

進化論的計算手法の最近の研究動向

Recent Research on Evolutionary Computation by Hitoshi IBA(Electrotechnical Laboratory).

伊庭 斉志¹

¹ 電子技術総合研究所

1. はじめに

近年進化論的計算手法(Evolutionary Computation)が注目を集めている。この手法は生物の遺伝子の複製や選択淘汰のメカニズムを基にしたものであり、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms, 以下GAと略す)、進化論的戦略(Evolutionary Strategy, 以下ES)、進化論的プログラミング(Evolutionary Programming, 以下EP)、遺伝的プログラミング(Genetic Programming, 以下GP)などを含んでいる。1997年の5月にはIEEEからEvolutionary ComputationのTransactionが創刊され、ますますこの分野の研究および応用開発が盛んになると期待される。

1997年6月現在、筆者は進化論的計算手法研究の中心の1つであるスタンフォード大学に滞在しており、最新の研究動向について見聞する機会を得ている。本稿ではこれまでのアメリカ滞在の間に得られた貴重な知見をふまえて、進化論的手法についての最近の話題を中心に解説する。

2. 進化論的計算手法の温故知新

進化論的な手法の代表例は、前述のようにGA, ES, EPである(GPについては次章で独立して述べる)。これらの手法はいずれも1960年代から70年代にかけて研究が始まっている。各手法の特徴を簡単に述べると次のようになる。

GAは、(1)初期集団の生成、(2)適合度計算、(3)選択、(4)生殖、という4つの基本的な流れにより探索を行う。この研究は、1970年代にJohn Hollandとその弟子たちがミシガン大学で行った業績にまでさかのぼる。GAの遺伝子表現は主に文字列であるが、遺伝子表現と実際に探索すべき空間のマッピングを適切に設計することでさまざまな問題に適用可能である。

EPは、オートマトンの適応的学習を中心とした進化論的なプログラミングを実現する研究手法である。この研究は、L.J.Fogelらによって1960年代に始められた。最近EPは、ニューラルネットワークの合成、巡回セールスマン問題、軌道生成、自動制御、システム

同定、ルールベースの構築などのさまざまな問題に応用されている。

ESは、ヨーロッパ(特にドイツ)において古くから活動していた一派であり、Rechenbergを中心とする。初期のESは、(1)オペレータとして突然変異を主に用いる、(2)実数値表現を扱う、という点でGAとは異なっていた。ESはGAとは違って交叉の影響がないため定量的研究が困難ではなく、突然変異率の効果などが数学的に解析されている。ESはさまざまな最適化問題に応用され、また最近になって実数値以外の問題にも適用されるようになった。

これら3手法間の交流がなされるようになったのは最近のことである(Rechenbergがドイツ語の論文しか書かなかったため、GAの人々には彼の研究は90年代になるまでほとんど知られていなかった)。しかしながら、この数年盛んに研究交流がなされ、各手法間の統合などのアプローチがとられるようになっていく。手法間の違いを強調するよりは、お互いの長所をうまくとり入れた拡張を模索しているようである。GA, ES, EPについての詳細に関しては拙著^{1,2)}を参照されたい。

今年に入って、進化論的な計算手法に関してすでに3回の国際会議がアメリカで開かれている(1997年6月現在)。1997年の3月にはノースカロライナ州のリサーチトライアングルでFEA(First International Workshop on Frontiers in Evolutionary Algorithms)が開催された。この会議はInformation Science Journalがスポンサーとなっており、ニューロ、ファジーの分野の会議も同時に開かれている。ちょうどIEEEのWorld Congressと同じ趣旨の会議である。残念ながら事前に宣伝がさほどなされていなかったためか、またはこの種の学会が多すぎるからだろうか、参加者に若干の偏りが見られた。一方でニューロ、ファジーの研究者がGAの研究を聞く機会があり、またその逆の機会もあり、有益な情報交換の場になり得たと思われる。興味深かったのは、招待講演でのDavid Goldbergの話であった。彼は“Making Genetic Algorithms Fly: A Lesson from the Wright Brothers”という題名で講演を行った。飛行機

