

アニマットアプローチとシミュレーション

鈴木 恵二

本稿は人工生命研究において、生物のように振る舞うシミュレーションモデルを目指しているアニマットアプローチの中から代表的な研究事例を取り上げ、人工生命とシミュレーションの関わりについて検討を行うおうとするものである。すなわち、アニマットの定義、モデル観、研究例を紹介し、この中でシミュレーションが果たしている役割及び求められる性質に言及する。特に、シミュレーションが設定する環境特性の重要性から、現実的な力学的ダイナミクスを取り扱っている3つの研究例を具体的に取り上げ、アニマット研究に見られる特色を議論している。

1. はじめに

生物のように、自らの意志をもって行動するシミュレーションモデルやロボットを作り上げることは極めて興味深いものである。特にこうしたシステムが設計者自身が予想していなかった振る舞いや形態を伴って動き回る様を目にしたときには、驚きさえ感じる。本稿は特に人工生命研究において、生物のように振る舞うシミュレーションモデルについての話題を中心に取り上げ、人工生命、その中でも特にアニマットと呼ばれるアプローチとシミュレーションの関わりについて検討を行うおうとするものである。

まず始めに人工生命とはいかなるものか、この定義から答えるべきところが本筋であろう。しかし、いまだ未定義であるというのが本当のところである。確かに人工生命という言葉が表舞台に上がってきたのは1987年に開かれたロスアラモスでの“人工生命に関するワークショップ”¹⁾が最初である。この会議の第1回から第3回までの主催者として、またこのパラダイムを広げるのに多大なる役割を果たしてきたのがLangtonである。

彼は当初、人工生命とは“Life as it could be (生命のあり得る姿)”を探求するものだと言い表した¹⁾。すなわち、既存の生物学が生命の一形態である生物だけを研究対象としているのに対して、数理的、情報科学的立場から広く生命というものの可能性を探ることを目的として出発しようとしていた。

しかしながら、その後の発展は少なくとも彼が意図していたものとは異なったものとなった。そのひとつの要因は同じ時期に表舞台に立ち始めた遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithms)^{2),3)}の発展であり、もう一つはそれまでの古典的な人工知能手法に敢然と異を表したBrooksによる包含アーキテクチャ (SSA: Subsumption Architecture) を使ったロボットの出現であった⁴⁾。この両パラダイムに属した研究者たちは、ヨーロッパでの“人工生命会議 (ECAL)”⁵⁾において、そして“From Animals to Animats”というタイトルで知られる“適応的行動のシミュレーションに関する国際会議 (SAB)”⁶⁾⁻⁸⁾の場で新しい自律的システムとロボットの可能性を示した。この結果、その後の人工生命パラダイムの進展方向は、少なくとも情報工学

の観点からすれば、Langton の意図とは違う方向に向いてしまった。すなわち、実在する生物のように進化や学習という時間発展を通して、複雑で動的な環境とインタラクションを続ける自律的システムの情報処理モデルおよびロボットアーキテクチャに関する研究を指すようになった。以上の経過を踏まえ、本稿の人工生命に対する立場が上記の観点から述べるものであることをここで明示しておく。

次章では、まず上述の趣旨からみた人工生命アプローチの、より具体的表明であるアニマトアプローチとその特徴を述べる。そして具体的な研究事例として、仮想生物の生成発展に関わるシミュレーション研究を幾つかを取り上げ、シミュレーションと人工生命との関わりについて検討を行う。

2. アニマトアプローチ

人工生命において自律的システムの立場を強く明確に表明した言葉として、アニマト (Animat) という言葉が使われている。“動物”を指す Animal と “生命のように生き生きとしたもの”を指す Animation からきた造語である⁹⁾。人工生命という言葉は人によって様々な定義や意味を持つものに対して、アニマトが示す定義は明白である。すなわち；

“アニマトとはシミュレーション上の生物、もしくは実ロボットであり、その行動ルールは実際の生物に触発されたものである”。

このアニマトをめざす一連の試みをアニマトアプローチと呼ぶものとする。この定義からアニマトアプローチが目指すものとは、何らかの生物的に振る舞う仮想生物もしくはロボットを構成することが目的であることが伺えよう。よって生物のように環境を認識するためのセンサを持ち、外界の状況に応じた適応的な振る舞いが実現されることが望まれる。ただし、このとき生じる行動および行動を生じさせるメカニズムは“知的”であ

る必要はない。“知的”な行動はその行動が想定された環境下では十分に機能するが、予想していない事態においては脆弱なものでしかない。アニマトアプローチでは、脆弱な“知的行動”よりも“ロバスト”な刺激反応型行動戦略を好む傾向がある。よって同じ生物でも人間のような生物レベルよりも、昆虫や爬虫類、植物といった生物レベルの行動実現に重きをおいている傾向がある。こうした傾向は、世界モデルの記述と行動計画に重きを置く従来の人工知能アプローチを厳しく批判した Brooks の影響を多分に受けていることを示している。

