

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24300090

研究課題名(和文)進化型多目的局所探索の最適なアルゴリズム構造の決定に関する研究

研究課題名(英文)Algorithm Structure Design for Evolutionary Multi-Objective Local Search

## 研究代表者

石淵 久生 (Ishibuchi, Hisao)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60193356

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：複数の競合する目的を持つ多目的最適化問題を解く場合には、目的間のトレードオフ関係を明確にするために、パレート最適解と呼ばれる解の集合を求めることが重要である。パレート最適解集合を求めることで、目的関数空間内のパレートのフロントが得られ、目的間のトレードオフが明確になる。進化型多目的最適化アルゴリズムでは、多点探索という進化計算の特徴を利用することで、アルゴリズムの1回の実行で全てのパレート最適解の探索が行われる。本研究では、進化型多目的最適化アルゴリズムの計算効率を大きく向上させるための局所探索の組み込みに関する研究調査を行い、進化型多目的局所探索の実装に関する重要な知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：When we search for a final single solution of a multi-objective optimization problem with conflicting objectives, we need to identify the tradeoff relation among the conflicting objectives. For this purpose, it is important to find a set of so-called Pareto optimal solutions. This is because the set of all Pareto optimal solutions, which is called the Pareto front, shows the tradeoff relation among the conflicting objectives in the objective space. An evolutionary multi-objective optimization (EMO) algorithm tries to find all Pareto optimal solutions by its single run using its multi-point search property. In this project, we have examined how to combine local search with an EMO algorithm for drastically improving its search ability. After examining various schemes for combining local search, we obtained some important guidelines for implementing high-performance evolutionary multi-objective local search.

研究分野：計算知能

キーワード：アルゴリズム 多目的最適化 遺伝的アルゴリズム 進化計算 遺伝的局所探索

### 1. 研究開始当初の背景

遺伝的アルゴリズムに代表される進化計算は、局所解に陥ることなく、最適解が存在する領域を探し出す大域的な探索能力が高い。しかし、最適解が存在する領域を探し出した後、効率的に最適解を発見するための局所的な探索能力は高くない。そのため、遺伝的アルゴリズムに局所探索を組み込んだ遺伝的局所探索の実装に関する研究が 1990 年代前半から活発に行われている。

一方、多目的最適化問題への遺伝的アルゴリズムの応用も 1990 年代前半から活発に行われている。単一目的最適化問題に対する進化計算と同様に、多目的遺伝的アルゴリズムに代表される進化型多目的最適化アルゴリズムの大域的探索能力は高いが、局所的な探索能力は高くない。そのため、局所探索との融合の必要性は明らかである。しかし、1990 年代における進化型多目的最適化の研究では、多様なパレート最適解を探し出すための多様性維持メカニズムが大きな注目を集め、局所探索の組み込みによる探索能力の向上という研究方向は注目されていなかった。

そのような状況の 1990 年代に、研究代表者は、進化型多目的最適化アルゴリズムに局所探索を組み込んだ進化型多目的局所探索を世界で最初に提案した。また、2003 年には、進化型多目的局所探索の実装における大域探索と局所探索とのバランスの重要性を明らかにした。

1990 年代には全く注目を集めなかった進化型多目的局所探索であるが、近年、大規模な組合せ最適化問題や複雑な関数最適化問題に対する進化型多目的最適化の研究において、局所探索の必要性が明らかになり、進化型多目的局所探索の持つ高い探索能力が大きな注目を集めている。研究代表者が提案した進化型多目的局所探索では、交叉や突然変異で生成された子個体に対して局所探索が適用される。すなわち、現在の個体群に対して、まず大域探索（交叉・突然変異）が適用され、次に局所探索が適用される。この基本構造は、単一目的最適化問題に対する進化型局所探索を含めて、多くの研究で一般的に用いられているが、研究代表者の最近の研究により、必ずしも最適なアルゴリズム構造とは言えないことが示されている。

### 2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、進化型多目的最適化アルゴリズムに局所探索を組み込んだ進化型多目的局所探索アルゴリズムの自動設計である。この最終目的を実現するため、進化型多目的局所探索の最適なアルゴリズム構造に関して以下の研究を行う。なお、本研究におけるアルゴリズム構造は、交叉や突然変異、局所探索、世代更新などの操作の組合せ方法を意味している。

