

土木計画学における遺伝的アルゴリズムの適用と発展

Application and its Direction of GA for Infrastructure Planning & Investment

室蘭工業大学 ○学生員 諏訪 純 (Jun SUWA)

室蘭工業大学 正員 田村 亨 (Tohru TAMURA)

室蘭工業大学 フェロー 斎藤 和夫 (Kazuo SAITO)

1. はじめに

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms ; 以下、GA と呼ぶ) は、1975 年 J.H.Holland により離散的組合せ問題の最適化手法の一つとして提案されてから、多くの対象に適用されてきている。本研究では、土木計画学とその周辺分野におけるGAの適用をレビューするとともに、今後の発展方向をまとめるものである。

結論から述べると、GAは単純GAから進化GAに研究の主眼が移ってきている(図-1)。そして、土木計画学の分野においては、多目的最適化問題への適用が手法上残されている。

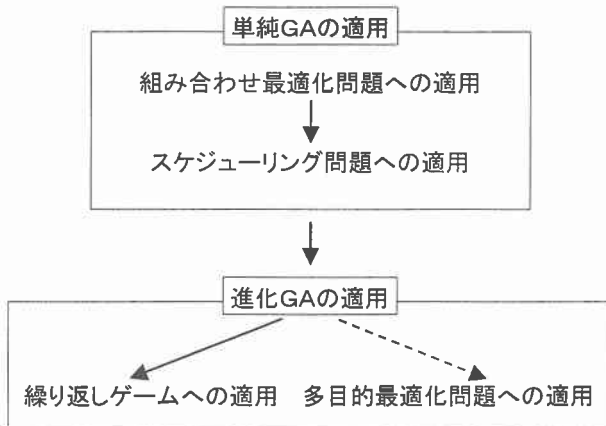


図-1 土木計画分野におけるGA適用の流れ

2. 遺伝的アルゴリズム

2.1 遺伝的アルゴリズムの特徴

GAは、現在の分子生物学的な遺伝子工学から生み出されたものではなく、ダーウィンの「自然淘汰による進化」という原理を基本概念とし、淘汰、交叉、突然変異という生物特有の現象とその過程を計算工学的な見地からアルゴリズム化したものである。

生物はその目標を達成するために、いくつかの基本的な能力を、下記の様に持っている。

- ① 「目標の認識」：生物は目標を達成するために、進化の過程における淘汰(削除)の基準と判定に役立つ情報を利用できる。
- ② 「環境との相互作用」：生物は環境を予測する場合には、環境と相互作用できる。
- ③ 「記憶保存」：生物は生存する環境において有効であった条件を記憶できる。

これらの「目標の認識」「環境との相互作用」「記憶保存」の性質は、おのおのが他の性質と組み合わせると、「学習と適応」という生物しか示さない知的な挙動を示

すようになる。そこには生物に特徴的な自己組織化現象が観察される。

- ④ 「自己組織化」：目標が与えられると自らの判断と経験にしたがって自立的に組織を変化させ、目的を達成するための好適な状態を常時形成する現象である。

自己組織化現象は、新しい目的を与えられた場合にも、その目的にあわせて自己変形して、時々刻々と変わっていく目的に対処する能力である。すなわちGAとは生物に見られる「目標の認識」、「環境との相互作用」、「記憶保存」、の性質を複合的に組み合わせたときに生じる「自己組織化」という学習に基づく適応のアルゴリズムである。

2.2 最適化手法としてのGA

GAを他の最適化手法と比較すると以下のような特徴があげられる。

- ① 離散的組み合わせ問題の最適化である
- ② 最適化が遺伝子間の空間そのものでなく、遺伝子から生成される表現形の評価関数で行われる
- ③ 探索は複数点で行われ、相互に協調及び競合する事の効果によって局所解に捕らわれない処理を行える
- ④ 最適化において勾配情報は使わず、評価関数のみで探索するので微分不可能な評価関数も適用対象とできる
- ⑤ 適応関数値によって、確率的に優位な次期探索点が決定される

一般に最適化問題は目的関数と制約条件のもとで最小(最大)化する解を求める問題である。

○目的関数： $f(X) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \rightarrow \min$

