

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：32639

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11469

研究課題名(和文) 設計変数の定義域狭域化による進化的計算のための探索領域限定方法の開発

研究課題名(英文) Search Space Restriction Approach by Narrowing Domain of Design Variables for Evolutionary Computation

研究代表者

折登 由希子 (ORITO, Yukiko)

玉川大学・工学部・准教授

研究者番号：60364494

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、最適解の探索が困難な多次元の大規模最適化問題において、解空間全体から進化計算の各手法が効率的に最適解を発見するための探索領域の抽出を試みた。具体的には、等式制約付き最適化問題を解くための一手法である縁付きヘッセ行列の極値判定法を用いることで、設計変数上の探索すべき領域を狭め、最適解が含まれると期待される有望な探索領域を発見するアプローチの開発を行った。縁付きヘッセ行列式の数学的展開の限界と数値実験の結果から、有望な探索領域を抽出するための設計変数の定義域を狭めるアプローチの問題点を明らかにすると同時に、設計変数数を削減するアプローチの有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

進化計算の各手法は強力な最適解探索ツールであるが、実問題に多くある制約付きかつ多次元の大規模最適化問題において、その有効性は未知な部分が多い。このため、そのような大規模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。

本研究課題では、解空間全体から最適解が存在すると期待される探索空間の絞り込み方法の開発を行った。本研究課題の成果は、多様かつ煩雑な情報のデータ分析の必要性の高まりとともに、今後ますます高次元化される最適化問題において、進化計算により効率的に最適化するための探索領域限定方法の一つとしての貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we tried to determine the search space region from the entire solution space for a number of evolutionary computation methods to efficiently search for the optimal solution in multidimensional large-scale optimization problems. Specifically, by using the extreme value determination method of the bordered Hessian, which is one method for solving equality-constrained optimization problems, we developed an approach to narrow the search space region on the design variables for finding the promising search space regions that are expected to have the optimal solution. From the viewpoints of the limitations of the mathematical expansion of bordered Hessian Matrix and the results of numerical experiments, for finding the promising search space region, we reveal the problems with the approach of narrowing the domain of design variables and then the effectiveness of the approach of reducing the number of design variables.

研究分野：計算知能

キーワード：進化計算 初期探索空間の限定 縁付きヘッセ行列 資産配分問題

## 1. 研究開始当初の背景

遺伝的アルゴリズムをはじめとする進化計算の各手法は、大規模最適化問題である多次元の設計空間上で最適解を効率的に探索することが困難である。このため、多次元の設計空間上で進化計算の探索領域を限定する方法が研究されている。設計空間を複数の探索領域に分割し、各領域上を個々に探索する探索領域分割方法に関する研究では、Potter and Jong [2000]は最適化問題を構成する複数の部分問題のそれぞれを探索領域とする方法、Li and Yao [2012]は複数にグループ分けした変数空間のそれぞれを探索領域とする方法を提案している。これらの研究は、最適化問題の特徴を考慮した上で複数に分割した個々の領域上での探索を協力的に実施する独自の操作改善が既存の進化的計算のアルゴリズム中に必要となっている。

このように、大規模最適化問題において進化計算により効率的に最適解の探索を行うためには、既存の進化計算に最適化問題の特徴を考慮した独自の操作改善が必要であることが多く、進化計算の開発に関する知識や経験のない研究者や実務家にはハードルの高い問題点があった。この問題点を解決するため、既存の進化計算に独自の操作改善を加える従来のアプローチではなく、既存の進化計算が効果を発揮するための有望な、すなわち最適解が存在することが期待される探索領域を解空間全体から抽出することが求められる。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、大規模最適化問題における多次元の設計空間上で個々の変数の定義域を狭域化することにより、解空間全体から有望な探索領域を抽出する方法の開発を行う。

多次元空間を1変数から見た相対的な2次元空間と捉え、厳密解法である縁付きヘッセ行列の極値判定法を利用することで複数の2次元空間の相対極値点を導出する。相対極値点の値により抽出した変数の定義域を進化計算の有望な探索空間領域とする方策をとる。

## 3. 研究の方法

### (1) 設計変数の定義域狭域化方法の開発

等式制約付き最適化問題に対する厳密解法の一つである縁付きヘッセ行列の極値判定法を用いて、多次元空間を1変数から見た相対的な2次元空間と捉え、複数の2次元空間の相対極値点を導出した。