などのもの作りで大切なのは必ずしも新奇な物を作るのではなく、過去の設計物のマイナーチェンジ、合成、取捨選択である。この過程はGAの突然変異、交差、選択と一致しており、それはまさにWright兄弟らの飛行機の設計に用いられていた原理である。この話(の一部)はすでにどこかで聞いた気もしたが、GAの一般的入門の話としては効果的だった。奇しくもノースカロライナのアウターバンクス(大西洋沿いの海岸)は、ライト兄弟が初めて実験飛行をした場所であり、National Memorialとなっている。

4月にはインディアナポリスで2つの国際会議が同時開催された。これらはEPVI(6th International Conference on Evolutionary Programming)とICEC97(4th IEEE International Conference on Evolutionary Computation)である。前述のようにEPはもともと進化論的プログラミングを指向した会議であったが、最近では進化論的手法一般をトピックとして扱っており、純粋のEP研究といえるものはむしろ少数派になっている。会議の資料などに描かれていたように、インディアナポリスはインディ500で有名である。残念ながら自動車レースには1カ月早すぎた(もっともインディ500の時期は1年前からホテルを予約するのが常識だそうだから、その時期に学会ができるはずもないが)、会議で目に付いたのは、いくつかの興味深い実際的应用、日本人研究者が多く活躍していることなどである。理論的研究は少なくなったものの、RudolphやMühlenbeinなどのグループが地道に研究しているのに勇気づけられた。ただしこれらの理論的研究発表のセッションに聴衆が少ないのは、いつもながら困りものである。常に面白い応用や分かりやすい話に人が集まる傾向があるのはどうしようものないことなのだろうか? また応用としてはEvolvwareというセッションがあった。これは(ロボットを含めた)ハードウェアの進化を目指す研究であり、最近にわかに注目を集めている。このセッションでは、日本人を2組含めた合計4論文の発表があった。いずれも、ハードウェアやロボットの機能・構成を何らかの形で創発させることを試みていた。昨年10月にはつくばでICES(International Conference on Evolutionary Systems)と称するこの分野に焦点を絞った第2回目の国際会議が開催され、内外から40件近い発表があった。また今年に限っても、後述するGP97での特別セッション、IJCAI97でのEvolvable Systemsに関するワークショップ(Workshop on Evolvable Systems)などの会議が開かれる。Evolvable Hardware(EHW, 進化するハードウェア)は、GAの有効な応用分野として有望視されている。ただし単なる応用例を超えた新しいパラダイムになるためには、その理論的基盤、実現可能性、有用性などに今後の研究課題が残っていると思われる。

以上の研究の詳細は会議の議事録(ICECはIEEE

Pressから、EPはSpringerから出版されている)を参照されたい。最後に会議で興味深かった話を1つあげておこう。David B.Fogelが招待講演で数十年前の論文をとりあげ、そこでなされている研究が現在の最先端のトピックと共通し、ある意味では先に進んでいることを述べていた。彼の趣旨は単なる研究の再発見ではなく、温故知新を説くことにあったようだ。ここでの「故」とは彼の父であるL.J.FogelやKenneth DeJongである。それに対しDeJongがいくつかコメントしていたのは印象的であった。かつてDeJongは自分が導入した標準関数(DeJongのF1~F5と呼ばれている)がGAの指標に使われすぎるのを嘆いていた。つまりこの関数のみを最適化すればよいかのようにGAが研究されている現状を批判したのである。こうしたことを考えると、「温故知新」の意義を考えざるを得ない。どのような研究分野にも当てはまるのであろうが、進化論的計算手法の分野でもまた「研究の進化」が始まっている。自分は科学者であり歴史家ではないとして昔を振り返らないのは、もちろん正しい態度ではない。しかしながら一方で、発展中の研究領域の中での温故知新は難しく、「故」と「新」を取捨選択することが研究者に必要な慧眼であるように思われた。

3. 遺伝的プログラミングの新展開

遺伝的プログラミング(GP)はGAの遺伝子型を構造的な表現が扱えるように拡張し、プログラム生成や学習、推論、概念形成などに応用することを目指している。GPの基本的思想はStanford大学のJohn Kozaらにより提案された。GPは、ロボットのプログラム生成、ゲームのプログラム、画像理解、人工知能におけるさまざまな問題解決、学習などに応用され探索の有効性が確かめられている。GPの最新の研究成果は、毎年夏にスタンフォード大学で開催される国際会議(The Annual Conference of Genetic Programming)において多数発表されている。GPについての参考文献や詳細な解説は拙著³⁾を参照されたい。

