

遺伝的アルゴリズムの応用

基本問題から複雑問題まで

C言語による

ナップザック問題～信号解析処理

後藤 龍二

はじめに

進化的計算手法には、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA), 遺伝的プログラミング (Genetic Programming : GP), 進化的プログラミング (Evolutionary Programming : EP) や進化戦略 (Evolutionary Strategy : ES) などが含まれる。

この中で GA は、1960 年後半にホランド (John H.Holland : 1929~) を中心としたミシガン大学のグループによって提唱された進化的計算手法である。「自然界における生物の進化過程において、次世代の個体群の構成は、環境に適合度 (適応性の度合) の高い染色体を持つ個体と突然変異によって発生する染色体を持つ個体で形成される確率が高い」という進化論の概念に基づいている。自然界の問題解析において、多目的最適化、時系列予測、観測誤差やノイズを含む観測データからの最適値解析および陰関数の解法などは重要な課題要素である。これらの解法として進化的計算手法が有効とされ、既にこれらの課題要素を単独または複合して内包する問題解決への応用例が発表されている。発表されている GA の応用は、普遍的なアプローチでは容易に対処できない問題の解析ツールとして、集積回路や通信ネットワークの設計などの工業部門、経済および政治に関する複雑問題解決など多岐にわたっている。特に最適化問題への応用が多い。しかし、多目的最適化、時系列予測、観測誤差やノイズを含む観測データからの最適値解析および陰関数の解法の課題要素を同時に含む問題解析への応用例は、極めて少ない。

本書の内容は、上記した課題要素を同時に含む問題として移動体の運動特性解析問題へ GA を適用する場合の設計とシミュレーション結果である。

内容の第一は、海上移動体の運動特性解析問題へ GA を適用した研究に関する。海上の移動体の遠隔点の海上に位置する観測体が、移動体を追跡、攻撃、待伏または救難するためには、移動体の未来位置を予測する必要がある。この場合、移動体の運動を一義的に決定する運動特性をレーダーやアクティブソナーなど電波や音波を放射するアクティブ観測機器で得られる移動体の位置情報から解析する必要がある。位置情報には観測誤差やノイズが含まれる。移動体が目的点に向かって移動する場合は、進路は目的点に指向するが、被攻撃、被追尾を回避する必要がある場合には、欺瞞運動を行うと考えられる。その欺瞞運動は進路を基準線とする正弦波、鋸歯状波または直線で近似することが適当である。正弦波、鋸歯状波の場合の運動特性は移動体の速度、進路、波長、振幅、初期位相角である。これらを直線運動として近似する場合は、線形回帰分析などによって解析できるが、正弦波、鋸歯状波で近似する場合は、多目的最適化、時系列予測、観測誤差やノイズを含む観測データからの最適値解析および陰関数の解法などの課題を解決する必要がある。本書の内容の第一は、この解析に GA を適用した結果である。

内容の第二は、海中の移動体の運動特性解析問題へ GA を適用した研究に関する。海

中移動体は、海上移動体と同様に目的点に指向するが、欺瞞運動の必要性が低いので等速直進で近似することが適当であると考えられる。この移動体の遠隔点に位置し、移動体に敵対する潜航型の観測体が移動体の運動を一義的に決定する運動特性を解析するためには、移動体によって観測体の存在を逆探知されないという制約条件のもとで解析する必要がある。すなわち、観測体は電波や音波などを放射するアクティブ観測機器ではなく、移動体が放射する音波などを傍受するパッシブ観測機器で観測した情報に基づく解析が必要である。この GA では、観測した移動体の航走音信号を GA によって解析（信号解析）し、周波数と位相角を求める。それらの結果から移動体の運動を一義的に決定する距離、方位、速度、進路および音源周波数を解析する 2 段階の GA を適用している。一般に信号解析にはフーリエ変換に基づく解析手法である FFT（Fast Fourier Transform）を使用する機会が多い。しかし、FFT 解析は、信号のサンプリング区間が信号の基本波の整数倍でない場合には、解析出力にスペクトル漏れ（Spectral leakage）が生ずるという欠点がある。本書の航走音信号解析では、周波数を前もって知ることができないことを前提としているため、周波数を他のスペクトル要素と同時並行して解析できる GA 解析方式を採用している。本書の内容の第二は、2 段階の GA を海中移動体の運動解析に適用した結果である。

内容の第三は、地球周回移動体の運動特性解析問題へ GA を適用した研究に関する。地球を周回する移動体の位置情報を地上のレーダーやレーザーなどのアクティブ観測機器で時系列的に観測し、移動体の運動を一義的に決定する運動特性である近地点引数、軌道長半径、軌道半径比率、初期真近点離角、近地点速度などを解析する問題に GA を適用した結果である。

