

令和元年5月26日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00339

研究課題名(和文) 進化計算のための等式制約付き探索空間の無制約化アプローチ

研究課題名(英文) Unconstrained Approach for Evolutionary Computation on Equality Constrained Search Space

研究代表者

折登 由希子(Orito, Yukiko)

広島大学・社会科学研究科・准教授

研究者番号：60364494

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：制約付き最適化問題は、制約を満たす実行可能解と制約を満たさない実行不可能解が多数存在する設計空間上において、実行可能解の一つである最適解を見つける問題である。メタヒューリスティクスの代表的探索手法である進化計算は、制約条件が存在する設計空間上では、探索した解が実行不可能領域にあれば、何らかの方法でその解を実行可能領域に移動させる制約処理操作を要する。このため、制約処理操作はしばしば探索の鈍化を引き起こす。この問題を解決するため、三角関数を利用して、制約付き探索空間を無制約な探索空間へ変換する変換式の開発を行った。等式制約付き最適化問題に対して、変換式を進化計算に利用することの有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタヒューリスティクスの代表的探索手法である進化計算は強力な最適解探索ツールであるが、無制約な設計空間上において特に、非常に高い探索性能を示すことが分かっている。しかしながら、実問題の多くは制約付き最適化問題であり、このような制約付き最適化問題においても進化計算の有効性を広く発信する必要がある。本研究では、制約付き探索空間における進化計算の利用に際して問題となる実行不可能解の制約処理方法として、制約付き探索空間を無制約な探索空間へ変換する変換式の開発を行った。本研究の成果は、従来進化計算を利用していなかった分野において、進化計算を適用するためのブリッジとなる。

研究成果の概要(英文)：The constrained optimization problem is a problem that finds the optimal solution as one of feasible solutions in the whole solution space consisting of a lot of feasible and infeasible solutions. The evolutionary algorithm, one of metaheuristics approaches, needs to handle the constraints of the obtained infeasible solution on the constrained search space. In a word, the evolutionary algorithm must change the infeasible solution to the feasible solution in some way. Therefore, the constraints-handling brings about the evolutionary stagnation. In order to avoid this problem, we proposed the search space reduction approach using trigonometric functions that changes the constrained search space to the unconstrained search space. We showed the usefulness of the search space reduction approach in evolutionary algorithm for the equality constrained optimization problem.

研究分野：進化計算

キーワード：進化計算 制約処理 次元削減 資産配分問題

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

制約付き最適化問題は、制約を満たす実行可能解と制約を満たさない実行不可能解が多数存在する設計空間上において、実行可能解の一つである最適解を見つける問題である。メタヒューリスティクスの代表的探索手法である進化計算は、無制約な設計空間上では複雑な非線形の問題においても非常に高い探索性能を示す。一方、制約条件が存在する設計空間上では、探索した解が実行不可能領域にあれば、何らかの方法でその解を実行可能領域に移動させる制約処理操作を要する。このように、制約処理前後の解に相違が生じることで、過去に探索した解の分布に従って新たな解を探索する進化計算は、しばしば探索の鈍化を引き起こす。この問題を解決するため、進化計算の適用に際して効率的な制約処理方法の開発が求められる。

2. 研究の目的

進化計算の探索において、探索を終えた解の制約を処理する方法ではなく、探索空間自体に制約処理の機能を持たせ、制約付き探索空間を無制約な探索空間へ変換する変換式の開発を行うことが本研究の目的である。

本研究では、不等式制約付き最適化問題より実行可能解が少なく、最適解の探索が困難な等式制約付き最適化問題を対象としており、開発する変換式を実問題である資産配分問題に適用することでその有効性を確認し、テスト関数に適用することで汎用性を確認する。

本研究の等式制約問題は、 N 個の設計変数から成るベクトル (X_1, \dots, X_N) が、制約付き探索空間において線形等式制約 $X_1 + \dots + X_N = 1$ を満たす領域に実行可能解が存在する最適化問題である。