以下ではまず、アニマトアプローチの動向の概観とシミュレーションとの関わりについて示す。

2.1 アニマトアプローチの動向

現在までのアニマト研究において、アニマトを生成発展させるための手続きとして用いられているのは、GA や遺伝的プログラミング^{10),11)}といった進化戦略と呼ばれるものと、強化学習¹²⁾と呼ばれる二つの手法が主に用いられている。さらに発展系としてのアニマトモデルの表現手法を挙げて見ると、セルラーオートマトン、ニューラルネットワーク、LISP プログラム、SSA, Behavior ネットワーク¹³⁾等が使われている。

ここで、アニマトアプローチにおけるシミュレーションのあり方についての議論を示しておく必要があると思われる。Brooks はかつて、アニマトアプローチを行う研究者たちのシミュレーションの在り方について実ロボットを扱う立場から厳しい警鐘を鳴らしたことがあった¹⁴⁾。すなわち、現実にはたいして問題とならないような特殊な障害物回避運動をシミュレートしたり、実際には極めて不確実性が大きく左右する状況に対して安易なシミュレーション状況を許すことへの警告である。このように極端に問題を誇張したり、安易な状況の下で作られられたアニマトは

研究上において何の貢献も成さないものだとして厳しく批判し、より現実性を反映したシミュレーション手法を行う必要性を説いた。アニメットアプローチの在り方は様々であり必ずしも Brooks が指し示すところの現実性だけが重要な側面ではない。例えば、Ray の Tierra²⁰⁾ では仮想生物達は計算機メモリー上を住みかとし、仮想 CPU によって操作される環境下で、再生能力を進化させながら繁殖能力を競い合っている。このような仮想生態系を扱う試みではシミュレーションこそが実現の手段そのものであり、現実性の観点は意味を失う。しかしいずれにせよ、研究上作られたアニメットに妥当性や普遍性がもたれるかどうかは、シミュレーションの在り方に関わっていることは疑いない。

以降では、上記の意味においてシミュレーション上に現実的な物理的制約とダイナミクスを取り入れた仮想生物に関する研究を取り上げる。これらの研究はアニメットのモデル化はもとより、シミュレーションの在り方といった面からも、今後の人工生命研究に大きな影響を与えると考えられる。

3. アニメットの研究事例

アニメットにおける一つの目標は、生物のように振る舞う仮想生物を生成することである。これは形態的にも、またその振る舞いにおいても“それらしく振る舞うこと”が望まれる。こうした目標を現時点で最もよく達成している研究について具体的にふれてみる。

3.1 Artificial Fish

Terzopoulos¹⁵⁾ は実際の魚のように泳ぎ回る仮想生物の様子を CG アニメーションとして実現する手法を示した。魚及びその群をアニメーションとして実現しようとするれば、従来では一コマずつ描き込む必要があった。ある程度モデル化してやって、全てを描き込む必要を無くしたとしても、補食行動から障害物回避あるいはサメに遭遇し群を作る様子

といった複雑な行動を連続的に生成することは困難であった。この問題に対し Terzopoulos らは、アニメットアプローチにより、回りの状況を知覚しながら行動様式を決定する人工魚モデル (Artificial Fish, 以下 AFish と略す) を提案した。以下に概要を述べる。

まず、AFish の 3 次元形状モデルであるが、現実性を増すために実際の魚の写真から 3 次元幾何形状モデルを生成している。また表面の模様には実際の魚のテクスチャをマップして生成している。さらにこうして作られた 3 次元モデルに現実的な魚の泳ぎ方を反映させるために図 1 にあるようなスプリングからなるフレーム構造と水中の応力を考慮に入れた物理的ダイナミクスを導入している。このダイナミクス上の制約によって、あり得ない泳ぎ方を排除し、より現実的な行動様式が実現される。構成されたスプリングフレーム構造は機能モデルによって制御される。AFish の機能モデルは 3 次元の水中環境を認識するための知覚部 (perception)、知覚と後に述べる習性やメンタル状態を反映して次の行動を定める行動決定部 (Behavior)、行動決定部の信号を受けて実際の泳ぎを実現するモータ駆動部分 (Motor) からなる。

モータ駆動部は先に示したフレーム構造上のスプリングを動作させる。制御対象として

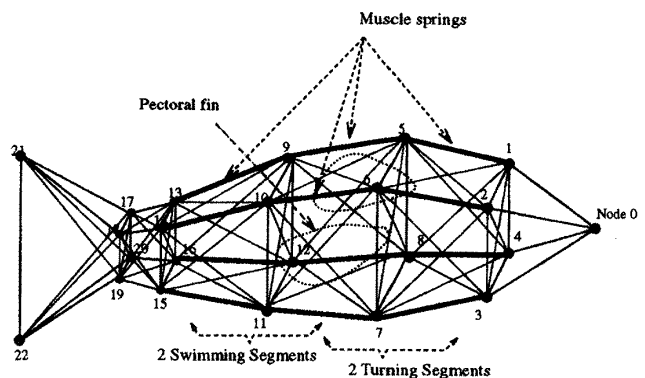


図 1 Artificial Fish のフレームモデル
各ノードは質点であり、細線はスプリング、太線は筋肉に相当するスプリングである。

のフレーム構造は推進部 (Swimming Segments) と旋回部 (Turning Segments) そして胸ビレ部 (Pectoral fin) からなる。モータ駆動部は行動決定部から送られてくる水泳スピードと方向に関する情報をスプリングを動かす大きさと周波数、および胸ビレについてはその角度に置き換えて動作させる役目を持つ。このときも各フレーム構造が作り出す動きが非現実的にならないように、現実の魚の泳ぎ方を参考に注意深くモデル化がなされている。センサとしては擬似的なビジョンセンサと温度センサが用意され、周囲の状況が知覚できるものとしている。