(1) 個々の多目的最適化問題に対して、最適な構造の進化型多目的局所探索を実装する。

(2) 多目的最適化問題の特徴と進化型多目的局所探索の最適構造との関係を明らかにする。

(3) 探索の序盤や終盤など異なる探索局面で必要な進化型多目的局所探索の構造を明らかにする。

(4) 進化型多目的局所探索の実行中に最適構造を自動的に発見するアルゴリズムを開発する。

### 3. 研究の方法

進化型多目的局所探索アルゴリズムの開発のために、多目的最適化問題の特徴の調査、進化型多目的最適化アルゴリズムの性能調査、交叉や突然変異などの性能の調査、単一目的最適化問題に対するアルゴリズム構造のメタ最適化、進化型多目的局所探索アルゴリズムの構造のメタ最適化を行った。以下、具体的に研究方法の説明を行う。

#### (1) 多目的最適化問題の調査

1990 年代に進化型多目的最適化アルゴリズムの評価に用いられた簡単な 2 目的最適化問題から現在の進化型多数目的最適化アルゴリズムの評価に用いられている 10 目的を超える多数目的最適化問題まで、幅広く多目的最適化問題の特徴を調べた。特に、ランダムに生成された初期個体群とパレートフロントを比較することで、パレートフロントへ近づくための収束性、パレートフロント全体を覆うための多様性、パレートフロント上を均一に覆うための一様性のなかで何が必要とされているかという観点から多目的最適化問題の特徴を調べた。

#### (2) 進化型多目的最適化アルゴリズムの調査

2 目的から 10 目的までのナップサック問題を用いて、進化型多目的最適化アルゴリズムとして幅広く用いられている NSGA-II、MOEA/D、SMS-EMOA、HypE の性能評価を行った。また、NSGA-III、MOEA/DD、-MOEA など、最新の進化型多数目的最適化アルゴリズムの性能比較を、DTLZ や WFG と呼ばれる多数目的最適化テスト問題を用いて行った。さらに、様々な多目的最適化問題への応用も試みた。

#### (3) 交叉や突然変異の性能調査

初期個体に対して交叉や突然変異を適用することで生成された子個体と初期個体との関係を調べることで、収束性や多様性、一様性の実現の容易さに関する調査も行った。また、交叉操作により生成された子個体の性能と交叉される親個体間の距離との関係も調べた。

#### (4) 単一目的最適化アルゴリズムの設計

直前に調べられた解との比較だけに基づく対話型進化計算モデルを定式化し、単一目的最適化を行う進化計算アルゴリズムのメタ最適化を行った。メタ最適化では、個々の解を生成する方法を並べた記号列として進化計算アルゴリズムを表現し、効率的に探索を行うために記号列の最適化を行った。記号列に含まれる記号は、解を生成する手法であ

り、本研究では、ランダム生成、突然変異操作、交叉操作、過去に調べた解の再提示という手法を用いた。解の再提示は、最終的に獲得される解を1個に絞り込むために必要な操作である。

#### (5)多目的局所探索アルゴリズムの設計

局所探索と大域探索を適用する順序に加えて、局所探索適用個体選択のために用いられるトーナメント選択のサイズ、実際に局所探索を適用する確率、個々の個体に対する局所探索において調べられる近傍解の数を決定変数とするメタ最適化を行うことで、多目的局所探索アルゴリズムの設計を行った。

### 4. 研究成果

前節で示した研究方法により、以下のような研究成果が得られた。

#### (1)多目的最適化問題の調査

テスト問題の性質の調査を行うことで、多目的最適化アルゴリズムの開発が性能評価に用いられているテスト問題の性質に大きく依存していることを明らかにした。例えば、1990年代のテスト問題は、図1に示すように、白丸で示すランダムに生成された初期解がパレートフロント近くに存在するため、収束性と多様性は重要ではなく、一様性のみが重要となる。そのため、一様性向上のための様々な工夫が提案されている。一方、2000年前後のテスト問題では、図2に示すように、初期解がパレートフロントから離れているため、収束性が極めて重要になる。そのため、1999年以降に提案された主要な進化型多目的最適化アルゴリズムでは、収束性が一様性や多様性よりも重視されている。このような研究成果を国際会議 SSCI 2014 で発表した。