3. 研究の方法

(1) 制約付き探索空間を無制約な探索空間へ変換する変換式の開発

進化計算が、制約付き探索空間 (X_1, \dots, X_N) を直接探索する場合、制約 $X_1 + \dots + X_N = 1$ を満たすような解を簡単に見つけることは困難である。本研究では、ピタゴラスの定理より三角関数の性質 $\sin^2 Y_i + \cos^2 Y_i = 1$ を利用して、制約付き探索空間を制約処理の必要のない無制約な探索空間 (Y_1, \dots, Y_M) へ変換するための 2 種の変換式を考案した。

(2) 空間の変換後に生じる解の偏りを考慮した進化計算の探索方策の考案

開発した変換式を利用することにより、進化計算はその探索過程において制約処理の必要がなく、無制約な探索空間を探索できることになる。しかしながら、無制約な探索空間の次元数 M は、制約付き探索空間の次元数 N より小さい。制約付き探索空間へ変換された際の実行可能解の偏りを調査するため、進化計算のアルゴリズムとして、遺伝的アルゴリズム (GA)、分布推定アルゴリズム (EDA)、実数値遺伝的アルゴリズム (RCGA) の実装を行った。

4. 研究成果

(1) 制約付き探索空間を無制約な探索空間へ変換する変換式の開発

制約付き探索空間 (X_1, \dots, X_N) を無制約な探索空間 (Y_1, \dots, Y_M) へ変換するため、線形等式制約 $X_1 + \dots + X_N = 1$ を満たすように X_i を Y_j の三角関数で表す 2 つの変換式を考案した。

① 変換式 1

制約付き探索空間 (X_1, \dots, X_N) を無制約な探索空間 (Y_1, \dots, Y_M) へ変換する変換式は、例えば、制約付き探索空間を (X_1, X_2) 、無制約な探索空間を (Y_1) とすると、 $(X_1, X_2) = (\sin^2 Y_1, \cos^2 Y_1)$ と表せば、ピタゴラスの定理から $X_1 + X_2 = 1$ となる。すなわち、進化計算は無制約な探索空間 (Y_1, \dots, Y_M) を探索することで、三角関数を利用した変換式を通して自動的に制約 $X_1 + \dots + X_N = 1$ を満たす制約付き探索空間上の実行可能解を見つけることができる。これにより、進化計算はその探索過程において制約処理の必要がなく、無制約な探索空間を探索できることになる。制約付き探索空間の設計変数の数が N のとき、変換式 1 により変換される無制約な探索空間の設計変数の数は $M = \log_2 N$ となる。

② 変換式 2

変換式 1 と異なる定式化により、線形等式制約 $X_1 + \dots + X_N = 1$ を満たすように X_i を Y_j の三角関数で表す。制約付き探索空間の設計変数の数が N のとき、変換式 2 により変換される無制約な探索空間の設計変数の数は $M = N - 1$ となる。

(2) 空間の変換後に生じる解の偏りを考慮した進化計算の探索方策の考案

変換式を通して変換される無制約な探索空間の次元数 M は、本来の探索空間である制約付き探索空間の次元数 N より小さい。このため、進化計算が無制約な探索空間上で得た解を制約付き探索空間へ変換した実行可能解には偏りがあることが予想される。この偏りを調査するため、等式制約を持つ資産配分問題に対して、進化計算アルゴリズムとして GA、EDA、RCGA の実装を行った。

数値実験において、ベンチマークとなるポートフォリオを複製する等式制約付き資産配分問題（最小化問題）の最適化を行った。変換式 1 に有効な結果をもたらすと想定したベンチマーク A と変換式 2 に有効な結果をもたらすと想定したベンチマーク B に対する結果を異なる 7

期間において実施している。

① 変換式 1 の有効性

本来の制約付き探索空間へ進化計算アルゴリズムを適用し、その探索過程で解の制約処理を行う従来のアプローチと、無制約な探索空間へ進化計算アルゴリズムを適用し、変換式 1 を通して本来の制約付き探索空間の解を得る本研究のアプローチを比較した。

結果となる表 1 から、本研究で考案した変換式 1 によるアプローチは、無制約な探索空間の次元数 M が極めて少ないにも関わらず、全ての実験期間において本来の制約付き探索空間を直接探索する従来のアプローチより良い結果を得ている。

