

適応的なロボット設計を目指す 人工生命アプローチ

Emergent Robotics based on Artificial Life Perspective

有田 隆也 (名古屋大学 大学院情報科学研究科)

Takaya ARITA, Nagoya University, Furo, Chikusa, Nagoya 464-8601

1. はじめに

人工生命研究は、複雑なシステムの起源・進化や複雑なシステムに特有の創発現象へのアプローチにおいて、新しい視座や有力な方法論を提供するものであり、生命だけでなく、社会、言語、経済などに関わるシステム論的普遍性のある知見を得ることを目指してきた[有田 02]。究極的には、生命とは何か、人間とは何か、自分とは何かという根本的な問いかけに対する、定式化された計算論的回答を求めるものであり、その意味で普遍的である。また、同時に、進化計算、進化ロボティクス、人工生命グラフィックス、人工生命アートなどの実用的な応用分野も開拓してきており、真に融合的、学際的な領域になっている。本稿では、特に、我々の人工生命ラボトリ(仮称)において行われている人工生命研究の中から、ロボットに関わる様々な試みを紹介し、人工生命研究がロボットの存在意義をどのように捉え、どのように変えようとしているか考える。

2. 発生と進化に基づくロボット

自然界における生物の進化は、体の構造と行動の共進化という側面を持つとみなすことができる。課せられた制約の下で、生息する環境に応じて、体の構造と体の制御法の両者が相互作用しながら選択圧を受けてきたという見解である。近年、進化ロボティクスの研究領域において、このような自然のメカニズムの一部が利用されてきたが、ほとんどの研究では、ロボットの構造を人間が確定した上で、その構造においてセンサからの入力をどのようにモータへの出力に結びつけるかというところに進化的計算手法を応用するものであった。一方で、3次元仮想空間において仮想生物が構造と行動を進化させることに成功した Sims による先駆的研究[Sims 94]以来、いくつかの研究が行動だけでなく、構造との共進化を指向している[Matos, Arिता 04]。しかし、それらの多くは仮想空間内に留まるものであった。実ロボットの構造の進化を指向した研究もいくつかあるが、それらは、ロボットの形状、特に、各種センサの選択や配

置までもを含むような複雑で大きな自由度を想定したものはなかった。

そもそも、自然界における生物は、体の構造(形状)と行動(頭脳)が互いに相互作用を及ぼしながら進化してきたとみなせる。ロボットにおいても、行動だけでなく構造も同時に進化的に設計するという新しいロボット設計の方法論を検討することが朝井らの研究[朝井, 有田 02, 03]の目的である。そのロボット進化モデルは、最初は何の機能も持たないただの立方体のブロック一つであったロボットが、構造と行動の両者への進化圧が働き、環境に適したモータ、車輪、各種センサなどを取捨選択しつつ、与えられたタスクをうまくこなすようなロボットが自動的に出現してくるというものである。

モデルの概念を図1に示す。本モデルでは、発生と進化という2つのプロセスが採用されている。両プロセスは各ロボット個体のもつ1セットの遺伝子情報によって規定される。遺伝子情報は生成文法として表現される。構造と制御を同等に表現し、発現する点に特色がある。ひとつのブロックだけが存在する状態から個体発生は始まり、ブロックの周りの状況に応じて条件部分が満たされた遺伝子が発現し、様々な機能を持つブロックが、上下左右に接続されていく。遺伝子情報は、接続された新ブロックにもコピーされ、各ブロックで同様に解釈される。この発生の段階が終わると、実際に課された環境下でのタスクの実行となる。環境からの入力に応じて各ブロックの発火状態が伝播し、発火したブロックが相互に影響し、モータなどのブロックの状態変化に応じて、再び環境への出力となる。各個体は染色体の記述に従い、設定されたタスクを実行し、適応度評価を受ける。その後、遺伝的操作を行い、次世代集団を構成する。

壁に衝突しないでなるべく広い面積を通過するほど得点が

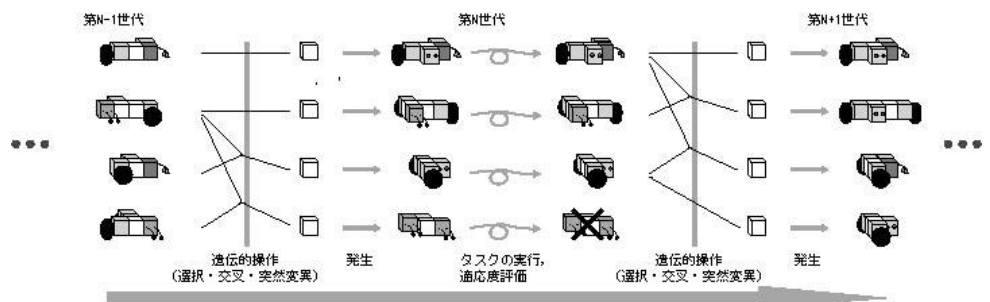


図1 ロボットの発生と進化

高いという課題を設定した。ロボットが通過した面積を適応度とし、壁に衝突した場合はそこで評価を終了する。典型的な進化の進み方を図2に示す。同図は、各世代における評価値の最高得点と平均得点を示している。進化が連続的に進むのではなく、階段状、つまり、断続平衡進化の様相を呈していることをはっきり示している。各段階における典型的なロボットの構造と行動を明らかにするために、同図には、さらに、200 世代、700 世代、1000 世代、1600 世代における最高得点を獲得したロボットと、そのときの動きを図式的に示している。450 世代あたりから中央の壁を避けはじめたが、2つの車輪（モータ）を垂直方向に向けるという予期せぬ構造であった。超音波センサを利用して壁との距離を保ちながら進むことにより壁を避けた。1000 世代で出現したロボットは黒い床に入るとそこから抜け出するために光センサを使用している。1600 世代で最高得点を獲得したロボットは、光センサは使わず、2つの超音波センサをうまく使い分け、車輪の回転方向を微妙に切り替えながらフィールド全体を動き回るのであった。

