

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 12 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26540128

研究課題名(和文)進化型多数目的最適化における解集合評価の体系化へ向けた評価指標の批判的考察

研究課題名(英文)Critical Review of Performance Indicators for Constructing Consistent Solution Set Evaluation Framework in Evolutionary Many-Objective Optimization

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) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：進化型多目的最適化では、多目的最適化問題のパレートフロント全体を一様に覆うような非劣解集合が獲得される。非劣解集合の評価は、パレートフロント全体の近似の度合いとして評価される。非劣解集合がパレートフロントに近いほど高い評価となる。また、パレートフロントを幅広く覆っているほど高い評価となる。2目的問題や3目的問題では、パレートフロントと非劣解集合を図示することが可能であるため、視覚的な評価および評価尺度の意味も明確である。本研究では、視覚的な解析が困難となる多数目的最適化問題に対する非劣解集合の評価に関連する様々な問題点を解析し、新しい評価尺度およびテスト問題生成手法の提案も行った。

研究成果の概要(英文)：In evolutionary multiobjective optimization (EMO), a set of non-dominated solutions is obtained to approximate the entire Pareto front of a multiobjective problem. High evaluation is assigned to the solution set when it is close to the Pareto front and covers the entire Pareto front. When the number of objectives is two or three, we can depict the solution set and the Pareto front in the objective space. Thus it is easy to visually evaluate the solution set. It is also easy to visually understand the physical meaning of each performance indicator. However, the visual evaluation of solution sets and the visual understanding of performance indicators are very difficult for many-objective problems with four or more objectives. In this study, we analyzed various difficulties related to the evaluation of solution sets of many-objective problems. Then we proposed a new performance indicator and a test problem generation mechanism for evolutionary many-objective optimization.

研究分野：計算知能

キーワード：進化計算 多目的最適化 多数目的最適化 非劣解集合 解集合評価 性能評価尺度

## 1. 研究開始当初の背景

意思決定者の選好に関する事前情報を必要としない汎用的な最適化手法である進化型多目的最適化の応用が現実世界の幅広い分野で行われ、様々な成功事例が報告されている。しかし、目的関数の数が多い多数目的最適化問題への応用では、多目的探索能力の急激な悪化に加えて、高次元目的関数空間内での探索挙動の把握や獲得された解集合の評価も困難になる。

研究代表者は、進化計算分野における世界最大の国際会議 CEC 2007 において進化型多数目的最適化に関する招待講演を行い、翌年にサーベイ論文を発表した。このサーベイ論文では、2007 年までに出版された進化型多数目的最適化関連論文 48 件を網羅的に解説した。進化型多数目的最適化に関する研究は、2007 年以前は大きな注目を集めていなかったが、サーベイ論文の年間被引用回数からも明らかのように、近年、研究論文の数が急増している(例えば、研究開始前年である 2013 年の年間被引用回数は 65 回、2016 年の年間被引用回数は 121 回、総被引用回数は 540 回)。

進化型多数目的最適化に関する研究の多くは、目的関数の数の増加に伴う多目的探索能力の急激な悪化に対する改良である。しかし、高次元目的関数空間内での探索挙動の把握が困難であり、獲得された解集合の評価方法にも問題が多いため、改良手法の評価が非常に難しいという状況に置かれている。

## 2. 研究の目的

本研究では、多目的探索の効率化、探索挙動の把握、解集合の評価という進化型多数目的最適化の課題のなかで、最も根本的な課題である解集合評価に焦点を絞り、目的関数の数の増加に伴い発生する問題点を明確に示す。さらに、新しい評価指標の提案を試みる。本研究では、このような研究を行うことで、進化型多数目的最適化における解集合評価の体系化に向けた最初の一步となることを研究目的とする。具体的には、以下の3点を明らかにする。

- (1) 文献調査により、多数目的最適化問題の解集合評価に用いられている評価指標を調べる。
- (2) 大規模数値実験により、目的関数の数の増加に伴い発生する評価指標の問題点を明確にする。
- (3) 個々の評価指標の提案者および推奨者との議論を通じて、新しい評価指標の可能性を検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 文献調査

進化型多数目的最適化に関する文献を網羅的に調査した。調査対象となる文献の選択は、Google Scholar における被引用回数を用いて行った。また、進化計算分野で最も権威ある論文誌である IEEE Trans. on Evolutionary

Computation 誌 (インパクトファクタ 5.908) と Evolutionary Computation 誌 (インパクトファクタ 3.600) に関しては、Early Access Paper を含めて、進化型多数目的最適化に関する全ての論文を調査した。