○制約条件： $g_j(x) \leq 0 (j = 1 \sim m)$

○設計変数： $X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in S \subset X$

土木計画においては、資源配分、スケジュール問題、最適配置問題、等への適用事例がある。

いずれの問題も離散的組み合わせ問題として設定されると、GAにより解く事が可能である。GAを効果的に適用する為には、対象とする問題の構成要素を上手に抽出してモデル化を行い、構成要素の組み合わせ候補を無駄なく記号化し、GAにおける「遺伝子線列」としてコーディングすることが大切となる。

ここで、GAの基本的な計算過程を整理すると以下の様になる。

- ① 線列の生成：人口サイズ分の遺伝子線列を生成する
- ② 目的関数の計算：遺伝子線列をデコードし、目的関

数により評価する

- ③ 淘汰処理: 線列集団すべての目的関数値の分布より、目的関数値を適応関数値に変換する。適応関数値が比較的低い遺伝子線列は確率的に淘汰される
- ④ 繁殖処理: 淘汰された遺伝子線列の代わりに、生き残った遺伝子線列から遺伝子線列を確率的に選択しコピーする
- ⑤ 交叉処理: 遺伝子線列集団から1対の線列を選択し部分的に交換する
- ⑥ 突然変異処理: 遺伝子線列集団から1本の線列を選択し部分的に他の組み合わせ要素に変換する

以上の②～⑥まで操作を収束条件を満たすまで繰り返すことで最適解を得る。①～⑥の基本的計算フローを図-2に示す。

最適手法としては得られた解の結果が全てであり、最適解を構成している遺伝子線列をデコードすることで、目的とする離散的要素の最適な組み合わせを得ることができる。

最適手法としてのGAは探索システムであり、価値があるのは結果として得られる解である。その解探索の過程における各個体の動向に注目し、なんらかの意味を見出そうという行為は余り意味が無いこととなる。

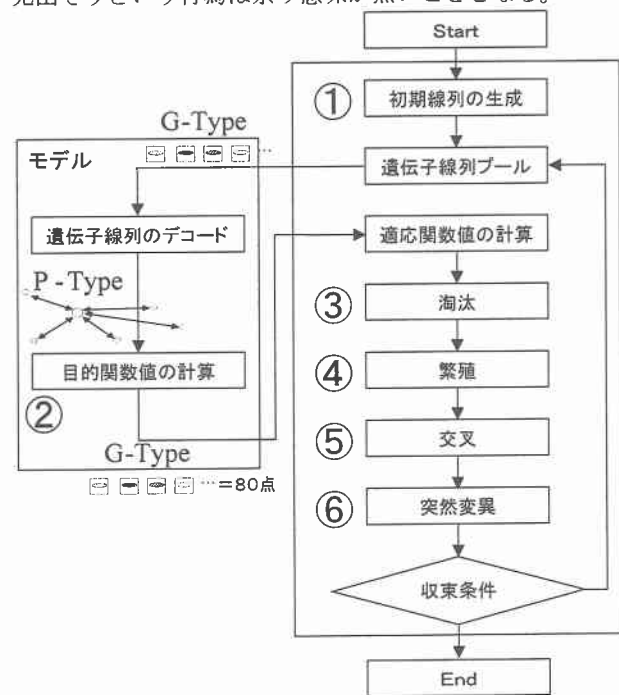


図-2 GAの基本的なフローチャート

3 遺伝的アルゴリズムの適用

3.1 GAの適用分類

計算工学の分野における、GAの今後の応用分野は、

- ① 組み合わせ最適化問題及び非線型最適化問題の近似解法
- ② 生物進化のモデル及び検証ツール
- ③ 適応システムまたは自律分散システムの制御アルゴリズム
- ④ ニューラルネット、オートマトンなどとのハイブリッドシステム
- ⑤ 免疫システムの基本アルゴリズム

⑥ 人工生命の基本アルゴリズム

と分類されている。

工学の応用分野として密接に関係してくるのは主に①、③、④である。②は生物学的な応用分野であり、⑤、⑥は境界領域の分野となる。

土木計画の分野では、特に①についてのみ研究されているといってもよい。この分野では適用対象を組み合わせ問題としてモデル化し、遺伝子線列として記号化することで、GAが容易に適用できることが応用事例を多く生む理由の一つである。

