

人工生命と遺伝アルゴリズム

鈴木 恵二

人工生命の研究において、遺伝アルゴリズム (GA) の果たしている役割はきわめて大きい。それは人工生命研究が複雑な環境に対する適応システムの構築を目指している上で、GA はきわめて広範囲にわたる問題領域において進化に基づくロバストな適応手法を提供することができる点にある。すなわち、人工生命研究中においては GA は“関数最適化手法”としてではなく、“複雑環境化における適応手法”の役割を果たしている。この意味において、Holland の GA 研究当初の目的に立ち返ったともいえよう。一方、人工生命研究の急激な進展とそれに伴う GA の拡張は、スキーマ理論やビルディングブロック仮説等の基礎理論ではもはや覆うことのできない広がりを見せ、より強力な進化モデルとその理論構築が望まれ始めている。ここでは、人工生命研究において見られる GA の利用例とともに、新たに課せられた課題について述べる。

1. はじめに

1991 年に開かれた遺伝アルゴリズム (GA) に関する国際会議 (4th ICGA)⁽¹⁾ では、人工生命に関するワークショップが開かれ盛んな議論が交された。このときの参加者の大半の意見として“人工生命は何を目指しているのか”、“どんな性質を持てば人工生命と呼べるのか”と言ったものであった。この時点における人工生命とは、GA 研究中におけるニューラルネットワークと広義に捕えた場合のクラシファイアーシステムを指すものだと多くの研究者が考えていたように思える。しかしながらこの会議中においては、Holland がチュートリアルでエコロジカルモデルの発端となった Ecosystem⁽²⁾ を紹介し、Ray が今や人工生命の代表としてよく取り上げられる進化モデル：Tierra⁽³⁾ を発表し、多くの研究者の度肝を抜いていた。また今日よく知ら

れるようになったジェネティックプログラミング (GP)⁽⁴⁾ もこの会議で登場した。しかしこうした発表に関して、多くの参加者はその発展性に懐疑的であり、ことに GP については、そのあまりにも大胆なプログラムの直接コーディングと交叉のやり方をみて、ほとんどの人が現在知られているような可能性を信じていなかったようであった。

その会議以後、現在までに 2 年余りが過ぎたわけであるが、依然として“人工生命研究とはいったい何なのか”という質問にたいして明確な答えは用意されていないようである。しかし、GA と人工生命の関係はきわめて変化した。以前は Goldberg の著書 Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning⁽⁵⁾ の影響が大きく、GA 研究者は“GA are Function Optimizer (最適化手法である GA)”という認識が強かったのに対して、“GA as Function Optimizer (最適化能力を持つ適応システムとしての

GA)が強調されるようになった⁽⁶⁾。これはこの2年余りの間に相次いで発表された“Artificial Life”^(7,8,9)，“From animal to animats”⁽¹⁰⁾および“Toward A Practice of Autonomus Systems”⁽¹¹⁾といった人工生命に関する国際会議の中で、問題対象である複雑な環境に対する強力な適応システムとしてGAが道具として採用され、またGA自体もこの目的に沿って拡張されたことによる。すなわち、人工生命研究の進展によって、GAに関する研究目的が、Hollandらの当初の目的であった、“ロバストな適応システムの構築”に立ち返る結果となった。

しかしながら、人工生命がGAに及ぼした影響の結果、伝統的GAの手法およびその理論的根拠であったスキーマ定理やビルディングブロック仮説では、その能力、理論的指標のどちらも不十分であることが次第に明らかになってきた。

本報告はこうした人工生命におけるGA研究の幾つかを紹介し、多くの拡張やあらたな理論構築が望まれている現状の課題について示すものとする。

2. 人工生命におけるGA

GAの特徴は様々な文献でも取り上げられているが^(12,13)、今一度、“人工生命を支える適応手法”の意味を問直すと言う視点からあらためて示すことにする。

GAの特徴は以下の4点：(1)確率的探索法、(2)多点探索法、(3)直接探索法、(4)並列探索法、としてまとめられる。この中でも特にGAを強力な適応手法としての特性を与えているのが、(3)の直接探索法である。直接探索法では問題空間の性質（微分値等）を利用しない。GAでは問題空間の性質を利用する代わりに、(2)の多点探索によって得られるそれぞれの探索点の順序付けを利用する。この問題対象に依存しない手法を用いることによ