AFish モデルとして物理的制約を持つ駆動モデルおよび知覚部を用意した上で、モデルを如何にスマートに動かすかが課題となる。この課題に対して、モータ制御部に対する強化学習の導入と意志生成機構を用いた行動制御機構を提案している。現実的制約に違反しないような駆動モデルを用意すること、それを様々な条件下に沿った動きを実現することとは別である。そのために目的にあわせた幾つもの制御モジュールを強化学習とシミュレーテッドアニマリングを組み合わせた手法によって段階的に生成する方法を用いている。例えば、まず必要なのはスムーズに前進することであり、この目標に対して泳ぐ速度、加速度の滑らかさ、移動距離を組み合わせた評価関数を設定し訓練を行う。こうした一種の訓練には、敵から逃げる行動、追いかける行動、これらの行動をスムーズにつなげる行動という具合に、それぞれ評価関数を工夫しながらボトムアップ的に学習させて様々な制御モジュールを生成させている。

上記の手続きを経て構成された駆動制御モジュール群を利用し、センサ情報とそれぞれの魚の習性を反映した行動様式を変化・決定させる役目を負うのが Behavior ネットワークの一種である意志生成機構である。この機構構成の例を図2に示す。意志はセンサから

入ってくる外界状態はもとより、内部 (メンタル) 状態として、空腹感、性欲、恐怖感に関するダイナミクスをもつ。この意志機構に種特有の習性や、センサ情報として何に注目するのか、その結果変化するメンタル状態に応じてどんな行動様式をとるのかといったパターンを埋め込むことにより、静的障害物の回避や、補食、生殖行動、群行動などをスムーズに発現することができる。例えばサメのような捕食者であれば、図2の図中における捕食者の検知および逃避行動、群行動は必要なく、また内部状態も恐怖感を扱う必要がなくなる。

以上のようにして作られた AFish のシミュレーション行動の一部分を図3に示す。生殖行動として雌の魚を追かける雄の様子や、群を作っている獲物に近づくサメなどきわめて多様な行動が生成されている。

AFish の手法は、魚が持つべき物理的制約を注意深くモデルとして用意し、モデルの制御に強化学習を用いたうえで意志を導入することにより複雑な行動パターンの生成を実現したものである。

次にやはり物理的制約を採り入れたシミュレーション手法で、モデル生成の手続きとして進化戦略を用いているものを紹介する。

3.2 3次元スティックアニマット

AFish ではモデルの原型は実際の魚から生成し、その行動制御部分に学習と Behavior ネットワークが用いられていた。つまり描き出されていたアニマットは実際に存在する魚である。一方、生物が進化という過程を経て現在の形状と行動形態を取るようになったことを考えると、形状生成までも含めたアニマットに興味もたれる。このようなアプローチの一つに Ventrella の 3次元スティックアニマットがある¹⁶⁾。Ventrella は仮想生物をスティック形状からなるものに制限した上で、物理的ダイナミクスに応じた歩行実現を試みている。以下ではこの手法について紹

