

《小特集》

創発と進化

ヤリ ワーリオ*・溝 口 潤 一*・下 原 勝 憲*

ABSTRACT The paper describes a simulation method for a network of autonomous units that creates a form. This method has a biological correspondence of morphogenetic process. The autonomous cells interacts with each other forming a network that defines the multicellular organisms. The interactions are based on the genetic information and the modeled environmental forces. This allows furthermore the usage of evolutionary algorithms to evolve the interactions and thus to create new structures.

1. はじめに

最近、人工生命の話題が盛んに取り上げられてきている。自然界の生物に見られるような動作を示すプログラムは人工生命の分野に分類することができる。従って、コンピュータ・ウイルス、遺伝的アルゴリズム、進化システムなどは人工生命の概念のもとに置かれてきた^{1),6)~8),14)}。

上記のシステムを人工生命に含めることに特に問題はないが、本稿では人工的な生物システムのより厳格なもう一つの側面に焦点を当てる。すなわち、人工的な生物システムを進化だけでなく個体の発達をも含んでモデル化する仮想現実を作り出すことである。本稿の主な動機は、生物システムをシミュレートすることではなく、人工的な生物システムを創り出す過程をモデル化することである。そのような生成モデルは、例えば、知的自律システムやソフトウェア・エージェントなど、今後工学的にも重要となる人工的な生物システムの構築に利用できよう。本稿のもう一つの動機は、創発の概念をいかにシミュレートするかという一つの事例を示すことで、シミュレーションの分野に新しい発想をもたらすことができるというものである。

本稿では、生物システムの創造において重要であると思われる生物的な過程のあらましを説明する。これらの過程で強調したいのは、“合成”、“創発”、“局所的制御”といった考え方である。“合成”という概念では、システムは環境の一部として徐々に形作られな

ければならないということを強調したい。そのような過程を経て、最終的なシステムの形態は簡単なルールに基づいて創発的に形成されていく。それらのルールはシステムの最終形を明示的に定義するようなものではない。最終的なシステムは簡単なルールが集合的に実行された結果である。これは、全体のシステムは大域的な制御よりも“局所的な制御”に基づいて構成されるということを意味している。

合成の過程では、遺伝情報と同じく、環境がシステムの生成に影響を与える。こうすることによって、システムは環境の変化に対して直接的にかつ直ちに反応することができる。このような反応は適応と見做すことができよう。合成過程での普遍的な適応機構を見つけることは、我々の研究の主要な目標のひとつである。

本稿では、人工生命の概要を述べた後で、生物的な適応について説明する。その後、“創発”の概念について述べ、環境のモデルに注目してシミュレーション・システムを説明する。そして、シミュレーション・システムの環境モデルを説明するとともに、いくつかの簡単な例を示す。ニューラル・ネットワークの形成を含んだ生物レベルの行動については、参考文献を挙げるにとどめ、本稿では省略する。また、本稿の主眼は進化よりも自己組織化にあるので、進化的なシミュレーションの結果は示さない。

2. 人工生命の概要

「人工生命」は「生物のような行動」を研究することを目的とする。「分析的」な方法に代わって「合成的」な研究の方法を用いて、行動を創造するメカニズムを探索する。従って、生命のような行動を創造する

Formation and Evolution. By Jari Vaario, Jun-ichi Mizoguchi and Katsunori Shimohara (ATR Human Information Processing Research Laboratories).

*^(株)エイ・ティ・アール人間情報通信研究所

メカニズムの発見は、次に示す目的に繋がる。1) 既存の生命のより深い理解、特に生命にとって基本的な属性に関する理解（科学目的）。2) 一般的な適応の能力を持った人工物の創出（工学目的）。

人工生命の基本的な目的は生物の行動の本質を理解することである。これは人工生命の「生命」に相当する部分である。「人工」の意味は生命のようなシステムを人工的な媒体の上に構築することである。媒体に応じて人工生命が対象とする分野は次のように分けられる。コンピューター上での実現（ソフトウェア）、シリコンやロボットなどでの実現（ハードウェア）、化学分子での実現（ウェットウェア）。媒体に捕らわれない研究により人工生命を哲学的に捉えることも可能である。

このように、人工生命は学際的な研究を促進するという共通の目標の下で、様々な研究分野を統合する役割を果たす。（図1）

2.1 研究手法

生命のようなシステムにとって必要かつ十分なメカニズムが何であるかという共通の認識はまだ得られていない。問題なのは、単一の手法で生命の示す非常に多様な行動を網羅することが困難だということである。ここでは、次の二つ基本的な手法をあげる。それは、互いに競合する「進化」と「自己組織化」という概念である。

