

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月5日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20300084

研究課題名（和文） 多数目的最適化問題に対する進化型多目的最適化アルゴリズムの開発と応用

研究課題名（英文） Development and applications of an evolutionary multiobjective optimization algorithm for many-objective problems

研究代表者

石渕 久生（ISHIBUCHI HISAO）

大阪府立大学・工学研究科・教授

研究者番号：60193356

研究成果の概要（和文）：本研究では、互いに競合する多数の評価基準を持つ多数目的最適化問題のパレート最適解を効率的に探索するために、進化型多目的最適化アルゴリズムの性能評価を行った。また、目的関数間の依存性とアルゴリズムの探索挙動との関係を調べた。このような調査結果に基づき、多様性を維持するための交叉方法、性能評価尺度を効率的に計算するための近似手法、効率的な多目的探索を実現するために複数の評価基準統合関数を用いる方法の提案を行った。

研究成果の概要（英文）：In this paper, we examined the ability of evolutionary multiobjective optimization (EMO) algorithms to efficiently search for Pareto-optimal solutions of many-objective problems with a large number of conflicting objectives. We also examined the relation between the search ability of EMO algorithms and the dependency among objectives of many-objective problems. Based on these examinations, we proposed a new crossover operator for diversity maintenance, an approximation method for efficient hypervolume calculation, and the use of multiple scalarizing functions for efficient multiobjective search.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2011年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：計算知能

科研費の分科・細目：情報学，感性情報学・ソフトコンピューティング

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，組合せ最適化，多数目的最適化，収束性，多様性，ナップサック問題

## 1. 研究開始当初の背景

進化型多目的最適化は、進化計算において最も大きな注目を集めている研究分野であり、その有効性が広く認識されている。一般に、多目的最適化問題には、パレート最適解と呼ばれる多数の解が存在する。しかし、単点探索に基づく従来手法では、多数のパレー

ト最適解の中の1個が得られるだけであり、獲得された解が意思決定者の選好を満たしているとは限らない。これに対して、多点探索に基づく進化型多目的最適化手法は、アルゴリズムの1回の実行で多数のパレート最適解を同時に探索できるという優位性を持っている。

進化型多目的最適化の分野では、インドの Deb 教授の NSGA-II とスイスの Zitzler 博士の SPEA2 が幅広く利用されている。しかし、これらのアルゴリズムは、パレート優越関係に基づいているため、多数目的最適化問題に対しては探索能力が低く、多様性維持メカニズムのために意思決定者の直感とは異なる探索挙動を示す。

申請者は、パレート優越関係に基づかない独創性の高い進化型多目的最適化アルゴリズムの開発を独自に続けてきた。今後、パレート優越関係が有効に機能しない多数目的最適化においては、申請者の研究の重要性がさらに高まることが期待される。

## 2. 研究の目的

申請者のこれまでの研究成果を進展させることにより、多数目的最適化問題に対して効率的に多目的探索を行うことができるアルゴリズムの開発を行い、現実問題に対する有効性を明確に示す。

本研究で開発する進化型多目的最適化アルゴリズムの最大の特徴は、パレート優越関係を個体評価に利用しない点にある。このような研究方向は、従来の進化型多目的最適化の枠組みでは少数派であるが、パレート優越関係が機能しない多数目的最適化においては主流派になることが予想される。また、少数のパレート最適解に探索を集中させることも本研究の大きな特徴である。一般に、進化型多目的最適化では、数百個の解が獲得される。しかし、多数目的最適化では、数百個の代替案を意思決定者に提示することは現実的ではなく、数個から十個程度の代替案の提示が望まれる。そのため、本研究では、少数の代表的なパレート最適解に探索を集中させる。

## 3. 研究の方法

上記2の研究目的を達成するために、以下のような方法で研究を実施した。

### (1)進化型多目的最適化の性能調査と改良

NSGA-IIやSPEA2など、従来の多目的最適化アルゴリズムを多数目的最適化問題に適用した場合での問題点を数値実験により詳細に調べる。また、数値実験結果に基づき、改良方法を検討する。

