

今西進化論に基づく最適化手法の構成と評価に
関する研究

神戸大学工学部

田川聖治

今西進化論に基づく最適化手法の構成と評価に関する研究

1. 研究の背景と目的

遺伝アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) は生物進化のプロセスをアナロジーとする確率的なアルゴリズム (計算手順) であり, 探索・学習・最適化における汎用的な手法の枠組を与えるものである。特に, 工学的に意味のある様々な問題が最適化問題に帰着されることから, それらを解くための最適化手法として GA の発展が期待されている。理論的な正統性よりも実践的な有用性を重視するがゆえに, GA は生物進化のメタファーで表現され, アナロジーによって理解される。したがって, 実用的な GA を構成するためには, 類比する生物進化モデルが肝要となる。

ある最適化問題に対して GA を適用する場合, その最適化問題の解候補を個体と呼び GA では個体の集団を保持して進化 (改善) させてゆく。従来の GA はダーウィン進化論をアナロジーとし, 個体の優劣 (適応度) に基づく「自然選択」を模擬する。ここで, 自然選択は個体集団に多様性があるのはじめて作用するが, 選択は多様性を減少させる。このような自然選択における多様性のパラドックスから, 従来の GA は進化の停滞や初期収束と呼ばれる膠着状態に陥って, 十分に良い解を求められない場合がある。近年, 自然選択の不足を補うために, 生物学や生態学の専門的な知識を援用した生物進化モデルの拡充が試みられている。しかし, それらは GA のメカニズムを複雑にするものであり, 簡便で実用的な最適化手法という GA 本来の魅力を損なう恐れがある。

本研究の目的は, ダーウィン進化論に対峙する今西進化論を新たなアナロジーとした GA の構成法を提案するとともに, 幾つかの最適化問題に適用してその有効性を評価することである。今西錦司⁽¹⁾は自然選択を徹底的に否定して, 「種の棲み分け」と種レベルでの「定向進化」を主張した。生物学における今西進化論の評価はともかく, 個体集団の多様性維持と高い探索能力を両立させた GA を構築する上で, ダーウィン進化論よりも簡便で的確なアナロジーを提供していると思われる。

⁽¹⁾ 今西錦司 (1902 ~ 1992): 生態学者, 人類学者。京都大学農学部卒, 京都大学教授, 岐阜大学長等歴任。探検家, 登山家としても活躍。1979 年, 文化勲章を受章。

2. 研究方法

はじめに, 今西の主張する「種の棲み分け」と「定向進化」について紹介する。生物の形態は環境との相互作用で決まり, 生活様式が違えば形態も異なる。これを「生活形の形態原理」と呼ぶ。さらに, 形態の違いによって生活の場が分かれることを「棲み分け原理」と呼び, 棲み分けた個体は別々の種として共存する。一般に種概念は曖昧で, 生物学的, 系統学的, 形態的な種などが存在するが, 「種の棲み分け」における「種」とは, 個体間の形態的な差異を意味する。また, 今西の主張する「種の棲み分け」は, 類似の種は共存できないとするガウゼらの「競争排除則」の対偶とも取れる。

次に, 今西進化論における「定向進化」とは, 個体が変わるときがくれば, 種全体が一定の方向へ速やかに変化するというものである。僅かな個体差が重要な意味を持てば, 種社会の秩序は破壊されてしまう。そこで, 今西は個体レベルでのランダムな突然変異に基づく生物進化を否定して, 種を進化の単位としている。しかしながら, そのメカニズムを明らかにしていないため, 今西進化論は哲学的, あるいは, 非科学的と中傷される。一方で, 生物進化のメカニズム自体が多様であって, それが「自然選択」のような唯一の原理に支配されるという西洋的パラダイムを疑問視する意見もある。

本研究では、上記のような今西進化論をアナロジーとする GA の基本的な構成を示し、従来のダーウィン進化論に基づく GA との比較において、その特徴を明らかにする。次に、複数の局所的最適解が存在する多峰性問題と、複数の目的関数が存在する多目的最適化問題を対象として、今西進化論に基づく GA を実際に構築するとともに、計算機実験によってその有効性を評価する。これらの多峰性問題や多目的最適化問題に対して GA を適用する場合は、個体集団の多様性を高く維持する必要がある、ともに自然選択を模擬する従来の GA にとっては困難な問題であると言える。