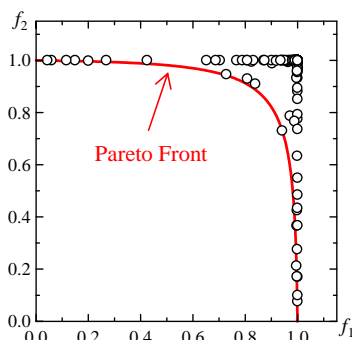


図1 1990年代のテスト問題の例

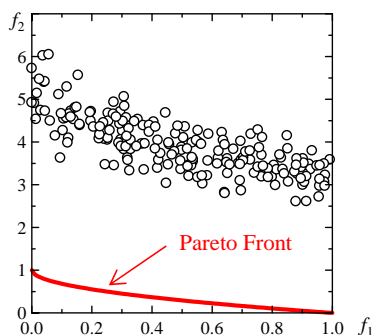


図2 2000年前後のテスト問題の例

また、DTLZおよびWFGと呼ばれる最新の多目的最適化テスト問題に関する調査を通じて、これらの問題が特殊な構造を持つ問題であることを明らかにし、国際会議 IEEE CEC 2016への投稿を行った。さらに、縮退したパレートフロントを持つテスト問題として定式化されたWFG3は、実は縮退したパレートフロントだけではなく、縮退していないパレートフロントも持つことを明らかにし、IEEE Trans. on Evolutionary Computation誌に投稿を行った。これらの投稿は、どちらも採択決定となっている。

一方、視覚的に多目的最適化アルゴリズムの挙動を調べるために提案されている距離最小化問題を高次元決定変数空間内の多目的最適化問題へ拡張する方法を提案し、国際会議 IEEE CEC 2013およびIEEE CEC 2014において、問題の定式化および探索挙動に関する発表を行った。

#### (2)進化型多目的最適化アルゴリズムの調査

多目的ナップサック問題に対してNSGA-II、MOEA/D、SMS-EMOA、HypEの性能評価を行い、個々のアルゴリズムの探索挙動を明らかにした。具体的には、パレート優越関係に基づくNSGA-II、チェビシェフ関数に基づくMOEA/D、ペナルティパラメータの値を大きく設定したPBI関数に基づくMOEA/Dは、2目的ナップサック問題に対して高い探索性能を示すが、目的関数の数の増加と共に大きく探索性能が低下することを明らかにした。一方、荷重和関数に基づくMOEA/Dおよびの値を小さく設定したPBI関数に基づくMOEA/Dは、2目的ナップサック問題に対する探索性能は低いが、10目的ナップサック問題に対して最も高い性能を示すことも示した。さらに、SMS-EMOAおよびHypEは、2目的問題から10目的問題まで平均的に良い性能を示すが、目的関数の数の増加と共に計算時間が大きく増加することも示した。このような探索性能の違いを、目的関数空間において現在の解を改良する部分空間の割合という観点から明確に説明し、IEEE Trans. on Evolutionary Computation誌に投稿した。この論文は、2015年に出版された。

また、DTLZやWFGなどのテスト問題を用いて、NSGA-IIIや $\epsilon$ -DEA、MOEA/DDなど最新の進化型多目的最適化アルゴリズムの探索挙動の調査を行った。これらのアルゴリズムは、DTLZおよびWFGに対しては非常に高い探索性能を示したが、目的関数を最大化に変更したMax-DTLZおよびMax-WFGに対しては、目的関数の数が10である場合でもNSGA-IIやMOEA/Dに探索性能が劣るという予想外の結果が得られた。この結果をIEEE Trans. on Evolutionary Computation誌に投稿した。現在、この論文は2回目の査読中である。また、このような予想外の結果の原因を調べるために、PBI関数におけるパラメータの設定とMOEA/Dの探索性能との関係やNSGA-IIとNSGA-IIIとの比較に関する調査を、Max-DTLZ