### (2)多数目的最適化に対する従来手法の調査

多数目的最適化問題に対して提案されている従来手法に関する文献調査を行う。さらに、目的関数の数の異なる様々な多数目的最適化問題を用いた数値実験により、従来手法の問題点を明らかにする。

### (3)多目的遺伝的局所探索の性能調査と改良

申請者の研究グループで提案している多目的遺伝的局所探索を多数目的最適化問題に適用し、その有効性を調査する。

### (4)優越領域最大化手法の性能調査と改良

個体間でのパレート優越関係に基づかない進化型多目的最適化アルゴリズムとして提案されている「優越領域最大化手法」の性能調査を行い、その改良方法を検討する。

### (5)スカラー化関数手法の性能調査と改良

多数の目的を統合するスカラー化関数に基づく進化型多目的最適化アルゴリズムの性能調査を行い、その改良方法を検討する。

### (6)問題の性質と探索性能の関係の調査

多数目的最適化問題の性質と個々の進化型多目的最適化アルゴリズムの探索性能との関係を調査する。特に、複数の目的間に依存性が存在する場合に対して、依存性の強さと探索性能との関係を調査する。

### (7)現実世界の問題への適用

進化型多目的最適化アルゴリズムをファジィ識別器の多目的設計問題に適用し、その有用性を調査する。

### (8)新しい研究方向の模索と提案

多数目的最適化に関する新しい研究方向を模索し、新しい研究テーマを切り拓く。

## 4. 研究成果

上記3の研究方法に従って研究を行い、以下のような研究成果を得た。

### (1)進化型多目的最適化の性能調査と改良

従来の多目的最適化アルゴリズムを多数目的最適化問題に適用した場合、目的関数空間において、パレートフロントへの収束性が大きく悪化することは広く知られている。本研究では、収束性が大きく悪化するだけではなく、多様性も不十分であることを数値実験により明確に示した。このような数値実験結果に基づき、多様性を増加させるための交叉方法を提案し、2目的問題や3目的問題だけではなく、目的数が3よりも多い多数目的問題に対しても有効であることを明確にした。この研究成果を、進化計算の分野で最も権威があり、インパクトファクターが4を超えているIEEE論文誌で発表した (H. Ishibuchi et al.: Diversity improvement by non-geometric binary crossover in evolutionary multiobjective optimization, IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2010)。

### (2)多数目的最適化に対する従来手法の調査

多数目的最適化問題に対して提案されている進化型多目的最適化アルゴリズムの改良方法に関する文献調査を行った。また、数値実験により、「収束性の大幅な悪化を防ぐために提案されている改良手法は多様性を大幅に低下させる」という問題点を持つことを明らかにした。このような文献調査結果および数値実験結果をCECやGECCOなど進化計算分野の主要国際会議で発表した。特に、CEC 2008で発表した論文は、Google Scholarによる被引用回数が90回を超えており、国際

的に大きなインパクトを与えた (H. Ishibuchi et al.: Evolutionary many-objective optimization: A short review, Proc. of CEC 2008).

(3)多目的遺伝的局所探索の性能調査と改良

多数目的最適化問題に申請者の研究グループで提案している多目的遺伝的局所探索を適用し、性能評価を行った。数値実験により、多目的遺伝的局所探索の探索性能に関して、進化型多目的最適化アルゴリズムと比較すると収束性の低下が少ないだけでなく、多様性も十分に保たれていることを示した。また、数値実験結果に基づき、局所探索を適用する個体の選択方法および局所探索における候補解の選択方法の改良方法を提案した。

(4)優越領域最大化手法の性能調査と改良

Hypervolumeを用いた優越領域最大化手法であるSMS-EMOAの性能を調査した。性能調査の結果、Hypervolumeの計算時間が目的数の増加と共に爆発的に増加することを確認した。このような数値実験結果に基づき、複数のスカラー化関数を用いてHypervolumeを近似する方法を提案し、システム制御情報学会論文賞を受賞した (塚本・坂根・能島・石淵: 進化型多数目的最適化に対するスカラー化関数を用いたHypervolumeの近似手法の提案, システム制御情報学会論文誌, 2009)。