3. 研究内容

3.1. 今西進化論に基づく GA の構成

提案する今西進化論に基づく GA では、「種の棲み分け」を世代交代モデルで、種レベルの「定向進化」を遺伝的局所探索 (GLS: Genetic Local Search) で模擬する。また、前者に集団の多様性維持を、後者に最適解の効率的な探索を役割分担させる。

はじめに、今西進化論で進化の単位となる「種」を定義する。従来の GA と同様に対象とする最適化問題の解候補を個体とし、個体間の距離 δ_p を定義する。ここで、個体間の距離 δ_p としては、一般的なハミング (Hamming) 距離のほかにも色々な構造的距離が考えられる。さらに、適当な種の閾値 L_p を導入して、二つの個体 s^a と s^b が次式の関係を満たせば両者は同種、そうでなければ異種とする。すなわち、種とは距離に基づく個体間の反射的、対称的な関係であるが、必ずしも推移的な関係ではない。

$$\delta_p(s^a, s^b) \leq L_p$$

次に、「棲み分け型の世代交代モデル」では、従来の GA に散見されるように類似した個体の集合を種とするのではなく、集団内の各個体を「形而上の種の代表」と見なす。また、個体間の優劣の比較を両者が同種である場合に限定し、集団内に様々な異なる種を保持する。以下に、提案する世代交代モデルの基本的な構成を示す。手順 3 で個体を生成する GLS では、交叉で得られた個体 (子) を初期値とし、対象とする問題固有のヒューリスティックを取り入れた局所探索法を実行する。新たな子 s^c が異種間の交雑で誕生するため、生物学的な種の定義とは矛盾するが、前述のように、種とは個体間の形態的な差異のみを意味する。ただし、以下の世代交代モデルの構成は最も単純なものであり、多目的最適化問題に GA を適用する場合などは、若干の拡張が必要である。

【棲み分け型の世代交代モデル】

手順 1: 集団サイズ $|P|$, 種の閾値 L_p , 最終世代 T をパラメータとして与える。

手順 2: ランダムに $|P|$ 個の個体を生成し初期集団 $P(0)$ とし、世代数 $t=0$ とする。

手順 3: 集団 $P(t)$ からランダムに両親 s^a と s^b を選び、GLS を施して子 s^c を作る。

手順 4: 子 s^c と最短距離にある個体 $s^d \in P(t)$ を求める。

手順 5: s^c と s^d が同種 ($\delta_p(s^c, s^d) \leq L_p$) ならば劣る方を除き、異種 ($\delta_p(s^c, s^d) > L_p$) ならば集団 $P(t)$ 内で最悪の個体を子 s^c で置き換える。

手順 6: 世代数 $t = T$ ならば集団 $P(T)$ 内で最良の個体を解として出力し終了する。

$t < T$ ならば $t = t + 1$ と更新して手順 3 に戻る。

3.2. 今西進化論に基づくGAの特徴

提案した今西進化論に基づくGAと、ダーウィン進化論に基づくGAの特徴を表1で比較する。ただし、ダーウィン進化論とは、分子生物学と融合したネオ・ダーウィニズムを指すものとする。まず、スキーマ (schema) 定理に見られるように、従来のGAでは個体集団を「遺伝子プール」として捉える。一方、提案したGAでは個体間の距離を導入することで、対象とする問題の解空間を距離空間に拡張し、個体集団を「種の標本」と考える。また、従来のGAでは個体の生死をその優劣 (適応度) で決めるのに対して、提案したGAでは優劣よりも個体間の差異 (距離) を尊重する。

次に、新たな個体を生成する遺伝演算子として、ランダムな交叉や突然変異に代わり、提案したGAでは効率的なGLSを採用している。NP完全問題における計算量の議論や、NFL (No Free Lunch) 定理を挙げるまでもなく、万能かつ強力な最適化手法は存在せず、それらの構築では対象とする問題固有の知見を利用することは常識である。今西進化論はラマルク流の適応的な定向進化を支持しているため、従来のハイブリッドGAのように複数のアナロジーを使い分けることなく、問題固有のヒューリスティックをGAに組み込む包括的な考え方を与えている。しかしながら、今西進化論に基づくGAでは最適解の探索をほとんどGLSが担当するため、有効なヒューリスティックが存在しない漠然とした問題には不向きである。また、提案したGAの実装は容易であるが、大規模な問題に適用する場合は、GLSにおける局所探索法的高速化が成功の鍵となる。