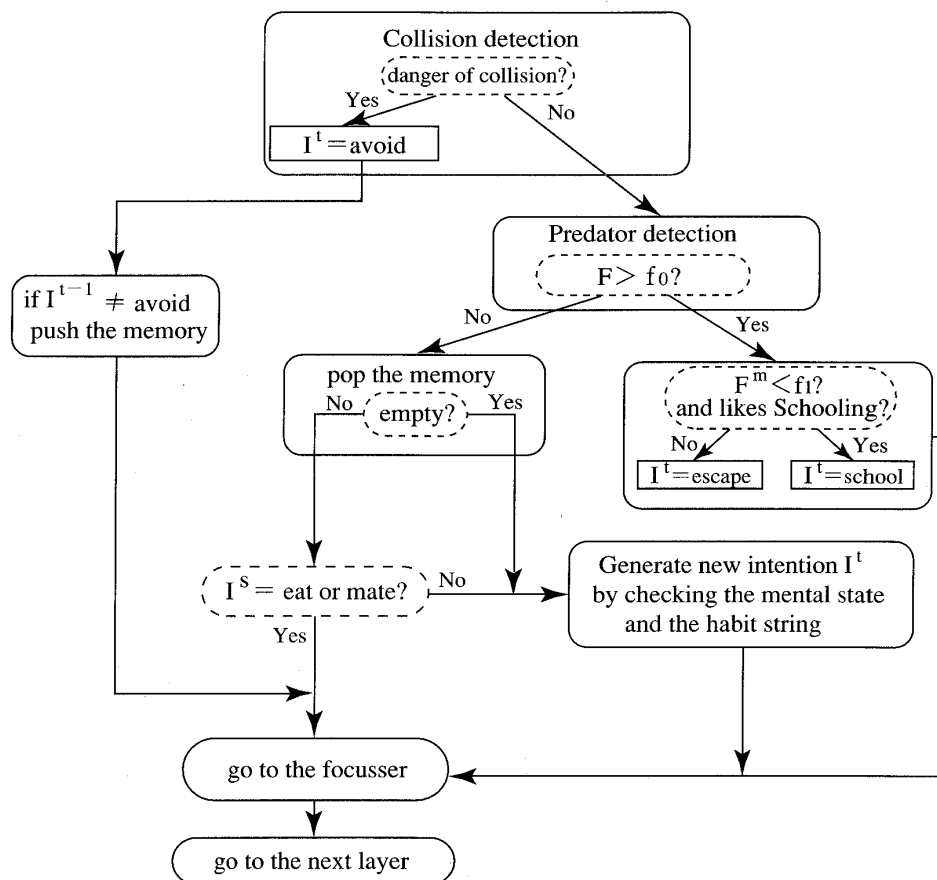


図2 Artificial Fishの簡略化した意志生成機構

意志 I には{回避, 逃避, 群る, 食べる}等があり, メンタル状態として恐怖感 F , 空腹感, 性欲等がある。ここで f_0, f_1 は閾値。

介する。

まず, アニマツトが置かれる環境であるが, AFishと同様に現実的な物理的ダイナミクスとして重力, モーメント, 床反力, アニマツト自身の内力等が生じるものとしている。

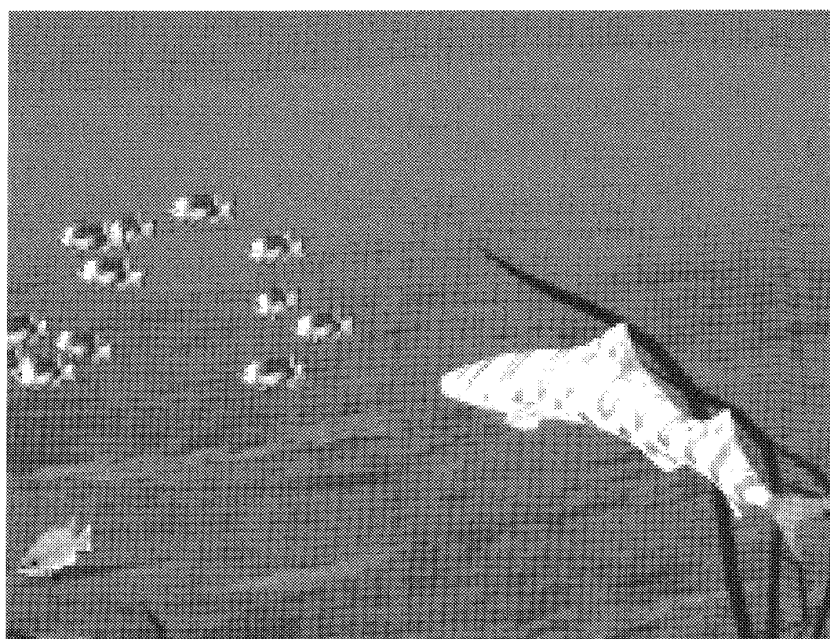
アニマツトの形状およびその動作様式は遺伝子表現としてGAのストリング上にコーディングされる。形状としては, 頭部に当たるヘッド部分と, 背骨に相当するボディ部分, そしてボディ部に対して対称にのびる肢部分からなる。またボディ部と肢部は幾つかのセグメントに分割されるものとしている。これらのパラメータに加え, 各肢部の接続角度(ピッチ, ヨー)とそのジョイントの稼働角度もパラメータとしてコーディングされる。歩行動作実現のためのモータコントロールとし

ては, 各ジョイント毎にピッチとヨー方向についてそれぞれサイン波からなる動きをするものとしている。よってこの波形の大きさ, オフセット等を生成するための基本パラメータを動作に関わる部分としてコーディングする。

以上のコーディングを持つアニマツト遺伝子をGAで進化させる。この操作によって新たに作られた遺伝子から生成される各アニマツトは歩行テストにより評価される。評価方法として時間以内にどのくらい移動できたか, およびヘッド部分に関してこれをできるだけ高く持ち上げること, ぐらぐらさせないこと, 地面にぶついたりこすったりしないことを制約条件に加えることによって, より現実的な歩行形態を持つアニマツトが生成され



(a) 交尾行動. メス (上) を追いかけるオス (下).



(b) 捕食行動. 群れている獲物に近づくサメ.

