

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：24405

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20358

研究課題名（和文）トポロジカルクラスタリング手法による進化型多目的最適化手法の探索能力の改善

研究課題名（英文）A Study on Improving Search Ability of Evolutionary Multi-objective Optimization Incorporating Topological Clustering

研究代表者

増山 直輝（Masuyama, Naoki）

大阪公立大学・大学院情報学研究科 ・准教授

研究者番号：00815607

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）：本研究では、探索途中で得られた解の分布情報をクラスタリング手法によってネットワークに要約し、ネットワークのノードの分布により参照ベクトル集合の配置を調整する手法を提案した。本研究成果は、進化計算分野の最難関学術雑誌の1つであるIEEE Transactions on Evolutionary Computationに採録された。また、進化型多目的最適化手法の探索性能を収束性と多様性に分割して捉え、2つの評価指標でそれぞれを定量的に計測する分析手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

進化型多目的最適化手法において、探索に重みベクトルを利用する手法の理論的研究は、(a)適応的に重みベクトルの生成や方向調整を行う機構の研究、および重みベクトルに設定する最適な距離関数の選択方法に関する研究に大別される。本研究は、成長型トポロジカルクラスタリング手法をもとに、上記(a)、(b)を同時に考慮する独自性の高い発展的研究である。また、探索過程の定量的・定性的評価が可能な指標の提案を基に、進化型多目的最適化手法や、代表的なテスト問題が内包する特性や類似性を明らかにし、新たな最適化手法の設計方針や、現在のテスト問題における問題点を議論することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we proposed an algorithm to summarize the distribution information of the solutions obtained during the search by using a clustering approach, and to adjust the position of the reference vector set according to clustering results. The results of this research have been accepted in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, one of the top academic journals in the field of evolutionary computation. In addition, we proposed an analytical method that quantitatively measures each with two evaluation metrics by dividing the search performance of EMOAs into convergence and diversity.

研究分野：クラスタリング

キーワード：進化型多目的最適化 最適化 クラスタリング 適応共鳴理論

1. 研究開始当初の背景

システムや製品設計においては考慮すべき「目的」が複数存在し、一方の目的を追求すれば他方を犠牲にせざるを得ない関係を有する多目的最適化問題が存在する。一般的に、相反する複数の目的関数を同時に最適化する多目的最適化問題では、トレード・オフ関係を考慮しつつ各目的の最適化を行うため、多数の最適解が存在する。このような解集合で構成される領域はパレートフロントと呼ばれる。パレートフロントを効率的に探索する方法として、進化計算を利用した進化型多目的最適化手法が知られている。1度の探索でフロント付近の解や、パレートフロント上の解(パレート解)を複数獲得できる利点を持つため、近年盛んに研究されている。

進化型多目的最適化において、パレートフロントの近似を行う手法の研究が大きなテーマの1つであるが、多くの従来研究においては、パレートフロントが存在し、かつ規則的なパレートフロントを有する問題を主な対象としているため、パレートフロントの位置や形状が未知の実問題のような複雑な問題への対応に関して議論が不十分であると言える。

目的数が4以上のMOPは、多数目的最適化問題(Many-objective Optimization Problem, MaOP)と呼ばれ、近年、その探索や分析の困難さから注目を集めている。MaOPの困難さの原因の1つは、可視化の困難さである。Parallel Coordinatesや散布図行列によって、獲得された解集合を直接可視化することは可能であるが、目的数が大きくなるほど可視化情報は複雑化する。そのため、獲得された解集合の実態を可視化情報から理解することは容易ではなくなり、可視化の有効性が低い。また、進化型多目的最適化手法のMaOPに対する探索結果の実態を理解し、分析するには、獲得された解集合の情報を適切な粒度で集約する手法が求められる場合もある。さらには、従来の分析手法が定性的に議論されていることから、分析には定量的な評価指標に基づく手法を用いることが望ましい。

2. 研究の目的

本研究の目的は、複雑、または未知のパレートフロントを有する多目的最適化問題においても効率的な探索が可能な進化型多目的最適化手法の提案である。より具体的には、解情報からパレートフロントの特徴や位置を推測し、自律適応的に探索方向の変更を行うことで重点的な探索が可能な手法の提案を行う。また、提案手法を含む進化型多目的(および多数目的)最適化手法の最適化性能を定量的・定性的に比較するために、収束性指標と多様性指標の2つの評価指標を用いたスケーラブルな分析手法の提案を行う。