てGAは広い適用範囲を持つことになり、人工生命で取り上げられる様々な対象に適応可能となっている。また、(4)の並列探索法としての性質も人工生命にとってはきわめて大切な性質であり、後述するエコロジカルシステムにおいて同期的な種の進化を自然に実現しうる可能性として取り上げられている。

人工生命における代表的中心課題としては、

- ・形態形成モデル (L-System)
- ・学習モデル (ニューラルネット, 強化学習)
- ・生体の分散並列処理
- ・免疫系, 細胞間のコミュニケーション
- ・自己修復
- ・進化モデル

といったものがあげられよう。この中でGAが持つ意味合いは進化モデルであり、またそのダイナミクスを利用した適応手法としての道具である。こうした視点から幾つか関連する研究を取り上げてみよう。

実際の生物は非常に長い時間をかけて、交配と選択を繰り返して現在に見られるさまざまな種とそれらの間に見られる相互関係からなるエコロジカルシステムを築いてきた。GAはこの自然に見られる基本的進化ダイナミクスをまねたものであり、それゆえ計算機内にエコロジカルシステムを発現させることが期待されている。こうした研究として、J. Hollandのecho system⁽²⁾やT. RayのTierra⁽³⁾等のモデルが挙げられる(図1, 図2)。これらのモデルは再生および交配や突然変異に基づくダイナミクスによって、種の生成や共生といった関係を発現させることができることを示したものである。しかしながらこうした発現を支えるダイナミクスの理論は依然確立されていない。すなわち、進化ダイナミクスのさらなる理解とその理論化、そしてその理論に基づくGAの拡張が現在求められている。

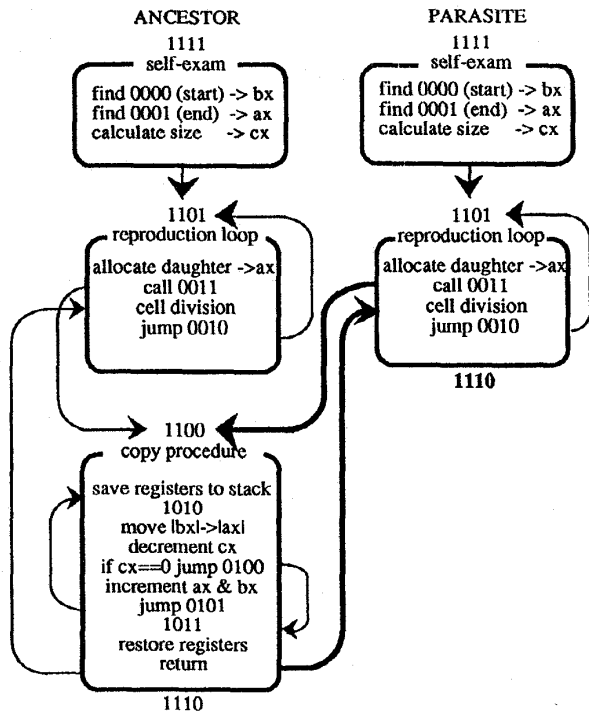
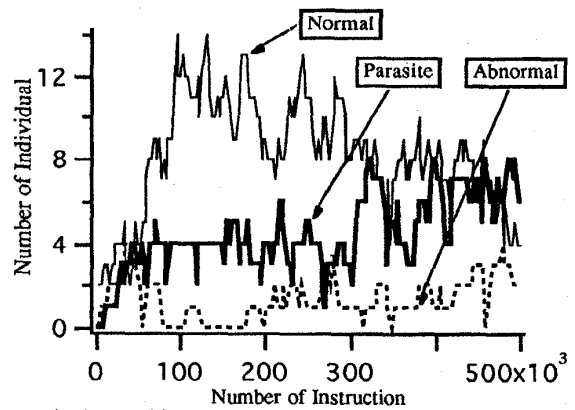
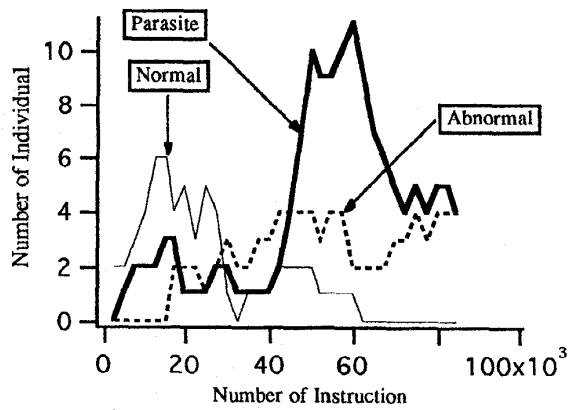