最近のGP研究として注目されているのは、いくつかの理論的な研究や解析である。とかく「GPには理論がない」とか「GPはランダムサーチより賢いのか?」などという批判が聞かれるのに対し、いままでのGP研究者の多くはGPで解ける問題のリストを積み上げることで満足していた傾向がある。それに対して、GAと同じようにスキーマ(解を構成する有益な部分構造のこと)を定義してGPの探索能力を解析したり、プログラミング合成手法としてのGPの能力を理論的に分析する研究がなされはじめている。その流れの一環として、この夏のGP97では“Program Growth Control in Genetic Programming”(遺伝的プログラミングにおけるプログラムの成長と制御)という題名でチュートリアルが行われる。これは遺伝的プログラミングと学

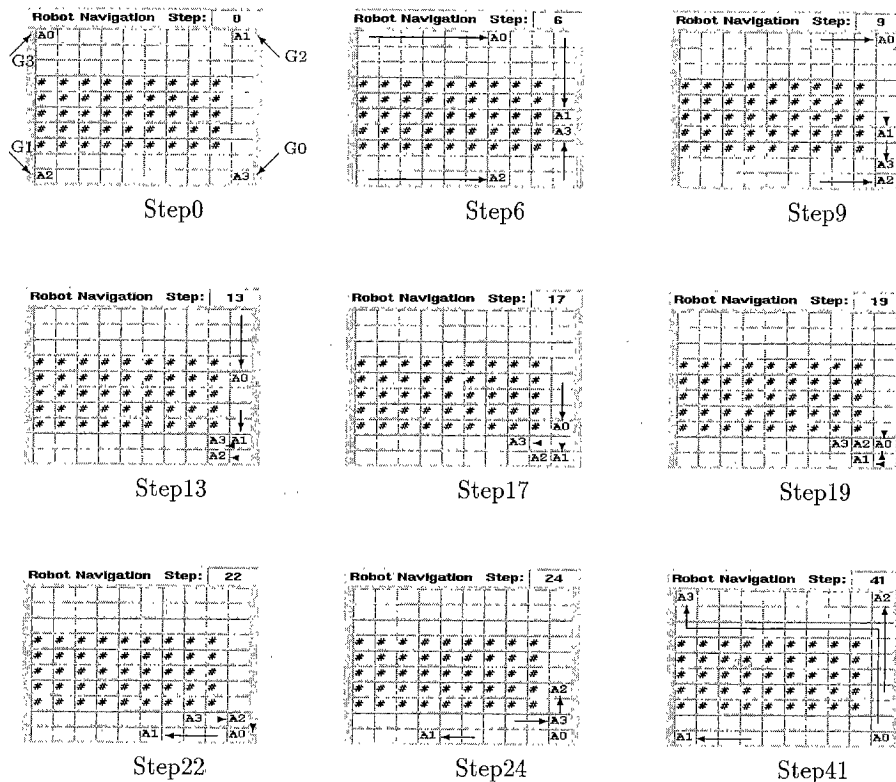


図-1 進化したプログラムによる振る舞い

習理論 (Minimum Description Length—MDL基準, オッカムの剃刀などの学習原理) を統合し, より効果的なプログラム合成を行うことを試みるものである。また GP 97 のすぐ後にミシガン州で行われる ICGA (International Conference on Genetic Algorithms) でも, “Evolutionary Computation with Variable-size Representation” (可変長の表現による進化論的計算手法), および “Exploring Non-coding Segments and Genetic-based Encoding” (非コード化断片と遺伝的コード化) というタイトルで2つのワークショップが開催される。前者は可変長表現を遺伝子とする進化論的計算手法の理論的研究にターゲットを絞っている。いうまでもなく GP の遺伝子である木構造は可変長のデータである。また後者のワークショップは GP や GA の遺伝子におけるイントロンに関するものである。イントロンとは遺伝子の中で発現されないデータのことを指すが, これはかならずしも冗長で無駄な情報ではない。イントロンがあることにより, 探索効率が良くなるという研究報告もある。このことは実際の生物にも当てはまる。高等動物の DNA が必ずしも多くはなく, 人間よりもカエルやイモリのほうが DNA 量が多い (C 値のパラドックスと言われる)。また DNA がそのまま情報としての遺伝子ではなく, 余分な部分を切り張りしてから転写されるということも知られている。イントロンと遺伝的探索手法の効率に関してはまだ未解決の問題が多々あるが, これらの研究が進化論的計算手法の1つの理論的基盤を提供するものと期待される。