### (2) 評価指標の問題点の調査

進化型多数目的最適化において、獲得された解集合の評価に用いられることの多い IGD (Inverted Generational Distance) と呼ばれる評価指標を解析的に分析すると共に、問題点が発生するかどうかに関して、大規模な数値実験により検証した。また、IGD の計算に必要な参照点集合の設定方法と IGD による性能評価の結果の間での依存関係を調査した。さらに、進化型多数目的最適化を含む進化型多目的最適化において、解集合の評価に用いられることの多い評価指標 HV (Hyper-volume) に対しても、参照点の設定方法と性能評価の結果の間での依存関係を調べた。

### (3) 新しい評価指標の提案

上記(2)で行った IGD と HV の問題点に関する検討に基づき、新しい性能評価指標の提案を試みた。具体的には、HV の持つ Pareto Compliance という理論的に優れた性質および距離計算に基づく IGD の持つ高い計算効率を同時に持つような評価指標の提案を試みた。

### (4) 新しいテスト問題の提案

解集合の評価指標の特徴や問題点を明確にするために、様々な形状を持つパレートフロントに対応したテスト問題の提案を試みた。さらに、提案したテスト問題を用いて、進化型多目的最適化アルゴリズムの性能評価を行った。

## 4. 研究成果

本研究により、以下の成果が得られた。

### (1) 進化型多目的最適化の研究動向

大規模な文献調査を行うことで、進化型多目的最適化アルゴリズムの評価に用いられる評価指標に関する次のような研究動向が明らかになった。

4 目的から 9 目的程度の多数目的問題：厳密な HV の計算が可能であり、HV が評価指標として用いられることが多い。IGD が同時に用いられている場合も多い。

10 目的以上の多数目的問題：厳密な HV の計算が困難であるため、2014 年頃までは IGD だけが用いられていることが多かった。しかし、2015 年以降、IGD だけでは評価指標として不十分であるという認識が研究者の間で共有されるようになり、IGD に加えて、近似計算に基づく HV が評価指標として用いられる場合が多くなっている。厳密な HV 計算の高速化の試みも続けられている。

### (2) 評価指標の問題点

多数目的最適化問題の解集合に対する評価指標として用いられている IGD の問題点として、評価結果が参照点集合に強く依存す

ることを明確に示した．具体的には，異なる参照点集合により，解集合間の比較結果に逆転が生じることを数値実験により明確に示した．

また，パレート優越関係に矛盾する評価結果が IGD により得られる可能性を，簡単な例題により明確に説明した．例えば，図 1 に示す例では，解集合 A は解集合 B を 2 目的最小化問題において優越する．これは，解集合 B に含まれている解が，解集合 A に含まれている解に優越されているためである．このことから，解集合の比較では，解集合 A は解集合 B よりも優れた解集合であると言える．しかし，IGD を用いて解集合の比較を行うと，解集合 A よりも解集合 B が高く評価される．

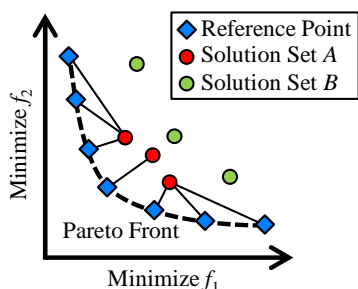


図 1 パレート優越関係と矛盾する結果の例

さらに，進化型多目的最適化手法により得られた解集合に対して，そのような不適切な評価結果が，IGD により実際に得られることを数値実験により明確に示した．

### (3) 新しい評価指標の提案

上述のような IGD の問題点を解消するために，各々の参照点から解集合に含まれる最も近い解への平均距離という IGD の定義を，各々の参照点から解集合により優越される領域までの平均距離に変更し，IGD<sup>+</sup>を提案した．個々の参照点から解集合により優越される領域までの距離を図 2 に示す．

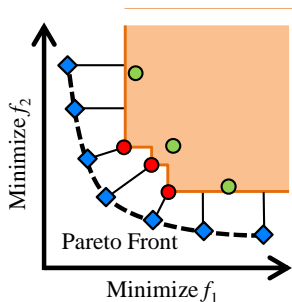


図 2 新しい評価指標 IGD<sup>+</sup>の説明図

研究代表者により 2015 年に提案された新しい評価指標 IGD<sup>+</sup>は，進化型多目的最適化に関する有名なスペインの Webpage である jMetal 5 において，標準的な 6 種類の評価指標に含まれるなど，既に国際的に大きな注目を集めている．