「進化」的方法論では、自然淘汰のみで生命システム構築にとって必要かつ十分なメカニズムを有しており、個体の発達は進化にとって重要ではないと主張する。生物学の分野ではこれに反対する意見も見られるが、人工生命の分野では依然として強固な考えとして存在している。この種の方法論の例としては、遺伝的プログラミング、進化システム、「Tierra」などがあ

る。ここで述べる「自己組織化」的方法論では自己組織

化が生物システムの起源であると考えられる。進化は自己組織化の結果であり、人工生命の研究も自己組織化から始めるべきである。「オートイポエシス」（自己創成学あるいは創出系と訳される）は、システムがその安定性を維持するとともに、生物的な構造を創造する例である。環境の変化に対して優れた適応能力を持つ免疫ネットワークから発想を得た様々な相互作用ネットワークも他の例として挙げることができる。

「自己組織化」の最も重要な特徴は目標的な行動を創造することである。一方、「進化」（明示的に与えられた目標が目的を定める）は、創造性において同程度の能力を有しているとはいえない。この問題は「自己組織化」と「進化」という二つの方法論を組み合わせることにより解決される。そのようなシステムでは、「自己組織化」がミクロ・ダイナミックスをもたらし、「進化」がマクロ・ダイナミックスをもたらす。

図2は人工生命の異なる研究手法を組み合わせたものである。ボトムアップ的な手法は自己組織化の過程であり、構造の創発をもたらす環境と遺伝情報に基づいている。相互作用する基本要素、例えば、細胞などの集団をベースとする。生物学的には、創発される構造は表現型と呼ばれ、環境の影響を強調する場合には、表現模写⁹⁾または、表現型変異¹¹⁾と呼ばれる。これらの構造から進化的なフィードバックが形成され、それはトップダウン的な手法となる。トップダウン的な手法は、表現型変異のフィルタとして働く自然淘汰の機構と遺伝的変異の生成の機構に分けることができる¹¹⁾。ここでは、進化的フィードバックの機構をマクロ機構、積み上げの機構に基づく自己組織化をミクロ機構と呼ぶことにする。

3. 生物的な適応の概要

我々の研究の目的は知的な行動能力を持った人工システム（エージェント）を創り出すことである。この

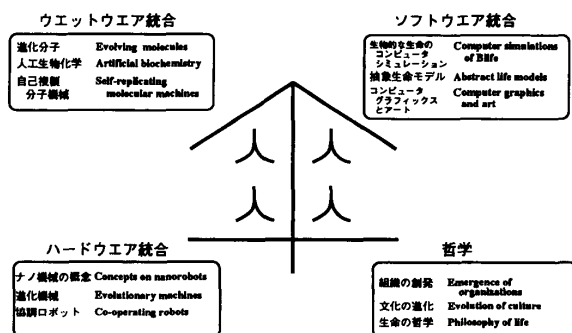


図1 人工生命は学際的な研究分野である

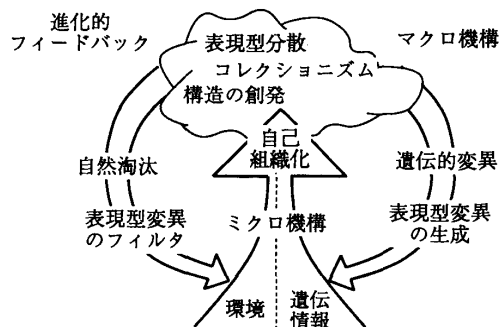


図2 人工生命研究手法の一般的概念

時、知性とは環境への適応能力であると考えられる。この目的のため、ここで扱うシステムの生命を生物システムのそれと同様に定義する。

このシステムは遺伝子型により構成される。遺伝子型は表現型を形成する。表現型は行動を生み出す。行動は複製または死をもたらす。複製は新しい遺伝子型を生成し、ここに遺伝子型から複製につながる循環が出来上がる。一つの段階から次の段階への移行においては、環境から影響を受ける過程が存在する。生物的な適応はこれらの過程（形態形成、個体発生、自然淘汰、遺伝的変異）により定義される。この一般的な概念を図3に示す。

形態形成と個体発生は個体でのプロセス、つまり発達過程である。同様に自然淘汰と遺伝的変異は、それらが個体に起こったとしても、集団レベルの進化的な過程であると考えられる。

進化においても個体の発達が重要な役割を果たしていることが明らかになってきている^{4),11)}。これらのすべての過程にとって、環境は欠くことのできない要素である。通常、環境は可能な変数空間を持った、うまく定義されたインターフェースで置き換えることができる。しかしながら、システムは様々な環境の特徴を利用する能力を有すべきである。そうすることによって、空間の知覚や可能な行動を進化させることが可能になる。以上のことを図4に示す。

