交配によって少しずつ遺伝子を変えることにより、多様な生態系へ進化を遂げたものと考えられる。

人工生命研究の一つの方法論として、実際の生物に見られる適応機能を計算機によってシミュレートし、複雑系の発生を再現するというアプローチがあるが、多細胞生物の形態形成の進化のモデルも、その一つとってよい。発達の形式モデルとしてはL-システムが有名であり、主に植物の成長過程のモデルとしてコンピュータグラフィクスにも多く応用されている(例えば[Lindenmayer 89])。このような発達の形式モデルにおける状態遷移規則を遺伝子にコーディングし、発現形態に対して定義される適応度に従って進化させる。

ここで紹介するシミュレーションは、筆者らが行ったそのような試みの一つである。このシミュレーションの過程の視覚化は、作者の意図とは別に、コンピュータグラフィクスアートの新たな手法と考えることもでき、実際、アート作品の一つとしても受け入れられている。

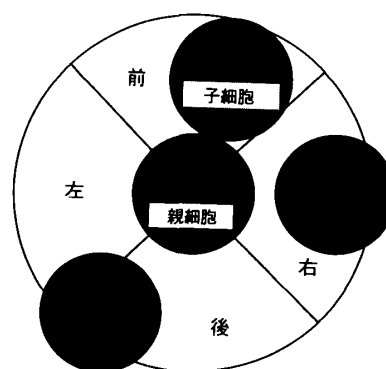
2・1 2次元ユークリッド空間上の単純な発達システム

まず、表現型の成長の場についての物理モデルを定義する。個体の成長の場は2次元ユークリッド空間である。ここで紹介するモデルの細胞はすべて一定の大きさの円であり、他と重なることもないし移動することもない。実際の生物の細胞は、大きさも形もさまざま、自由に移動するものもあれば、隣接する細胞と接着されているものもある。また、変形もする。しかし、これらの物理的性質をすべてシミュレートするには、現在の計算機のパワーは貧弱すぎる。また、プログラミングも大変であるから、ここでは、この程度のモデルにとどめることとした。

多くのセル構造オートマトンで用いられるような矩形に区切られたチェス盤世界に比べれば、連続なユークリッド空間とただけでも、プログラミング上の手間は非常に多くなる。実際2次元ユークリッド空間上の近傍領域を効率良く探索するための工夫なしには、十分な時間内に計算を終えることはできない。

次に、成長のアルゴリズムを定義する。当モデルでは、細胞は分裂と膨張により増えるのではなく、既存の細胞が隣接する子細胞を作り出すことによって増殖する。一つの計算ステップにおおのこの細胞が一つの子細胞を作ろうとする。

子細胞の位置と状態は、①細胞自身の状態、②隣接する領域にある他の細胞の配置、③遺伝子、の三つの情報から決定される。ここでは各計算ステップにおいて、個々の細胞は9通りの状態のうちの一つを自身の状態とすることとした。このうち8状態は増殖状態で、残りの一つは停止状態である。停止状態にある細胞は子細胞も作らないし、自身の状態を変えることもない。増殖状態にある細胞は、図1のように、隣接領域を前後左右の4領域に分割し、それぞれの領域に他の細胞の中心が含まれるかどうかを観察する。各細胞には向きがあり、前後左右は個々の細胞自身を中心とする相対的な位置である。一つでも含まれていれば1、一つも含まれていなければ0とし、4領域を合わせて4ビットの数とする。つまり、周囲の状態は16通りある。ゲノムを記録する染色体は、増殖状態8通りと周囲の状態16通りの組合せ、つまり $8 \times 16 = 128$ 通りの場合



環境: 前左右 = 0011₂ = 3

図1 細胞の増殖のプロセス

について、子細胞の位置と初期状態を決める整数を引き出す「表」の形式をとる。一つの整数は、位置を決める相対角度8ビット、子初期状態4ビット、次の時刻ステップにおける自身の状態4ビットからなる。つまり有効な情報は合計で $(8+4+4) \times 128 = 2048$ ビットである。状態の情報4ビットの整数のうち、0から7までを増殖状態、8から15までを停止状態とする。図1にあるように、子細胞は親細胞にお尻を向けて接した状態にあるものとする。ただし、作ろうとした子細胞が、既存の他の細胞と領域的に重なる場合には、子細胞を作らない。以上のようなアルゴリズムに従うと、さまざまな形態を生成することができる。

