

3次元ユークリッド空間上の単純な発達システムとその進化

撫 利明 永吉 正浩 平山 宣正
増島 康弘 矢野 喜義 畝見 達夫

創価大学 工学部 情報システム学科

環境と内部状態を参照する拡張されたL-Systemと、遺伝的アルゴリズムによるその進化のシミュレーションについて述べる。多細胞生物の単純な発達モデルとして、すべての細胞が同一の大きさの球であり、隣接する空き領域に子細胞を産み出すことにより発達する個体を想定する。各個体のゲノムには、細胞の内部状態と環境の状態から子細胞を産み出す方向を決定するルールを記述する。ある種の極端なエリート主義戦略を用いた遺伝的アルゴリズムにより、一定のステップ数内で成長が停止した個体の中で細胞数の多いほうが好ましいとする適応度定義を用いて進化させると様々な興味深いパターンが生成できる。進化過程の解析は今後の課題だが、コンピュータグラフィックスアートの材料としての応用も可能である。

A Simple Development System on 3D Euclidean Space and its Evolution

Toshiaki Nade

Masahiro Nagayoshi

Nobumasa Hirayama

Yasuhiro Masujima

Kiyoshi Yano

Tatsuo Unemi

Department of Information Systems Science, SOKA University
1-236 Tangi-chou, Hachioji, Tokyo 192, Japan

This paper proposes an extended L-System which refers to environments and internal states, and describes simulations of its evolution by Genetic Algorithm. We propose a simple growth model for multi-cellular organism, where each of cells is in the same size of sphere and it spawns daughter cell into the adjacent space not occupied by another cell. The genome of each individual includes the rules that determine the daughter cell orientation from its internal and external states. Using a genetic algorithm with elitist strategy under the definition of fitness that the more cells the better if growing process stops in a constant number of steps, we observe some kinds of interesting forms emerging. An analysis of evolutionary process is our future work, but the proposed method can be applied to the field of computer graphics art.

1 はじめに

ここに紹介するモデルは、“A-Life World 「人工生命の美学」展”にも参考出展された「進化する成長システムと生態系」[1]のシミュレーションモデルを3次元に拡張したものである。

3D化を図ることにより、多細胞生物の形態形成の進化と同等の空間を与えることができ、より自然界に近似した世界における形態の発生が期待できる。遺伝子にコーディングする状態遷移規則に制限があるため、モデルに与える情報量は前モデルとはさほど変わらないが、3次元に拡張しただけでも十分に、より多様性に富んだ個体の発現が確認できた。またCGアートとしても応用価値の高いものに仕上がっている。

2 成長の物理モデル

個体の成長の場は3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球であり、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、大きさも形も様々で、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、現在の計算機パワーでは貧弱すぎる。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にした。

3次元ユークリッド空間上の近傍領域を効率よく探索するために、データの管理方法に工夫を施している。すなわち、各個体に用意された領域空間全体を探索するのではなく、細胞の近傍だけを探索している。これによりメモリの節約と計算時間の短縮を促進できる。

3 成長のアルゴリズム

当モデルにおいては、細胞は分裂と膨張によって増えるのではなく、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。1つの計算ステップに各々の細胞が1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3つの情報から決定される。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1つを自身の状態とする。このうちの8状態は増殖状態で、残りの1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。遺伝子は、増殖状態8通りと周囲の状態16とおりの組み合わせ、つまり $8 \times 16 = 128$ とおりの場合について、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。つまり、図2のように、状態によって表の位置を決め、その項目に書いてある数値を引き出す。位置を決める相対角度に8ビット、初期状態に4ビット、次状態に4ビットを使う。つまり有効な情報は合計で $(8 + 4 + 4) \times 128 = 2048$ ビットである。実際には、2バイト=16ビットを表の単位とする。また、状態も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。このような冗長な遺伝子表現は、プログラミング上の都合もあるが、同時に、次節に述べる遺伝操作に大きな影響を与えるものである。