縁付きヘッセ行列の極値判定法は、極値点である停留点を数学的に導出することができる。しかしながら、多変数の極値点を理論的に導出することは極めて困難である。そこで、本研究課題では、多次元空間を1変数から見た相対的な2次元空間と捉え、疑似的な極値点を導出した。全変数に対してこの方法を実施することで、複数の2次元空間の相対極値点を導出している。

これにより、解空間全体の全設計変数に対して、それぞれの定義域の上限と下限を得ることで有望な探索空間を抽出することができた。すなわち、進化計算のために有望な探索空間を狭めることが可能となった。

しかしながら、最適化対象とした資産配分問題は、等式制約問題であるため、設計変数の定義域を狭めることができて、多次元の変数の定義域内において、等式制約を満たす最適な組み合わせを見つける大変さは変わらず、進化計算による効果的な探索は困難であった。このため、以下(2)の方法を開発した。

### (2) 設計変数の数の削減方法

(1)と同様に、等式制約付き最適化問題に対する解法の一つである縁付きヘッセ行列の極値判定法を用いて、以下の3種類のアプローチを開発した。

- ・ モデル1：多次元空間を1変数から見た相対的な2次元空間と捉える変数選択モデル
- ・ モデル2：多次元空間を1変数から見た相対的な3次元空間と捉える変数選択モデル
- ・ モデル3：多次元空間を1変数から見た相対的な2次元空間と捉え、変数の選択と選択解除・再選択を繰り返す再帰組み換えによる変数選択モデル

(1)の方法が設計変数の定義域を狭域化する方法だったのに対し、(2)の方法は設計変数の数を減らす、すなわち最適解にとって重要ではない設計変数を削除することで、有望な探索空間を抽出する方法である。

## 4. 研究成果

### (1) 研究方法(1)の成果

研究方法の(1)の方法では、等式制約問題において、設計変数の定義域を狭めることができて、多次元の変数の定義域内において、等式制約を満たす最適な組み合わせを見つける大変さは変わらず、最適化問題における表現型(割合)と進化計算で探索できる遺伝子型(値)の変換式の導出は困難を極めた。このような理由から、狭めた定義域は有望な探索空間領域であったにも関わらず、その探索空間内における進化計算による探索自体は困難であった。最適化対象の資産

配分問題における等式制約は、設計変数値の合計を 1 とする、いわば割合を決定する問題である。この割合決定問題（配合問題・配分問題）に対する進化計算ベースの手法の開発は、今後の課題としたい。

## (2) 研究方法(2)の成果

縁付きヘッセ行列の極値判定法を用いて解空間全体から設計変数の数を減らす、すなわち最適解にとって重要ではない設計変数を削除することで有望な探索空間を抽出する次元削減方法は、極めて良好な結果を示した。

高次元（約 1000~2000 次元）の大規模最適化問題である資産配分問題に対して、モデル 1、モデル 2、モデル 3 により得られた解を比較する。

### ① 進化計算とモデル 1 の比較

モデル 1 は、縁付きヘッセ行列の極値判定法により、有望な設計変数として解を構築する 1 変数の選択を繰り返す方法である。この方法は、有望な設計変数を選択するだけでなく、多次元を 2 次元と捉えた相対的な極値点としての準最適解を導出することができる。一方、最適化問題に対して進化計算を適用する際は、通常は解空間全体を探索空間とする。本研究課題では、進化計算としてビット型の単純遺伝的アルゴリズム（単純 GA）、分布推定アルゴリズム（EDA）、UNDX の交叉を行う実数値型遺伝的アルゴリズム（RCGA）の 3 手法を解空間全体へ適用した。モデル 1 から得られた解と進化計算の各手法から得られた解を比較し、解空間全体を最適化する進化計算より、有望な探索空間へ削減しただけのモデル 1 による解がはるかに良い結果となることを示した。

### ② モデル 1 とモデル 2 の比較

モデル 1 とモデル 2 の差は、有望な設計変数選択操作 1 回において選択する変数の数が 1 変数であるか 2 変数であるかである。モデル 1 は多次元空間を 2 次元と捉え、モデル 2 は多次元空間を 3 次元と捉えることから、モデル 1 により設計変数選択を 2 回実施することは、モデル 2 により設計変数選択を 1 回実施することに相当する。相対的な極値点は選択回数が少ないほど良い結果となることが想定でき、実験結果もそのような結果、すなわち、モデル 2 による解は、モデル 1 による解より良い解であることが分かった。しかしながら、縁付きヘッセ行列式の理論的な導出は選択変数が増えるほど困難であり現実的ではないことも示した。