### (4) WFG3 の真のパレートフロントの発見

進化型多目的最適化アルゴリズムの性能比較では，テスト問題に様々なアルゴリ

ズムを適用され，評価指標を用いて獲得された解集合の比較が行われる．そのため，アルゴリズムの比較結果を検討する場合には，評価指標の妥当性の検討だけでなく，テスト問題の妥当性の検討も重要である．本研究では，進化型多目的最適化に関する研究で幅広く用いられている DTLZ テスト問題と WFG テスト問題を調査し，WFG3 の真のパレートフロントの形状を明らかにした．テスト問題 WFG3 の提案論文では，図 3 に示すような縮退したパレートフロントを持つテスト問題の提案が意図されている．そのため，多くの論文で，縮退したパレートフロントを持つ問題として WFG3 に対する性能評価が行われていた．本研究では，問題の詳細な分析により，実際には，WFG3 のパレートフロントは，図 4 に示すような縮退していない形状であることを明らかにした．

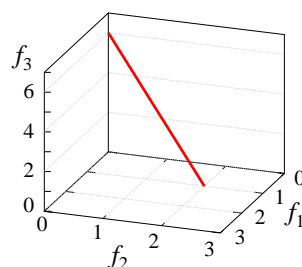


図 3 意図された WFG3 のパレートフロント

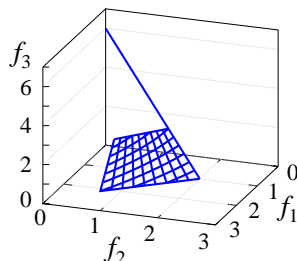


図 4 WFG3 の真のパレートフロント

### (5) 新しいテスト問題の提案

DTLZ テスト問題および WFG テスト問題に関する調査により，これらのテスト問題のパレートフロントの多くが図 5 に示すような三角型であることを明確にした．これは，MOEA/D 型の進化型多目的最適化手法で用いられている重みベクトルの分布に似た形状である．

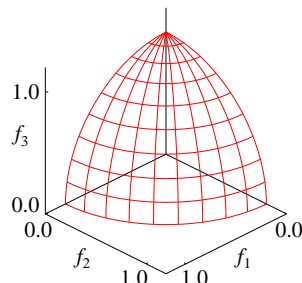


図 5 DTLZ2 のパレートフロント

MOEA/D 型進化計算アルゴリズムが DTLZ テスト問題および WFG テスト問題に対して高い性能を示すのは，パレートフロントの形

状と重みベクトルの分布の形状が一致しているためである．この点を明確に示すために，DTLZ テスト問題および WFG テスト問題の全ての目的関数にマイナスの符号をつけたテスト問題を提案し，MOEA/D 型アルゴリズムの性能評価を行った．マイナスの符号をつけることで，図7に示すように，パレートフロントが回転するため，予想されたように，MOEA/D 型進化計算アルゴリズムの性能が大きく悪化した．

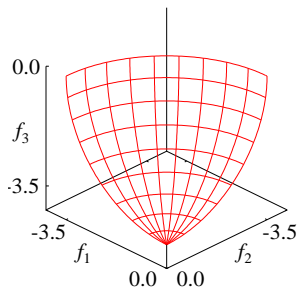


図6 Minus-DTLZ2のパレートフロント

(6) HV を最適化する解集合の解析

従来，HV に対する参照点の影響は，各々の目的を最適化するパレートフロントの端点だけに限定されると考えられていた．これは，2 目的最適化問題に対しては明らかである．また，DTLZ や WFG など，多くの多目的最適化テスト問題に対しても成り立つ．しかし，本研究で真のパレートフロントを明らかにした WFG3 テスト問題や，DTLZ や WFG の全ての目的関数にマイナスの符号をつけたテスト問題に対しては成り立たない．本研究では，このような性質を様々なテスト問題に対する数値実験で明らかにし，理論的な考察を行った．図7に，WFG3 テスト問題に対して，HV を最大化する解の分布と参照点の関係を示す．特に，参照点の位置がパレートフロントから大きく離れた場合では，最適化解分布がパレートフロントの周囲に集中するという興味深い結果が得られた．