表より相対角 (α, β, γ) が決まればX軸、Y軸、Z軸の順に細胞を回転させる。 α はX軸まわりの回転角、 β はY軸まわりの回転角、 γ はZ軸まわりの回転角である。回転の変換マトリクスは以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} C\beta C\gamma & C\beta S\gamma & 0 \\ S\alpha S\beta C\gamma - C\alpha S\gamma & S\alpha S\beta S\gamma + C\alpha C\gamma & S\alpha C\beta \\ C\alpha S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma & C\alpha S\beta S\gamma - S\alpha C\gamma & C\alpha C\beta \end{bmatrix}$$

ここで

$$C\alpha = \cos \alpha, C\beta = \cos \beta, C\gamma = \cos \gamma$$

$$S\alpha = \sin \alpha, S\beta = \sin \beta, S\gamma = \sin \gamma$$

である。

また変換後の子細胞の位置は親細胞の相対座標での値であるので、プログラム上ではこれを絶対座標（すなわち個体の、初期における細胞の座標系）になおしている。

図1は簡明さのために、2次元上におけるモデルの表現を示したものであるが、実際は隣接領域に6方向を考える。この図のように子細胞は親細胞にお尻を向けて接した状態になるものとする。ただし、つく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つくらない。

以上のようなアルゴリズムに従うと、様々な形態を生成することができる。

4 形態進化のアルゴリズム

個体の形態の進化を見るために、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1つの細胞から、他の個体からの干渉を一切受けずに成長する。進化は一般的な遺伝的アルゴリズム¹²⁾と同様に、つぎのような手順に従う。

1. 初期集団であるN個の遺伝子を乱数で初期化する。
2. 個体毎に成長させ、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。

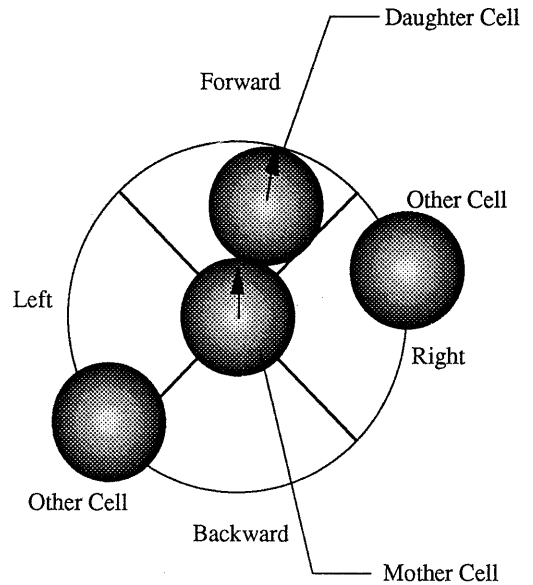


図1： Splitting process of the cell

2次元ユークリッド空間における細胞。2次元では隣接領域においては前後左右の4方向を考慮するだけでよかったが、3次元ユークリッド空間では、さらに6方向あるいは8方向に隣接空間を参照する必要がある。矢印は細胞の向きを示している。Daughter CellはMother Cellの球心に対してお尻を向けている。各細胞は自分が向く方向に子細胞をつくろうとする。

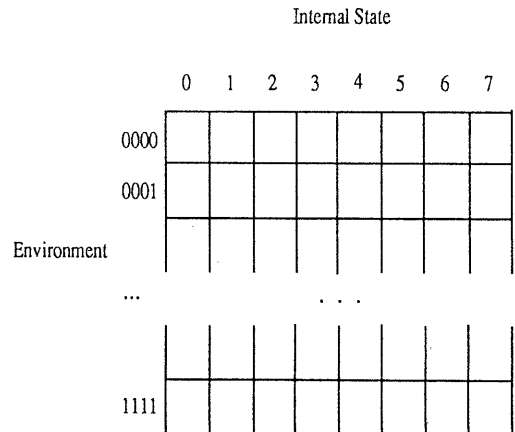


図2： Form of the gene

0~7は増殖状態、0000~1111は外部環境の状態である。子細胞の位置と初期状態は、 $8 \times 16 = 128$ とおりになる。

4. 2へもどる。

遺伝操作は次のようなものである。

1. 集団の中で適応度の高い方から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、適応度の高い方から1/3の個体との交叉結果で置き換える。
3. 適応度の高い方から1/3の個体をそれぞれ突然変異させたものを使って、適応度の低い方から1/3の個体を置き換える。