このようなことを可能にするためには、異なる種類の信号とある種の力学場のための媒体を提供する豊富な環境が必要である。そのような環境への基本的な要求条件は以下のように整理される。

- ある共通の原理に基づいてオブジェクトを移動させることができる。例えば、オブジェクトがある種の場を感知することによって引き込まれていくような様々な勾配場を与えることができる。

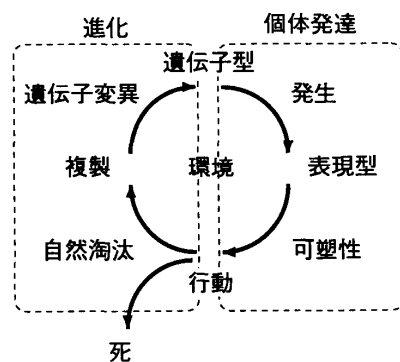


図3 生物学的適応の一般的概念

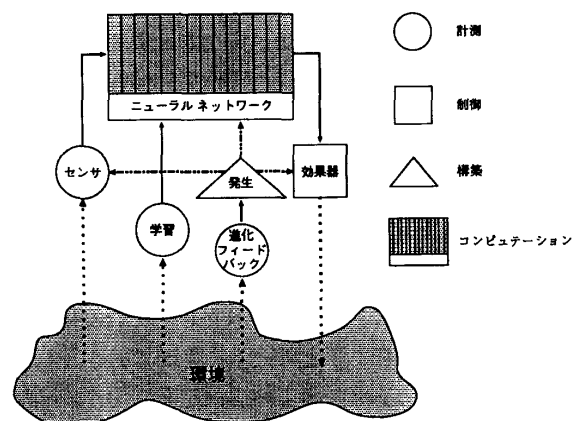


図4 進化自律システム概念 (2)を改変)

- 異なる種類の信号を伝搬させることができる。例えば、化学化合物の拡散や物体からの光の反射など。

これらの要求はバーチャル・リアリティの分野が直面しているのと同様のものである。違いは、人工的生物システムはシステム自身を修正することができるということである。周りの環境を知覚し、適切な行動を決定する能力に基づいて、人工的生物システムは知的な行動を示すことができる。進化をこのシステムに含めることにより、さらなる知性を進化させる能力を有することになる。

このようなシステムのモデル化において問題となるのは、知的システムの創出の原理である。ここからは、知的システムの創発のためには自己組織化の過程が必要であるという主張を展開する。創発過程はシステムの最終状態が定義できないような場合に必要となる。知性はこの場合に当てはまる。一般的な知的システムでは、最終状態は絶え間のない適応の過程である。このため、システムを動的に修正する能力だけでなく、動的に創造する能力が必要となる。本稿は以下の節で説明する自己組織化を通じた動的な創造過程に注目する。

4. 構造の創発

本稿の手法は環境からの影響に能動的な自律的要素に基づいたものである。これらの要素は相互作用ネットワークを創り出す。このネットワークを類推的にモデル化することは可能であるが、ここでは計算科学的な手法を用いることにする。それぞれの要素は独自の命令セット（相互作用ルール）を持った独立したプロセスと考える。それぞれの要素による相互作用ルール

の実行の結果として、それらの要素からなるネットワークが構成される。以下では、概念的な例を用いて上記の原理を説明する（これは、5）から部分的に発想を得た）。

4.1 基本要素

まず、相互作用の組み合わせとして基本要素を定義する。相互作用というのは、基本要素が内部と外部（周りの環境）の状態に応じて自身を修正する能力を意味する。これらの相互作用は下位レベルでの相互作用の創発的な結果であると考えることができる。しかし、少なくとも最下層の相互作用は定義しなくてはならない。

相互作用ルールに加えて、要素を移動させる別の要因も必要である。上記の相互作用ルールは基本要素の受動的な部分を変化させるだけである。これらの変化がどのように行動に結び付くかは環境に依存する。このため、最低限の要求として基本要素が個々の場に対する感度に応じて移動するような勾配場（環境の力学場）を仮定する。