および Max-WFG を用いて行った．そのような研究調査の結果を国際会議 IEEE CEC 2016 に投稿し，採録決定となった．このような研究により，NSGA-III や  $\epsilon$ -DEA, MOEA/DD など，MOEA/D の改良として提案された最新の進化型多目的最適化アルゴリズムでは，重みベクトルの分布とパレートフロントの形状が一致しない図3に示すような状況が発生することを明らかにした．この場合，図4に示すように，重みベクトルとパレートフロントが重なる領域の解だけが得られるため，獲得される解の総数が少なくなる．一方，重みベクトルの分布を逆転させた Inverted PBI 関数を用いた MOEA/D では，図5に示すように，一様に分布した多数の解が得られる．

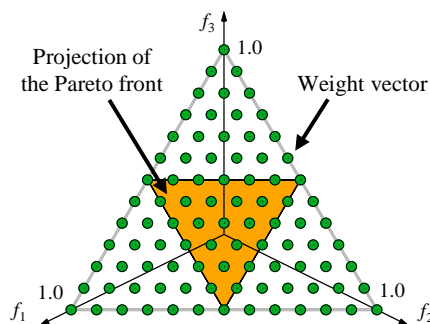


図3 重みベクトルの分布とパレートフロントの形状が一致していない状況

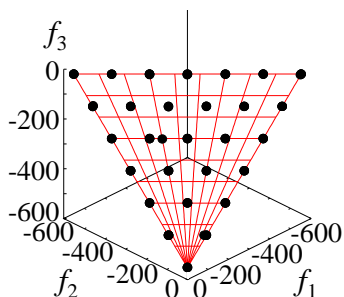


図4  $\epsilon$ -DEA で獲得された解集合

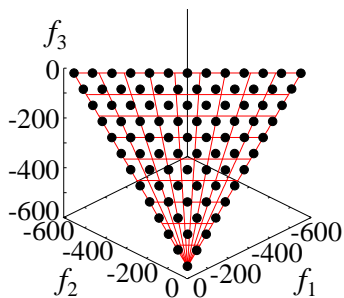


図5 MOEA/D-IPBI で獲得された解集合

### (3) 交叉や突然変異の性能調査

多目的ナップザック問題に対する交叉操作の性能調査を行い，類似した親個体の交叉により，高い探索性能が得られることを明らかにした．この結果を国際会議 PPSN 2012 で発表した．また，親個体間で少数の遺伝子だけを交換するという手法との比較を行い，国際会議 PPSN 2014 で発表した．

### (4) 単一目的最適化アルゴリズムの設計

直前に調べられた解との比較だけに基づく対話型進化計算モデルを定式化し，200 個の解を評価するという条件で探索アルゴリズムのメタ最適化を行った．その結果，複雑な多峰性関数では，評価個体総数が 200 という非常に限定された条件でも，交叉操作に基づく多点探索が有効であるという結果が得られた．一方，単純な単峰性関数では，局所探索に基づく 1 点探索が有効であるという結果が得られた．さらに，どちらの場合でも，探索の序盤において数十回のランダム探索を行うことで探索性能が向上するという興味深い結果が得られた．これらの結果は，IES 2014 などの国際会議で発表すると共に，拡張版を SpringerPlus 誌に投稿し，2016 年に掲載された．

### (5) 多目的局所探索アルゴリズムの設計

以下のようなパラメータに対する様々な設定と多目的局所探索アルゴリズムの性能との関係を数値実験により網羅的に調査し，国際会議 IEEE CEC 2013 で発表した．

- (a) 局所探索と大域探索を適用する順序
- (b) 局所探索適用個体を選択するために用いられるトーナメント選択のサイズ
- (c) 選択された個体への局所探索適用確率
- (d) 各個体に対する局所探索で調べられる近傍個体の総数

また，このようなパラメータを決定変数とすることで多目的局所探索アルゴリズムのメタ最適化を行った．この結果を国際会議 IEEE CEC 2015 で発表した．このような研究により，局所探索を適用する個体の性能および局所探索と大域探索で調べられる解の数の割合が進化型多目的局所探索アルゴリズムの性能に大きな影響を及ぼすことを明らかにした．

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[ 雑誌論文 ] (計 4 件)