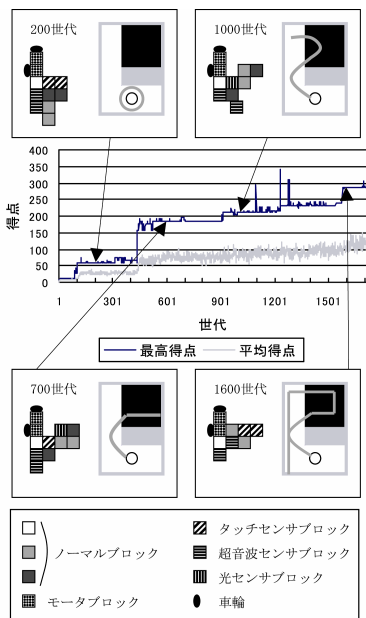


図2 典型的な進化過程(最高/平均得点)

遺伝子情報の解析の結果、実際に発現する遺伝子は全遺伝子の中できわめてわずかであり、さらに、発現する遺伝子の中でも、重要な役割を果たさないものもあることがわかった。高い評価値を得たロボットが集団中に広まる一方で、実際の生物同様、発現しない遺伝子も次の世代へ伝わるため、重要ではない遺伝子に突然変異が蓄積される。表現型に大きな変化がなくても、このような遺伝子情報の冗長性に基づく多様性の増加は、断続平衡進化において、次の大きな進化が起こる可能性の増加に繋がると考えられる。これは進化の中立説とも深く関連していると考えられる。

シミュレーションで出現したロボットのいくつかを実際のロボットとして組み立てて実験した。図3は1600 世代で最高得点を獲得した個体を作成したものである。シミュレーションは計算時間削減のため進行方向等に関する物理的計算を

最大限簡単化したものであるが、ロボットの重量を多少調節することにより、シミュレーションで得られた行動をほぼ再現し、タスクフィールドを動き回ることができた。一方、この実験とは独立して、人間が最初から手で設計を行おうと試みた。構造は、2つの車輪を平行にするものであったが、各ブロックの状態数が限定されていて、センサの状態をうまくロボットの制御に結びつけるのが困難なために、タスクをうまく実行することができず、低い適応度に留まるものであった。

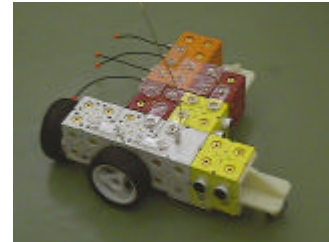


図3 1600 世代で出現したロボット

3. ロボット行動における共進化の調整

共進化遺伝的アルゴリズム（以降、CGA）の可能性を初めて示したのはHillisの先駆的研究[Hillis 92]である。彼が提案した競合型CGAは、共進化する2つの集団を設定し、一方の集団の適応度の増加がそのまま相手集団の適応度の減少につながるように適応度評価するというものである（図4）。彼はソーティングネットワークの設計を題材として、この手法の有効性を示した。ホスト個体集団（ネットワーク構造）とパラサイト個体（ソーティングされるテストデータ）の集団の2集団の共進化によって、一方の集団ではうまくソーティングできない回路から正しくソーティングできる回路へと進化し、もう片方の集団ではソーティングしやすいテストデータからしにくいテストデータへ進化するというものである。

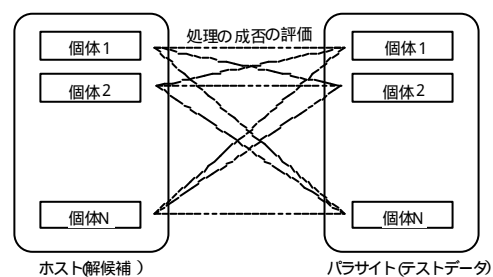


図4 共進化遺伝的アルゴリズムの適応度計算例

CGAにおいて、効率的な進化を実現するためには、集団間の進化の歩調を合わせることがきわめて重要である。ソーティングネットワーク設計問題においては、多くのテストデータを正しくソートできたネットワークほど適応度を高く、多くのネットワークにおいてソートされなかったテストデータほど適応度を高く設定するため、お互いに競い合うようにして進化が進むはずである（生物学では「赤の女王」効果と呼ばれる）。しかし、たとえば、テストデータが一気に難しいものに進化してしまった場合、ホスト集団では、どの個体もソーティングできなくなってしまい、適応度は似たり寄ったり

になってしまう。このような事態は、両集団の進化が停滞を意味する。

この問題を解決するために、三井と有田は両集団の進化の相対的な進み具合に差がすぎた場合に適応度の高くなりすぎている側の選択圧を自動的に弱める手法を提案している。特に、そのような機能としてもっともシンプルな「逆噴射」機能を導入した共進化 GA を提案している[三井, 有田 01]。「逆噴射」機能とは、一方の集団の適応度の平均がもう一方の集団の適応度の平均よりある一定以上高いときは、選択のしかたを逆転するというものである。ソーティングネットワーク設計問題で言えば、ソーティングを成功させた回数の少ないネットワーク、あるいは、多くのネットワークにうまくソーティングされたテストデータほど子孫をより多く残しやすくなるように適応度の計算方法を変えるというものである。これにより、適応度の高すぎる集団の進化の方向が反転され、進化の歩調が合う方向に向かうことを狙う。

さらに、久野らは、CGA における集団間の進化の進み具合の調整について、ロボットの捕獲逃走行動の獲得問題を題材として研究を行っている[久野, 有田 03]。タスク設定は、獲物ロボットと捕獲者ロボット一体ずつを向き合わせてスタートさせ、獲物側は捕獲者からなるべく長い時間逃げることにより、一方、捕獲者側は獲物をなるべく短い時間で捕まえることにより、高い適応度を獲得するというものである。獲物ロボット集団と捕獲者ロボット集団に関する CGA に基づいて、2層のリカレント型ニューラルネットを実現された行動制御回路におけるニューラルネットワークの重みを進化させる。