図5において、環境の中に存在し、他の要素が知覚しうような勾配場を形成することのできる基本要素を明示的に定義する。

このような基本要素の行動は簡単なプロダクション・ルールの形式で定めることができる。その論理的ルールは以下のようになる。

if...then Activate 'A' gradient field

if...then Be sensitive for 'A' gradient field

最初の段階では、条件は不要であり、動作部は常に実行される。

4.2 ネットワークの構成

環境の中にいくつかの基本要素が存在し、それぞれが勾配場を生成し、他の勾配場を知覚するような場合、構造の自発的な生成が起こる。

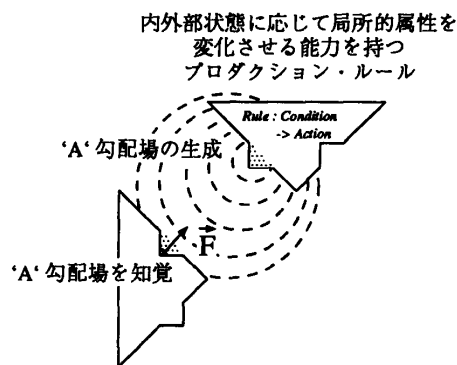


図5 創発の基本要素

これを図6に示す。いくつかの要素が環境の中に存在し、物理的な力を通してお互いに作用する要素からなるネットワークを形成する。これらの相互作用の結果として、構造が自己組織化される。

基本要素のネットワークの形成は簡単な論理条件で示される。

if connected to another unit on both side

then activate 'B' gradient field at the free edge...

この条件は空いている辺（free edge）を活性化させるといった新たな行動を起動するために使われる。これにより、次節で述べるような次のレベルへ向けての自己組織化が順番に引き起こされることになる。

4.3 複数レベルのネットワークの構成

もし相互作用のルールが隣の細胞の存在を感知することができるならば、新たな引力を持った勾配場が現れるといったように、そのルールは基本要素の内部状態を変化させることもできる（図6の‘B’勾配場）。そして、基本要素から第一レベルの構造が出来上がったのと同じように、第一レベルの構造から第二レベルの構造が形成される（図7）。つまり、基本要素が新たに隣の要素を感知した時には、その要素は自分自身の内部状態を変化させる。そして、ある細胞が隣の細胞を認識することにより、第一レベルの影響が消滅し、そして、さらなる内部状態の変化や環境からの影

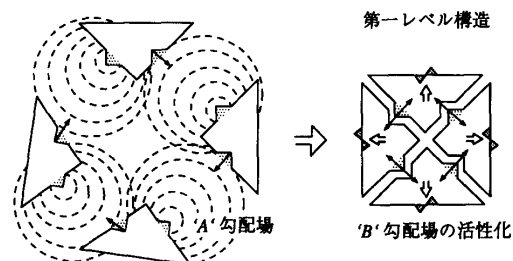


図6 基本要素のネットワーク

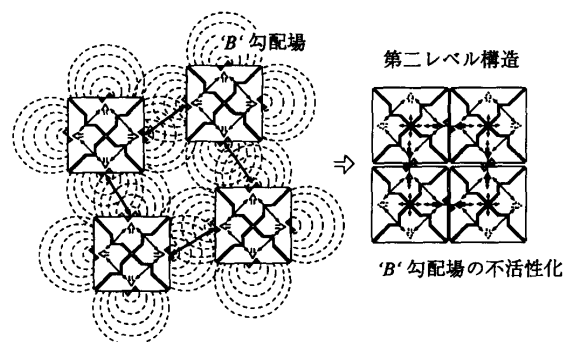


図7 複数レベルの構造

響に備えて、第二レベルの構造が不活性になる。

これらは以下のような論理条件で記述される。

if (not connected to another unit and
opposite neighbor connected to another unit)
then de-activate 'B' gradient field at the free edge...

この論理ルールが上記の構造を生成する。このようなルールによって鎖型の構造が出来上がることもある。

ここで見られる挙動はセルラ・オートマトン (CA) に似通っている。CA では構造を記述する CA のセルの状態によってパターンが形作られる。しかし、根本的に異なるのは、CA には環境と個々のセルをお互いに分離する原理がないことである。CA での環境は CA のセルの状態遷移ルールの一部としてモデル化される。このような分離を行なうことによってセルのルールを単純化するとともに、直接的な遺伝子コーディングが可能となる。

4.4 生物学上の対応

上記の例の基本要素は細胞と考えることができる。細胞は組織を作り、より複雑な生物を構成する。細胞の構造は特定の方向に起こる複数の細胞分裂を通して形成される。そこでの物理的な力は衝突と付着である。衝突は細胞をお互いに遠ざけようとするのに対して、付着は互いに引き付けようとする。細胞は付着の特性を調整するために自分の表面を変更することができる。

5. シミュレーション方法

上述のような構造の自己組織化をモデル化するためには、基本要素と環境をモデル化することになる。基本要素のモデルは内外部の状態を操作するプロダクション・ルールより構成される。環境のモデルは基本要素を動かす物理的な力をモデル化できるものでなくてはならない。従って、基本要素のモデルでは計算能力はさほど要求されないが、環境のモデルでは非常に高い計算能力が求められる。