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「20ステップ以内に成長が停止した個体のうち、細胞数の多い方が適応度が高い」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。シミュレーションの結果、だいたい図3のような個体が発生した。あわせていくつかの結果も示す。

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、これらはすべて今後の課題である。

5 コンピュータ・アートとしての可能性

Artificial Life は学問体系としてはしっかり確立されたものがあるわけではなく、まだ幼児段階であるといわれるかもしれない。しかし、それが指向する分野の多様性と、コネクショニズムや Emergency などに代表される新思考、また、その対象とするところが生命というだけに不確定要素が多分にありそこには大きな可能性がある、というような理由から、はやくも各界から期待がよせられている。なかでもコンピュータアートへの応用に対しての関心はなかなか高い。自然が織りなす世界の模様到我々は

幾度となく驚嘆させられる。人間には想像もつかぬ作業を自然はいともたやすくやっつけてのける。自然すなわち生命は、無限の可能性を秘めている。その生命をコンピュータ内に蘇生させ、アートの世界に新風を巻き起こすのが、コンピュータアートとしての人工生命である。

当モデルはそのような思いもこめながら作成された。ただし、まだまだ表現力には乏しい。現段階では一定の大きさの細胞をただ有機的に並べただけに過ぎないモデルではあるが、計算パワーの増大とともにそれなりの情報を与えればより高度で、複雑な系の発生を期待できる。

6 おわりに

ここで紹介したモデルは、いずれもシミュレーションを行な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ば、それらの解析を早急に進める必要がある。特に分子生物学やタンパク質工学への適用がすすめられればその効果に期待することもできよう。

参考文献

- [1] T-BRAIN CLUB (編) 「人工生命の美学」羊泉社、近刊
- [2] Goldberg, D. E. : Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison-Wesley (1989)