図3 Artificial Fish に見られる行動の一場面

るようにしている。

図4に生成されたアニマットの様子を示す。ひとつは6足の馬のような形状からなりカニ歩きをするアニマットであり、またあるものは頭のある方向とは逆向きに進むアニマットが生成されている。

スティックアニマットではAFishにはなかった形状自体もGAを使って進化させる

手法が取られ、その結果、興味深いアニマットが発現することを示したものである。どちらの手法においても物理的ダイナミクスを設定し、所望する動作を規定する評価関数下でモデルを発展させることにより、現実にあるようなアニマットの生成に成功している。一方、実際の生物を考えると、その行動様式は他の生物の行動に影響されており、もちろん



(a) カニのように横歩きをする6足馬型アニメット。



(b) 頭の向きとは逆向きに進む3本足アニメット。

図4 進化により発現したスティックアニメットの形態とその行動例

行動を規定するような評価関数が存在しているわけではない。このような意味において、興味深いアニメットを実現している例を次に紹介する。

3.3 バーチャルクリーチャ

MITが毎年学生を対象に開いているロボットコンテストは有名である。このコンテストに参加してくるロボットは実にバラエティーに富んでいて感心させられる。このようなコンテストをアニメットの世界に持ち込んだらどうなるであろうか。この興味を実現したのがSimsのバーチャルクリーチャ（以下VCと略す）である^{17),18)}。

VCにおいても、先の研究例と同様にそのシミュレーションにおいては物理的制約とそれを反映した力学的ダイナミクスが環境として取り入れられている。またスティックアニメットが簡単化のために、その形状をスティック状のものに制限していたのと同様に、VCは長方形のボディパーツに限定して構成される。またスティックアニメットにおいては、センサ情報を取り扱わなかったの対して、刺激反応系からなる行動制御部を有しており、よりアニメットらしいモデル構成を持っている。そしてモデル固有の遺伝的操作

を施すことによってVCの形状と行動を同時に創発させている。

ここであらかじめ強調しておくが、アニメットアプローチにおいて未知の形状とそれを制御するコントローラを同時に進化生成することは容易なことではない。AFishにおいては魚の形状は不変でありこのことは問題になっていなかった。一方、スティックアニメットでさえ、未知の肢部数とその分割数に対応したモータパラメータがそのつど必要とされることになり、進化の特性を活かしたモデル作りには工夫が要求される。スティックアニメットではこの課題に対してモータパラメータ生成関数をあらかじめ用意することによって固定数のパラメータから必要なモータ数の分だけパラメータが生成されるように工夫が成されていた。VCでは単にパラメータを用意するのではなく、AFishに見られたような刺激反応機構そのものを生成する必要がある。モデル化はより複雑なものになる。Simsのこの研究では生成されたVCの動きがあまりにも見事なために結果ばかりに目を奪われてしまいがちであるが、これを可能にしたモデル構成方法こそが、アニメットアプローチに多大なる貢献を果たしているといえる。

まず、VCの遺伝子表現であるがこれは形状の基本構成要素である直方体パーツを表すノードと、その要素から他のノードへの接続関係を表すアークによる方向グラフによる表現を基本としている。この表現例を図5に示す。アークは自己ループを含み、再帰的にそのパーツ部分が再現される。ノードにはパーツを再生するための情報として、その大きさ、接続されているパーツへのジョイント形式{固定、回転ジョイント、ひねり等}、ジョイント可動範囲、パーツの再帰的生成回数の上限などが埋め込まれている。こうした情報を持つグラフ表現からVCの身体形状が生成される。ここで注意しておくが、図5にはわかりやすいようにノードに手足としての対応関係が記されているが、実際の各パーツにはそのような区別は存在していない。

この形状生成に伴ってボディを操作するた

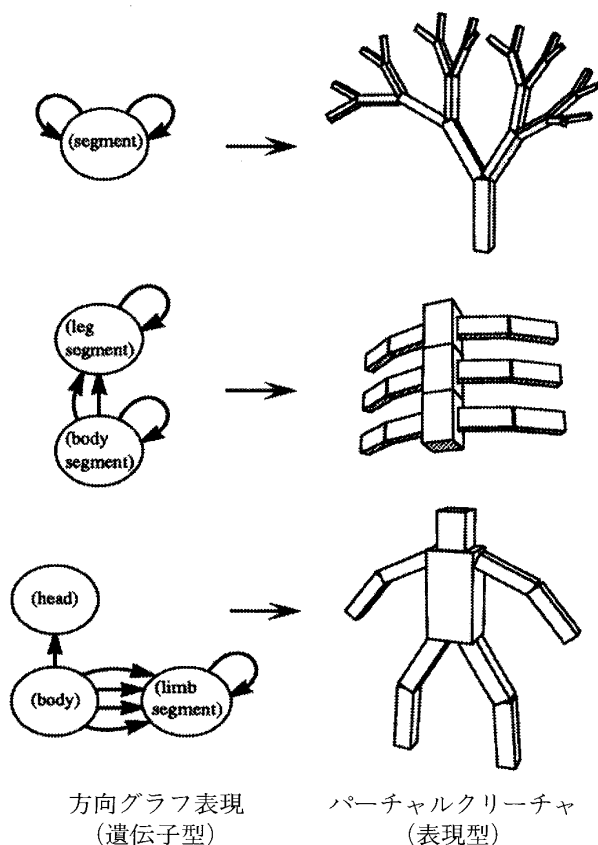
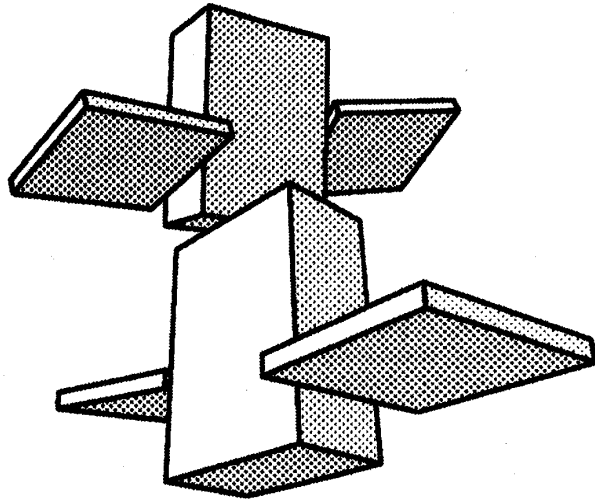