5.1 トップダウン対ボトムアップ

図8はプロダクション・ルールの階層的な適用を説明している。環境レベルは個体とプロダクション・ルールよりなる。プロダクション・ルールは個体間の物理的な相互作用を記述している。個体レベルは細胞とプロダクション・ルールによりなり、プロダクション・ルールは細胞間の物理的な相互作用を記述する。初期状態は少なくとも個体と環境に属する一個の細胞より構成される。トップダウン的なルールの適用によ

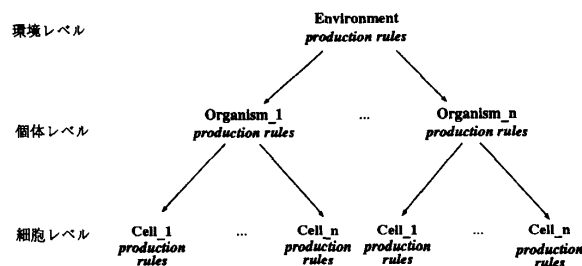


図8 トップダウン・モデリング原理

り、細胞は分裂し、成熟した個体が形成される。新しい個体が生み出されたことによって、最初の細胞は取り除かれる。

図8を逆にすることにより、少し違った見方をすることができ (図9)。ここでは、独立した細胞が各々のプロダクション・ルールを実行することにより、個体が形成されている。しかしながら、個体と環境のレベルのプロダクション・ルールが存在していないので、分離した環境モデルが必要となる。初期状態は単一の細胞からなり、それが分裂して個体を形成する。

5.2 シミュレーション・システムの概要

シミュレーション・システムはモデルの初期状態の生成のためのパーサより構成される。それぞれの基本要素のライフ・サイクルはプロダクション・ルールの評価により決定される。プロダクション・ルールを評価することにより、基本要素の内部状態は変更を受け、要素の分裂や死が発生する。環境のシミュレーションはモデル化した物理的な力学場(後ほど説明する)により構成される。グラフィカル・インターフェースはシミュレーションの可視化のために用いられる。

5.3 基本要素のモデル

それぞれの基本要素は相互作用のルール・セットを持っており、通常それらは同一のルールである。これらのルールは細胞機械、そして、ルール中の変数は遺伝情報と見做すことができる。初期段階では、システムは一個の基本要素のみからなり、その基本要素が分裂を通して増殖していく。もしくは、初期条件として十分な数の基本要素を与えることにより、これらの分割のルールは無視することもできる。

続いて、ルールを記述する言語の仕組みについて述べる。この言語はリンデンマイヤー・システム¹⁰⁾を発展させたものである。書き換えシステムの基本的な特徴はそのままであるが、変数を属性値によって置き換えることができる (key=value)。それにより、書き換えられたシンボルがそれぞれのプロダクション・ル

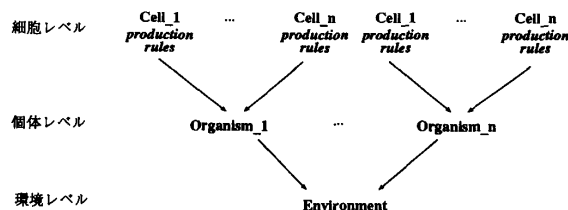


図9 ボトムアップ・モデリング原理。環境の分離モデルが必要である。

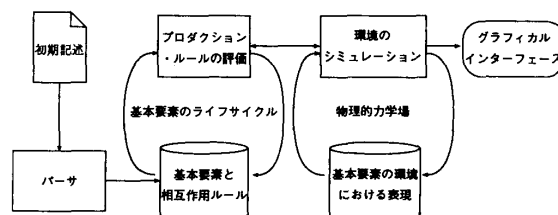


図10 環境がプロダクション・ルールから分離されているシミュレーション・システムの基本動作

ールをもつことができ、多階層のルール適用も可能となる。

5.3.1 基本形式

基本形式は書き換えプロダクション・ルールに基づいている。

predecessor :: condition → successor

これは、“condition”が満足されれば、“predecessor”が“successor”で置き換えられるということを意味している。ルールを階層的に表現すると次のようになる。

```
object (rule 1=(predecessor :: condition → successor),
        rule 2=(predecessor :: condition → successor),
        sub Objects=[sobj 1 (rule A=(pred :: cond → succ),
                               rule B=(pred :: cond → succ),
                               sobj 2 (rule C=(pred :: cond → succ))])])
```

例えば、オブジェクトは細胞であり、ルールは遺伝子である。この場合は、上の表記は次のように表すことができる。

```
organism (Cells=[
    cell (gene 1=(predecessor :: condition → successor),
          gene 2=(predecessor :: condition → successor)),
    ...
])
```

