

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K00352

研究課題名(和文) 多目的離散最適化における厳密解法に基づく探索空間分割と誘導型局所探索の開発

研究課題名(英文) Development of search space partitioning and guided local search based on enumeration algorithm for multi-objective discrete optimization

研究代表者

花田 良子 (Hanada, Yoshiko)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：30511711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：多数の非劣解からなるパレート最適解を求める進化型多目的最適化において、解集合の収束性の向上と多様性・均一性の向上は重要な研究課題である。本研究では、多目的遺伝的アルゴリズムの局所探索性能を強化するとともに、目的関数空間上で探索領域を分割し、それぞれの領域にある部分パレートフロントを集中的に探索することで、パレートフロントへの収束性、解集団の多様性、均一性の向上に関する知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した多目的遺伝的アルゴリズムは汎用性が高く、設計や意思決定の分野の諸問題への応用が可能である。作成した多目的離散最適化のベンチマーク問題については、現在も規模を拡大しており、真のパレート解集合とともに公開する予定である。これらは今後、多目的最適化における新たな手法を開発する際の探索性能、挙動検証に利用することができ、手法開発の効率の向上に役立つと考えている。

研究成果の概要(英文)：In evolutionary multi-objective optimization, which finds Pareto-optimal solutions consisting of a large number of non-dominated solutions, improving the convergence and diversity/uniformity of the solution set is one of most important research issues. In this study, we obtained some important guidelines to enhance both the local search and global search performances of the multi-objective genetic algorithm with dividing the search region on the objective function space to search intensively the partial Pareto front in each region.

研究分野：進化計算

キーワード：遺伝的アルゴリズム 多目的最適化 局所探索

## 1. 研究開始当初の背景

多数の非劣解からなるパレート最適解(パレートフロント)を求める進化型多目的最適化において、解集団の収束性の向上と多様性・均一性の向上は重要な課題である。遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)を多目的最適化問題に拡張した多目的GAにおいては、前者の収束性はパレートランクやエリート戦略の適用、後者の多様性・均一性は主に適応度のシェア、ニッチ戦略やメイティングの局所化といった、いずれも解の選択操作など上位の探索スキームを用いて改善されている。一方、本来のGAの主探索オペレータである交叉については単純なN点交叉や一様交叉が用いられることも多い。これらは多くの問題クラスに分け隔てなく適用できるものの、単一・多目的によらず小規模な例題のみにしか有効に働かない。選択、交叉、突然変異に代表される遺伝的操作の中で、各個体(解)が持つ情報を交換する交叉の設計がGAの解探索性能向上の鍵となる。交叉設計はとくに単一目的のGAで重要な課題とされ、離散あるいは組合せ最適化問題においては部分解の保全と形成に重点を置いた局所探索に基づく交叉が開発されている。多目的離散最適化においても部分解の保全と形成は重要であり、これらを考慮した交叉の開発が求められる。

## 2. 研究の目的

離散変数あるいは離散化された連続変数の多目的最適化問題を対象とし、多目的GAの局所探索性能を強化することで、パレートフロントへの高い収束性を実現する。局所探索性能を向上させると、一方で解集団の多様性、均一性が損なわれる。そのため、目的関数空間上で探索領域を分割し、複数の解集団でそれぞれの領域にあるパレートフロントの一部(部分パレートフロント)を集中的に探索する枠組みのもと、開発する交叉および局所探索オペレータを適用することで、解集合の収束性のさらなる向上と同時にパレートフロントを隈なく探索する、すなわち多様性・均一性の向上を図る。また、多目的ポートフォリオ最適化への応用を図る。

## 3. 研究の方法

(1) 真のパレートフロントが既知の多目的連続最適化問題において、目的関数空間上で探索領域を分割し、各部分探索空間で多目的GAの解集団の収束性、多様性、均一性の評価を行う。また、各部分パレートフロントへの収束性能を向上させるため、目的関数の景観の局所的特性と探索の指向を考慮した交叉の適用と改良、および局所探索オペレータの開発を行う。

(2) さらなる収束性、多様性、均一性の向上にむけて、設計変数空間での探索領域の分割の検討を行う。入り組んだパレートフロントをもつ多目的離散最適化問題のベンチマーク作成し、求めた真のパレート最適解の設計変数空間上での分布を検証する。その問題を用いて多目的GAの局所探索と大域探索のバランスの検討を行う。

(3) 多目的ポートフォリオ最適化への応用のための、探索空間の絞り込みに関する基礎的検討を行う。

## 4. 研究成果

(1) 2目的の連続最適化問題を対象とし、目的関数空間を分割する単純な方法として、目的関数空間上で原点を固定した斜交座標で表現される複数の空間への分割、複数の希求点に基づく分割、の2種を考案した。分割方法の有効性を検証するにあたり、多目的GAの世代交代モデルとして、多くの性能検証・解析が行われているNSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)を採用した。また、探索性能の評価には、真のパレート最適解が既知の多目的最適化のベンチマーク問題の一つであるWFGの2目的の例題を用い、部分パレートフロントにおけるGenerational Distance(GD)とInverted Generational Distance(IGD)を比較した。

