

機関番号：12612

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009年度～2010年度

課題番号：21800021

研究課題名（和文） 多数目的最適化に有効な進化型アルゴリズムの開発

研究課題名（英文） Development of effective evolutionary algorithms for many-objective optimization

研究代表者

佐藤 寛之 (SATO HIROYUKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：60550978

研究成果の概要（和文）：

本研究では、4 つ以上の目的関数を同時に最適化する多数目的最適化問題に有効な進化型アルゴリズム(MOEA)の開発を目的として、精緻に解の優劣を決定するためにパレート支配を部分的に適用する方法と、解の支配領域を自己決定する方法、さらに解探索を促進するために交叉による遺伝子変化量を抑制する方法を開発した。テスト問題を用いた性能検証実験によって、開発したアルゴリズムが多数目的最適化問題における MOEA の解探索性能を著しく改善することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

To develop effective multi-objective evolutionary algorithms (MOEAs) for many-objective optimization problems which optimize more than four objective functions simultaneously, in this work we have developed a novel MOEA partially applying Pareto dominance and a method to self-control the dominance area of solutions. Also, to encourage the solutions search in many-objectives problems, we have developed a method of crossover controlling the number of crossed genes. The result of performance verification using benchmark problems revealed that proposed methods significantly improve the search performance of MOEA on many-objective optimization problems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010年度	940,000	282,000	1,222,000
総計	2,020,000	606,000	2,626,000

研究分野：多目的進化型アルゴリズム

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：多数目的最適化, 多目的最適化, 進化型アルゴリズム

## 1. 研究開始当初の背景

近年、多目的最適化問題の解法として、生物進化の過程をモデル化して構築された進化型アルゴリズム(EA)を用いる、多目的進化型アルゴリズム(MOEA)の研究が国内外で鋭意進められている。EAは解集団を用いる多点

探索を実現するため、一度の探索で目的関数間のトレードオフをなすパレート最適解集合(POS)を求めることができる点で多目的最適化問題の有用な解法手段である。MOEAの代表的手法として、解を選択する際に支配関係(複数次元の目的関数空間における優越関

係)を利用する NSGA-II, SPEA2 などのアルゴリズムが提唱され, その有用性が報告されてきた. MOEA の応用例としては, 音速航空機の翼設計において音速と亜音速航行時の抗力などを最小化する形状最適化や, ディーゼルエンジンにおいて燃費, 窒素酸化物とススの排出量を最小化する燃料噴射スケジューリングなどが挙げられ, 世界中で工学的応用が盛んに行われている. 近年, MOEA の研究分野では, 目的数の増加に伴い解の支配関係を用いる MOEA の POS 探索性能が顕著に低下する問題が共通の課題として取り上げられ, 多数目的最適化問題 (Many-objective optimization Problem: MaOP) に有効なアルゴリズムの開発と実社会問題への応用が望まれている.

## 2. 研究の目的

本研究では, 多数目的最適化に有効な進化的アルゴリズムを開発することを目的とする. 進化的アルゴリズムによる多目的最適化は, これまで目的数が比較的少ない 2, 3 目的最適化について多数の成果が報告されてきた. しかし, 実社会ではさらに多くの目的関数を同時に最適化する要求が高まっており, 時代の趨勢は多目的最適化から多数目的最適化に急速にパラダイムシフトしている. 多数目的最適化に効果的な進化的アルゴリズムはいまだ世界中で研究段階にあり, 本研究によって実用性の高いアルゴリズムの実現を目指す.

## 3. 研究の方法

本研究では, MaOP における MOEA の解探索性能を改善するために, パレート支配の概念を拡張して精緻な解のランキングを構築するパレート部分支配を用いる MOEA, パラメータを用いずに解の支配領域を自己決定する方法, さらに MaOP における解探索を促進する交叉遺伝子量の制御法を開発した.

### (1) パレート部分支配を用いる MOEA

最適化する目的数が増加すると, 解集団内の多くの解が互いに支配されない関係になり, 解の優劣決定が困難になる. その結果, 親選択のために十分な選択圧が得られない問題が生じる. この問題を解決するためには, EA の親選択において解の優劣をより明確に決定する必要がある. 従来の MOEA では,  $m$  個全ての目的関数を同時に考慮して解の支配関係を算出するが, 提案アルゴリズムは,  $m$  個の目的関数の中から取り出した  $r (< m)$  個の目的関数に対してパレート支配を部分的に適用した親選択を行う. さらに,  $r$  個の目的関数を何世代かごとに時間的に変更することによって, 最終的に全目的関数を最適化するアルゴリズムを実現する.