5.4 環境のモデル

以下に述べる環境モデルは二次元で実現されたものであるが、同様にして、三次元にも拡張できる。しかし、ここでのモデル化の段階では、計算と可視化に費やす労力に見合うほどの効果を三次元モデルで得ることはできない。

環境モデルの役割は、基本要素をその特性に従って移動させる力をシミュレートすることである。基本要素の特性はそれ自身の状態や周りの環境に応じて自発的または相互依存的に変化する。そして、基本要素を移動させる力は勾配場の考え方にに基づき定義する。

この考え方は、Fleischer と Barr³⁾ による類推的な手

法よりも優れている。すなわち、物理的な力のモデル化に勾配場を利用することは解析的な試みよりもいくつかの利点がある。まず第一に、すべての力に対して基本的な考えを共通化でき、その実現も容易にすることができる。第二に、ある地点での勾配場の計算も容易でかつ高速である。第三に、複数の部分からなるオブジェクトに働いている力は各部の力の合計になる。この点は形が動的に変化する我々の研究にとっては特に重要なものである。

それぞれの要素は勾配場を生成することができる。勾配場を持った要素は移動することができるが、上記のようなモデル化によって、このシステムでは動的な勾配場を重ね合わせることが可能となる(図11)。

オブジェクトの結合は引力によって実現される。図12には8個のオブジェクトの勾配場が示されている。それぞれがお互いに引き合い、その結果として形作られた構造が示されている。生成されたシステムに働く力はそれぞれの部分の力の重ね合わせとなる。

図12の形態は細胞群の中心に引き込みの谷があるため、非常に不安定である。シミュレーションでは丸め誤差のために、図13に示すように、一つおきに細胞が引き込みの谷に落ち込んでしまう。

安定した形態の例を図14に示す。勾配場によりパターンが出来上がるが、それらは、勾配場を生成する変数と同様に、初期状態に依存する。意味のあるパターンを作る、つまり出来上がった個体が環境で行動するためには、いつ分割し、いつ死に、どのような付着力が発生し影響するかといった細胞の活動を制御する遺伝情報が必要となる。また、細胞の周囲から細胞の内部に情報を伝える機構が必要である。この機構は、例えば、隣に細胞が存在しているかどうかを調べるために使われる。

6. 生命的な行動

ここでは、いくつかのモデル化の可能性について簡

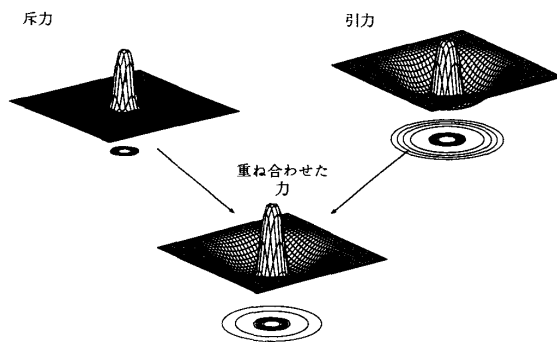


図11 重ね合わせた斥力と引力

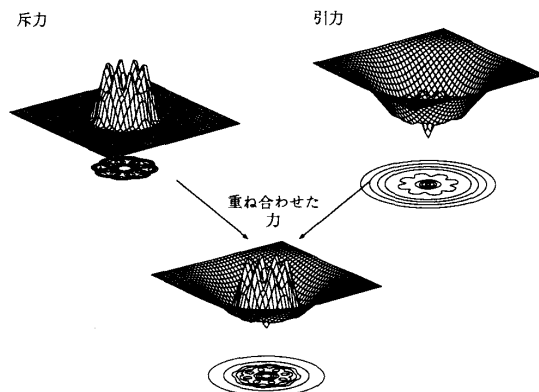


図12 8個の細胞の斥力と引力の重ね合わせ

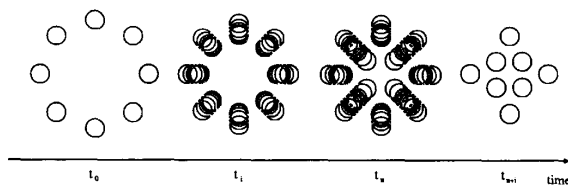
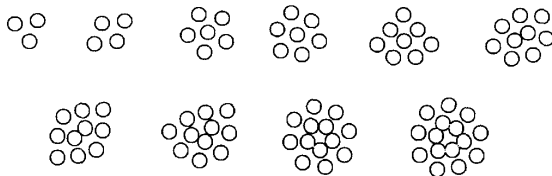
図13 円形の8個の細胞が引き込みの谷に落ち込むことにより星型を形成する。(t₀:初期状態, t₁:段階的な落ち込み, t₂:一つおきの細胞の急激な引き込み谷への落ち込み, t_{n+i}:最終の安定状態)