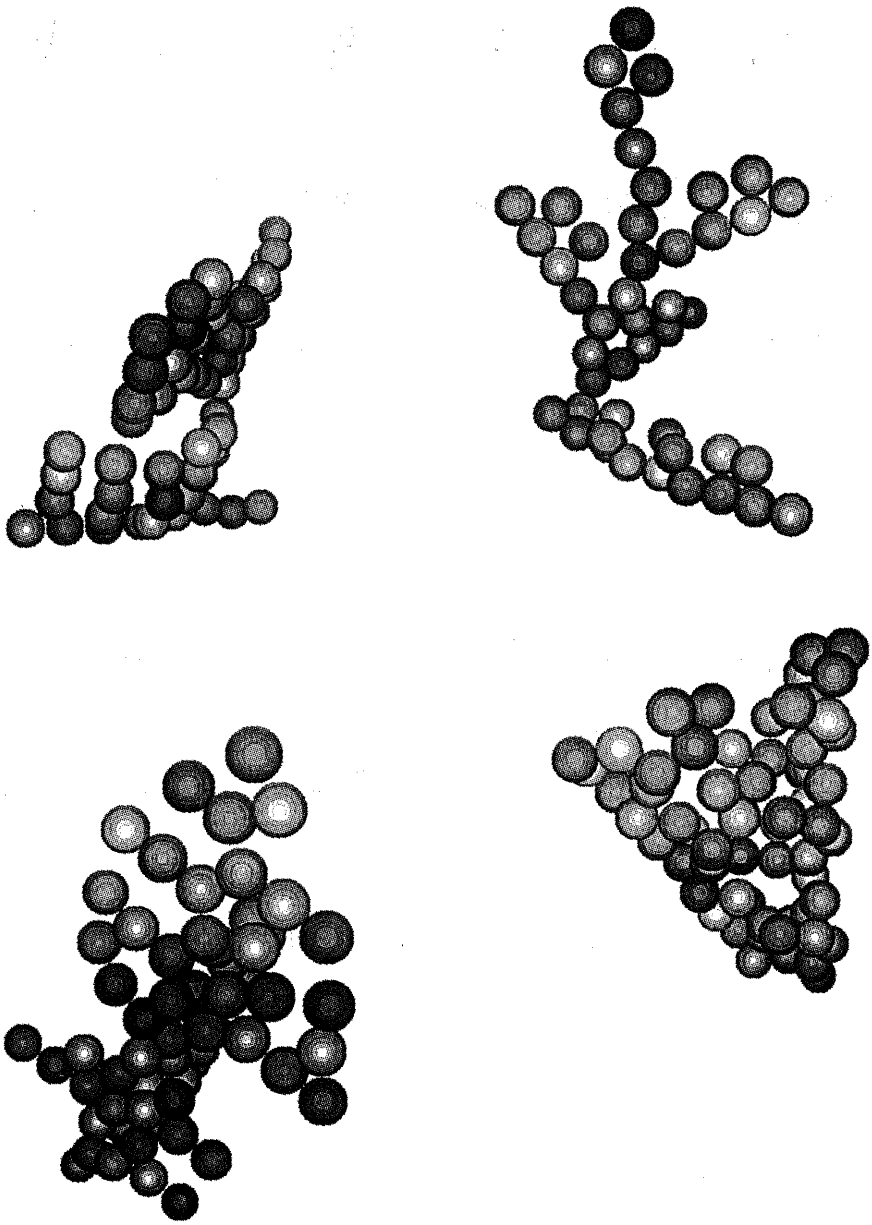


图 3 : Sample forms emerged.

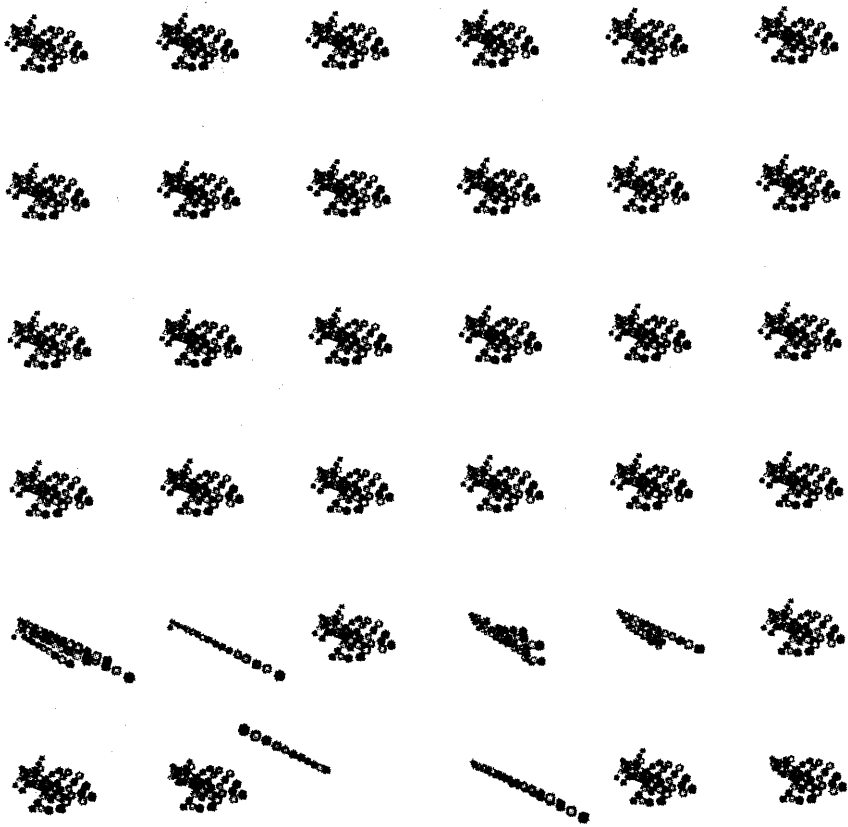


图 4 : Sample screen of simulation.