CGA における集団間の進化の歩調を合わせる方法として、久野らは多様性の調節に着目した。なぜならば、適応度の高い側の多様性を抑制すると、性能の良好な個体が世代を経てあまり変動せず、その行動が変化する傾向が弱まり、突然変異にのみ依存する傾向が強まる。その結果、適応度の低い集団は、現在の適応度の高い集団の行動パターンに特化した行動を生み出すことに専念すればよくなり、適応度の上昇が促進されると考えられるからである。

実験の結果、多様性調節機能を導入すると特に初期世代において適応度が 20% 近く向上可能であることが示された(図 5)。適応度の高い集団(獲物集団)の多様性を抑制することで、適応度の低い集団(捕獲者集団)の進化指標が明確になり、捕獲者集団の進化が促進されたためであると考えられる。なお、三井らのような選択圧調節機能を導入した実験では、特に効果が認められなかった。これは、獲物集団のエリート個体が選択されなくなったことにより、その集団の多様性が増加した結果、逆に捕獲者集団の行動の変化に柔軟に対応できるようになり、捕獲者の進化が阻害されたためであると考えられる。三井らの研究で行ったソーティングネットワークや次元セルオートマトン設計問題では、解候補集団に、あらゆるテストデータを解くことができる基礎能力が内包されており、また、両集団において解の優劣が相手に依存せず決まる部分が多い。一方、久野らが対象とした問題設定では、獲物集団の全ての行動を捕獲できるような万能性を実現するには捕獲ロボットの潜在的能力が足らず、獲物集団の行動の変化に応じて行動パターンを大きく変更する必要がある。こ

の違いが選択圧調節機能の効果の違いに表れたと考えられる。

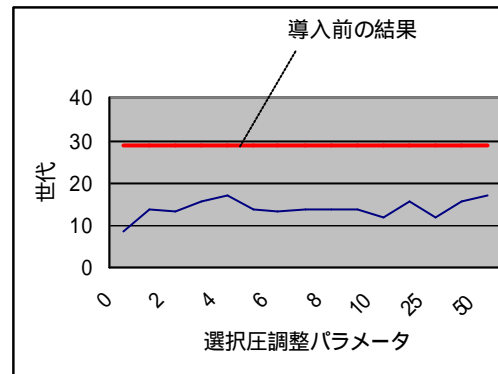


図 5 適応度 0.3 に達するまでの世代数

4. ロボットにおける誤認の適応性

情報を正確に獲得することは多くの場合に適応的であると考えられている。しかし、その情報がある行動を促進するものであり、しかも、その行動の適応性が集団内でその行動が行われる頻度に依存する場合には、必ずしもそれは言えないケースが想定される。例えば、ある道路が空いており、そこを通過すれば速く移動できるという道路情報が集団内に広まることにより、その道路を通過しようという行動の頻度は上昇し、結果的にその道路は渋滞する。また、ある株価が安いという情報の伝播は、結果的に株価の高騰を招き、適応度を下げる。これらは、情報が共有されることにより集団構成メンバーが特定の行動に集中した結果、個体、あるいは、集団の適応度が低下することを意味する。このような状況では、情報を正確に認識しないこと、すなわち、誤認により情報の共有が妨げられることによって、行動の多様性は増加し、適応的となると考えられる。

情報の共有そのものが多様性の減少をもたらす状況において、コミュニケーションは情報共有の1つの手段であり、必然的に多様性を低下させるものなので、コミュニケーションによっても、このような多様性減少による効果が表れるはずである。つまり、コミュニケーションに対して、誤認が働くことにより、認識に差異が生じ、その結果、行動の多様性が増加し適応的となると考えられる。また、情報の共有が行動の多様性の低下をもたらす効果は、その情報によって、促進される行動がどれだけ特定の行動であるかということにより異なる。情報がある行動一点のみを促進するときは、その一点に行動が集中するため、多様性低下の効果が最大となる。ある特定の行動一点のみを禁止するような情報では、行動を促進する範囲がその一点以外すべてということとなり、多様性低下の効果は最小となる。両者の間のどちらの行動が促進される幅は連続的と考えられる。したがって、誤認の効果もその多様性の低下の大きさに依存すると考えられる。

誤認は情報獲得過程から2種類に分類できる。ある個体が情報を環境から直接得る際に生ずる誤認を直接誤認、コミュニケーションなど間接的な情報入力の際に生ずる誤認を間接誤認と呼ぶ。直接誤認は、他個体とのかわりがないため個々の行動多様性を増加させ、間接誤認は、コミュニケーションによって発生するため集団的な行動多様性を増加させると考えられる。

以上のような仮説に基づいて、資源探索問題を対象としたマル

エージェントモデルを構築して、直接誤認と間接誤認の適応性を定量的に評価することにより、上記の仮説の妥当性を定量的に検討している[Akaishi, Arita 02]。タスクはロボットの資源収集を想定しており、正方形のセルに区切られた2次元平面上をエージェントが資源を探索し収集するものである(図6)。

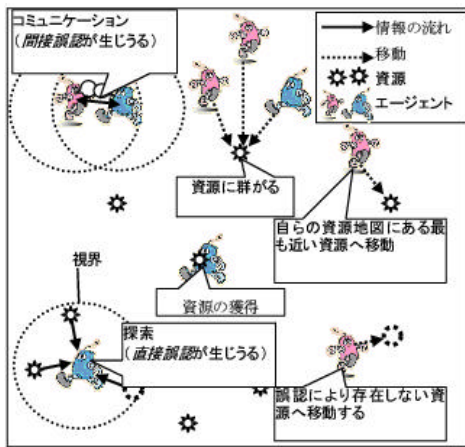


図6 モデル概要

エージェントは自ら知覚した、もしくはコミュニケーションによって得た資源の位置と量に関する地図情報を記憶する。エージェントがコミュニケーション、もしくは自らの知覚により情報を得る際、誤認が発生する可能性がある。誤認が発生した場合、情報の受信者の認識は送信者と異なったものとなる。