### ③ モデル 1 とモデル 3 の比較

モデル 1 は、多次元空間を相対的な 2 次元と捉え、設計変数選択操作 1 回において 1 変数選択することの反復から有望な探索空間を構築する設計変数選択アプローチである。これに対して、モデル 3 は、モデル 1 と同様に設計変数選択操作を繰り返すだけでなく、一定間隔毎に選択済み設計変数の選択解除と再組み入れを繰り返すことで、貪欲的に有望な探索空間として設計変数を選択するアプローチである。

表 1 モデル 1 とモデル 3 の比較

実験期間	モデル1	モデル3（組換え間隔）				
		1	2	3	5	10
1	5.96	11.16	8.81	8.38	7.38	6.67
2	5.82	10.53	8.78	8.13	7.06	6.45
3	3.56	5.67	4.92	4.44	4.26	3.89
4	4.02	5.47	4.96	4.73	4.48	4.30
5	4.46	8.09	6.87	6.14	5.54	5.11
6	7.16	11.73	9.75	9.46	8.31	7.99
7	5.81	12.06	10.16	8.52	7.46	6.61
8	6.78	12.87	10.63	9.73	8.53	7.86
9	5.07	8.43	7.10	6.70	6.21	5.68
10	5.51	9.44	7.85	7.30	6.53	6.13
11	6.02	11.60	9.67	9.00	7.84	6.91
12	6.55	10.79	9.28	8.57	7.86	7.25
13	5.73	9.19	8.10	7.39	6.93	6.31
14	6.20	10.15	8.86	7.92	7.33	6.82
15	8.33	15.79	12.62	11.54	10.00	9.32
16	11.33	31.58	24.48	20.27	17.10	13.59
17	8.57	18.58	14.53	12.89	11.20	10.15
18	6.73	11.29	9.39	8.36	7.69	7.29
19	6.15	11.44	9.06	8.60	7.22	6.94
20	8.96	17.82	15.31	12.55	11.78	10.15