多目的GAが直交座標で表現される目的関数空間を前提に、精度が高く多様・均一な解集合を得る探索オペレータを用いているため、斜交座標で定義される目的関数空間の各部分空間を、解の優越関係を保ったままで、直交座標に変換した。各部分空間上でNSGA-IIによる最適化を行った結果、精度の高い部分パレートフロントの近似解集合が得られる空間と、偏った解しか得られない空間が存在することがわかった。後者は、設計変数空間上で両親間に子個体を生成する局所探索交叉を用いた際に、指定部分空間外の領域(他の部分空間)に多くの解が分散することが原因であり、解の引き戻し操作をするものの交叉が有効に働かないためであった。

部分空間においてパレートフロントを集中探索させるため、求めたいパレートフロントを複数の希求点で近似し、隣接する2つの希求点との目的関数空間上での距離を最小とする2目的最小化問題に帰着させた。部分パレートフロント探索にあたり、解集団全体でパレートフロント全体を探索する一般的な多目的GAのアプローチと、希求点による部分パレートフロント探索を併用した。その結果、探索の前半を全体のパレートフロントの探索、後半に部分パレートフロントの集中探索に切り替えることで、全体的な解集合の精度向上が得られることがわかった。また、希求点の個数を増やし、求める部分パレートフロントの幅を狭くすればするほど部分的な探索性能の向上が確認され、希求点を適切な場所に配置することで高い精度が保証されることがわ

かった。局所および大域的な探索性能向上のために、複数の目的関数の降下方向に向けた直線的な局所探索と探索履歴を考慮した大域探索の手法を部分パレートフロント探索に補助的に導入することで、例題によっては、さらに探索精度が向上することを確認した。

(2)(1) で得られた知見から、さらに精度の向上を図るためテスト問題を通して、パレート局所解周辺の特徴を再度見直したところ、目的関数空間での分割では得ることが難しい部分パレートフロントが存在すること、目的関数空間で幅広く、かつ精度が高いパレート局所解を得るには、設計変数空間で独立して探索しなければならないことがわかった。そのため、当初の目標であった目的関数空間の分割から、設計変数空間上での分割に方針を改め、それぞれの部分空間においてパレートフロントの集中探索を行うことで探索性能の向上を図ることとした。

各部分設計空間において、入り組んだ形状、かつ全体で大きな広がりを持つパレート最適解集合を有する多目的離散最適化問題での多目的 GA の挙動を解析するため、NK モデルに基づくベンチマーク問題を作成した。NK モデルは、目的関数の局所景観の複雑さを表現できるビットの問題であり、各目的関数での変数間依存の強さにより、パレート最適解集合の設計空間上での広がりが調節できる。また、パレートフロントを形成するパレート最適解の個数が限られるため、大域的な探索の性能、挙動を分析するのにも適している。ここでは、種々の変数間依存強度を有する 2 目的 NK モデルを作成し、列挙法によりすべてのパレート最適解集合を導出した。また、得られたパレート最適解集合を設計変数空間上の距離をもとに分類した結果、目的変数空間上での距離と設計変数空間上での距離が大きく乖離しているパレート最適解が確認された。これにより、GA の探索においては、設計変数空間上で離れた複数の解を同時に精度よく求めることは難しいため、効率的にパレート解集合を求めるには、設計変数空間上で分離して探索する必要があることがわかる。また、 $N=40$ 、 $K_1=K_2=8$  の NK モデルにおいて、NSGA-II の探索の枠組みのもと、一様交叉、および解集合の収束に向かわせる内挿領域の局所探索交叉と解集合の分布を拡大する外挿領域の局所探索交叉を併用した手法を比較した結果、図 1 のように、後者の局所探索ベースの交叉は精度の高い多様なパレート最適解が得られることがわかった。