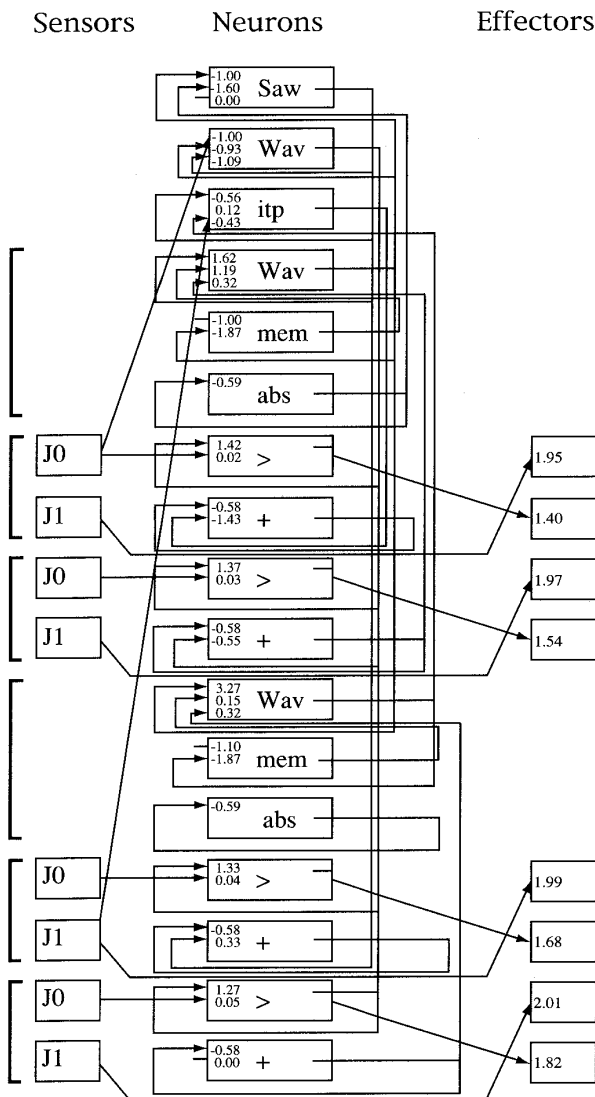
図5 ヴァーチャルクリーチャ形状生成のグラフ表現例

めの刺激反応機構も同時に生成される。刺激反応機構はセンサ、パーツを駆動するためのエフェクター、およびニューロンの3要素をノードとして持つネットワークからなる。センサとしては3種類；ジョイント角度センサ、接触センサ、光センサである。ニューロンノードは様々な数学的関数からなる；積、閾値、サイン、シグモイド、メモリー等である。この刺激反応機構の役割を持つ仮想神経回路網は“脳”に相当する部分ネットと各形状パーツに埋め込まれる部分ネット（ローカル制御システム）からなり、それぞれが接続情報に基づいてネットワーク形態をなす。すなわち、形状パーツのそれぞれにローカル制御システムが付随しており、パーツの再生に伴って制御システムもまた再生される。この仮想神経回路網の例を図6に示す。図6(b)のネットワークは図6(a)のVCに対応しており、左側のブラケット部分が各ボディパーツに含まれているローカル制御システム部分である。ブラケットに含まれていない上部のネットワークは“脳”に相当し形状から独立している。この神経回路網が各部分においてどのような意味合いを持っているのか理解することは難しい。しかし重要なのはこの神経回路網が、後で示すような評価関数をみたく行動をこのVCに引き起こすのに十分な機能を持っているということである。

以上のようにグラフ表現を基礎として、形状生成とそれに伴う制御モジュールの生成機構を示した。このグラフ表現型は、GAと同様の枠組みの下で、進化操作と世代交代を受けることによって変化し、その結果様々な種のVCが創発される。進化操作としては突然変異と交叉の2種類からなる。突然変異の方法としては(i)各ノード内の内部パラメータをランダムに変更する、(ii)ランダムにノードを付け加える、(iii)各ノード間の神経回路の接続パラメータを変更する、(iv)神経回路の接続を新たに加えたり、削除する、(v)神経回路の接続



(a) 泳ぎ回るバーチャルクリーチャの一例.



(b) (a)を制御する仮想神経回路網.

図6 ヴァーチャルクリーチャとその仮想神経回路網の例.