図1 Tierraで用いられている祖先プログラム (ANCESTOR) と、突然変異によって発現した寄生プログラム (PARASITE) の例。寄生プログラムは自己複製機能を失っているために他の個体プログラムの複製機能を利用して自分のコピーを作る。

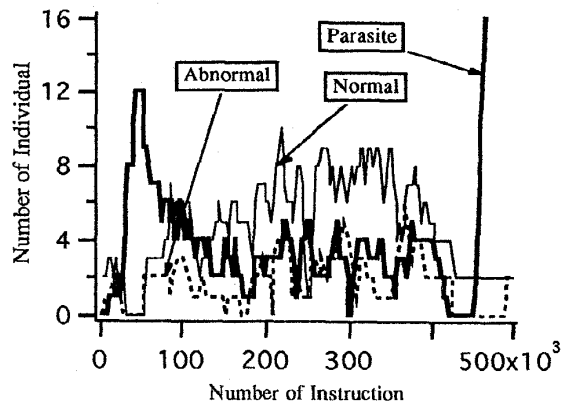
上記の進化モデルそのものとしてのGA研究は、現在その課題が指摘され始めている段階であるが、学習や形態形成等と結び付いた研究は非常に進められている。それらの中で代表的なものはニューラルネットワークとの結合、生物的形態形成、ジェネティックプログラミングであろう。例えば北野のニューロジェネテックラーニング⁽¹³⁾では遺伝子は直接ニューラルネットワークの結合構造を表現する単純コーディングではなく、結合の生成ルールがコーディングされる。この結果生成されるネットワークは規律的なものとなり、進化的学習と組み合わせることによって単純コーディングよりも学習効率の良いネットワークが生成されることを示した。また進化させる対象としてプログラムそれ自身を選び、所望のプログラムを自動生成させようというのも自然な考え方であり、これを実現し



(a) 比較的安定した進化プロセスの例。



(b) 最終的に絶滅となった例。



(c) 不安的な進化プロセスの例。

図2 (a)–(c) 1マシン語の実行を1単位時間とし、ANCESTORと同じ個体(Normal)、独立しているがANCESTORとは違う個体 (Abnormal)、および寄生活動を行う個体 (Parasite) について、出現数の遷移を示した実験結果。各実験結果は1つの祖先プログラムから出発して、突然変異のための乱数を変更した場合の例である。(a)は比較的安定した変化を見せた例であり、(b)は進化の途中ですべての種が絶滅した例。(c)は寄生個体の爆発的増加が観察された例である。この例からもわかるようにこの種の手法は安定した進化プロセスを得るのが困難である。

たのものが Koza のジェネテックプログラミング (GP)⁽⁴⁾ である。GP では遺伝子として LISP 形式にコーディングされたプログラムを対象とし、そのプログラム木の一部を他のプログラムと交換するという手法を用いている。Koza はこの手法を用いてロボットプログラミング等 80 余りの応用問題を解いて見せている。

このように人工生命における GA は、進化モデルとしてエコロジカルシステムの実現に対する期待とともに、様々な対象領域で適応手法として用いられることにより、対応しなければならない課題が広まってきているといえる。以下では GA における問題領域を示しこれらが“人工生命における GA”の課題とどのように結び付いているかを示すことにする。