2・2 遺伝的アルゴリズムを用いた進化

個体の形態の進化を見るため、成長過程での個体間の相互作用がない状況を設定した。つまり、それぞれの個体は一つの細胞から、他の個体からの干渉をいっさい受けずに成長する。進化は一般的な遺伝的アルゴリズム[Goldberg 89]と同様に、次のような手順に従う。

- (1) 初期集団として N 個のゲノムを乱数で初期化する。
- (2) 個体ごとに成長させ、表現型を作り、その適応度を計算する。
- (3) 適応度に応じて遺伝操作を行い、次の世代の遺伝子集団を作る。
- (4) (2)へ戻る。

遺伝操作は、次のようなものである。

- (1) 集団のなかで適応度の高いほうから1/3はそのまま残す。
- (2) 次に適応度の高い1/3の個体を、それ自身と、適応度の高いほうから1/3の個体との交叉結果で置き換える。
- (3) 適応度の低いほうから1/3の個体を、高いほう

から 1/3 の個体のそれぞれを突然変異させたもので置き換える。

これは、ある意味では極端なエリート主義戦略と見ることもできる。

ここで用いた適応度は「40 ステップ以内に成長が停止した個体のうち、細胞数の多いほうが適応度が高い」というものである。成長が停止しなかった個体には、すべて一律に低い適応度を割り当てる。このような適応度評価を用いた結果、一般には巻貝のような形が発生した。

口絵 I (以下、口絵はすべて本号) にシミュレーション例を示す。シミュレーション結果に関する解析としては、系統樹、遺伝子頻度の変化、表現型の特徴に基づく分類、などが考えられるが、これはすべて今後の課題である。

なお、このシミュレーションによる画像は、A-Life World「人工生命の美学」展[畝見 93]に参考出品された。

2・3 生態系による自然選択の導入

進化による複雑系の発生という「人工生命」らしいテーマについて考えるならば、前節で用いたような恣意的な適応度評価には、どこか無理があるように感じられる。実際の生物界に複雑化をもたらした要因の一つは、個体間の相互作用、つまり生態系の存在である。前節で紹介したシミュレーションでは、それぞれの個体を独立に成長させたが、複数の個体を同じ空間上で成長させ、個体どうしが衝突する可能性を持たせたらどうなるだろうか。

また、生物進化における適応度は、繁殖成功率によって決まる。つまり、いくつの子孫を残せたかによって適応度が決まるのであって、適応度によって子孫を残せる数が決まるのではない。繁殖成功率は、繁殖できる成体にまで成長できる確率と、1 個の成体が一生のうちに産める子孫の個数で決まる。

ここでは単年生草本のような生物を考える。つまり、春、種から成長を始め、秋に種を残して枯れる。残された種は翌年の春に再び芽を出し成長をする。細胞の状態の種類として種状態を一つ追加し、種状態の細胞だけが冬を越すことができ、その他のすべての細胞は死滅することとする。ただし、個体の大きさ、すなわち、個体を構成する細胞の大きさに比例して、残せる種の個数に制約をつける。つまり、十分に成長できなかった個体は、いくら多くの種を作ったとしても、それらすべてが発芽できるわけではない。また、突然変異は種の生成のときにだけ可能性があるものとする。

この設定は、繁殖成功率に基づく自然選択のモデルとしても不自然ではない。

口絵 II に実行例を示す。大きく成長できても、種が実らない個体は淘汰される。多数の同種の個体からなる群落の生成が観察できる。

3. 模擬育種法による創造支援

最適化手法としての遺伝的アルゴリズムの応用が、工学分野を中心に多く試みられつつあるが、ここで紹介する模擬育種法は、例えば、魚類 → 両性類 → 虫類 → 鳥類・哺乳類といったような自然界における進化ではなく、農作物や家畜に対して行われてきた品種改良の過程をもとに考え出された手法である。品種改良は農業分野を中心に多くの現場で長い歴史を持つ。穀物、野菜、果樹、食用家畜、観賞用動植物、競走馬など、現在我々が見ることのできるさまざまな種類の農作物や家畜は、ほとんどが長年にわたる品種改良の成果である。

品種改良では自然選択ではなく人為選択によって、生き残れるかどうかが決まる。すなわち、各世代において、表現型のなかから人間の手によって好ましい個体を選び、次の世代の親とするという対話的な手順を繰り返すことにより、人間の好みを反映した構造を発生させようというわけである。