直接誤認、間接誤認、正確なコミュニケーションが行動促進情報に及ぼす影響を調べるためシミュレーション実験を行った。その結果、特定の行動を促進する情報に関する直接誤認は、個々の多様性を増加し適応的となりうること(図7)、正確なコミュニケーションは集団行動の多様性を減少させ誤認の適応性を減少しうること、それに対して間接誤認は集団の多様性を増加し、コミュニケーションを適応的としうることを確認された。

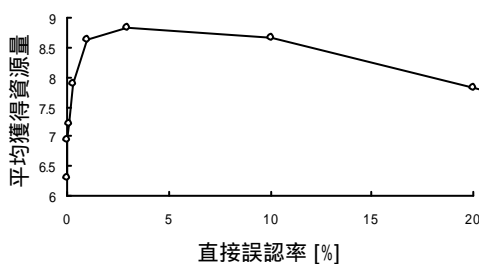


図7 直接誤認の影響

この結果は、多様性をもたらす要因としての誤認の適応性に関する研究が以下のような興味深いテーマに新たな知見を生み出すものと考えられる。第1に、工学的な技術革新に対するアンチテーゼとしての可能性である。例えば、群ロボットシステムにおいて、ロボットのセンサー感度の限りない向上がシステム全体の性能向上に必ずしもつながらない状況がありうるのではないかと。第2に、人間の感覚器官の不完全性に関する機能主義的な説明である。感覚器官はしばしば誤る

が、これに関して構造的物理的な限界からの説明でなく進化的な理解が可能ではないか。第3に、人間の文化的側面を遺伝とのアナロジーで理解しようとするミーム学における議論の中にこのような誤認の適応性を位置付ける立場である。誤認はミームにおける突然変異を生じさせる原因の一つとして考えられるのではないかと。という点である。

5. フェロモンコミュニケーションの応用

近年、群知能に関する研究が活発になってきている。群知能とは単純な知能を持つ個体が集団として創発させる知能であり、単純な個体であっても複数集まることによってその総和以上の知が生まれるということである。生物学においては社会性昆虫についての研究がなされてきた。コロニーを作って集団で生活する昆虫は社会性昆虫と呼ばれ、典型例として蜂や蟻がある。蜂や蟻は女王を中心とした複雑なコロニーを形成しているが、女王がコロニーの運営を集中管理しているわけでない。コロニーの存続に必要な様々な作業は個々が自律的に行っている。

このような群知能を支えるメカニズムとして蟻のフェロモンコミュニケーションがある。非常に単純なメカニズムであるが、工学的応用の可能性からも注目されている。蟻はフェロモンと呼ばれる揮発性の化学物質を体内で生成し、採餌行動の際に自分の通った道筋に分泌する。また他の蟻が分泌したフェロモンがあればその道筋を辿る。つまり蟻は場を介した非同期型コミュニケーションを実現している。それぞれの蟻はフェロモンを辿るだけでも、全体としては巣と餌の間にフェロモンの道筋を形成し、効率よく採餌活動を行う。さらに、複数の経路があるときに短い方の経路を選択することが知られている。

たとえば、図8に示すように、巣と餌があり、それらをつなぐ長さ違う2本の経路があるとする。2匹の蟻がそれぞれフェロモンを分泌しながら異なる経路をたどり餌に向かって進む(図8(a))。そして、餌にたどり着くと同じ経路を辿って巣に戻る(図8(b))。すると、この時点で下の短い方の経路に分泌されているフェロモンは長い経路に比べて2倍になる。蟻は多くのフェロモンが分泌されている方へ進むため、より多くの蟻が短い経路を選ぶようになる。

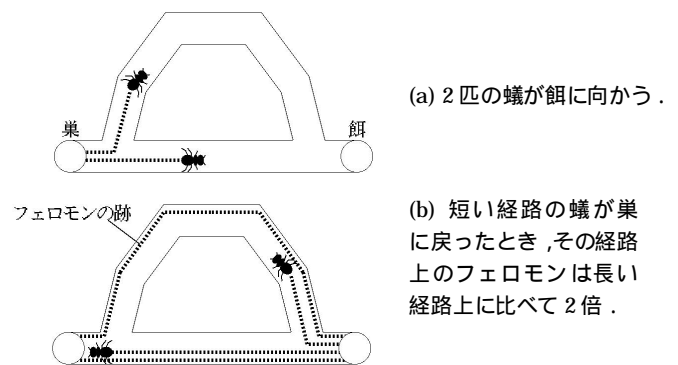


図8 蟻が短い経路を選択する仕組み

採餌活動が初期の段階で、たまたま長い経路の方に多くの蟻が進んでしまった場合は、その経路にフェロモンが多く分泌

され、短い経路に蟻が集まらなくなってしまう場合があり得るが、その場合も、「フェロモンが徐々に蒸発する」ということを考慮すると、最初に長い経路の方に蟻が集まったとしても、徐々に短い側の経路を選ぶようになるはずである。