3. GA の問題領域と人工生命における課題

図 3 に GA のアルゴリズム概要を示す。

GA のアルゴリズムは大まかに 4 つのパートから構成される。このアルゴリズムに基づいて実際に実行するためには以下に挙げる実行方式とそのパラメータ群を決定しなければならない。まず、

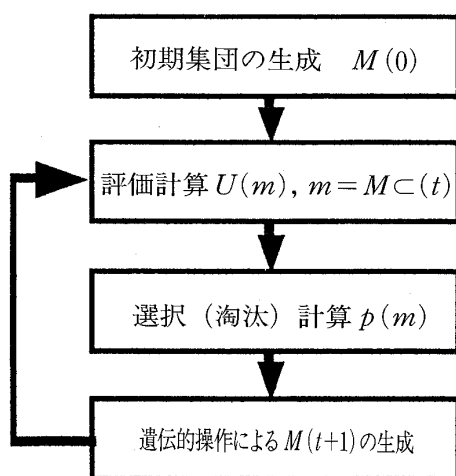


図 3 GA のアルゴリズム

(a) どのようなコーディング (バイナリービット, 実数値, LISP 表現等) を持つ遺伝子を何個用意するか, またそれをどのように初期化するのか (一様乱数初期化, 問題依存型) といった初期集団形成の設定。

(b) 問題を解く目的を評価関数として如何に反映させるか。

さらにこの評価法は選択操作と結び付いて (c) 遺伝子集団内の優劣をどのようにとり, どの遺伝子が子孫を残すのか (評価値比例, 確率的比例選択, ランク付け, トーナメント方式等)。

そして,

(d) 新しい探索点を生成するための交叉操作をどのようにとるか (2 点交叉か一様交叉, またその交叉確率をどうとるか)。

(e) 同じく新しい解候補を得るために行う突然変異操作をどのように実行するのか (一様乱数, あるいは集団の分布に応じた確率的実行等)。

GA 自体の研究ではこれらの設定法について, そのほとんどが最適化手法としての能力という基準から研究が進められてきた。例えば, 評価関数は対象問題から明示的に定まり, かつたとえ多峰性関数であろうとも時間的に不変であり, 各個体の評価も独立に定めることができるというものであった。しかしながら, 適応システムあるいは進化モデルとしての GA が取り扱わなければならない課題として, 評価関数について言えば, (1) 評価関数の状態が個体の能力自体によって定められているような場合。すなわち, ロボットにある環境下で適応的振る舞いを獲得させようとする場合に相当する。獲得しようとしている途中でロボット自身の足が壊れたりした場合には, 評価関数もそれに応じて変更されなければならない。また個体の評価が単独で決められない場合として (2) 協調的振る舞いを必要とする進化形態や, さらには (3) Tierra のようなエコロジカルシステムを合目的に用いよう