3. 研究の方法

- (1) 複雑、または未知のパレートフロントを有する多目的最適化問題においても効率的な探索が可能な進化型多目的最適化手法

進化型多目的最適化において、現在の解情報からフロントの特徴や位置を推測し、自律適応的に重点探索方向の変更が可能な手法によって、パレートフロントの形状が複雑、または未知の場合でも効率的かつ精度良くパレート解が獲得可能であることが知られている。提案手法は、進化型多目的最適化手法が保持する解集合の分布を成長型トポロジカルクラスタリングによってクラスタリングし、パレートフロント形状の近似を行う。本研究で適用するクラスタリング手法は、独立した複数のクラスタを同時に近似可能であり、パレートフロントが複数に分断された問題へも対応可能であるが、パレートフロントの近似情報を基にした効果的な遺伝的操作を実現するアプローチに関して、その効果を多面的に議論するために進化計算を利用する機械学習への適用も行う。さらに、近似されたフロント形状情報を利用した分割にもとづく進化型計算手法を提案する。近似されたフロント形状に合わせて、クラスタリングの代表点であるノードに対して重みベクトルを設定し、複雑なフロント形状にも対応した探索を実現する。また、トポロジー構造により分断されたフロント形状を独立したクラスタとして認識可能であり、クラスタ間での無駄な交叉操作や解の更新を避け、効率的な探索を行う。さらに、次世代で獲得した解集合をもとにトポロジー構造を自律適応的に変化させ、より精度良くフロント形状の近似を行う相互協動的動作を創出する。

- (2) 収束性指標と多様性指標の2つの評価指標を用いたスケーラブルな分析手法

進化型多目的最適化手法の探索性能を収束性と多様性に分割して捉え、2つの評価指標でそれぞれを定量的に計測する分析手法を提案する。具体的には、収束性評価指標としてGenerational Distanceの理論的考察を与え、多様性評価指標について、複数の候補を提案・検討する。また本

研究では、2つの評価値を2次元空間上に可視化し、アルゴリズムの探索性能の収束性と多様性を総合的に比較する手法を提案する。

4. 研究成果

- (1) 複雑、または未知のパレートフロントを有する多目的最適化問題においても効率的な探索が可能な進化型多目的最適化手法

本研究では、探索途中で得られた解の分布情報をクラスタリング手法によってネットワークに要約し、ネットワークのノードの分布により参照ベクトル集合の配置を調整する手法を提案した。具体的には、解の分布情報の要約方法として、入力に応じて適応的にノードとエッジを生成する Growing Neural Gas (GNG) を適用し、要約された解の分布情報を基に参照ベクトル集合の配置を自律適応的に調整することで、MaOP に対する効率的な探索を実現した。

パレートフロントの近似情報を基にした効果的な遺伝的操作を実現するアプローチに関して、その効果を多面的に議論するために進化計算を利用する機械学習への適用を行った。本成果は、学術論文に採録されている (https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsoft/32/1/32_512/article-char/ja/)。また、本研究成果である Decomposition-based multiobjective Evolutionary Algorithm guided by Growing Neural Gas (DEA-GNG) は、進化計算分野の最難関学術雑誌の1つである IEEE Transactions on Evolutionary Computation に採録された。また、同分野で頻りに利用される実験プラットフォームである PlatEMO (<https://github.com/BIMK/PlatEMO>) に DEA-GNG が組み込まれていることから、提案手法の独自性や有用性は高いと言える。

本研究では、DEA-GNG の発展的改良手法として、進化型多目的最適化手法に Reference Vector guided Evolutionary Algorithm (RVEA)、クラスタリング手法に CIM-based Adaptive Resonance Theory (CA) を適用した RVEA-CA を提案した。RVEA-CA は、RVEA により探索途中で得られた解の分布情報をクラスタリング手法である CA によって要約する。RVEA-CA では、DEA-GNG よりもネットワークの情報を積極的に活用するために、ネットワークの連結情報を考慮した親個体選択戦略を提案した。この戦略により、既知の局所領域のみならず、未探索領域への探索が促進され、収束性と多様性のバランスを考慮した探索を実現した。本研究成果は学術雑誌で査読中である（同時に、プレプリント版を arXiv (<https://arxiv.org/abs/2204.10756>) で公開中）。