表1 変換式1

ベンチマーク	従来		変換式1	
	A	B	A	B
1	2.759E-03	1.597E-02	6.512E-04	2.958E-04
2	5.066E-03	7.239E-03	9.211E-04	1.952E-04
3	1.351E-03	1.952E-02	5.875E-04	2.835E-04
4	1.629E-03	8.738E-03	6.194E-04	2.745E-04
5	1.128E-03	3.916E-03	5.549E-04	5.200E-04
6	2.152E-03	8.000E-03	6.211E-04	1.892E-04
7	2.093E-03	7.007E-03	1.210E-03	5.126E-04

② 変換式 2 の有効性

従来のアプローチと、無制約な探索空間へ進化計算アルゴリズムを適用し、変換式 2 を通して本来の制約付き探索空間の解を得る本研究のアプローチを比較した。

結果となる表 2 から、本研究で考案した変換式 2 によるアプローチは、無制約な探索空間の次元数 M が本来の制約付き探索空間の次元数 N より 1 次元少ないが、多くの実験期間において本来の制約付き探索空間を直接探索する従来のアプローチより良い結果を得ている。

表2 変換式2

ベンチマーク	従来		変換式2	
	A	B	A	B
1	2.759E-03	1.597E-02	3.694E-03	1.856E-04
2	5.066E-03	7.239E-03	1.151E-03	2.342E-04
3	1.351E-03	1.952E-02	8.623E-04	1.917E-04
4	1.629E-03	8.738E-03	3.257E-03	2.083E-04
5	1.128E-03	3.916E-03	1.680E-03	5.698E-04
6	2.152E-03	8.000E-03	1.459E-03	6.086E-03
7	2.093E-03	7.007E-03	3.113E-03	6.813E-03

③ 変換式 1 と変換式 2 の比較

変換式 1 を通して本来の制約付き探索空間の解を得るアプローチと変換式 2 を通して本来の制約付き探索空間の解を得るアプローチを比較した。

結果となる表 3 から、変換式 1 によるアプローチは、変換式 2 によるアプローチより多くの実験期間において良い結果を得ている。

変換式 1 の無制約な探索空間の次元数は $M = \log_2 N$ であり、変換式 2 の無制約な探索空間の次元数 $M = N - 1$ と比較して、自由度が極めて低いにも関わらず変換式 2 より良い結果を得ている。これは、変換式 2 は設計変数の数が多く自由度が高かったが、制約付き探索空間へ変換した実行可能解には、大きな粗密差があったことを意味する。

制約付き探索空間を無制約な探索空間へ変換する変換式は、本研究で考案した 2 つの変換式以外にも様々な自由度や粗密差で定義することができ、本研究を基にしたこれらの内容を今後とも継続する予定である。

表3 変換式1と変換式2の比較

ベンチマーク	変換式1		変換式2	
	A	B	A	B
1	6.512E-04	2.958E-04	3.694E-03	1.856E-04
2	9.211E-04	1.952E-04	1.151E-03	2.342E-04
3	5.875E-04	2.835E-04	8.623E-04	1.917E-04
4	6.194E-04	2.745E-04	3.257E-03	2.083E-04
5	5.549E-04	5.200E-04	1.680E-03	5.698E-04
6	6.211E-04	1.892E-04	1.459E-03	6.086E-03
7	1.210E-03	5.126E-04	3.113E-03	6.813E-03

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Maaki Sakai, Yoshiko Hanada, Yukiko Orito, Edge Assembly Crossover Using Multiple Parents for Traveling Salesman Problem, Proceedings of Joint 10th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 19th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, pp.474-477, 2018 (査読有).
- ② Yukiko Orito, Yoshiko Hanada, Equality Constraint-handling Technique with Variables Grouping in EA for Large Scale Global Optimization, Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.274-279, 2018 (査読有).
- ③ Tomoko Kashima, Yukiko Orito, Hiroshi Someya, Consecutive Meals Planning by Using Permutation GA: Analysis of Meal's Characteristics in Optimum Solution, Journal of Advances in Information Technology, Vol.9, No.3, pp.51-56, 2018 (査読有).
- ④ 小野景子, 鳥山直樹, 古川雄大, 折登由希子, 自己組織型差分進化法に基づく自己回帰隠れマルコフモデル, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, Vol.11, No.2, pp.41-49, 2018 (査読有).
- ⑤ Yoshiko Hanada, Yukiko Orito, Yuji Nakagawa, Effectiveness of Iterative Asset Selection Based on Bordered Hessian for Portfolio Optimization Problems, Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.2040-2044, 2017 (査読有).