また、獲得された非常に多数の非劣解から選好解を選択するという意思決定者の負担を軽減するために、獲得される非劣解の数の最小化とHypervolumeの最大化というメタレベルでの2目的最適化問題を提案し、非劣解の数とHypervolumeの間でのトレードオフ関係を明らかにした。このような研究成果を国際会議で発表し、Best Paper Awardを受賞した

(H. Ishibuchi et al.: Selecting a small number of representative non-dominated solutions by a hypervolume-based solution selection approach, Proc. of FUZZ-IEEE 2009)。

(5)スカラー化関数手法の性能調査と改良

スカラー化関数に基づく進化型多目的最適化アルゴリズムであるMOEA/Dの性能調査を行った。様々な条件での多様な数値実験を行うことで、MOEA/Dでは、目的関数の数や個体群サイズに応じて適切なスカラー化関数を用いる必要があることを明らかにした。このような問題点を解決するために、多目的探索を行うと同時に適切なスカラー化関数を選択する手法や異なる種類のスカラー化関数を同時に用いる手法を提案し、進化型多目的最適化専門の国際会議であるEMOや進化計算分野の主要国際会議GECCOなどで研究成果を発表した。特に、複数のスカラー化関数を同時に用いる方法では、適切なスカラー化関数を用いる場合よりも高い探索能力を持つことを明らかにした。

(6)問題の性質と探索性能の間の関係の調査

一般に、NSGA-IIやSPEA2など個体間の優

越関係に基づく進化型多目的最適化アルゴリズムの探索能力は、目的関数の数が増加すると急激に悪化する。しかし、目的関数間で依存性が高い場合、すなわち、目的関数間での競合が少ない場合では、目的関数の数が増えても探索能力の悪化が少ないことを明らかにした。これは、特殊な状況での多目的探索挙動の調査であるが、多目的最適化アルゴリズムの興味深い性質と考えられる。このような研究成果を進化型多目的最適化専門の国際会議であるEMOや進化計算分野の主要国際会議GECCOなどで発表した。

(7)現実世界の問題への適用

進化型多目的最適化アルゴリズムをファジィ識別器の多目的設計問題に適用し、その有用性を調査した。また、数値実験結果に基づき、識別能力最大化に重点を置いた多目的探索の必要性を示した。さらに、目的関数空間の座標軸を回転させることで、識別能力最大化に重点を置いた多目的探索が可能になることを示した。このような研究成果をSoft Computing誌で発表した。一方、様々な施設からの距離を最小化する立地探索問題への進化型多目的最適化アルゴリズムの適用も行った。この研究成果は、進化計算分野の主要国際会議GECCOで発表した。

(8)新しい研究方向の模索と提案

多数目的最適化では、目的関数空間が高次元空間となるため、目的関数空間内で多目的進化を視覚的に調査することができない。そこで、決定変数空間を2次元に限定し、2次元空間内で多目的進化を視覚的に調査するという研究方向を提案した。さらに、2次元決定変数空間を用いることで、決定変数空間での多様性を視覚的に調査できることも示した。これは、多数目的最適化に対して新しい観点を提供するものである。

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12件)

- ① H. Ishibuchi, Y. Nakashima, and Y. Nojima, "Performance evaluation of evolutionary multiobjective optimization algorithms for multiobjective fuzzy genetics-based machine learning," *Soft Computing*, vol. 15, no. 12, pp. 2415-2434, 2011. 査読有
- ② H. Ishibuchi, Y. Sakane, N. Tsukamoto, and Y. Nojima, "Implementation of cellular genetic algorithms with two neighborhood structures for single-objective and multi-objective optimization," *Soft Computing*, vol. 15, no. 9, pp. 1749-1767, 2011. 査読有
- ③ H. Ishibuchi, N. Tsukamoto, and Y. Nojima, "Diversity improvement by non-geometric

binary crossover in evolutionary multiobjective optimization,” *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 14, no. 6, pp. 985-998, 2010. 査読有