表1：遺伝アルゴリズム (GA) の特徴比較

GAの型	今西進化論	ダーウィン進化論
アナロジー	種の棲み分け・定向進化	自然選択・突然変異
個体集団	種の標本	遺伝子プール
個体の生死	個体の差異 (距離)	個体の優劣 (適応度)
個体の生成	ヒューリスティック	ランダム

3.3. 多峰性問題への今西進化論に基づくGAの適用

複数の局所的最適解が存在する多峰性問題として、大規模集積回路 (LSI: Large Scale Integration) の実装設計における「モジュール配置問題」を考える。モジュール配置問題とは、複数のモジュール (回路素子) とそれらの接続要求が与えられたとき、配線長の総和が最短となるよう、すべてのモジュールをチップ上のスロットに配置するものである。モジュール配置問題の求解は、LSIのCAD技術の中で最も自動化が進んでいる分野であり、幾つかの初期配置手法や配置改善手法 (局所探索法) が知られている。しかし、実際にLSIを実装する場合は、配線の占有面積や電気的特性等も考慮する必要がある。ただ一つの最良解 (モジュール配置) を設計者に強要するような従来の手法は、LSI全体の設計に貢献するものであるとは言えない。通常、モジュール配置問題には複数の最適解が存在する。そこで、これらを代替案として設計者に提示できれば、目的関数 (配線長) に反映されない性質の比較検討を通じて、経験による知識の活用や、新たな発想を促すような創発的設計が可能になるものと期待される。

モジュール数64で8通りの最適解を含む例題に対して、提案したGAの閾値 L_p を変えて適用した結果 (10回平均) を表2に示す。閾値 $L_p=0$ の場合、目的関数値によってのみ個体の生死が決まるため、ダーウィン進化論に基づくGAに相当する。また、従来のGAに集団の多様性を維持する技法であるER (Elitist Recombination) とシェアリング (Sharing) を導入した場合の結果も示す。表2から、提案したGAによれば、種の閾値 L_p を適切に調整することで、多くの最適解が求まることが確認できる。

表 2：各 GA で得られた最適解の個数の比較

今西進化論に基づく GA				ER-GA	シェアリング
$L_p = 0$	$L_p = 20$	$L_p = 40$	$L_p = 64$		
2.3	4.6	7.8	7.3	3.4	1.8

3.4. 多目的最適化問題への今西進化論に基づくGA の適用

複数の目的関数が存在する多目的最適化問題として、フレキシブル生産システムにおける「多目的資源分割問題」を考える。多目的最適化問題の本質はトレードオフにあるため、個体集団による多点探索を特徴とする GA が注目されている。すなわち、多目的最適化問題に対する多くのパレート (Pareto) 最適解の中から、GA によって幾つかの代表的な解候補をサンプリングする。ここで、パレート最適解の性質はその目的関数値によって決まるため、従来の GA では目的関数空間における個体集団の多様性維持が重視されていた。しかしながら、各個体が有する機能 (目的関数値) はその構造の射影にすぎず、元来、GA の性能は解空間における個体集団 $P(t)$ の分布に左右される。

そこで、目的関数空間と解空間における個体間の距離をともに考慮した今西進化論に基づく GA を考案した。今西進化論に基づく GA と、ダーウィン進化論に基づく GA に前述の ER を取り入れた手法 (ER-GA) を 3 目的資源分割問題に適用した場合の、目的関数空間における最終世代の個体集団 $P(T)$ の分布を図 1 に示す。ただし、各集団に含まれる個体数は $|P| = 50$ である。図 1 から、提案した GA ではパレートのフロント上に広く個体が分散しており、多様なパレート最適解が抽出されることが確認できる。

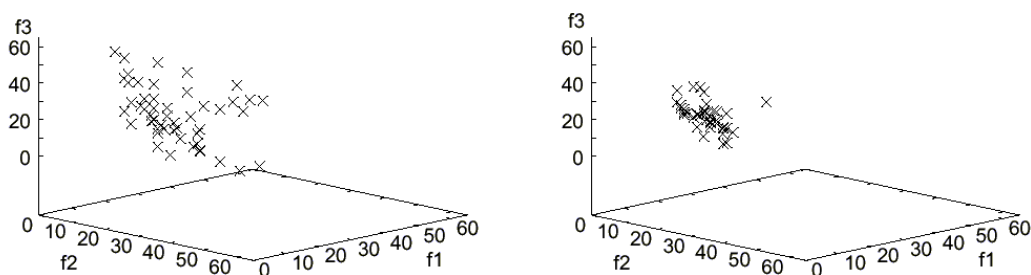


図 1：目的関数空間における最終世代の個体集団の分布
今西進化論に基づく GA (左) とダーウィン進化論に基づく ER-GA (右)