内容の第四は、空中移動体の運動特性解析問題へ GA を適用した研究に関する。地上の観測体が、自らの存在位置を空中移動体によって逆探知されないように、移動体の方位角、俯仰角を電子式逆探装置（Electronic counter measure : ECM）などのパッシブ観測機器で時系列的に観測し、移動体の距離、3次元の速度、進路を解析するために GA を適用した結果である。

これらの問題に GA を適用し、一定の評価ができる精度の範囲で運動特性を解析することができることをシミュレーションによって確認している。これによって GA は多目的最適化、時系列予測、観測誤差やノイズを含む観測データからの最適値解析および陰関数の解法などを同時に含む問題の解法として有効であると結論づけている。

パソコンレベルのシミュレーションにおいて、実時間性を実現できない場合があるが、将来において解析システムの専用化によって処理の高速化は可能であると予測している。

処理装置の高速化、ネットワークによる分散処理技術およびリアルタイム OS（Operating System）の技術は既に存在する。コンピュータの処理速度に関する過去の

発展の経緯から今後もその傾向は維持され、一層進歩すると考えられる。一方、GA 処理の効率化についても既に多くの提案が行われている。さらに継続的に GA の応用目的に対応した処理方式および高速化の研究を重ねることにより GA の複雑問題解析への適用性を一層高めることが可能であると考えられる。

本書の構成はつぎのとおりである。

第 1 章では GA の概要を記述し、つぎにその原理と応用例を記述している。これらの応用例は進化的計算手法に関する国際学会（GECCO*¹ や IEEE_CEC*² など）で発表された論文から抜粋したものである。巻末の参考文献と関係づけてあるので詳細については当該学会の論文誌を参照することができる。さらに、本書の主題である移動体の運動特性解析を普遍的な方式で行った場合の問題点を記述している。

第 2 章では、GA による“アクティブ運動解析”を記述している。

第 3 章では、GA による“パッシブ運動解析”に必要な水中移動体の“航走音信号解析”を記述している。

第 4 章では、GA による“パッシブ運動解析”を記述している。

第 5 章では、GA による“地球周回および空中移動体の軌道解析”を記述している。

第 6 章では、総合考察を記述している。

第 7 章の総合まとめでは、本書の GA 応用の新規性、GA 解析処理の実時間性に関する展望を記述している。続いて参考文献、発表論文一覧を載せている。

付録 1, 2 ではアクティブ運動解析プログラムの実行例、付録 3 では音響信号解析プログラムと実行例、付録 4 ではパッシブ運動解析プログラムの実行例、付録 5 ではナップザック問題解析プログラムと実行例、付録 6 では巡回セールスマン問題解析プログラムと実行例、最後の付録 7 では英文により本書の内容を概説している。

進化論

GA は、生物の進化過程に着想を得た問題解決手法であるといわれていることは既に述べた。生物の進化過程に関する理論が進化論（Theory of Evolution）である。生物は神の創造物ではなく極めて簡単な原始生物から進化したものであるという説である。

進化論と GA の関係を、筆者なりの解釈で概説を試みる。

進化の例を人類にもみることができる。一つの種である人類は、2000 万年前に類人猿の中から派生したとされている。2本足歩行に加えて、環境を生き抜くために有利な火や道具を使う能力、着衣能力や食に関する柔軟性などにより、地球のあらゆる地域に適合して生き抜く文化を成長させ、長い世代を経て万物を支配するまでに進化したのである。

*¹ Genetic and Evolutionary Computation Conference

*² Congress on Evolutionary Computations

進化論といえば、イギリスの地質学者で博物学者の「種の起原」を著したダーウィン（Charles Robert Darwin : 1809-1882）の名前を挙げなければならない [53]。ダーウィンの進化論は自然淘汰説（自由選択説ともいう）に基づいている。その説によれば、生物の子は親の形質を受け継ぐ。受け継いだ形質には変異（突然変異ともいう）が含まれる。変異は無方向（ランダム）である。ランダムであることは環境に適合し易い方向の進歩もあり、そうでない方向の退歩もあるという意味である。したがって、親よりも対環境性が優れている場合とそうでない場合がある。世代ごとにランダムな方向の変異が繰り返される。優れた対環境性を引き継いだ子は環境を生き抜くために有利であり、次世代に生き残る確率が高い。そうでない子は次世代に生き残る確率が低くなる。

ダーウィンはイギリス海軍の測量船ビーグル号で5年間にわたる航海を行った。寄港した各地（特にガラパゴス諸島）で観測した生物の変異から進化を確信したといわれている。長い年月にわたり生物の変異を観測し進化論の根拠を蓄積した。