- (2) 収束性指標と多様性指標の2つの評価指標を用いたスケーラブルな分析手法

従来の進化型多目的最適化手法の研究において、手法の収束性や多様性は、散布図などで個体群をプロットするなどの、直接的な可視化手法によって議論されてきた。しかし、従来の直接的な可視化手法では目的数に対するスケーラビリティが低く、MaOPs における進化型多目的最適化手法の探索性能を分析する手法として十分であるとは言えない。また、複数の進化型多目的最適化手法の複数の試行における個体群を比較することも困難であるなど、従来の直接的な可視化手法は進化型多目的最適化手法の分析手法としては不便な点が多い。

本研究では、パレートフロントを近似する参照点集合を用いて各解に対応するパレート最適解を近似的に求める手法を提案した。また、求めた近似パレート最適解集合を用いる汎用的な多様性指標である Hypevolume of Approximated Pareto-optimal solutions (HV_{p^*}) を提案した。 HV_{p^*} は、参照ベクトル集合を用いて、進化計算分野で頻りに適用されるテスト問題である DTLZ 問題における HV_{p^*} を近似することで、収束性評価指標である Generational Distance と同等程度の汎用性を実現することができた。また、提案分析手法を、進化型多目的最適化手法の探索過程分析に拡張することで、進化型多目的最適化手法の探索過程を2次元空間上の1本の線として可視化することができた。本手法により、進化型多目的最適化手法や、代表的なテスト問題が内包する特性や類似性を明らかにし、新たな最適化手法の設計方針や、現在のテスト問題における問題点を議論した。本研究成果によって、指導学生が IEEE CIS Japan Chapter Young Researcher Award を受賞した (<http://www.ieee-jp.org/section/tokyo/chapter/CIS-11/index.php?TopPage-J/YRA-J>)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Liu Yiping, Ishibuchi Hisao, Masuyama Naoki, Nojima Yusuke	4. 巻 24
2. 論文標題 Adapting Reference Vectors and Scalarizing Functions by Growing Neural Gas to Handle Irregular Pareto Fronts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Evolutionary Computation	6. 最初と最後の頁 439 ~ 453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TEVC.2019.2926151	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

1. 著者名 入江勇斗, 増山直輝, 能島裕介, 石淵久生	4. 巻 32
2. 論文標題 未知クラスの継続的な学習を可能とするファジィ遺伝的機械学習手法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌)	6. 最初と最後の頁 512-517
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3156/jsoft.32.1_512	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 T. Kinoshita, N. Masuyama, and Y. Nojima
2. 発表標題 Search process analysis of multiobjective evolutionary algorithms using convergence-diversity diagram
3. 学会等名 2022 Joint 12th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 23rd International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kinoshita, N. Masuyama, Y. Nojima, and H. Ishibuchi
2. 発表標題 Analytical methods to separately evaluate convergence and diversity for multi-objective optimization
3. 学会等名 14th International Conference of Metaheuristics (MIC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下貴登, 増山直輝, 能島裕介
2. 発表標題 Convergence-Diversity Diagramの探索過程分析への拡張
3. 学会等名 第22回進化計算学会研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下貴登, 増山直輝, 能島裕介, 石淵久生
2. 発表標題 Convergence-Diversity Diagramのためのパレート最適近似手法の検討
3. 学会等名 第16回進化計算シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下貴登, 増山直輝, 能島裕介, 石淵久生
2. 発表標題 適応共鳴理論に基づくクラスタリングを用いた進化型多目的最適化アルゴリズム
3. 学会等名 第20回進化計算学会研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下貴登, 増山直輝, 能島裕介, 石淵久生
2. 発表標題 進化型多目的最適化アルゴリズムの分割的性能評価
3. 学会等名 第15回進化計算シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下貴登, 増山直輝, 能島裕介, 石淵久生
2. 発表標題 クラスタリング手法を用いた適応的分割に基づく進化型多目的最適化アルゴリズムの性能評価
3. 学会等名 第14回進化計算シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Liu Yiping, Ishibuchi Hisao, Yen Gary G., Nojima Yusuke, Masuyama Naoki, Han Yuyan
2. 発表標題 On the Normalization in Evolutionary Multi-Modal Multi-Objective Optimization
3. 学会等名 2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>本研究成果の一部が学術雑誌で査読中である (同時に, プレプリント版をarXiv (https://arxiv.org/abs/2204.10756)で公開中)。</p>

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
研究協力者	能島 裕介 (Nojima Yusuke) (10382235)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	石渕 久生 (Ishibuchi Hisao)		

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