Dorigo らは蟻の集団がもつこのような能力を利用して、代表的な組み合わせ最適化問題である巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem; TSP) の解法アルゴリズムを考案した [Dorigo, Maniezzo, Colormi 96] [Dorigo, Gambardella 1997]。蟻によるフェロモンコミュニケーションに基づいた組み合わせ最適化問題の解法アルゴリズムを総称して Ant Colony Optimization (ACO) という。ACO では蟻が各都市を次々に訪問することによって巡回路を形成する。ある都市から次に訪問する都市を選ぶ際に、各都市へつながる経路に分泌されているフェロモンに従う。つまり、より多くのフェロモンが分泌されている経路が選ばれやすくなっている。この都市の選択を繰り返すことによって巡回路を得る。そして、巡回路が形成されたら、その巡回路に一定量のフェロモンが分泌される。これを繰り返すことによって、全体としてよりよい巡回路を形成していく (図 9)。

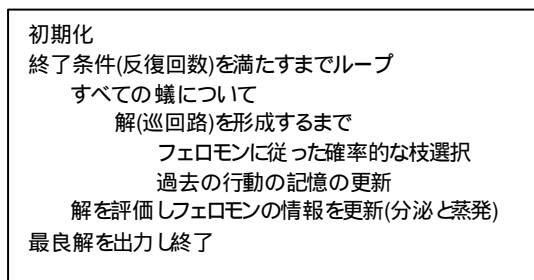


図 9 ACO の基本的なアルゴリズム

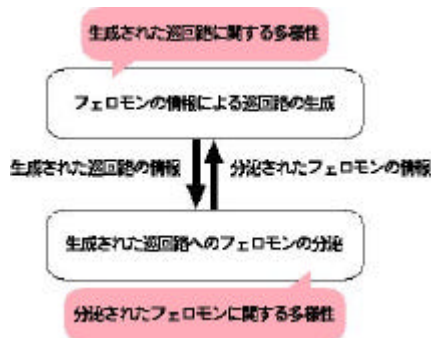


図 10 ACO におけるフィードバック構造と多様性

ACO の基本的な原理は次の 2 つの処理の繰返しにおけるポジティブフィードバックにあるといえる (図 10)。

- ・フェロモン情報に従って巡回路を生成
- ・生成された巡回路の「良さ」をフェロモン情報として蓄積

ACO に関する研究の焦点の一つは、最適解への収束速度の向上と解候補の多様性の維持をどのようにバランスさせるかであるが、中道らは、ACO に対して、ランダム選択のメカニズムを導入することでこの問題にアプローチしている [Nakamichi, Arita 01, 03] [中道, 有田 02]。ランダム選択で多様性を調整することによって、このポジティブフィードバック

構造に存在する 2 段階の多様性が効果的に機能し、従来法より良質の解を安定して算出可能であるというものである。

他のメタヒューリスティクスとの比較においても、ACO の一種である Ant Colony System (ACS) は遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA)、進化的プログラミング (Evolutionary Programming: EP)、シミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing: SA) 等の他の比較的新しいメタヒューリスティクスの中でほぼベストな成績を TSP に対してあげる (表 1) ([Dorigo, Maniezzo, Colormi 96] より)。同表は各アルゴリズムでみつかった最良値とその発見までに探索した巡回路数 (大括弧内) を示している。ACO が他アルゴリズムに比べて優れた結果を出していることがわかる。

表 1 ACS と他のメタヒューリスティックの TSP での比較

アルゴリズム 問題	ACS	GA	EP	SA	最適解
Oliver30 (30 都市問題)	420 [820]	421 [3200]	420 [40000]	424 [24617]	420
Eil50 (50 都市問題)	425 [1830]	428 [25000]	426 [100000]	443 [68512]	425
Eil75 (75 都市問題)	535 [3480]	545 [80000]	542 [324000]	580 [173250]	535
KroA100 (100 都市問題)	21,282 [4280]	21,761 [103000]	N/A [N/A]	N/A [N/A]	21,282

ACO は TSP のみならず、多くの組み合わせ最適化問題に適用され、有効性が確認されている。TSP の実問題への応用は、数百点を扱う基盤配線、運搬経路計画、スケジューリング、数万点を扱う基盤穿孔、X 線結晶構造解析 (タンパク質の構造解析)、数百万点を扱う VLSI 設計等さまざまである。ロボットにおけるコミュニケーションの進化 [Arita, Koyama 98] は人工生命の中心的なテーマのひとつであるが、フェロモンコミュニケーションを群ロボットシステムに応用することもチャレンジングなテーマである。現在、我々はその実現手法を検討中である。

6. ロボットにおける感情の適応性

感情の機能に焦点を絞った研究がなされてきており、典型的な機能としては、行動の幅を広げる、内部状態を伝達する、社会的なつながりを強めるといったものが考えられている。加藤らは、ロボットが与えられたタスクをする際に、たとえ、人間がいなくても、感情はロボットにとって、適応的な「形質」であるとの仮説に基づいて研究を進めている [Kato, Arita 04]。研究の目的は、感情の起源や意義、特に進化的な適応性をロボットを使って追究することと、及び、感情に基づくロボットシステムとしての工学的な応用を検討することである。

最初のステップとして、Dörner による人間の感情に関する理論 [Dörner and Hille 1995] に基づいた定義を行った。彼の説は一言で言うと、感情は行動のモジュレータであるというも

のである。たとえば、テレビには明るさとかコントラストなどの調整つまみがあるように、人間が行動するときの、行動のしかたを調整するものが感情であるとする。ここでのポイントは、感情は行動のしかたを決めるのであって、行動の内容自体を決めるものではないという点である。Dörnerの感情理論をロボット行動に適用したモデル(図11)では、感情は行動生成機構が決めた行動を取るアクチュエータの実際のコントロールのしかたに影響及ぼす。典型的な及ぼし方がある感情に相当する。感情モジュールは、基本的には行動生成機構とは独立なモジュールである。ロボットのモジュレータとして、現在、