数値実験の結果として、モデル3は、モデル1よりはるかに有望な探索空間となる解を絞り込めることが分かった。

表1は、解空間全体が設計変数1000で構成される大規模最大化問題に対して、本報告書の「5. 主な発表論文等」の「学会発表」に記載した「縁付きヘッセ行列を用いた再帰組み換えアプローチによるポートフォリオ最適化問題の探索空間の構築、電気学会 電子・情報・システム部門大会[2022]」で報告したモデル1とモデル3から得られた解の評価関数値である。実験期間とは、資産配分問題を最適化した異なる20期間であり、組み換え間隔とはモデル3における縁付きヘッセ行列の極値判定法による選択後の設計変数の選択解除・再組み入れを行う間隔を意味する。この結果から、特に組み換え間隔が短いほど、モデル3により得られた解の評価関数値が極めて良いことが分かる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 武石光平, 染谷博司, 折登由希子, 加島智子	4. 巻 142, 6
2. 論文標題 制約エージェントを導入した対話型進化計算による多人数献立計画最適化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C 電子・情報・システム部門誌	6. 最初と最後の頁 691-692
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.142.691	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kiyoharu Tagawa, Yukiko Orito	4. 巻 15, 1
2. 論文標題 A Mapping-Based Constraint-Handling Technique for Evolutionary Algorithms with Its Applications to Portfolio Optimization Problems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 62-76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/18824889.2022.2040268	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田川聖治, 折登由希子	4. 巻 12, 2
2. 論文標題 融資を利用したポートフォリオ最適化問題に対する差分進化アルゴリズムの適用: GP (Genotype-Phenotype) 写像に関する一考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 進化計算学会論文誌	6. 最初と最後の頁 26-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11394/tjpnsec.12.26	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 加島智子, 折登由希子, 染谷博司	4. 巻 141, 10
2. 論文標題 多重集合の反復順序問題 -時系列献立計画問題- に対する探索の停滞からの脱出を考慮したGAの提案	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C 電子・情報・システム部門誌	6. 最初と最後の頁 1087-1100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.141.1087	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小野景子, 鳥山直樹, 古川雄大, 折登由希子	4. 巻 11
2. 論文標題 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	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用	6. 最初と最後の頁 41-49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 田川聖治, 折登由希子
2. 発表標題 プロスペクト理論に基づく分散投資問題の進化計算アルゴリズムによる解法
3. 学会等名 計測自動制御学会 第50回知能システムシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田川聖治, 折登由希子
2. 発表標題 融資を利用した分散投資問題のプロスペクト理論に基づく拡張
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 折登由希子, 花田良子, 木村優斗
2. 発表標題 縁付きヘッセ行列を用いた再帰組み換えアプローチによるポートフォリオ最適化問題の探索空間の構築
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 折登由希子, 花田良子
2. 発表標題 ポータフォリオ最適化問題における局所解がGAの探索に与える影響の分析
3. 学会等名 電気学会 システム分野横断型新システム創成合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Maaki Sakai, Yoshiko Hanada, Yukiko Orito
2. 発表標題 Edge Assembly Crossover with Tabu for Traveling Salesman Problem
3. 学会等名 2020 IEEE World Congress on Computational Intelligence, IEEE Congress on Evolutionary Computation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村優斗, 折登由希子, 花田良子
2. 発表標題 ポータフォリオ最適化における縁付きヘッセ行列を用いた貪欲アプローチによるGAの初期集団の構築
3. 学会等名 電気学会 システム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石橋和也, 田中貴宏, 折登由希子
2. 発表標題 人口減少時代のヒートアイランド現象緩和型土地利用配置に関する研究: 進化計算を用いた最適土地利用シナリオの作成
3. 学会等名 日本建築学会 中国支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 折登由希子
2. 発表標題 進化計算における制約付き最適化問題の制約処理方法
3. 学会等名 IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society, Hiroshima Chapter (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 折登由希子, 花田良子, 李駿之
2. 発表標題 三角関数を利用した探索空間削減モデルにより変換される探索空間の特徴検証
3. 学会等名 電気学会 システム分野横断型新システム創成合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加島智子, 折登由希子, 染谷博司
2. 発表標題 時系列献立計画問題における順序パターン評価関数の提案
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoko Kashima, Yukiko Orito, Hiroshi Someya
2. 発表標題 Variable Orders Verification for Evolutionary Computation Solutions on Consecutive Meals Planning
3. 学会等名 14th International Conference on Innovative Computing, Information and Control (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukiko Orito, Tomoko Kashima
2. 発表標題 EDA with Hamming Distance for Consumption-Loan Planning in Experimental Economics
3. 学会等名 Genetic and Evolutionary Computation Conference ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukiko Orito, Yoshiko Hanada, Junzhi Li
2. 発表標題 Search Space Reduction Model with Trigonometric Function for Linear Equality Constraint-handling: The Case of Portfolio Replication Problem
3. 学会等名 2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 折登由希子
2. 発表標題 進化計算の適用分野拡大へ向けて
3. 学会等名 電気学会 システム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井真章, 花田良子, 折登由希子, 梶川嘉延
2. 発表標題 枝組み立て交叉における過去母集団の利用の効果
3. 学会等名 第15回 進化計算学会 研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加島智子, 折登由希子, 染谷博司
2. 発表標題 時系列献立計画問題における進化計算による解の悪順序出現時点の検証
3. 学会等名 電気学会 システム産業計測制御合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Maaki Sakai, Yoshiko Hanada, Yukiko Orito
2. 発表標題 Edge Assembly Crossover Using Multiple Parents for Traveling Salesman Problem
3. 学会等名 Joint 10th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 19th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 酒井真章, 花田良子, 折登由希子
2. 発表標題 複数の親を用いた枝組み立て交叉の提案
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 折登由希子, 花田良子
2. 発表標題 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
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 家計の消費借入計画の分析: どのような人が最適な消費借入計画を立てるのか?
3. 学会等名 日本感性工学会 生命ソフトウェア・感性工房・而立の会合同シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukiko Orito, Yoshiko Hanada
2. 発表標題 Equality Constraint-handling Technique with Variables Grouping in EA for Large Scale Global Optimization
3. 学会等名 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 折登由希子, 花田良子
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第28回インテリジェント・システム・シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 折登由希子, 加島智子
2. 発表標題 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
3. 学会等名 平成30年 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 折登由希子, 花田良子
2. 発表標題 進化計算の適用分野拡大へ向けて
3. 学会等名 電気学会 システム研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	花田 良子  (HANADA Yoshiko)  (30511711)	関西大学・システム理工学部・准教授    (34416)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------