また最近, 多数のエージェントのための協調的な行動を GP に基づいて創発させる研究がなされている。この理由は, ある種のタスクを複数のエージェント間の部分タスクに分離することによって, 簡単にまたはこれによってのみ解くことができるからである。しかしながら, 複数のエージェント間のための協調, 同期, 通信などのためのプログラムを手で書くことは容易なことではない。そのため GP などによる適応的なエージェントの実現は重要なことである。

たとえば, 目標タスクとしてロボットナビゲーションのための協調を考えよう。この実験環境は, エージェント (A_i で表される。ただし $i=0,1,\dots$) と障害物 (#) からなる (図-1 の Step 0 を参照)。各物体は格子の1マスを占める。エージェントは障害物や壁に当たらない限り上下左右に動くことができる。エージェントの目標はそれぞれのゴールにできるだけ早くに到着することである。図-1 ではエージェント A_i のゴールが G_i として示されている。図から分かるように, 目的地に着くためには4つのエージェントが細い隘路を通らねばならない。2つのエージェントがこの隘路で互いに反対方向に行こうとするとデッドロックに陥る。そのためこのナビゲーション問題は協調行動なしには的確に解くことができない。

実験の結果, GP によって訓練例のみならずテスト例においても成績の良い (通信) エージェントのプログラムが得られた。これは進化したプログラムが頑強なことを意味する。図-1 はこのプログラムによるエー

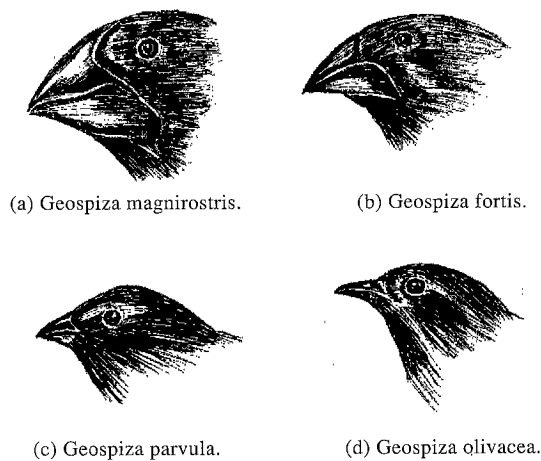


図-2 ガラパゴス島のフィンチ

エージェントの振る舞いがある訓練例に対して示したものである。たとえばStep9からStep19までのA3の行動を見ると、メッセージを受け取ったなら同じ場所にとどまるか戻るにより他のエージェントに道を譲っている。このほかのさまざまな実験によって、通信の有効性、GPを用いた通信プログラムの合成、さらにその結果タスクを解決するための的確な協調行動の創発を確認した⁶⁾。

筆者らは、上述のナビゲーション問題のほかに、タイトルワールド、追跡問題などにもGPを適用し、同様の有効性を確かめている^{4),5)}。

なお本章で述べた研究の詳細はGP97やICGAの議事録(これらはMorgan Kaufmannから出版されている)を参照されたい。

4. 人工生命の彼岸

筆者は1997年の5月から6月にかけてガラパゴス諸島とそこにあるチャールズダーウィン研究所(Charles Darwin Research Station^{*})を訪問する機会を得た。「何でもさらガラパゴス諸島に?」すでに過去のものでしょうか。」と何人かの友人に訝られたが、それは大きな間違いであり、現在でもこの島は進化論的な研究の1つの中心として大きな注目を集めている(もっとも進化論的な手法を研究している手前、一度は進化論の発祥の地ともいえるガラパゴスを訪れたいという本音もあったが)。