- 1) Activation: 単位行動の所要時間
 - 2) Externality: 移動速度
 - 3) Precision: 角を曲がる時の慎重さ
 - 4) Focus: 基本行動の乱れの少なさ
- という4つを定義し、これらの4パラメータ値の典型的なセットとしての感情を5つ(怒り, 不安, 満足, 興奮, 悲しみ)定義している。たとえば、怒りは、(大, 大, 小, 大)として定義される。

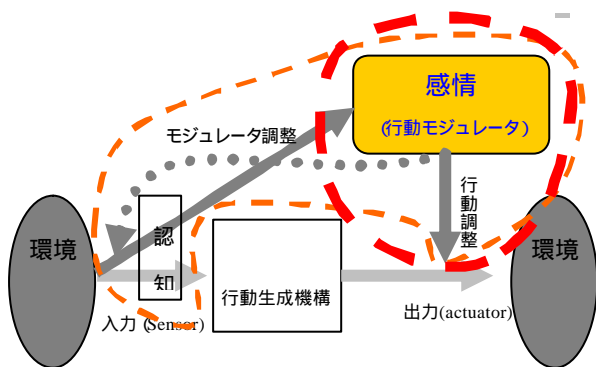


図11 感情に基づくロボットモデル



図12 Amigobot
(W28cm x L33cm x H15cm)

行動モジュレータのロボットの行動への割り付け方の妥当性を検証するため、実際のロボット Amigobot (図12) が移動をする際に、各感情に基づく振舞いを行わせた。1000人以上の被験者に対して、ロボットが個々の感情を伴って行動している動画像とそれぞれの感情名を正確に結び付けられるか評価実験を行った結果を図13に示す。実物のロボットではなく、計算機画面上の小さな動画であったにも関わらず、基本的にそれらの行動が設定した各感情が伴っているとほぼ適切に判断されていることがわかる。「満足」の識別率は高い。一方、「悲しみ」と「心配」は混同されやすいが、これは、直感的にも妥当と思われる。

現在は、感情の適応性の観点から、ロボットにこのような感情を埋め込んだ場合の適応性(タスク実行の効率性)について各感情について個別に検討している。たとえば、急に暗くなったりしてセンサー入力情報が急激に減少する環境に遭

遇した場合、「心配」の感情が起きて、注意深く、集中して行動するようになると不測の事故を避けることができたり、大きなダメージを受けるような環境に遭遇した場合、「怒り」の感情が起きて、多少注意力が落ちて行動の速度を上げて一気にその環境を脱するなどという状況が考えられる。このような点から、感情が適応進化の結果、選択されることをシミュレーションに示すとともに、このような感情の適応性を応用したロボットシステムを検討している。

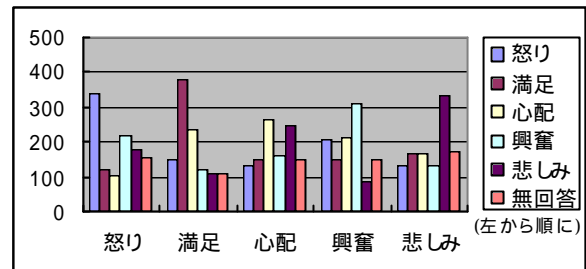


図13 感情認知の検証(横軸:正解 縦軸:回答数)

7. 投機的体験と再現体験に基づくロボット

技術の歴史は我々人間が自由を獲得していく歴史といえることができるかもしれない。もし、この見方が正しいとするならば、我々は発展を続ける情報技術やロボット技術によって、どのような自由を確保してきたのだろうか? この疑問に対して、空間的な制約や時間的な制約からの自由を獲得してきたのだと答えることができるかもしれない。そこで、この点に関してより直接的に検討する材料を得るために、空間的・時間的な制約からの自由を目的とする、最新のインターネット技術や自律ロボット技術を最大限活用する新しいロボットシステムのパラダイムを提案した[Kuromiya, Arita 02]。まず、最初のアイデアは、バーチャル(インターネット)世界においてはいわゆるモバイルエージェントとして振舞い、実世界においてはロボティックエージェントとして振舞う持続的に存在するエージェントである。それぞれのエージェントはあるユーザの一種の「分身」であり、情報を集め、実世界において人間とコミュニケーションをしながら、2つの世界を自由に動き回る(図14)。自律モードとライブモードがあり、ライブモードはいわゆる遠隔実在感 tele-existence の技術によって実現される。この機能は、我々の空間的な制約からの解放に関わる。

さらに、このシステムには「投機的体験」(後でユーザが望まなければ無駄になるという意味において「投機」という新しい概念を導入した(図15)。これは、自律モードで特にタスクを割り当てていない、世界中の利用可能なロボット資源を利用してたえずなされるものであり、ユーザの意図とは直接関係ないものである。投機的体験の内容自体はデータベースに格納されていく。ユーザがデータを検索し、もしそのユーザのエージェントが過去においてその投機的体験を行っていた場合、過去に遡って体験することができる(「再現体験」)。その意味で、空間的だけでなく、(過去の方向性に対する)時間的制約を最大限まで軽減する試みであると考えている。こ