さらにイギリスの経済学者マルサス（Thomas Robert Malthus : 1776-1834）の「人口論」からもヒントを得たといわれている。マルサスの人口論は「人類が必要とする食料の生産量は算術的にしか増加できない。一方、抑制されない人口は指数関数的に増加し、食糧生産は人口の増加を充足できない。したがって人口増加は抑制されなければならない」という理論である [59]。

ダーウィンの進化論はつぎの三つに要約することができる [54]。

- (1) 生物の世代推移の過程で親の形質は子に変異して受け継がれる。
- (2) 生物には環境内で生き残れる数以上の子が生まれ、生存競争を行う。
- (3) 環境に適合し易い変異を受け継いだ子が高い確率で生き残り、適合し難い変異を受け継いだ子は淘汰される。つまり、自然淘汰によって環境に適合し易い性質が子孫に蓄積される。

これが「自然淘汰説（自然選択説）」である。しかし、当時は唯心論全盛の時代であり、宗教のもと「人間はもとよりすべての生物は神によって創造された」が絶対真理として信じられていた。この時代に異端的で唯物論的な進化論を提唱することにダーウィンは二十年もの間、躊躇していたといわれている。同時代に同じイギリスの博物学者で生物学者のウォレス（Alfred Russel Wallace : 1823-1913）も突然変異によって生物は進化すると唱えた。ダーウィンはそれに触発されウォレスの論文を含めて発表した。人類の進化については「種の起原」の最後の章で、控えめに「将来に光明が投げられるだろう」と述べるにとどめている。その後、突然変異の性質の解明が進み、それによって新種の生物が発生することはなく生物個体の変異によって環境への適合性を変化させることにより進化が起こるという考えが一般的となった。つまりウォレスの突然変異説は、ダーウィンの自然淘汰説のなかに組み込まれる形で生きている。

進化論に関してダーウィン以前にも、以後にも多くの理論が提唱されている。ダーウィン以前の進化論として有名なのは、フランスの博物学者ラマルク（Jean-Baptiste de Monet, Chevalier de Lamarck : 1744-1829）で「動物哲学」を著し、変移説を唱えた。別名「用不用説」と呼ばれる進化論を提唱したラマルクは、進化論の先駆者と言われている。ラマルクの変移説はつぎの二つの法則からなる [55]。

- (1) 発達の限界を超えていないすべての動物において、ある器官の一層頻繁で持続的な使用は、この器官をすこしずつ強化し、発達させ、大きくし、これに使用の期間に比例した威力を与える。一方、これらの器官を恒常的に使用しないと、この器官は徐々に弱まり、役に立たなくなる。
- (2) ある種が長い間において、身をおいてきた状況の影響によって、ある器官の優先的な使用の影響や、ある部位の恒常的な不使用によって自然が個体に獲得させた、あるいは失わせたあらゆるものは、獲得された変化が雌雄に共通であるか新しい個体に共通であるかぎり、自然はこれを生殖によって次に生まれる個体に維持する。

この二つ法則の問題点は、第一に、環境によって動物が徐々に変移し、多様な種が派生すると考えていることであり、第二に環境に対する動物の適応性と進化の結びつきの理論が欠けているなどと、後世ダーウィンなどによって批判され、否定された。ラマルクは当時信じられていた「生物は神による創造物」という絶対的真理に敢えて挑戦した進化論の先駆者という意味でその名を残している。

遺伝と言えば「遺伝の法則」を実験的に明らかにしたメンデル（Gregor Johann Mendel : 1822~1884）が有名である。メンデルはエンドウ豆を注意深く何世代も観測し、遺伝の法則を発見した。エンドウ豆の形質に「丸い」と「皺がある」のような対立があるとき対立形質という。メンデルの法則は、三つの法則からなる [58]。

第一は、両親の形質は遺伝子によって子に遺伝する。形質が対立する両親からの遺伝には優性遺伝と劣勢遺伝があつて、両親の一方の優勢形質は子に顕在化し、対立する劣勢形質は顕在化しない（優劣の法則）。第二は、孫の世代では優勢形質が顕在化するものと対立する劣勢形質が顕在化するものに分離する（分離の法則）。第三は、対立形質はお互いに独立的に存在する（独立の法則）。

このメンデルの法則はダーウィンの進化論を否定するものではなく、むしろ補うものである。

その後においても多くの進化論が提唱されている。ダーウィンに対峙する進化論として日本の今西錦司（元京大名誉教授：1902~1992）の進化論もある [56], [57]。今西錦司の進化論は、ダーウィンの進化論の変異説と自然淘汰説を批判するものである。特にダーウィンの「変異の方向は種の個体ごとに無方向（ランダム）であり、環境に適合しない変異を受け継いだ個体は淘汰される」とする説に対して、今西錦司は「変異の方向は