- [1] H. Ishibuchi, T. Sudo, and Y. Nojima, “Interactive evolutionary computation with minimum fitness evaluation requirement and offline algorithm design,” *SpringerPlus*, vol. 5, no. 192 (Total 29 pages), February 2016. (Online Journal) 査読有  
DOI: 10.1186/s40064-016-1789-1
- [2] H. Ishibuchi, N. Akedo, and Y. Nojima, “Behavior of multi-objective evolutionary algorithms on many-objective knapsack problems,” *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 19, no. 2, pp. 264-283, April 2015. 査読有
- [3] H. T. T. Binh, B. T. Lam, N. S. T. Ha, and H. Ishibuchi, “A multi-objective approach for

solving the survivable network design problem with simultaneous unicast and anycast flows,” *Applied Soft Computing*, vol. 24, pp. 1145-1154, November 2014. 査読有

- [4] H. Ishibuchi and Y. Nojima, “Repeated double cross-validation for choosing a single solution in evolutionary multi-objective fuzzy classifier design,” *Knowledge-Based Systems*, vol. 54, pp. 22-31, December 2013. 査読有

〔学会発表〕(計23件)

- [1] H. Ishibuchi, K. Doi, H. Masuda, and Y. Nojima, “Relation between weight vectors and solutions in MOEA/D,” *Proc. of 2015 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision-Making*, pp. 861-868, Cape Town, December 8-10, 2015.
- [2] H. Ishibuchi, H. Masuda, and Y. Nojima, “Comparing solution sets of different size in evolutionary many-objective optimization,” *Proc. of 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 2859-2866, Sendai International Center, Sendai, Japan, May 25-28, 2015.
- [3] Y. Tanigaki, H. Masuda, Y. Setoguchi, Y. Nojima, and H. Ishibuchi, “Algorithm structure optimization by choosing operators in multiobjective genetic local search,” *Proc. of 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 854-861, Sendai International Center, Sendai, Japan, May 25-28, 2015.
- [4] H. Ishibuchi, H. Masuda, Y. Tanigaki, and Y. Nojima, “Review of coevolutionary developments of evolutionary multi-objective and many-objective algorithms and test problems,” *Proc. of 2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision-Making*, pp. 178-185, Orlando, Florida, USA, December 9-12, 2014.
- [5] H. Ishibuchi, T. Sudo, K. Ueba, and Y. Nojima, “Offline design of interactive evolutionary algorithms with different genetic operators at each generation,” *Proc. of 18th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems*, vol. 2, pp. 635-646, Singapore, November 10-12, 2014
- [6] H. Ishibuchi, Y. Tanigaki, H. Masuda, and Y. Nojima, “Distance-based analysis of crossover operators for many-objective knapsack problems,” *Proc. of 13th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, pp. 600-610, Ljubljana, Slovenia, September 13-17, 2014
- [7] H. Masuda, Y. Nojima, and H. Ishibuchi,

“Visual examination of the behavior of EMO algorithms for many-objective optimization with many decision variables,” *Proc. of 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 2633-2640, Beijing, China, July 6-11, 2014

- [8] H. Ishibuchi, M. Yamane, N. Akedo, and Y. Nojima, “Many-objective and many-variable test problems for visual examination of multiobjective search,” *Proc. of 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1491-1498, Cancún, México, June 20-23, 2013
- [9] H. Ishibuchi, Y. Tanigaki, N. Akedo, and Y. Nojima, “How to strike a balance between local search and global search in multiobjective memetic algorithms for multiobjective 0/1 knapsack problems,” *Proc. of 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1643-1650, Cancún, México, June 20-23, 2013
- [10] H. Ishibuchi, N. Akedo, and Y. Nojima, “Relation between neighborhood size and MOEA/D performance on many-objective problems,” *Proc. of 7th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, pp. 459-474, Sheffield, UK, March 19-22, 2013
- [11] H. Ishibuchi, N. Akedo, and Y. Nojima, “Recombination of similar parents in SMS-EMOA on many-objective 0/1 knapsack problems,” *Proc. of 12th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, Part II*, pp. 132-142, Taormina, Italy, September 1-5, 2012
- [12] H. Ishibuchi, N. Akedo, and Y. Nojima, “EMO algorithms on correlated many-objective problems with different correlation strength,” *Proc. of 2012 World Automation Congress*, Puerto Vallarta, Mexico, June 24-27, 2012 (6 pages)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石淵 久生 (ISHIBUCHI HISAO)  
大阪府立大学・工学研究科・教授  
研究者番号：60193356