図14 ランダムに配置した細胞による安定した形態

単に説明する。それらの例はトップダウンとボトムアップの手法として分類できる。トップダウンの手法は、例えば、個体レベルでの相互作用を最初から与え

るなど、初期状態の明示的な定義を暗に意味している。ボトムアップの手法では、形態は基本要素レベルの相互作用に基づいて形成されると考える。この場合、個体レベルの相互作用は基本要素の相互作用の結果として創発的に現れてくる。ボトムアップの手法の方がより生物学的であるが、生命のような行動を司ることは非常に難しくなる。

以下に例を説明するが、これらの詳細は(12),(13),(15)~(17)に述べられている。基本要素は細胞であり、神経細胞(ニューロン)として分化し、最終的には環境での行動を司ることのできるニューラル・ネットワークを形成する。

6.1 構造の創発

この例では多細胞の分割に基づいて個体がいかに形作られるかを示す。構造は分割の方向と細胞を遠ざけたり引き付けたりする環境の力学場によって決定される。分割の順序は遺伝情報として明確に与えられるが、進化によっても獲得することができるはずである。進化による獲得は今後の課題である。

図15の例では、12個の粘着場が安定した形態を形成するために用いられている。この形態は連続的な分割と細胞分化の結果である(詳細は12)を参照願いたい)。粘着場は遺伝情報と細胞の系譜情報に従って細胞により生成される。

この例では信号の伝搬を含んでおらず、形態の形成を示しているだけである。結合ネットワークを形成するために、ある細胞(32, 35, 38, 39, 18, 19, 28, 29)は

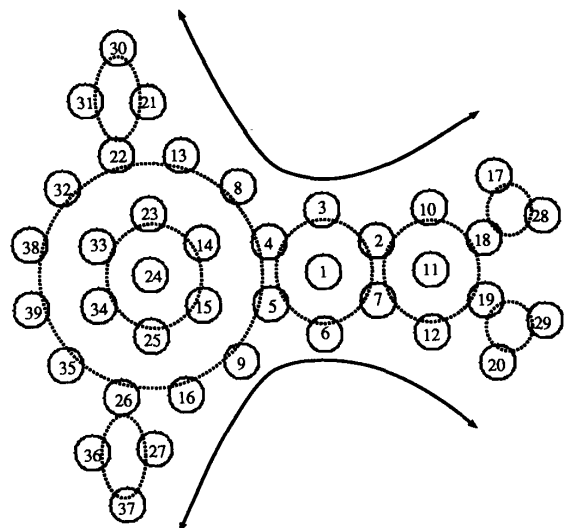


図15 生成された構造。安定した粘着グループは楕円で示されている。筋肉の伸張と湾曲(一個の筋細胞の拡張と収縮によって起こると考えられる)は、二個の双方向の矢印で示される。