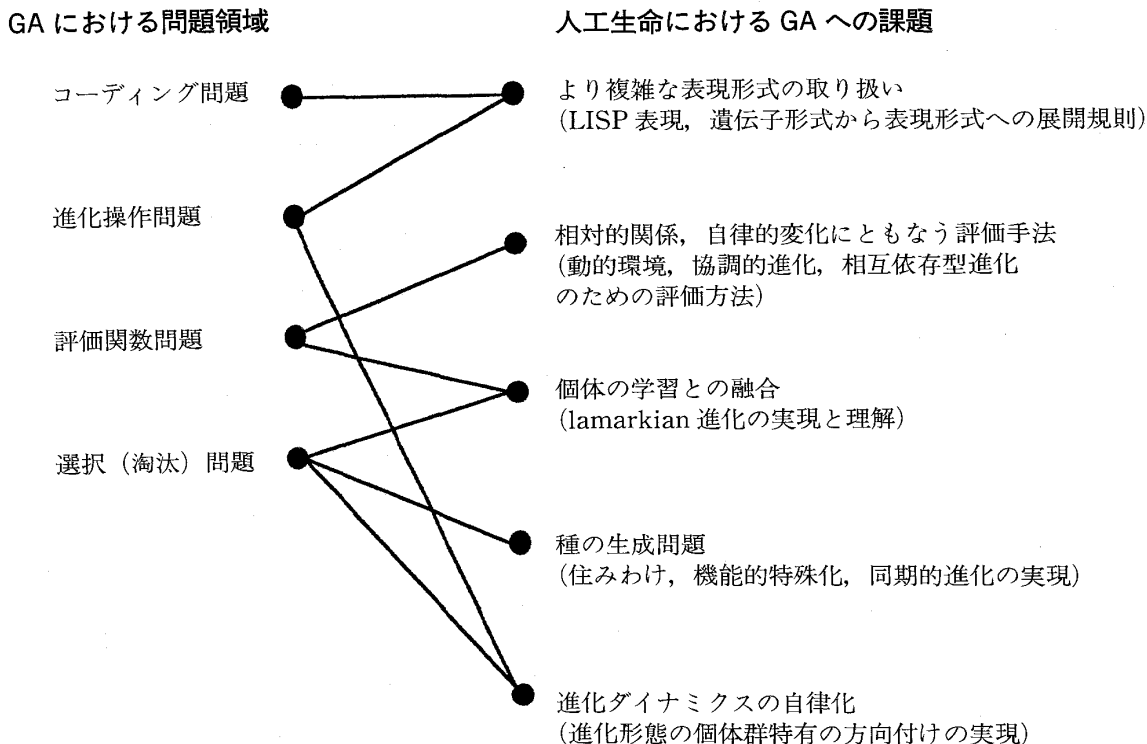


図4 GAにおける問題領域と人工生命におけるGAへの課題との対応関係

とした場合に起こる，進化プロセス自体に依存して評価が定まるような場合である。

その他の表現（コーディング）問題，淘汰問題，生成問題についても同様に，適応システムあるいは進化モデルとしての新たな課題に迫られており，これらを図4に示す。

ここで強調すべきことは，いずれの課題についても，実験的試みはいくつもなされているが，それらの正当性や妥当性を与える理論が欠如していることである。例えば，ある問題に対して，共進化をGAに導入することによって，効果が上げられる場合がしられている。しかし，共進化の形態をどのように設計すれば良いのか，またどのような問題のクラスにそれが必要であり，またどのような効果があるのかといった指針は明らかになっていない。

4. 結 言

本報告は，人工生命を支える道具あるいは

モデルとしての“適応的システムとしてのGA”における現状の課題を示した。人工生命の研究目的はいまだ明らかになっていないと言いが，少なくとも“適応性”の視点が欠けたモデルは人工生命とは呼べないのも確かであろう。この意味においてGAが重要な役割を果たさなければならないのは明白であり，それゆえGAの基本原理解“進化ダイナミクス”のより強力なモデリングと理論化は人工生命それ自身にとっても重要な課題といえる。

参考文献

- (1) Belew, R.K. and Booker, L.B. (editors): Proc. of The Fourth International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, (1991).
- (2) Holland, J.H.: Adaptation in Natural and Artificial Systems (second edition), MIT Press, pp.171-198 (1992).
- (3) Ray, T.S.: Is It Alive or Is It GA?; Proc. of

- The Fourth International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, pp. 567-534, (1991).
- (4) Koza, J.: Genetic Programming, MIT Press, (1992).
- (5) Goldberg, D.E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning; Addison-Wesley, (1989).
- (6) De Jong, K.A.: Are genetic algorithms function optimizer?; Parallel Problem Solving from Nature 2, Elsevier Sci. Pub., pp.3-13 (1992).
- (7) Langton, C.G.: Aritificial Life; Addison-Wesley (1989).
- (8) Langton, C.G.: Aritificial Life II; Addison-Wesley (1991).
- (9) Langton, C.G.: Aritificial Life III; Addison-Wesley (1993).
- (10) Mayer, J. and Wilson, S.W. (editors): From Animal To Animats, MIT Press (1991).
- (11) Bourguine, P. and Varela, F. (editors): Toward a Practice of Autonomous Systems; MIT Press (1992).
- (12) 北野：遺伝的アルゴリズム，産業図書 (1993)。
- (13) “遺伝的アルゴリズム特集号”，システム／制御／情報，Vol.37, No. 8 (1993)