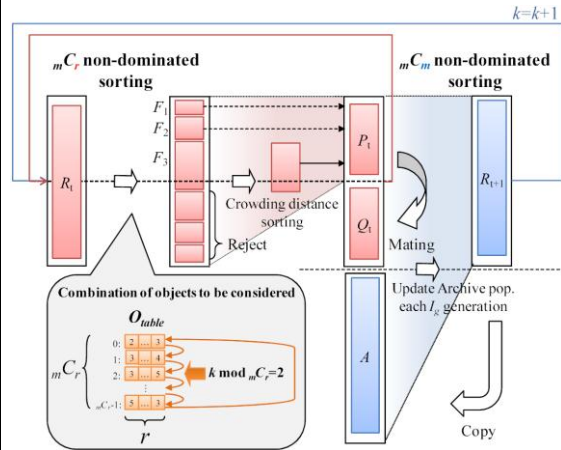


図 1: パレート部分支配を用いる MOEA

開発したパレート部分支配を用いる MOEA (Pareto partial dominance MOEA: PPD-MOEA) のブロック図を図 1 に示す. PPD-MOEA は, 代表的な MOEA であるパレート支配を用いる NSGA-II をベースに, これにパレート部分支配を適用できるように拡張してアルゴリズムを設計した. PPD-MOEA では, 部分支配で考慮する目的関数の数  $r$  とその組合せを変更する世代数  $I_g$  をパラメータとする. 解探索開始前に, 解が有するすべて ( $m$  個) の評価値から,  $r$  個を選択するための  $mC_r$  通りの組み合わせをすべてリストした  $O_{table}$  を生成する. 解探索を開始したら, 目的関数の組み合わせを  $O_{table}$  の先頭から一つ選び, 選択した  $r$  個の目的関数の組み合わせによる非支配ソーティングによりフロントを算出, 親個体集団  $P_t$  の選択に反映させる.  $I_g$  世代ごとに, 考慮する目的関数の組合せを  $O_{table}$  にリストされた次の組み合わせへと順次変更していく. また, 目的関数の組み合わせの変更と同時に, POS を保存しておくアーカイブ解集団  $A$  を更新する. PPD-MOEA では,  $P_t \cup Q_t$  と  $A$  に対して,  $m$  個すべての評価値を考慮した非支配ソーティングにより,  $P_{t+1}$  を選び出し, アーカイブ解集団  $A$  へコピーする.

### (2) 解の支配領域の自己制御法

解の支配領域制御法 (CDAS 法) はパレート支配の概念を拡張 (緩和) し, パラメータ  $S$  によって解の支配領域を制御することにより, 適切な解のランキングを実現する. MaOP においては,  $S < 0.5$  によって解の支配領域を拡大し, 従来よりも精緻な解のランキングを促すことによって解探索性能が著しく改善することが確認されている. しかしながら従来の CDAS 法は, 適切な支配領域の制御パラメータ  $S$  を実験的に見出さなければならない点や,  $S < 0.5$  に設定した場合に解集団の収束性が改善する一方で多様性が低下する点に問題がある. このような観点から従来の CDAS 法が

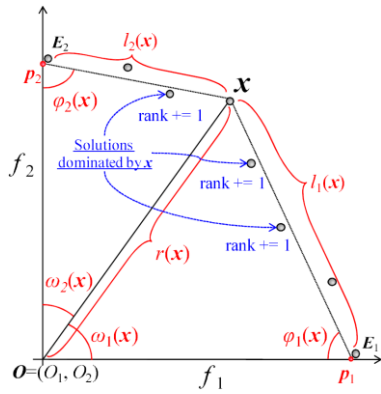


図 2 : 解の支配領域の自己制御法 (S-CDAS)

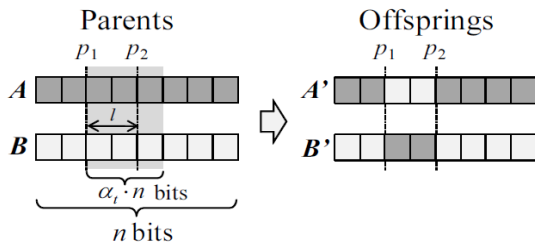


図 3 : 二点交叉の遺伝子長制御 (CCG<sub>TX</sub>)