これらの機能を実現するミニマムなシステムはすでに実現され、所期の動作を確認している(図 16)。

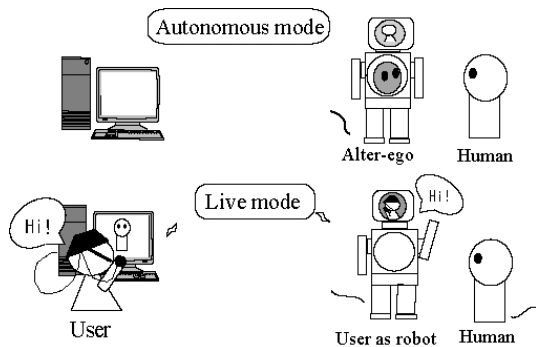


図 14 分身エージェントの自律モードとライブモード

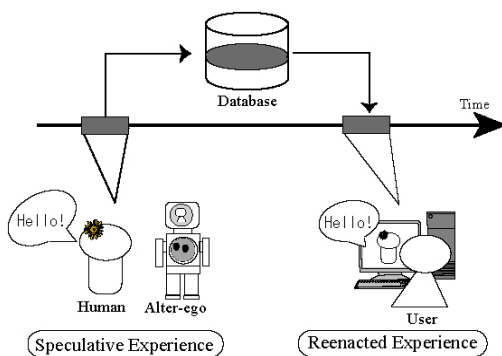


図 15 投機的体験と再現体験

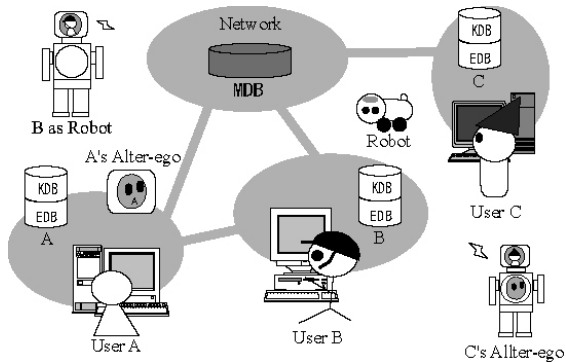


図 16 システム概観

8. 具現化進化を実現するロボットシステム

進化ロボティクスの研究分野においては、「Simulate & Transfer」手法、つまり、ホストコンピュータでロボットや環境をモデル化したシミュレーションを行い、遺伝的アルゴリズムを適用してロボット行動を進化させ、その後、その結果をロボットに転送するという手法が主流であった。しかし、この手法には、次のような大きな問題点がある。

- 1) シミュレーションで得られたコントローラを実ロボットに実装したとき、シミュレーションとは異なる行動が発現する。
- 2) 環境が変わったり、新しいタスクが与えられるたびに、シミュレーション設定を変更し、シミュレーションをや

り直さねばならない。

- 3) ロボット間に複雑な相互作用がある場合、ロボット数の増加に対するスケーラビリティが低い。
- 4) ロボットの複雑な行動や複雑な環境をシミュレートするのは困難で長い時間がかかる。

そこで、遺伝的アルゴリズムを分散化して、ホストコンピュータによる制御やシミュレーションを一切行わずにロボットだけでその行動を進化させる「具現化進化 (Embodied Evolution)」ための研究が Pollack らや臼井らなどによって開始された [Watson, Ficici, Pollack 99] [Usui, Arita 03]。Watson らのモデルは、各ロボットが遺伝的アルゴリズムにおけるひとつの個体に相当し、進化速度がロボット間の遭遇頻度に直接依存するような極めてシンプルなモデルである。一方、臼井らの研究の特徴は、分散化遺伝的アルゴリズムの枠組みを拡張したことにより、柔軟で効率的な進化手法を実現したことである (図 17)。各ロボットは内部に、数個～数十個の仮想個体を持つ。各個体はロボットの制御回路であるニューラルネットワークの構造を規定するものである。ロボット内で時間をスライスして、順番に各個体を評価、つまり、その個体の表現するニューラルネットワークに基づいて行動する。ルーレット選択により、選ばれた個体は交叉や突然変異などの遺伝的操作の後、再び評価される順番を待つキューに入る。ロボット同士が遭遇すると、適応度の高い個体を確率的に相手ロボットに送信する。相手から送られた個体も同様にキューに入れられ、適応度評価を待つ。

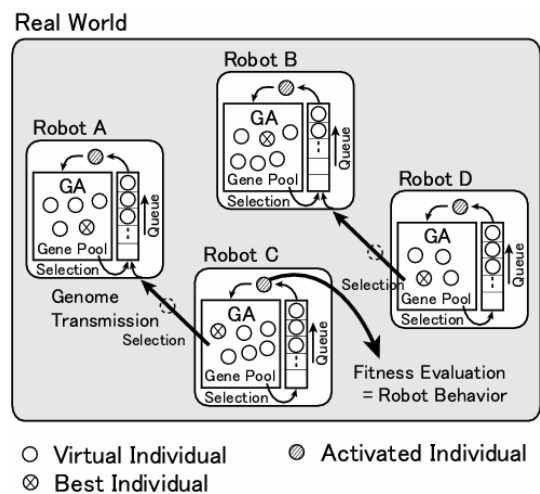


図 17 具現化進化システムの構成

臼井らは、提案手法を評価するため、ケベラロボット (図 18, 直径 5cm) を使用した実験を行った。ホストコンピュータを使用せずにロボットだけで進化させる場合、ロボットへの電源供給をどのように連続的に行うかが重要な問題になるが、ロボットの上にパンタグラフを載せて電源を供給する実験装置 (図 19) を使用した。ロボットが実行するタスクとしては、ロボットや壁へぶつからないという障害物回避を設定し、遺伝的アルゴリズムによってその行動を進化的に獲得するものとした。

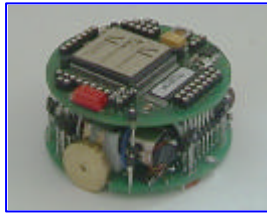
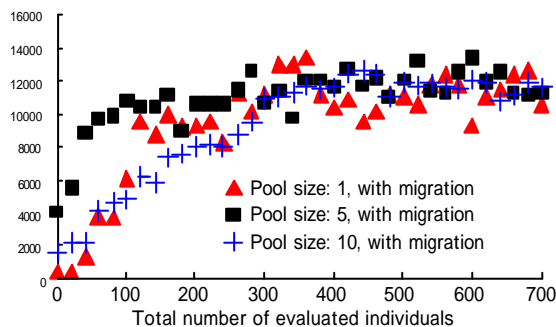