がなされていないノードの削除, を行う. また交叉としては, (i)ストリングを遺伝子として持つGAと同様に, ノードを遺伝子の構成要素とみなして2つの親VC間で交叉を行う, (ii)一方の親を基本として, もう片方の親のグラフの一部を移植する.

進化操作とそれに続く淘汰・再生操作によって作り出されたVCは, スティックアニマットのようにある行動課題に沿った評価関数によって行動力の判定を受ける. Simsは行動課題として, (1)スイミング, (2)歩行, (3)ジャンプ, (4)追尾行動, を設定し, 興味深い数々のVCを示している.

Simsはまた, ロボットコンテストのようにVC同士を競争させたときの進化結果も示している. コンテストの課題は, 2匹のVCを離して向かい合わせ, その中央に置いた直方体の争奪戦をさせようとするものである. どのようにしてこれを取るかは一切指示しない. きまりとしてあるのは, どちらがこの直方体をものにするか, あるいはより接触面積を多く確保するか, 両者ともそれができない場合にはより近づいた方を勝者とするだけである. このような競い合いはアニマットアプローチにおいてはきわめて重要な意味をもつ. 歩行や泳ぐといった評価関数の下では, 評価値を高くする方法が一つ見つければそれでよい. しかし競争となると, ある者が優れた戦略を見つけ出したとすれば, 他の者はこの戦略の裏をかくような他の戦略を見つける努力をしなければならない. そうして新たに見つけだされた行動戦略は再び, その裏をかくような戦略によって打ち負かされることが期待される. このような競争が続く限り次々に優れた戦略の進化が期待される. こうした手法は人工生命研究にあって“共進化”¹⁹⁾と呼ばれ, 進化をより助長する手法として注目されているものである.

図7にコンテストの結果を示す. このコンテストでは様々な戦略が見られている. 例え

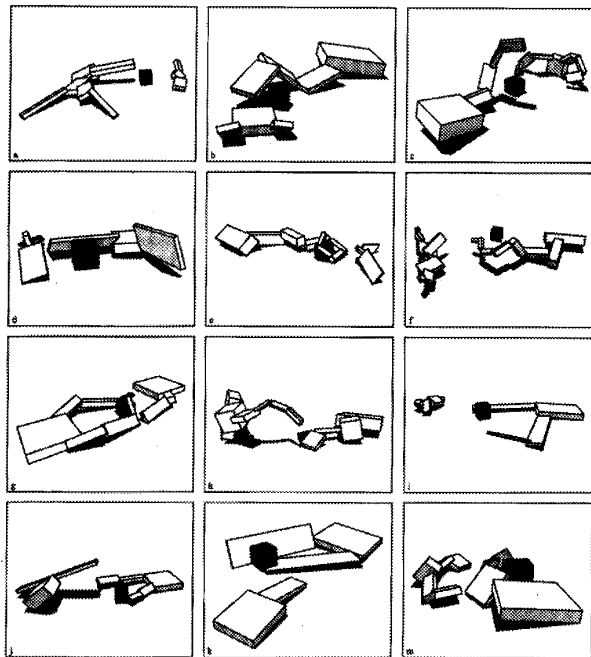


図7 様々なバーチャルグリーチャが発現した直方体の奪い合いの一場面

ば、bの対戦で大きいVCは目標の直方体を脇によけてから小さい相手を突き飛ばしている。cにおいてはカニの様なVCが現れ、歩いて目標物に近づく行動を獲得した。しかしセンサ情報を持たないために直方体を通り過ぎてしまった。dやeでは最初に対戦相手その腕で突き飛ばしておいてから目標物を取りにいっている。fにおける長い腕を持つVCは光センサを使って、自ら動かした直方体を追っかける行動を示した。2本腕のVCの場合では、gは両腕で押しえ込む戦略を取り、またi、j、kではまず片方の腕で目標をバッティングしてもう片方の腕でそれをキャッチする戦略を示した。この中でも特にkにおける2腕VCはすばやく目標物をすくい上げる戦略を示し、fのセンサを持つVCとほぼ同等の強さを示して共にコンテストの最終勝者となった。また他の興味深い行動としてはmの1腕VCであり、直方体にいち早くたどり着くことができたときには、これを抱えて逃げていく行動を示した。

上記に示した戦略は、全て進化の過程を通

じて自発的に現れたものであることをいま一度強調しておく。もし人間の設計者が考えたとしてもこれだけバラエティに富んだ戦略の数々を思いつかないであろう。また思いついた戦略がどの程度優れているのか判断つきかねるであろう。すなわちアニマツトアプローチにおけるこうした手法は、知識の獲得を行う手法としても有望であることが示唆されている。

4. まとめ

本稿は人工生命とシミュレーションの関わりがいかなるものであるかを示すことを目的に、特にアニマツトアプローチとして取り上げられる領域に限った話題に触れてきた。すなわち、アニマツトの定義とそのモデル化手法に関する議論を通じて、シミュレーションがアニマツトモデルの展開過程そのものに対応すること。またシミュレーションの在り方の議論から、シミュレーション環境の設定が展開されるアニマツトの性質を大きく左右することを指摘した。