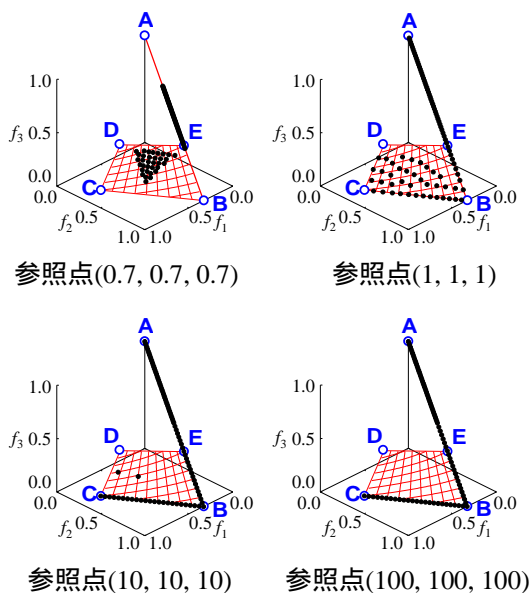


図7 HV を最大化する WFG3 の解分布

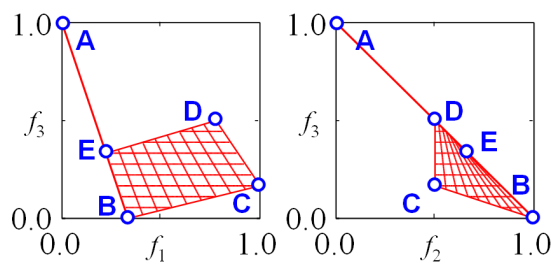


図8 パレートフロントの平面への写像

これは，WFG3 のパレートフロントを2次元平面に写像した時，図8に示すように，辺 AB 上の全ての点，および，辺 BC 上の全ての点が非劣解になるためである．これらの点は，3 目的 WFG 問題のパレートフロントであるだけでなく，一つの目的を取り除いた2 目的 WFG 問題のパレートフロントでもある．このような点の3 目的問題における HV 貢献度は，参照点をパレートフロントから遠ざけることで，単調に増加する．そのため，HV 最大化のために，解分布が辺 AB 上に集中することになる．

(7) IGD を最適化する解集合の解析

IGD に対しても，IGD を最適化する解分布に関する解析を行った．HV に対する解の最適分布のように，参照点の設定による劇的な変化は観察されなかったが，参照点の数を増やすと徐々に最適な解分布の広がりが小さくなることや，均等に分布した無限の参照点を用いた場合では，パレートフロントの境界上の点は，最適分布に含まれないなど，興味深い結果が得られた．

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 2 件)

- [1] H. Ishibuchi, Y. Setoguchi, H. Masuda, and Y. Nojima, "Performance of decomposition-based many-objective algorithms strongly depends on Pareto front shapes," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 21, no.2, pp. 169-190, April 2017. 査読有  
DOI: 10.1109/TEVC.2016.2587749
- [2] H. Ishibuchi, H. Masuda, and Y. Nojima, "Pareto fronts of many-objective degenerate test problems," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 20, no. 5, pp. 807-813, October 2016. 査読有  
DOI: 10.1109/TEVC.2015.2505784

{ 学会発表 } (計 10 件)

- [1] H. Ishibuchi, H. Masuda, and Y. Nojima, "Sensitivity of performance evaluation results by inverted generational distance to reference points," *Proc. of 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1107-1114, Vancouver, Canada, July 24-29, 2016.

- [2] H. Ishibuchi, K. Doi, and Y. Nojima, "Characteristics of many-objective test problems and penalty parameter specification in MOEA/D," *Proc. of 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1115-1122, Vancouver, Canada, July 24-29, 2016.
- [3] Y. Tanigaki, Y. Nojima, and H. Ishibuchi, "Meta-optimization based multi-objective test problem generation using WFG toolkit," *Proc. of 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 2768-2775, Vancouver, Canada, July 24-29, 2016.
- [4] H. Masuda, Y. Nojima, and H. Ishibuchi, "Common properties of scalable multiobjective problems and a new framework of test problems," *Proc. of 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 3011-3018, Vancouver, Canada, July 24-29, 2016.
- [5] H. Ishibuchi, R. Imada, Y. Setoguchi, and Y. Nojima, "Performance comparison of NSGA-II and NSGA-III on various many-objective test problems," *Proc. of 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 3045-3052, Vancouver, Canada, July 24-29, 2016.
- [6] H. Ishibuchi, H. Masuda, and Y. Nojima, "A study on performance evaluation ability of a modified inverted generational distance indicator," *Proc. of Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 695-702, Madrid, Spain, July 11-15, 2015.
- [7] 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, Japan, May 25-28, 2015.
- [8] H. Ishibuchi, H. Masuda, Y. Tanigaki, and Y. Nojima, "Modified distance calculation in generational distance and inverted generational distance," *Proc. of 8th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Part I, pp. 110-125, Guimarães, Portugal, March 29-April 1, 2015.
- [9] 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.
- [10] H. Ishibuchi, H. Masuda, Y. Tanigaki, and Y. Nojima, "Difficulties in specifying reference

points to calculate the inverted generational distance for many-objective optimization problems," *Proc. of 2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision-Making*, pp. 170-177, Orlando, Florida, USA, December 9-12, 2014.

〔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

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

能島 裕介 (NOJIMA YUSUKE)  
今田 諒 (IMADA RYO)  
土井 健 (DOI KEN)  
瀬戸口 悠 (SETOGUCHI YU)  
谷垣 勇輝 (TANIGAKI YUKI)  
増田 広行 (HIROYUKI MASUDA)