3.2 土木分野におけるGAの適用

土木分野でのGA適用事例は1992年に杉本によるレポート²⁾により初めて紹介された。このレポートではトラス構造物の離散的最適設計にGAが適用されており、外点ペナルティ関数によって制約条件のある最小化問題を無制約の最小化問題へ変換する方法と目的関数の適応関数への変換方法、及び線列の改良による解探索の効率化が説明されている。

土木学会において最初のGAに関する論文³⁾は杉本らによって1993年に発表されている。この論文は離散的構造最適設計にGAを適用したものであり、GAで用いられる用語、淘汰理論の整理が行われている。

また、同年1993年には土木学会構造工学委員会において第1期「AL(人工生命)技術の構造システム最適化への応用に関する小委員会」が構造最適化問題への応用に関する研究活動を行うことを目的として組織されている。委員会の成果としては、GAおよびNN(ニューラルネットワーク)について構造最適化問題への適用が十分可能であることを明らかにした点にある。

このようにGAの基本的な計算フレームが研究され、プログラムが配布される背景により、GAは構造設計分野だけでなく、他の分野において従来解く事ができなかった最適化問題に次々と応用されていった。

3.3 土木計画分野におけるGAの適用

土木計画分野においても、多くの対象についてのシステム最適化問題がその解法上の課題により、問題とされたまま残されていた。ところが、1993年には道路補修・建設工事の順序決定問題へGAを応用した事例¹⁾が杉本・田村により報告されたことにより、社会基盤の配置や実施のタイミングの策定といった離散的組み合わせ最適化問題の解法に展望が開かれた。この研究事例に基づき、翌年の1994年には田村らにより道路整備順位決定問題へのGA適用事例⁴⁾が報告されている。道路整備順位決定問題は最適ネットワーク計画の中心的課題であり、特に対象ネットワークが大規模になった場合の計算効率性が研究課題となっていた。従来、その解法としてはネットワークを部分分割する方法や階層化して解く方法が工夫されてきたが、計算時間の縮小と解精度の向上を同時に達成することは困難な問題であった。この研究では予算制約のもとでいつどこから道路整備をはじめるといったスケジュール最適化をGAを用いて行い、厳密解法とランダムサーチによりGA適用の有効性を検討が行わ

れた。その後、土木計画では多くの適用事例が報告されており、適用対象は多岐に渡る。(参考資料参照)

4 具体的な適用例

4.1 単純 GA の適用

1) 道路整備順位決定問題⁴⁾⁵⁾

組み合わせ最適化問題への適用であり、最も単純な GA の適用事例である。この事例では、遺伝子の構成として TSP 型 (Traveling Salesman Problem 型; 巡回セールスマン問題型) が用いられている点の特徴である。TSP 型の遺伝子構成では、設計変数に各事業や工事プロジェクト、道路リンクの施工番号、といった意味付けを行い、割り当て順序を表現することが多い。

○目的関数: $f(\{I\}) \rightarrow \min$

○制約条件: $g_1(\{I\}) \leq 0$

○設計変数: $\{I\} = \{I_1, I_2, I_3, \dots, I_n\}$

この問題の場合、設計変数は n 個ある事業の順番であり、その順番を決める問題である。制約条件としては年度毎の予算制約等が考慮される。

2) 震災復旧支援問題⁶⁾⁷⁾

最適スケジューリング問題への適用。この事例の特徴としては、遺伝子線列の構成が、構造的に制約条件を満足するように TSP 型コーディングと 10 進法を用いたバイナリコーディングを用いて行い、制約を満足する交叉・突然変異を行う点である。

○目的関数:

$f(\{I\}_1, \{J\}_1, \{I\}_2, \{J\}_2, \dots, \{I\}_k, \{J\}_k) \rightarrow \min$

○制約条件:

$g(\{I\}_1, \{J\}_1, \{I\}_2, \{J\}_2, \dots, \{I\}_k, \{J\}_k) \leq 0$

(各作業間の先行工事の関係)

○設計変数:

$\{I\}_k = \{I_1, I_2, I_3, \dots, I_n\}_k$

$\{J\}_k = \{J_1, J_2, J_3, \dots, J_n\}_k$ ($k = 1 \sim K$)

この問題は、先行工事関係のある複数作業内の工事順番と、担当する作業班の配分問題として定義される。各作業 k 毎に $I_1 \sim I_{n_k}$ の n_k 個の工事があり、それぞれ適当な作業班 $J_1 \sim J_{n_k}$ が復旧する。また、各作業間には、ある作業に属する工事が終わらなければ、他の作業に属する工事にかかれられないという関係がある。

これらの事例は、目的関数が 1 つの場合において、その目的関数を最小にすることにより最適化を行っている。

いずれの問題も、遺伝子線列の構成を工夫することが GA 適用の要となる。GA においても他のヒューリスティック手法と同様に、より良好な組み合わせ解を得るためには、GA を対象とする問題に単純に適用するだけではなく、問題の構造を GA の各プロセスの中に上手に反映させることが、効率的な解探索に繋がるといえる。しかしながら、遺伝子線列の構成法は経験に依存するといわれており、ルール化されていない。

4.2 進化型 GA の適用

1) 並列 GA のゲームへの適用⁸⁾⁹⁾

この事例では GA を学習する複数主体の繰り返しゲームに適用している。ここでは GA を並列化することによ

り、複数主体が同時に最適化行動を学習する全体の過程を、GA によりシミュレーションしている。この事例の特徴としては、GA を直接の最適化手法としては扱わず、ゲームのプレイヤーが学習するためのツールとして用いられている点があげられる。

○目的関数

$f_i(\{I_i, I_{-i}\}_{i \in N}) \rightarrow \max$

○制約条件

$g_j(I_j) \leq 0$

○設計変数

$I_i \in S_i$

$\{I_i\} = \{I_1, I_2, \dots, I_{mi}\}$

or

$\{I_i\} = \{I_1, I_2, \dots, I_k, \dots, I_{mi}\}, \forall I_k \in \{0, 1\}$

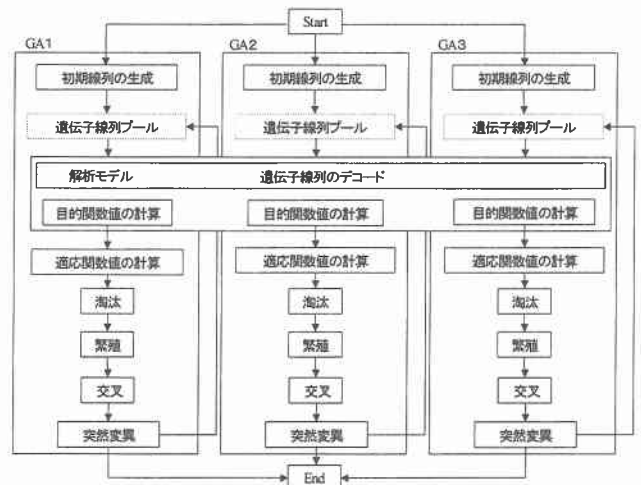


図-3 並列 GA のフローチャート

これまでの事例では、GA モデルが最適化を目的としてきたのに対し、この GA モデルは、GA の最適化の過程における学習アルゴリズム的側面に注目し、GA を人工生命的な適応エージェントとしてゲームを行うことに目的がおかれている。

2) 採餌適応戦略 GA の多目的最適化問題への適用¹⁰⁾

この事例は、荒川らが日本機会学会論文集において発表したものであり、土木計画分野における事例ではない。今後、土木計画分野においても適用可能であると考え、レビューすることにした。

これまでの、多目的最適化問題においては、各世代の集団をいくつかの小さなグループに分け、各小グループ間の交流を制限する方法や、適応度関数としてパレート最適性のランクを計算する方法が用いられてきた。しかし、これらの手法ではいくつかのパレート最適解を得られるに留まっている。この 2 つの方法を併用し、数多くのパレート解を得るのに成功した事例もあるが、パレート解戦略では、収束が進むにつれていくつかのパレート解に収束してしまい、パレート解の全容を知るにはいたらなかった。