またアニマツトアプローチの具体例として、現実的な力学的ダイナミクスを取り扱っている3つの研究例を取り上げた。すなわち、一つは強化学習によって行動を生成するものであり、他の二つは進化戦略を用いることによってモデルの形状生成まで含めたアプローチであることを紹介した。いずれの例においても、そのシミュレーション設定と強力な自己展開の手続きに支えられて“現実にあるような”仮想生物達が作られることを示した。また特に形状生成とその行動制御機構を同時に展開させようとする場合には、進化対象となるモデルが複雑化し、巧妙な手法が要求されることを指摘した。また共進化手法が多彩な戦略獲得法として期待できるものであることを述べた。

なお、本稿では詳しく触れられなかったが、アニマツトとしての振る舞いの質に目を向け

た研究もなされている。すなわち、AFishに見られた様な意志生成機構に基づく行動選択をより現実的なものに近づけようとする動きがある。従来の刺激反応系に基づく行動パターンだけでは、刺激として入力される外界の状況に全て従ってしまう。しかし、現実にはのどがひどく渇いていれば、目の前に現れた餌よりも水を探す方が優先されるべきである等、アニマツトの内部状態に応じた外界刺激に対する選択が為されるべきである。この考えから実現されたモデルにBruceのHamsterdamがある。AFishよりも複雑でダイナミクスを多用したこのハムスターモデルはこれまでに無かったアニマツトの行動様式を提供することに成功している。さらにBruceは仮想現実感を使って人間とインタラクションすることのできる仮想ペットを作成することに成功している。

アニマツトアプローチの全てが、実世界でありそうな仮想生物の生成を目標としているわけではないが、妥当で普遍性のあるモデル生成を行うためには求めようとする行動特性を正しく反映したシミュレーション設定をしておく必要があることに変わりはない。またこのことは逆に優れたシミュレーション技法を導入することによって、今までになかったアニマツトが作れる可能性があることも意味している。今後の発展が期待される。

参考文献

- 1) C.G. Langton (Eds): *Artificial Life*, Addison-Wesley (1988).
- 2) D.E. Goldberg: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley (1989).
- 3) L. Davis: *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold (1991). (日本語訳, 嘉数, 他: 遺伝アルゴリズムハンドブック, 森北出版 (1994)).
- 4) R. Brooks: *Intelligence without representation*, *Artificial Intelligence*, 47, pp.139-159 (1991).
- 5) F.J. Varela and P. Bourgine (Eds): *Toward a Practice of Autonomous Systems*, Proc. of 1st European. Conf. on Artificial Life, MIT Press (1992).
- 6) J.A. Meyer and S.W. Wilson (Eds): *From Animals to Animats*, Proc. of the 1st Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior, MIT Press (1990).
- 7) J.A. Meyer, H.L. Roitblat, and S.W. Wilson (Eds): *From Animals to animats 2*, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior, MIT Press (1992).
- 8) D. Cliff, P. Husbands, J.A. Meyer and S.W. Wilson (Eds): *From Animals to animats 3*, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior, MIT Press (1994).
- 9) J.A. Meyer and A. Guillot: *Simulation of adaptive behavior in animats*, Review and prospect, *From Animals to Animats*, pp.2-14 (1990).
- 10) J.R. Koza: *Genetic Programming*, MIT Press (1992).
- 11) J.R. Koza: *Genetic Programming II*, MIT Press (1994).
- 12) 成瀬, 嘉数: マルチエージェントシステムの適応とその応用, シミュレーション, 日本シミュレーション学会, Vol.13, No.4, pp.317-324 (1994).
- 13) P. Meas: *Stuated Agents Can Have Goals*, *Designing Autonomous Agents*, MIT Press, pp.49-70 (1990).
- 14) R.A. Brooks: *Artificial Life and Real Robots*, *Toward a Practice of Autonomous Systems*, pp.3-10 (1992).
- 15) D. Terzopoulos, X. Tu and R. Grzeszczuk: *Artificial Fishes with Autonomous Locomotion, Perception, Behavior, and Learning in a Simulated Physical World*, *Artificial Life IV*, MIT Press, pp.17-27 (1994).
- 16) J. Ventrella: *Explorations in The Emer-*

- gence of Morphology and Locomotion Behavior in Animated Characters, Artificial Life IV, MIT Press, pp.436-441 (1994).
- 17) K. Sims: Evolving Virtual Creature, Proc. of SIGGRAPH'94, pp.15-22 (1994).
 - 18) K. Sims: Evolving 3D Morphology and Behavior by Computation, Artificial Life IV, MIT Press, pp.28-39 (1994).
 - 19) W.D. Hills: Co-evolving Parasites Improve Simulated Evolution as an Optimization Procedure, Emergent Computation, MIT Press, pp.228-234 (1991).
 - 20) K. Thearling and T.S. Ray: Evolving Multi-celluar Artificial Life, Aritificial Life IV, MIT Press, pp.283-288 (1994).
 - 21) Bruce, B.: Action-Selection in Hamsterdam, Lessons from Ethology, Form animals to animats 3, MIT Press, pp.108-117 (1994).