図 18 ケペラロボット 図 19 ロボット実験装置

参考文献

- [Akaishi, Arita 02] Jin Akaishi and Takaya Arita, "Misperception, Communication and Diversity", *Artificial Life VIII*, pp. 350-357, 2002.
- [有田 02] 有田隆也, "人工生命", 医学出版, 2002.
- [Arita, Koyama 98] Takaya Arita and Yuhji Koyama, "Evolution of Linguistic Diversity in a Simple Communication System", *Artificial Life*, Vol. 4, No. 1, pp. 109-124, 1998.
- [朝井, 有田 02] 朝井勇次, 有田隆也, "ブロック型ロボットを用いた構造と行動の共進化の試み", *情報処理学会論文誌*, Vol. 43, No. SIG10 (TOM7), pp. 110-118, 2002.
- [朝井, 有田 03] 朝井勇次, 有田隆也, "マルチエージェント環境におけるロボットの構造と行動の共進化", 第 30 回知能システムシンポジウム, pp. 61-66, 2003.
- [Dorigo, Maniezzo, Colomi 96] M. Dorigo, V. Maniezzo and A. Colomi, "The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics - Part B*, Vol. 26, No. 1, pp. 1-13, 1996.
- [Dorigo, Gambardella 1997] M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant Colonies for the Travelling Salesman Problem", *Biosystems*, Vol. 43, pp. 73-81, 1997.
- [Dörner, Hille 1995] D. Dörner and K. Hille, "Artificial Souls: Motivated Emotional Robots", *Proc. of the International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 4, pp. 3828-3832, 1995.
- [Hillis 92] W. D. Hillis, "Co-Evolving Parasites Improve Simulated Evolution as an Optimization Procedure", *Artificial Life II*, pp. 313-324, 1992.
- [Kato, Arita 04] Tomoko Kato and Takaya Arita, "A Robotic Approach to Emotion from a Selectionist Perspective", *Proc. of the 8th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, 2004 (in press).
- [久野, 有田 03] 久野高嗣, 有田隆也, "競合型共進化遺伝的アルゴリズムにおけるロボット行動の多様性調節の効果", 第 30 回知能システムシンポジウム, pp. 19-24, 2003.
- [Kuromiya, Arita 02] T. Kuromiya and T. Arita, "Speculative Experience based on Internet Technology and Autonomous Robotics", *Proc. of the Seventh International Symposium on Artificial Life and Robotics*, pp. 487-490, 2002.
- [Matos, Arita 04] A. Matos and T. Arita, "An evolutionary model for 3D agents integrating continuous and plastic development", *Proc. of the 9th International Symposium on Artificial Life and Robotics* (in press).
- [三井, 有田 01] 三井富雄, 有田隆也, "進化圧を自動調整するホスト/パラサイト共進化遺伝的アルゴリズム", 第 15 回人工知能学会全国大会, 2C3-04, 2001.
- [中道, 有田 02] 中道義之, 有田隆也, "ACO におけるランダム選択に基づく多様性調節の効果", *情報処理学会論文誌*, Vol. 43, No. 9, pp. 2939-2946 (2002).
- [Nakamichi, Arita 01] Y. Nakamichi and T. Arita, "Diversity Control in Ant Colony Optimization", *Proc. of the Inaugural Workshop on Artificial Life (AL'01)*, pp. 69-78, 2001.
- [Nakamichi, Arita 03] Y. Nakamichi and T. Arita, "Diversity Control in Ant Colony Optimization", *Artificial Life and Robotics*, Springer, 2003 (in press).
- [Sims 94] K. Sims, "Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition", *Artificial Life IV*, pp. 28-39, 1994.
- [Usui, Arita 03] Yukiya Usui and Takaya Arita, "Situated and Embodied Evolution in Collective Evolutionary Robotics", *Proc. of the 8th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, pp. 212-215, 2003.
- [Watson, Ficici, Pollack 99] R. A. Watson, S. G. Ficici, and J. B. Pollack, "Embodied Evolution: Embodying an Evolutionary Algorithm in a Population of Robots", *Proc. of Congress on Evolutionary Computation*, pp. 335-342, 1999.

初期実験の結果を図 20 に示す。同図は、障害物にぶつからずに走行した距離に相当する適応度が、評価する個体数に応じて変化する推移を示したものであり、各ロボット内に存在する個体数（遺伝子プールサイズ）が 1, 5, 10 の各場合に分けて実験を行った結果を分けてプロットしている。同図より、進化が確実に進んでいること、及び、遺伝子プールサイズが 5 のときにベストであることがわかる。遺伝子プールサイズ 1 の場合は Watson らの手法 [Watson, Ficici, Pollack 99] に相当し、この手法が初期段階において一気に適応度を向上させていることがわかる。各個体が遺伝子を持ち、他個体と遺伝子情報を交換するという方式は自然の生物界で起こっていることあり自然である。遺伝的アルゴリズムを人工物の設計に用いるだけに留まらず、人工物が使用されている段階において、遺伝的アルゴリズムを用いてロボットなどの人工物



に適応性を埋め込む際には、この手法のように生物の進化からも一度学び取る点が少ないと思われる。

図 20 障害物回避行動の進化

9. おわりに

人工生命研究がロボットをどのように変えようとしているかを考えるために我々の研究室で行われている研究から 7 つの事例を紹介した。人工生命研究はロボットに対して今後も 2 つの面から関わっていくと思われる。一つは、計算機モデルでは捨象されざるをえなかった様々な物理的な制約をもつ具現化された人工の世界をロボット世界で実現するという方向性であり、もう一方は人工生命研究で解明していく創発的な現象のメカニズムを応用して先進的な実用ロボットシステムを実現するという方向性である。ロボットの直接的な設計はこの地球上でもっとも複雑なものである生物の成り立ちのメカニズムにしたいに任されるようになり、人間はそのメカニズムの設計、つまりメタ設計を行うことに専念するようになっていくものと推測する。