現在までに、博物学や、コンピュータグラフィクスアートのための創造支援ツールとしていくつかの応用が発表されている。以下では、それらの応用例と著者自身による最近の試みに基づき、基本操作手順、応用例、ユーザインタフェースの設計、および理論的考察について述べていくこととする。

このような手法には特定の適切な名前はついていないので、ここでは模擬育種法 (Simulated Breeding) と呼ぶことにする。K. Sims は artificial evolution と呼んでいる[Sims 91]が、計算機上と人為選択の両方が連想できる名前のほうが適切と考える。

3・1 模擬育種法の基本操作手順

模擬育種法では、適応度に応じた選択が、あらかじめ定義された評価関数ではなく、人間による個々の個体の表現型に対する主観的判断に任せられる。言い換えれば、自然選択 (natural selection) ではなく人為選択 (artificial selection) に基づく進化のシミュレーションを行おうということである。図 2 に世代交代の手続きの流れを示す。選択の部分を除けば、一般的な遺伝的アルゴリズムの手順とまったく同じである。模擬

- (1) N個の個体からなる遺伝子集団をランダムな情報で初期化。
- (2) 各個体の表現型を遺伝子から発生させ、表示する。
- (3) 表示された個体の中からユーザが主観に基づいて望ましいものを選ぶ。
- (4) 選ばれた個体の遺伝子を親として、遺伝操作によりN個の個体分の遺伝子を作り、新たな遺伝子集団とする。
- (5) (2)へ戻る。

図2 模擬育種法における世代交代の手続き

育種法では、適応度の計算手続きの代わりに、ユーザに好みの個体を適切に選択させるためのユーザインタフェースの設計が重要となる。ユーザが視覚化された個々の個体を見たうえで意思決定を行うため、1世代を構成する集団の大きさ（個体数）と世代数には、おのずと限界があり、一般的な遺伝的アルゴリズムのように計算機パワーに任せて大規模で複雑な問題を解くというわけにはいかない。

3・2 L-システムによるアプローチ

おそらく、模擬育種法の最初の試みは R. Dawkins による Blind Watchmaker であろう。このプログラムでは L-システムのパラメータをコーディングした遺伝子を用いて、生物界に見られるようなさまざまな形態をグラフィック画面上の線画として発生させた [Dawkins 86]。線画によって画面に表示された表現型のなかから、人間が好みの個体を一つ選び出すと、選び出された個体が親となり、突然変異によって次の世代の個体群を生成する。Dawkins は、左右対称やセグメント構造といった、動物にしばしば見られる形態の制約をあらかじめ導入することにより、生物に似たさまざまな形を生成することができることを示した。

模擬育種法をアートに応用する初期の試みは、Thinking Machines 社の K. Sims によって行われた。K. Sims は CG アニメーション用に拡張された L-システムを用いてさまざまな植物の形態を発生させ、それらによって構成された CG アニメーション作品 Panspermia [Sims 92b] を 1990 年に製作した。L-システムは発生モデルであるため、種子からの成長過程を再現することができる。合わせて力学モデルを導入することにより、さまざまな植物が揺れながら成長するアニメーション映像が構成されている。

また、IBM UKSC の W. Latham は分子設計 CAD のシステムを利用し、回転楕円体を再帰的に組み合わせることにより生物を連想させる形態を作成している [Todd 92]。

K. Sims が artificial evolution と呼ぶ模擬育種法は、Blind Watchmaker とは異なり、親個体は一つではなく複数でもよい。その場合には、遺伝操作として、

突然変異だけでなく交叉も取り入れる。この拡張により、異なった興味深い性質を持つ個体が同時に発生した場合に、両方を選択することで、それらの両方の性質を次世代に引き継ぐことができる。

3・3 遺伝的プログラミングによるアプローチ

K. Sims の 1991 年の作品 Primordial Dance では、L-システムではなく遺伝的プログラミングの手法 [Koza 92] が用いられた。つまり、プログラムコード自身を遺伝子と考え、その実行結果の表現型と考えて遺伝的アルゴリズムを適用することにより、計算機プログラム自身を進化させようとする試みである。X-Y 座標を入力とし色を示す 3 次元数値ベクトルを出力とする関数を各個体の遺伝型とし、あらかじめ決められた矩形領域にその関数を用いて描かれる画像を表現型としている。さらに、入力変数として時刻 T を導入することにより画像を連続的に変化させ、CG アニメーションを構成する。複雑な画像の連続的な変化の集まりによって構造された作品は、見るものに妙な感動を呼び起こす。