ガラパゴス諸島といえば、ダーウィンがビーグル号で航海の途中立ち寄り、そこでフィンチという鳥のくちばしの形が種によって少しずつ違っているのを見て、進化論を考えついたとして有名である(図-2参照、文献7)p.18より)。しかしながら、この話は少し誇張されている。ダーウィンは現地でもこの鳥について深く

研究したわけではない。彼の「種の起源」を読めばガラパゴスのデータはあまり生かされておらず、むしろ人為淘汰を中心とした議論に終始しているのが分かる。

最近この島が進化論の研究者から再び注目を集めているのは、プリンストン大学のピーター・グラントらの研究によるところが多い。彼らは20年以上の長期に渡って徹底的にフィンチの研究を行い、気候変化による餌の出来高によってかかる淘汰圧がフィンチのクチバシを劇的に変化させることを明らかにした。しかもこの進化は通常考えられている数万年というタイムスケールではなく、非常に速い速度(数年のオーダー)で起こることも示したのである(なお以下の記述は文献8),9)を基にしている)。

グラントらは、ある島に生息するフィンチ(とその新しく生まれた子孫)すべてに足輪をつけて識別ができるようにした。さらに血液採取によって遺伝や系統を調べ、クチバシを誤差0.1パーセントの精度で測定した。これらのデータはすべてコンピュータにインプットされ、巨大なデータベースになっている。ある意味で島のフィンチの種族全体をコンピュータに持ち込んだことになる。またフィンチの餌になりそうな種子の大きさをノギスではかり、種割り器で堅さを測定し、大きさと固さによる「食べやすさ指数」も設定した。

雨期には食べやすい種子が多く残っているので、フィンチ間の生存競争は起こらない。一方乾期になると、大きくて固いもの(つまり食べにくい種子)しか残らない。フィンチの間で餌の争奪戦が始まることになる。割る時間、探し回る時間が少なくて1回で食べられる量の多い餌から食べ尽くされ、食べにくいものだけが残る。するとこうした種子を割るのに適したクチバシのフィンチが増えてくる。一方で他の個体が割るのを待ち、取りこぼしの種を食べるフィンチなどもあらわれてくる。こうした学習能力の差、クチバシのほんの些細な差、体の大きさの差(餌の争奪戦には体の小さい個体は不利であるが、体が小さい分必要なエネルギー量も少ない)が生死を左右する。したがって、クチバシの大きさの変化に着目すればフィンチの「進化」が分かるのである。グラントらの観測によって、エルニーニョのような気象変化が植物の実りを左右し、その影響がフィンチの生存競争、つまり「進化」に現れることが明らかになった。そしてこうした「進化」は数年のスケールで展開されるのである(ただし、これは単なる「適応」であり「進化」ではない、という批判もある)。

このような研究は人工生命のあるべき姿と見なせないであろうか? 現状では彼らは計算機を単なるデータベースとして利用しているだけであるが、そこには1つの種族の歴史がすべて含まれている。実際の生物の進化とその精密なデータを解析することで、単なる

^{*} Station: 研究も行われているが、さまざまな自然保護を实践する基地という意味合いが強く、InstituteやLaboratoryではなく、Stationと呼ばれている。

シミュレーションにとどまらない人工生命研究と生物学研究の統合が実現されるとが期待される。さらにもう1つの興味深い点は、これらの「進化」現象が目の前で観察可能なことである。そもそも進化論が学問として批判されるのは、進化という現象が1回限りでしかも人間の寿命を超えたはるかに長いタイムスケールの事象であるため検証可能な理論を構築しにくいことにある。しかしながら、上で述べたような「進化」は数年の間に起こり、人間が観察可能なものなのである。