4. 研究がもたらす効果および波及効果

人工的なシステムの計画・設計・制御に関わる多くの諸問題は最適化問題に帰着され、それらの様々な最適化問題に対して、GA は生物進化をアナロジーとする汎用的で実用的な解法の枠組を与えている。さらに、個体集団による多点探索を特徴とする GA は、意思決定者に複数の解候補を提示することで、直感や経験に基づく人間の大局的な判断能力を支援することもできる。本研究で提案した今西進化論に基づく GA は、この様な従来の GA の利点や技法を踏まえた上で、新たな GA の可能性を示唆している。

今西進化論は「種の棲み分け」をテーゼとし、時間的な個体の変化の背景にある、空間的な種社会の構造に着目する。そこで、提案した GA では個体間の距離を導入することで、対象とする問題の解空間を距離空間に拡張した。これにより、GA の個体集団の

多様性が直接操作できるとともに，距離の概念に基づく GA の挙動の数理的な解析が可能となり，従来のスキーマや Markov 連鎖に代わる GA 理論の創造と展開が期待される．また，今西進化論はラマルク流の適応的な定向進化を支持し，GA に問題固有のヒューリスティックを組み込む包括的な考え方を与えている．さらに，提案した今西進化論に基づく GA のメカニズムは単純であり，実装も比較的容易であることから，工学的な設計問題に限らず，幅広い分野における様々な問題への応用が考えられる．

冒頭でも述べたように，ダーウィン進化論に基づく GA に見られる性能上の難点は，自然選択における多様性のパラドックスに起因すると思われる．一方，今西進化論は日本発の反ダーウィニズムである．今後，今西の主張を傾聴することで，ダーウィニズムの束縛から解放され，新たな発想による GA が広く普及することを期待する．

5．参考文献（本研究に関する発表論文）

- 1) 水谷浩二，田川聖治，羽根田博正「今西進化論に基づく遺伝アルゴリズムの構成法」，第 44 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集，pp.517-518，2000．
- 2) 若林昇，金重憲治，田川聖治，羽根田博正，「棲み分け型遺伝アルゴリズムによる多様なパレート最適解集合の生成法」，第 44 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集，pp.519-520，2000．
- 3) 田川聖治，水谷浩二，井上克己，羽根田博正，「今西進化論に基づく遺伝アルゴリズム：表現型の距離による種の棲み分け」，情報論的学習理論ワークショップ，2000．
- 4) 田川聖治，若林昇，羽根田博正，「今西進化論に基づく GA の多目的資源分割問題への応用」，平成 12 年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集，pp.415-416，2000．
- 5) 田川聖治，若林昇，羽根田博正，「今西進化論に基づく遺伝アルゴリズム：多目的最適化問題への適用」，第 6 回創発システム・シンポジウム，2000．
- 6) 水谷浩二，田川聖治，羽根田博正，「今西進化論に基づく GA による多様な最適解の発見」，計測自動制御学会・関西支部シンポジウム講演論文集，pp.114-117，2000．
- 7) 若林昇，田川聖治，羽根田博正，「今西進化論に基づく GA の多目的最適化問題への適用：解空間と目的関数空間を考慮した種の棲み分け」，計測自動制御学会・関西支部シンポジウム講演論文集，pp.118-121，2000．
- 8) Kiyoharu Tagawa, Noboru Wakabayashi, Kenji Kaneshige and Hiromasa Haneda, ``A New Genetic Algorithm based on Anti-Darwinism for Multi-Objective Part-Tool Grouping Problem," Proceedings of The 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp.782-787, 2000.
- 9) 田川聖治，水谷浩二，若林昇，羽根田博正，「今西進化論に基づく遺伝アルゴリズムの構成と評価」，第 45 回システム制御情報学会研究発表講演会，2001．（発表予定）
- 10) 田川聖治，水谷浩二，井上克己，羽根田博正，「今西進化論に基づく遺伝アルゴリズムによるモジュール配置問題の多様な最適解の探索」，システム制御情報学会論文誌，Vol.14，No.10，2001．（掲載予定）
- 11) 田川聖治，若林昇，羽根田博正，井上克己，「今西進化論に基づく遺伝アルゴリズムによる多様なパレート最適解の抽出法 - 多目的資源分割問題を事例として - 」，電気学会論文誌 C，Vol.121-C，No.6，2001．（掲載予定）