K. Sims の二つの作品は、並列計算機 CM-2 を用いて作成された。集団内の各個体の表現型を素早く画面表示するには、大規模並列マシンは最適である。しかし、残念ながらこの種のマシンは高価であるため、多くの人が利用できるわけではない。最近、著者は、UNIX ワークステーション上に同様のプログラムを作成したが、CPU 性能の面では、最近の 50 MIPS 以上といわれるマシンなら、さほど苦なく、興味深い画像を生成することができる。口絵 III に作成した画像の例を示す。図 3 にはモノクロで作成した画像の例を示す。モノクロの場合、関数の値は明暗を表すスカラ数でよい。

画像の育種過程における系統図の例を図 4 に示す。



図3 模擬育種法により発生した画像の例。画像の遺伝型つまり式は $(x + \sin(\text{hypot}(x+y, 1.10938))) / \min(\cos(\log(\exp(-(0.28125)/(y - \sin(\text{hypot}(x, y * y))))))$, y というものである。

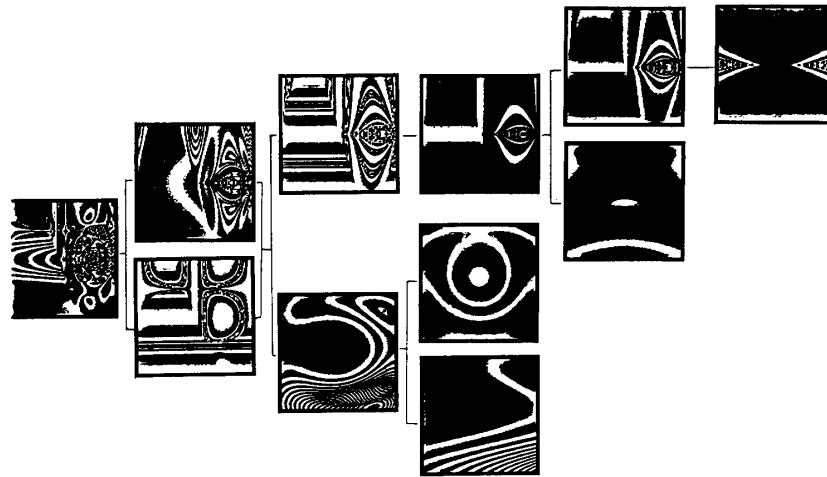


図4 画像の育種過程における系統図の例。右側が祖先，左側が子孫である

個々の画像の特徴が親から子へ引き継がれながら複雑化するようすが見て取れよう。

3・4 育種支援のためのユーザインタフェース

前述のとおり，模擬育種法では人為選択のためのユーザインタフェースが重要な役割を果たしている。Blind Watchmaker では， $4 \times 4 = 16$ 個の個体を画面上に表示し，マウスで好みの個体の一つ指示させるという形式をとっている。複数個体を選択する場合も，選択終了を指示する機能が追加される以外は同様である。

実際の品種改良では，優秀な品種の種子や精子を長期間保存し，通常の世代交代の時間間隔を超えた交配が行われる。進化が進むにつれて，ユーザの望みに沿わない方向へ遺伝子密度が収束する可能性もある。このような状況を打開するには，別の起源を持つ遺伝子と交配することが有効である。これを実現するには，ある世代で優秀であると判断された個体の遺伝子を世代を超えて保存するメカニズムが必要となる。筆者が開発した模擬育種法のシステムには，この機能のほか，個別に突然変異を行ったり，図形を回転させたりする機能も追加されており，比較的効率的に，興味深い画像を生成することができる。さらに，遺伝子をファイルに保存することもできる。口絵IVに，そのユーザインタフェースの例を示す。画面の大半を占める 4×4 個の画像は，その世代で発生した各個体である。その右側の縦1列四つの画像は，保存された個体である。前者の 4×4 の領域をフィールド，後者の領域をプールと呼ぶことにする。右端には，遺伝型の表示や，世代交代，ファイル入出力などを指示するメニューが用意されている。図には示されていないが，個体を個別に操

作するためのポップアップメニューも用意されている。

4. む す び

2章で紹介したモデルは，いずれもシミュレーションを行ったに留まっており，進化に関する解析は今後の課題として山積みされたままである。この研究に科学的貢献を期待するなら，それらの解析を早急に進める必要がある。また，ビデオアートの材料としては，3D化などの拡張方向も考えられる。