- ④ 一柳徳宏, 若松良彦, 能島裕介, 石淵久生: 多目的遺伝的局所探索アルゴリズムにおける局所探索適用個体の選択, システム制御情報学会論文誌, vol. 23, no. 8, pp. 178-187, 2010. 査読有
- ⑤ 塚本実孝, 坂根悠治, 能島裕介, 石淵久生: Indicatorに基づく進化型多目的最適化アルゴリズムへの Hypervolume 近似手法の適用, システム制御情報学会論文誌, vol. 23, no. 8, pp. 165-177, 2010. 査読有
- ⑥ 塚本実孝, 坂根悠治, 能島裕介, 石淵久生: 進化型多数目的最適化に対するスカラー化関数を用いた Hypervolume の近似手法の提案, システム制御情報学会論文誌, vol. 22, no. 11, pp. 385-395, 2009. 査読有
- ⑦ 塚本実孝, 能島裕介, 石淵久生: 多数目的最適化問題における進化型多目的最適化アルゴリズムの問題点とその改良手法に関する考察, システム制御情報学会論文誌, vol. 22, no. 6, pp. 220-228, 2009. 査読有
- ⑧ H. Ishibuchi, Y. Hitotsuyanagi, N. Tsukamoto, and Y. Nojima, “Use of biased neighborhood structures in multiobjective memetic algorithms,” *Soft Computing*, vol. 13, no. 8-9, pp. 795-810, 2009. 査読有

[学会発表] (計45件)

- ① H. Ishibuchi, N. Akedo, and Y. Nojima: A many-objective test problem for visually examining diversity maintenance behavior in a decision space, Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2011), 2011年7月14日, アイルランド ダブリン市
- ② H. Ishibuchi, N. Akedo, H. Ohyanagi, and Y. Nojima: Behavior of EMO algorithms on many-objective optimization problems with correlated objectives, 2011 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2011), 2011年6月7日, 米国ニューオーリンズ市
- ③ H. Ishibuchi, Y. Hitotsuyanagi, H. Ohyanagi, and Y. Nojima: Effects of the existence of highly correlated objectives on the behavior of MOEA/D, Sixth International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO 2011), 2011年4月6日, ブラジル オオーロ・プレット市
- ④ H. Ishibuchi, Y. Sakane, N. Tsukamoto, and Y. Nojima: Simultaneous use of different scalarizing functions in MOEA/D, Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2010), 2010年7月11日, 米国ポートランド市
- ⑤ H. Ishibuchi, N. Tsukamoto, Y. Sakane, and Y. Nojima: Indicator-based evolutionary algorithm with hypervolume approximation by achievement scalarizing functions, Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2010), 2010年7月11日, 米国ポートランド市
- ⑥ H. Ishibuchi, Y. Sakane, N. Tsukamoto, and Y. Nojima: Selecting a small number of representative non-dominated solutions by a hypervolume-based solution selection approach, IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2009), 2009年8月23日, 韓国済州島
- ⑦ H. Ishibuchi, N. Tsukamoto, Y. Hitotsuyanagi, and Y. Nojima: Effectiveness of scalability improvement attempts on the performance of NSGA-II for many-objective problems, Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2008), 2008年7月14日, 米国アトランタ市
- ⑧ H. Ishibuchi, N. Tsukamoto, Y. Sakane, and Y. Nojima: Evolutionary many-objective optimization: A short review, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2008), 2008年6月5日, 中国香港

[図書] (計3件)

- ① F. Neri, C. Cotta, and P. Moscato 編: *Handbook of Memetic Algorithms*, Springer, Berlin (2011). 担当部分: A. Jaszkievicz, H. Ishibuchi, and Q. Zhang: Multiobjective Memetic Algorithms, pp. 201-217.
- ② C. L. Mumford and L. C. Jain 編: *Computational Intelligence: Collaboration, Fusion and Emergence*, Springer, Berlin (2009). 担当部分: H. Ishibuchi and Y. Nojima: Multiobjective Genetic Fuzzy Systems, pp. 131-173.
- ③ C. K. Goh, Y. S. Ong, and K. C. Tan 編: *Multi-Objective Memetic Algorithms*, Springer, Berlin (2009). 担当部分: H. Ishibuchi, Y. Hitotsuyanagi, N. Tsukamoto, and Y. Nojima: Implementation of Multiobjective Memetic Algorithms for Combinatorial Optimization Problems: A Knapsack Problem Case Study, pp. 27-49.

## 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