環境の変化の中で生き抜くために種社会が環境に適応できる一方向に変異し、その方向に変異できた種社会は生き残り、変異できなかった種社会は淘汰される」と主張し、さらに「環境の変化は地球上の地域ごとに異なるので、同じ種でも種社会ごとに進化過程が異なる」という「棲み分け理論」を展開した。

ダーウィンの進化論に対するこのような批判は少なからずある。しかし、現代においてもダーウィンの進化論は正統派と見なされ、進化論の父といわれている。

GA は、生物における進化過程に関するダーウィンなどの進化論（自然淘汰説）に着想を得ているといわれ、つぎのことを基本とした複雑問題に対する進化的解析手法である。

- (1) 遺伝子（染色体）によって親個体の形質は、子個体に受け継がれる。したがって、環境に適合度が高い親個体の交配によって生まれる子個体は、環境への適合度が高い遺伝子（染色体）をもつ確率が高い。
- (2) 親個体の形質から無方向（ランダム）に変異（突然変異）した遺伝子（染色体）をもつ子個体が生まれる可能性がある。
- (3) 限られた数しか生存できない個体群にあつて、環境に適合度が高い個体は生き残る確率が高い。

詳細は第 1 章の遺伝的アルゴリズムの原理で記述する。

目次

第 1 章	遺伝的アルゴリズムとは	1
1.1	遺伝的アルゴリズムの概要	1
1.2	遺伝的アルゴリズムの原理	2
1.2.1	基本的動作	2
1.2.2	適合度	3
1.2.3	再生	5
1.2.4	交叉	10
1.2.5	突然変異	14
1.2.6	スキーマ定理	15
1.3	遺伝的アルゴリズム応用の動向	19
1.3.1	1980年代から2000年までの工学的応用例	19
1.3.2	比較的近い年代の工学的応用例	22
1.4	本書の応用の狙い	27
1.4.1	水上移動体の（普遍的）運動解析	28
1.4.2	水中移動体の（普遍的）運動解析	30
1.4.3	宇宙および空中移動体の軌道解析	33
第 2 章	アクティブ運動解析	35
2.1	運動解析問題の定式化	35
2.2	遺伝的アルゴリズムの適用方法	38
2.2.1	染色体の設計	38
2.2.2	適合度関数	39
2.2.3	遺伝的操作	40
2.3	解析結果の評価	41
2.3.1	評価シミュレーション方法	41
2.3.2	シミュレーション条件	43
2.3.3	シミュレーション結果	44
2.4	まとめ	47
第 3 章	海中移動体の航走音信号解析	49
3.1	航走音信号解析問題の定式化	49
3.2	遺伝的アルゴリズムの適用方法	51
3.2.1	染色体の設計	51

3.2.2	適合度関数	52
3.2.3	遺伝的操作	53
3.3	解析結果の評価	54
3.3.1	評価シミュレーション方法	54
3.3.2	シミュレーション条件	55
3.3.3	シミュレーション結果	56
3.4	まとめ	58
第4章	パッシブ運動解析	59
4.1	航走音解析に基づく運動解析問題の定式化	59
4.2	遺伝的アルゴリズムの適用方法	62
4.2.1	染色体の設計	62
4.2.2	適合度関数	63
4.2.3	遺伝的操作	63
4.3	解析結果の評価	65
4.3.1	評価シミュレーション方法	65
4.3.2	シミュレーション条件	66
4.3.3	シミュレーション結果	67
4.4	まとめ	69
第5章	地球周回および空中移動体の軌道解析	71
5.1	地球周回移動体の軌道解析	71
5.1.1	地球周回軌道の解析問題の定式化	71
5.1.2	遺伝的アルゴリズムの適用方法	74
5.1.3	まとめ	76
5.2	空中移動体の軌道解析	78
5.2.1	空中軌道の解析問題の定式化	78
5.2.2	遺伝的アルゴリズムの適用方法	80
5.2.3	まとめ	81
第6章	総合考察	83
6.1	初期推定値の設定	83
6.2	GA 解析処理の実時間性に関する展望	85

第7章	総合まとめ	89
7.1	応用面における新規性	89
7.2	GA 解析処理における新規性	90
7.3	最後に	91
	参考文献	93
	発表論文一覧	97
	謝辞	98
	索引	99
付録1	アクティブ運動解析プログラムの実行例	103
付録2	楕円積分プログラムと実行例	107
付録3	音響信号解析プログラムと実行例	109
付録4	パッシブ運動解析プログラムの実行例	149
付録5	ナップザック問題解析プログラムと実行例	153
付録6	巡回セールスマン問題解析プログラムと実行例	169
付録7	The Analysis for the Movement Characteristics of Moving Objects with Genetic Algorithms	191