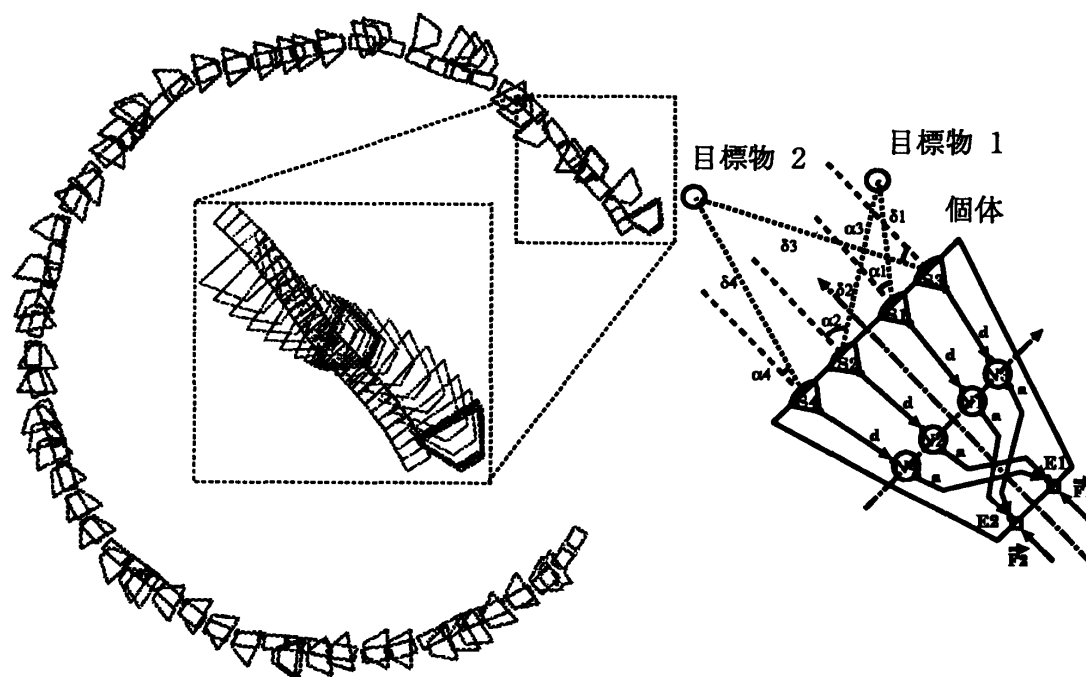


図16 簡単なニューラル・ネットワーク・システムによる目標物の追跡

分化して受容器となり、あるもの（2-4, 8, 10, 13, 17, 21, 30; 5-7, 9, 12, 16, 20, 27, 37）は筋細胞となり、あるもの（1, 11, 14, 15, 23-25, 33, 34）はニューロンとなる。意味のある行動を果たすネットワークを次節の例で示す。

6.2 行動の創発

本節の例では、追跡行動を生成するためのニューラル・ネットワークが形成される。目的とする人工物は別の人工物から感知される化学物質の場を作り出す。受容器はニューラル・ネットワーク中を伝わる信号を生成し、その信号を受けた作動器が感知された信号の強度に応じて追跡行動を行なう（図16）。

初期記述には個体をモデル化するためのプロダクション・ルールが含まれている。ニューラル・ネットワークは多細胞の分裂とニューロンの成長を通してモデル化される¹³⁾。

7. 結 論

本稿では、環境と遺伝情報の協調的な作用により、形態の形成がいかにシミュレートできるかを簡単に説明した。また、いくつかの例を用いて、基本となる考え方や概念について述べた。生命的な行動の生成の詳細については割愛したが、これらについては^{12), 13)}を参照願いたい。

生物学的な現象をシミュレーションを通して記述しようという発想は別に目新しいものではない。しかしながら、シミュレートされた世界で動作することができる形態を生成するために合成的な方法を用いる、というところが人工生命特有の手法である。

本稿で述べた内容の直接的な応用は依然として遙か彼方のものである。しかし、シミュレーションの分野に新しい展望を開き、適応行動のシミュレーションのための新しい手法の探求に貢献することができるはずである。

参 考 文 献

- 1) Rodney Brooks and Pattie Maes, editors. *Artificial Life IV*. The MIT Press, 1994
- 2) Peter Cariani. Emergence and artificial life. In Langton et al. 8), 775/798
- 3) Kurt Fleischer and Alan H. Barr. A simulation testbed for the study of multicellular development: The multiple mechanisms of morphogenesis. In Langton⁷⁾
- 4) Gilbert Gottlieb. *Individual Development and Evolution*. Oxford University Press, 1992
- 5) Kazuo Hosokawa, Isao Shimoyama, and Hirofumi Miura. Dynamics of self-assembling systems—Analogy with chemical kinetics—. In Brooks and Maes¹⁾
- 6) Christopher G. Langton, editor. *Artificial Life*. Addison-Wesley Publishing Company, 1989
- 7) Christopher G. Langton, editor. *Artificial Life III*. Addison-Wesley, 1994

- 8) Christopher G. Langton, Charles Taylor, J. Dooyne Farmer, and Steen Rasmussen, editors. *Artificial Life II*. Addison-Wesley Publishing Company, 1992
 - 9) Jean Piaget. *Adaptation and Intelligence—Organic Selection and Phenocopy*. The University of Chicago Press, 1974. The original French edition *Adaptation vitale et psychologie de l'intelligence: Sélection organique et phénocopie*, reprint 1980
 - 10) Premyslaw Prusinkiewicz and Aristid Lindenmayer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer-Verlag, 1990
 - 11) David S. Thaler. The evolution of genetic intelligence. *Science*, 264: 224/225, 1994
 - 12) Jari Vaario. From evolutionary computation to computational evolution. *Informatica*. (to appear)
 - 13) Jari Vaario. Modeling adaptative self-organization. In Brooks and Maes¹⁾
 - 14) Francisco J. Varela and Paul Bourguine, editors. *Towards a Practice of Autonomous Systems: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life (1991)*. A Bradford Book, MIT Press, 1992
 - 15) ヤリ・ワーリオ. Artificial life as constructivist AI. 計測と制御, 33 (1): 15/20, 1994
 - 16) ヤリ・ワーリオ. 知的人工物の自己組織化. *Computer Today*, 5, 1994
 - 17) 大須賀節雄. Artificial life と次世代の人工知能—生体の情報論的考察—. マイクロマシン研究会雑誌, 6 (1): 33/54, 1993
-