この事例では、食物連鎖、採餌戦略、生殖戦略、死亡戦略などの戦略をシミュレートして GA に加味した適応戦略 GA を、多目的最適化問題に適用している。

具体的には、種の多様性を維持するために、適応度関数を用いずに、これを基に作られる体力をもとに、自然

界で見られるさまざまな戦略を模擬している。また、目的関数ごとに、パレート解の探索領域を適応させることで種の分化をシミュレートした。

適用結果として、通常の GA を用いての単一目的での最適化にかかるのとほぼ同等の計算負荷で、非常に多くのパレート解が同時に得られている。また、非常に広い領域で精度よくパレート解を得ている。

6 おわりに

本研究では、土木計画学における GA の発展方向の一つとして、多目的問題への適用を示唆した。土木計画学においては、1970 年代後半から 1980 年代まで多属性効用関数や多目的最適化問題が一つの研究対象となっていた。その後は、現実の適用対象が合理的な多目的問題に設定できないことに気付き、研究は止まったままである。進化 GA 手法はシミュレーションとしての機能も併せ持っており、ロバスト（強健）な多目的問題でなくても、ニッジ処理を通して多目的問題の設定を可能にしているところが重要である。今後、準多目的問題における進化 GA の適用が期待される。

参考文献

- 1) 杉本博之、上前孝之、田村亨：GA の道路補修・建設工事の順序決定問題への応用，計測自動制御学会第 11 回システム工学会研究会資料，pp. 81-87，1993
- 2) 杉本博之：GA の工業設計への応用にむけてトラス構造物の離散的最適設計を例として，数理科学 No. 353，pp. 45-50，1992

- 3) 杉本博之、鹿 汴 麗、山本洋敬：離散的構造最適設計のための GA の信頼性向上に関する研究，土木学会論文集 Vol. 43A，pp. 67-76，1993
- 4) 田村亨、本博之、上前孝之：遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定への適用，土木学会論文集 No. 474/VI-20，pp. 105-114，1994
- 5) 杉本博之、田村亨、長濱祐朗：GA による高速道路網の新設路線工事の順位決定について，第 4 回システム最適化シンポジウム講演論文集，pp. 61-66，1995
- 6) 杉本博之、片桐章憲、田村亨、鹿 汴 麗：GA によるライフライン系被災ネットワークの復旧プロセス支援に関する研究，構造工学論文集 Vol. 43A，pp. 517-524，1997
- 7) 有村幹治、上西和弘、田村亨、杉本博之、榎谷有三：都市間時間距離に基づく被災道路の最適復旧モデル，土木計画学研究・論文集 No. 14，pp. 333-340，1997
- 8) 有村幹治、田村亨：遺伝的アルゴリズムの不完全情報下繰り返しゲームへの適用，土木計画学研究・講演集 No. 22(2)，pp. 383-384，1999
- 9) 諏訪純、有村幹治、田村亨：遺伝的アルゴリズムのゲームへの適用～航空ネットワーク構成を事例として～，土木計画学研究・講演集 No. 23(2)，pp. 669-672，2000
- 10) 荒川雅生、萩原 一郎、山川宏：複数の許容設計解を得るための採餌適応戦略遺伝的アルゴリズム，日本機械学会論文集(C編) Vol. 64 No. 622，pp. 2155-2161，1998