もちろん筆者がガラパゴスに滞在したわずか3週間ではその「進化」を観察するには短かすぎたが、いくつかの興味深い現象を目にすることはできた。広大な適応放散^{※2}の実例、フィンチのクチバシの差異、島によって異なるゾウガメの甲羅の形態、さらにウミイグアナの奇妙な生態など。島での自然保護の徹底は予想を上回るものであった。ナチュラリストと呼ばれる資格を有したガイドと一緒にしか島に上陸することが許されず、さらに別の島に行く場合には足に付着した砂までも洗い落とさなくてはならない(砂には植物の種子や微生物が存在し、不注意で別の島に移入されると生態系を壊しかねない)。また興味深かったのは、サンタフェ島を訪れたときのことである。この島のサボテンは、Giantcactusといわれ、3~4メートルもの大きさにもなる。これはこの島に住む陸イグアナやゾウガメに上の芽の部分を食べられないように共進化^{※3}した結果である。つまりゾウガメが精一杯延ばした頭に届かないようにサボテンは高くなっていった。一方、ゾウガメがいない島ではサボテンの高さは1メートル以下である。またこの島では茎に棘をはやす方法でゾウガメから身を守るサボテンもあった。しかしながら、サンタフェ島のゾウガメはすでに絶滅しており、また陸イグアナも絶滅の危機に瀕している。このようなことを考えあわすと、自然の織りなす共進化(軍拡競争)に感銘を受ける一方で、サボテンが不気味にそして空しいほど高く聳え立っていたのが印象的であった。

※2 適応放散：単一の種が多数の種に進化して、それらが同じ地理的範囲の中で多様な生態系を構成するようになること。たとえばオーストラリアのコアラ、カンガルーなどの有袋類は、単一の遠い祖先を起源に持つと言われている。

※3 共進化：相互に影響を与えながら2種以上の生物が進化すること。たとえば被子植物とその送粉者である昆虫は、より効率的な相互関係を確立するように進化したと言われている。

5. おわりに

本稿では、筆者のアメリカ滞在中の見聞をもとにして、進化論的手法の研究に関する最近の話題を解説してきた。

GAやGPなどの研究者は、分子生物学、エコロジー、進化生物学、そして集団遺伝学の世界に足を踏み入れることが奨励され、また実際に多くの研究者がそれを実践している。Melanie Mitchellは次のように述べている。「そうした手出しはGA研究の素敵な特典である。GAが一般的な探索手法であると同様にGA研究者は万能選手であるべきで、自分自身の専門分野から抜け出して有望なモデルや応用を追求するために新しい分野を学習する意志を持つべきである(文献10)vii).」この結果しばしば異なる専門分野の科学者との共同研究が可能となる。今後はますます多くの研究交流、研究における選択淘汰が行われ、進化論的計算手法に実りのある成果が得られることを期待している。

参考文献

- 1) 伊庭斉志：遺伝的アルゴリズムの基礎，オーム社(1994)。
- 2) 上田完次，下原勝憲，伊庭斉志(編著)：人工生命の方法，工業調査会(1995)。
- 3) 伊庭斉志：遺伝的プログラミング，東京電機大学出版(1996)。
- 4) Iba,H.:Emergent Cooperation for Multiple Agents using Genetic Programming, in Parallel Problem Solving from Nature 4(PPSN IV), Springer(1996)。
- 5) Iba,H., Nozoe,T. and Ueda,K.:Evolving Communicating Agents based on Genetic Programming, in Proc. International Conf. on Evolutionary Computation(1997)。
- 6) Iba,H.:Multiple-Agent Learning for a Robot Navigation Task by Genetic Programming, in Genetic Programming 1997(GP97), MIT Press(1997)。
- 7) チャールス・ダーウィン：ピーグル号航海記(下)，(島地威雄訳)，岩波文庫(1996)。
- 8) 中原英臣，佐川 峻(監修)：POPな進化論，同文書院(1996)。
- 9) ジョナサン・ワイナー：フィンチの嘴，(樋口広芳・黒沢令子訳)，早川書房(1995)。
- 10) Melanie Mitchell:An Introduction to Genetic Algorithms, MIT Press(1996)(東京電機大学出版から邦訳あり，1997)。(平成9年6月10日受付)



伊庭 斉志 (正会員)

1985年東京大学理学部情報科学科卒業。1990年同大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。工学博士。同年電子技術総合研究所入所。主任研究官。人工知能基礎の研究に従事。特に進化論的計算手法、学習、推論、人工生命に興味を持つ。人工知能学会会員。