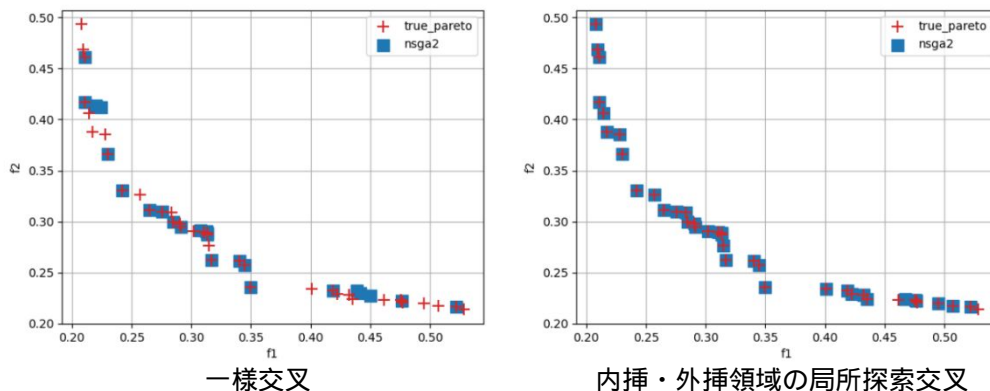


図 1 2 目的 NK モデル ( $N=40$ ,  $K_1=K_2=8$ ) で得られた解集合

(3) ポートフォリオ最適化問題は、与えられた評価関数を最大あるいは最小にするように、ポートフォリオを構成するアセット（銘柄）の投資配分比率を決定する問題である。一般にポートフォリオではリターンを最大化が望まれ、一方でリスクは最小化したい。これらはトレードオフの関係にあるため、ポートフォリオ最適化問題はしばしば多目的最適化として扱われることがある。GA あるいは多目的 GA でポートフォリオ最適化問題を解くにあたり、解はポートフォリオを表し、解を構成する各設計変数はいずれも、ポートフォリオ全体に対する各アセットの投資配分比率として  $[0, 1]$  の実数値で与えられる。単一目的、多目的いずれも、よい解を含む部分空間に絞って効率的に最適化を行うにあたり、株式市場を構成する全アセットからポートフォリオに組入れるアセットをあらかじめ選択しておく必要がある。

これまでに、リターンとリスクを単一の目的関数で表現し、2 変数（2 アセット）の部分問題として極値を解析的に求めることで、ポートフォリオの性能向上に大きく寄与する見込みがあるアセットを選択し、一つずつポートフォリオに組入れる貪欲的なアプローチを考案している。しかし、得られるポートフォリオの性能は初期のアセットの選択に大きく依存し、また、最適化する期間によって、適切な初期アセットが異なるといった問題があった。本研究では、貪欲法の初期アセットの選択の影響を緩和するため、ポートフォリオ構築の過程で、再帰的にアセットを組み替える操作を加えた新たなアセット選択法を提案した。東京証券取引所一部市場の上場銘柄のデータを用いて性能を検証したところ、提案手法においても、初期アセットの選択が与える影響の緩和は解決できなかったが、得られたポートフォリオの性能が従来手法と比較して飛躍的に向上した。今後は得られたアセット集合をもとに多目的ポートフォリオ最適化における多目的 GA の性能評価を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Keiko Ono, Yoshiko Hanada	4. 巻 25(2)
2. 論文標題 Self-Organized Subpopulation Based on Multiple Features in Genetic Programming on GPU	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics	6. 最初と最後の頁 177-186
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jaciii.2021.p0177	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 Daichi Kumoyama, Yoshiko Hanada, Keiko Ono	4. 巻 848
2. 論文標題 A New Probabilistic Tree Expression for Probabilistic Model Building Genetic Programming	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Studies in Computational Intelligence book series	6. 最初と最後の頁 pp. 121--132
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-25225-0_9	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 Yukiko Orito, Yoshiko Hanada, Junzhi Li	4. 巻 18888525
2. 論文標題 Search Space Reduction Model with Trigonometric Function for Linear Equality Constraint-handling: The Case of Portfolio Replication Problem	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. the 2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)	6. 最初と最後の頁 pp.1051--1057
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/CEC.2019.8790046	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 該当する

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 8件）

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 WCCI 2020, IEEE World Congress on Computational Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Yabuzaki, Yoshiko Hanada, Makoto Fukumoto
2. 発表標題 Verification of performance of Multi-Parental Real-Valued Crossover in Interactive Genetic Algorithm
3. 学会等名 2020 Joint 11th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 21st International Symposium on Advanced Intelligent Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahiro Nakao, Maaki Sakai, Yoshiko Hanada
2. 発表標題 Introduction of fast APSP algorithm and optimization algorithms for grid graphs
3. 学会等名 The Seventh International Symposium on Computing and Networking (国際学会)
4. 発表年 2019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 木村優斗, 折登由希子, 花田良子
2. 発表標題 ポート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 Mao Kuroda, Yoshiko Hanada, Keiko Ono
2 . 発表標題 Effectiveness of Multi-Step Crossover in Extrapolation Domain for Genetic Programming
3 . 学会等名 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) ( 国際学会 )
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 (SMC) ( 国際学会 )
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 in conjunction with Intelligent Systems Workshop 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Yoshiko Hanada, Yukiko Orito, Yuji Nakagawa
2 . 発表標題 Effectiveness of Iterative Asset Selection Based on Bordered Hessian for Portfolio Optimization Problems
3 . 学会等名 The 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiko Hanada, Yuji Nakagawa, Chanaka Edirisinghe
2. 発表標題 Complete Efficient Frontier of Multi-objective Multi-constrained Separable Nonlinear Optimization Problems
3. 学会等名 2017 INFORMS Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017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	仲川 勇二 (Nakagawa Yuji) (60141925)	関西大学・総合情報学部・教授  (34416)	削除：2019年5月15日
研究分担者	折登 由希子 (Orito Yukiko) (60364494)	広島大学・社会科学部・准教授  (15401)	

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
---------	---------