- ⑥ Yukiko Orito, Yoshiko Hanada, Search Space Reduction Approach in Evolutionary Algorithms: The Case of High-dimensional Portfolio Replication Problem, Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.554-559, 2017 (査読有).
- ⑦ Tomoko Kashima, Yukiko Orito, Hiroshi Someya, Consecutive Meals Planning by Using Permutation GA: The Case of Three Meal's Characteristics, Information Engineering Express, International Institute of Applied Informatics, Vol.3, No.3, pp.1-10, 2017 (査読有).
- ⑧ Yukiko Orito, Yoshiko Hanada, Dimension Reduction EA for Portfolio Replication Problem: Search Space Change by Fixing Important Variables, Proceedings of Joint 8th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 17th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, pp.22-25, 2016 (査読有).
- ⑨ Yukiko Orito, Yoshiko Hanada, Equality Constraint-handling Technique with Various Mapping Points: The Case of Portfolio Replication Problem, Proceedings of the 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp.2573-2580, 2015 (査読有).

〔学会発表〕(計 11 件)

- ① 折登由希子, 花田良子, 進化計算による探索のための 1 変数削減モデルによる探索空間の無制約化, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2018, 2018.
- ② 折登由希子, 花田良子, 進化計算による探索のための 1 変数削減モデルによる探索空間の無制約化, 第 28 回インテリジェント・システム・シンポジウム, 2018.
- ③ 折登由希子, 加島智子, 集団の解構造の画一性を利用した進化計算による解の改良推移: 消費借入計画問題を例として, 平成 30 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2018.
- ④ 折登由希子, 花田良子, 三角関数を利用した分割法による等式制約付き探索空間の無制約化, 第 14 回 進化計算学会 研究会, 2018.
- ⑤ 折登由希子, 加島智子, 初学者に分かりやすい進化型計算による解の改良推移の検討: 消費借入計画問題の場合, 第 14 回 進化計算学会 研究会, 2018.
- ⑥ 折登由希子, 加島智子, 井澤裕司, マルデワ・グジェゴシュ, 岡村誠, 消費借入計画問題の最適化: 借入計画に対する局所探索操作の検討, 電気学会 システム産業計測制御合同研究会, 2017.
- ⑦ 折登由希子, 加島智子, 井澤裕司, マルデワ・グジェゴシュ, 岡村誠, 消費借入計画問題の最適化: 2 段階問題における 2 種類のメメティックアルゴリズムの適用, 平成 29 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2017.
- ⑧ 折登由希子, 花田良子, 高次元最適化問題における進化計算の探索空間削減効果の検証: 資産配分問題の場合, 電気学会 システム研究会, 2017.
- ⑨ 折登由希子, 花田良子, 進化計算の探索空間における多段階次元削減の有効性の検証: ポートフォリオ複製問題の場合, 電気学会 システム産業計測制御合同研究会, 2016.
- ⑩ 古謝望, 花田良子, 折登由希子, 村中徳明, ポートフォリオ最適化問題のための進化計算の効果的な初期集団: 縁付きヘッセ行列による多段階回選択アセットの検証, 電気学会 システム産業計測制御合同研究会, 2015.
- ⑪ 古謝望, 花田良子, 折登由希子, 村中徳明, ポートフォリオ最適化問題のための進化計算の効果的な初期集団: 縁付きヘッセ行列による多段階回アセット選択の有効性, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 花田良子

ローマ字氏名: Yoshiko Hanada

所属研究機関名: 関西大学

部局名: システム理工学部

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 30511711

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。