参考資料：土木計画学における GA の適用事例

土木関係者が初めて GAI について報告したレポート		
GA の工業設計への応用にむけてトラス構造物の離散的最適設計を例として	杉本博之	1992
土木計画分野において GA を適用した初めてのレポート		
GA の道路補修・建設工事の順位決定問題への応用	杉本博之、上前孝之、田村亨	1994
土木計画学研究・講演集		
道路整備順位決定問題における遺伝的アルゴリズムの応用と課題	田村亨、杉本博之、長濱祐朗	1995
色彩イメージによる都市高速道路網の評価について	秋山孝正	1995
GAI によるグラフ分割を用いた部分グラフ集約化による全点間信頼度の近似解法	高山純一、石井信通	1995
GAI による道路ネットワーク震災復旧モデルの開発	有村幹治、田村亨、杉本博之	1995
都市高速道路における新たなリアルタイム流入制御手法に関する研究（遺伝的アルゴリズムの適用）	森地茂、清水哲夫	1996
タブー探索法によるマン・スケジューリングの解法	奥谷巖、福井紀行、風間克則	1996
グループ内の施工順序を内生化した道路整備のグループ化とその優先順位決定に関する研究	田上博司、濱田勝、朽木武	1996
GA を用いた複数モードのスケジューリング	浦田康彦、有村幹治、田村亨、榎谷有三、齋藤和夫	1996
GA を用いた最適バス路線網再編計画策定に関する研究	高山純一、宮崎綱彌	1996
GA を用いた新交通・輸送システムの最適路線計画	太田俊昭、池田弘幸、三原徹治	1996
リダンダンな道路整備を目的とした防災投資路線の決定問題と近似解法	南正昭	1996
都市間時間距離に基づく被災道路の最適復旧モデル	有村幹治、上西和弘、田村亨、杉本博之、榎谷有三	1996
吸収マルコフ連鎖を用いた観測リンク交通量からの OD 推計法の改良に関する研究	高山純一、杉山智美	1996
トラック・ミナル機能に注目した物流拠点の最適配置	山田忠史、谷口栄一、則武通彦、泉谷透	1996
GA を用いた新交通・輸送システムの最適建設路線に及ぼす最適性基準の影響	太田俊昭、池田弘幸、三原徹治	1996
遺伝的アルゴリズムによる軌道保守スケジューリング	三和雅史、内田雅夫	1996
複数の評価基準を考慮した広域物流拠点の最適配置	山田忠史、谷口栄一、則武通彦、多賀慎	1997
快速バスの導入計画評価に関する研究	高山純一、宮崎綱彌、塩土圭介	1997
GAI による系統交通信号の共通サイクル長に関する研究	小田原正和、久井守	1997
ドライバーの学習過程を考慮した道路交通システム解析	中山晶一郎、藤井聡、北村隆一、山本俊行	1997
路上駐輪を考慮した駐輪場最適配置分析（岐阜市柳ヶ瀬商店街を例として）	佐竹隆、鈴木崇児、宮城俊彦	1998
動的な交通特性を考慮した通行止情報提供位置の検討手法	高山純一、酒井大輔、永田恭裕、川上光彦	1998
Application of GA on Location of the Health Care Facilities	Fauzy AMMARI, Takaji SUZUKI, Toshihiko MIYAGI	1998
最適除雪道路選択モデルに関する研究	有村幹治、上西和弘、杉本博之、田村亨	1998
トラックの配車・配送計画システムの高度化による都市内道路交通への影響	谷口栄一、山田忠史、玉川大、細川貴志	1998
吸収マルコフ連鎖を用いた観測交通量からの OD 推計法の精度に関する研究	高山純一、齋藤麻子、杉山智美	1998
GA を用いた多段階販売センター最適立地選定に関する研究	相浦直徳、高橋均、唐澤豊、佐藤馨一	1998
軌道保守施策の長期最適化法	三和雅史	1998
遺伝的アルゴリズムを用いた公共バスの割当法	西村悦子、今井昭夫	1998
都市幹線道路網の交通流動変化に基づく最適地区流入交通対策検討システムの構築	鈴木崇児、田上博司、宮城俊彦	1999
遺伝的アルゴリズムの不完全情報下繰り返しゲームへの適用	有村幹治、田村亨	1999
Savine 手法組み込み型 GAI による輸送経路の最適化	相浦直徳、佐藤馨一、唐澤豊、嘉松孝友	2000
最適な交通ネットワーク形成プロセスに関する研究	赤堀至祐、香山吉隆、中川大、松中亮治	2000
遺伝的アルゴリズムによる都市道路網の混雑料金額設定に関する研究	野村貴博、秋山孝正	2000
大規模イベントを対象とした市内交通規制の影響評価	高山純一、林高博、四藤一成、原口友心	2000
コミュニティバスの路線網検索システムの構築	高山純一、柳沢吉保、中野泰啓、加藤隆章	2000
遺伝的アルゴリズムのゲームへの適用～航空ネットワーク構成を事例として～	諏訪純、有村幹治、田村亨	2000