しかしながら，アートとしての位置づけは微妙である。近代以後の多くの芸術作品は，作者の意図を伝える記号としての役割が大きな重みを持っていた。だが，人工生命のシミュレーション映像について作者の意図を云々することは無意味のように思える。この意味では，この種の作品は絵画や演劇よりも自然を撮った写真の芸術に近いと考えられる。つまり，作品は複雑な現象のなかから，特定の部分を切り取って見せたものなのである。

また3章で紹介した人為選択のアプローチには，適応度を計る評価関数は用意されず，人間が好みに応じた選択を行うことにより，明示的には記述できない人間の選好基準を引き出すという側面がある。この意味では，意思決定支援システムと目的を同じくするものでもあり，今後，実用的な応用が期待されるアプローチである。特に，多次元の複雑な設計問題には有用な支援ツールとなると考える。

進化の過程では，実際にユーザにとって思いがけない発展が遂げられることもある。興味深い形態の突然の出現は，ある場合にはユーザの判断基準を大きく変

更させることもあり得る。特に、遺伝的プログラミングによる画像生成のように、生成可能な画像の多様性をあらかじめ想像しにくいような領域では、このような現象は頻繁に起きる。このような意味で、模擬育種法の手法は、単なる好みの選択に留まらず、想像力の増幅にも寄与するものと考えてよい。つまり、ある意味のインタラクティブアートの環境を提供するもので

ある。作者は複雑な数式を考え出す必要はなく、画面に表示された画像のなかから好きなものを選んでいけばよいので、数学やコンピュータの知識に乏しい人でも、手軽にコンピュータグラフィクスアートの作者になることができる。このような創造支援環境の普及は、人類の文化の発展の面からも悪いことではなさそうである。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Dawkins 86] Dawkins, R.: *The Blind Watchmaker*, Longman, Essex (1986).
リチャード・ドーキンス 著, 中嶋, ほか訳: プラインド・ウォッチメイカー, [上][下], 早川書房 (1993).
- [Goldberg 89] Goldberg, D. E.: *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley (1989).
- [Koza 92] Koza, J. R.: *Genetic Programming: on The Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press (1992).
- [草原 93] 草原真知子: A-LIFE と CG の最新動向, *Super Designing*, No. 5, 玄光社 (1993).
- [Langton 89] Langton, C. G. (ed.): *Artificial Life*, Addison-Wesley (1989).
- [Langton 92] Langton, C. G., Taylor, C., Farmer, J. D. and Rasmussen, S. (eds.): *Artificial Life II*, Addison-Wesley (1992).
- [Lindenmayer 89] Lindenmayer, A. and Prusinkiewicz, P.: *Developmental Models of Multicellular Organisms: A Computer Graphics Perspective*, in [Langton 89], pp. 221-249 (1989).
- [Sims 91] Sims, K.: Artificial Evolution for Computer Graphics, *Computer Graphics*, Vol. 25, No. 4 (1991).
- [Sims 92a] Sims, K.: Interactive Evolution of Dynamical Systems, F. J. Varela and P. Bourguine (eds.), *Toward a Practice of Autonomous Systems—Proc. 1st European Conf. Artificial Life*, pp. 171-178, MIT Press (1992).
- [Sims 92b] Sims, K., et al.: Panspermia, in Langton, C. G. (ed.), *Artificial Life II, Video Proceedings*, Addison-Wesley (1992).
- [Todd 92] Todd, S. and Latham, W.: *Evolutionary Art and Computers*, Academic Press (1992).
- [畷見 93] 畷見達夫: 2次元ユークリッド空間上の単純な発達システムの進化, A-Life WORLD「人工生命の美学」展, 1993. 6. 23-8. 30, 東京国際美術館 T-BRAIN CLUB (1993).

著 者 紹 介

畷見 達夫 (正会員)



1978年東京工業大学工学部制御工学科卒業。1980年同大学院総合理工学研究科システム科学専攻修士課程修了。1981年同専攻博士後期課程中退。同専攻助手。1987年長岡技術科学大学工学部計画・経営系講師。1992年より創価大学工学部情報システム学科講師兼国際ファジィ工学研究所客員研究員。この間、自然言語

処理, 知識工学, 機械学習などの研究に従事。現在は、遺伝的アルゴリズム, 強化学習法, 自律分散ロボットの研究を行っている。情報処理学会, 日本認知科学会, 日本ソフトウェア科学会等, 各会員。