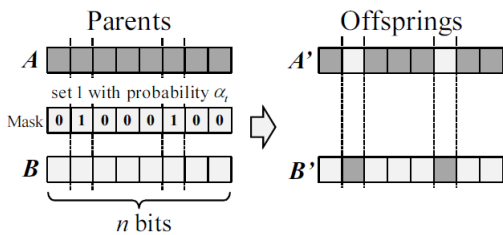


図 4 : 一様交叉の遺伝子長制御 (CCG<sub>UX</sub>)

有する問題を解決して、MaOP において得られる POS の収束性と多様性のバランスが良い解探索能力を実現するために、本研究では CDAS の一改良法である S-CDAS (Self-controlling dominance area of solutions) を開発した。

S-CDAS は、外部パラメータを用いることなく支配領域を個体ごと適応的に決定する。S-CDAS を用いた場合のある解  $x$  の支配領域について図 2 に示す。各目的関数の最大値を持つ解  $E$  を支配しないように支配領域を一意に決定し、解集団の多様性を維持しながら収束性が高い解を優先的に親として選択する。S-CDAS では、アルゴリズムが解の支配領域を自動的に自己制御するため、アルゴリズムの実行時にパラメータ  $S$  の設定が不要になる利点がある。

### (3) 交叉する遺伝子量の制御法

上記 (1), (2) の検討の中で、求めるべき POS が目的関数の数の増加に伴って、解空間中に広範に分布することが明らかになった。解空間を広域に満遍なく探索する場合、解集団中

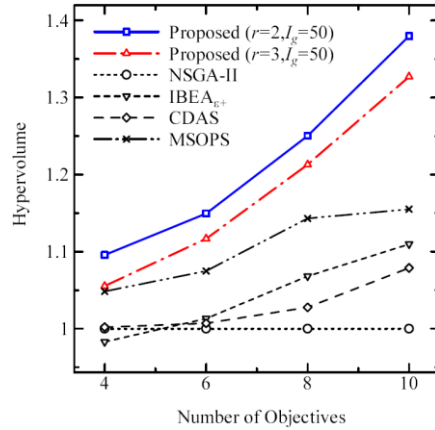


図 5 : PPD-MOEA の解探索性能

の遺伝子が多様化し、従来の遺伝的操作法の有効性が低下する。遺伝子構造が著しく乖離した解に対して従来の交叉法を適用すると、親が有する遺伝子構造を大きく破壊した子個体が生成されるためである。そこで、多数目的最適化を促進する遺伝的操作法を実現する目的から、交叉する遺伝子量を制御する方法 (Controlling the number of Crossed Genes: CCG) を開発した。従来の二点交叉を拡張して遺伝子変化量を制御する CCG<sub>TX</sub> について図 3 に示す。CCG<sub>TX</sub> は遺伝子長  $n$  の親個体  $A, B$  に対して、パラメータ  $\alpha_i$  を用いて交叉する遺伝子の最大長を  $\alpha_i \cdot n$  に制御する。 $\alpha_i$  に小さな値を選ぶことによって、親の遺伝子構造を子個体に多く残すことが可能になる。同様に従来の一様交叉を拡張して遺伝子変化量を制御する CCG<sub>UX</sub> を図 4 に示す。交叉する遺伝子座を示すマスクビット 1 をパラメータ  $\alpha_u$  で制御することによって、遺伝子変化量を制御可能とする。

PPD-MOEA, S-CDAS, CCG の多数目的最適化問題における解探索性能を検証するために、本研究では 4~10 目的の多数目的 0/1 ナップザック問題を用いたシミュレーション実験を行う。

## 4. 研究成果

### (1) パレート部分支配を用いる MOEA

多数目的ナップザック問題における PPD-MOEA の解探索性能について、得られた POS の Hypervolume 値 (POS が目的関数空間に構成する  $m$  次元体積) を図 5 に示す。Hypervolume は値が高いほど解探索性能が良いと判断する。ここで、代表的な MOEA である NSGA-II, IBEA<sub>+</sub>, CDAS, MSOPS の結果も合わせてプロットしている。この結果から、部分支配で考慮する目的関数の  $r$  数、目的関数の組み合わせを変更する世代間隔  $I_g$  に適切な値を設定することによって、従来の NSGA-II, IBEA<sub>+</sub>, CDAS, MSOPS と比較して、PPD-MOEA は高い解探索性能を実現すること

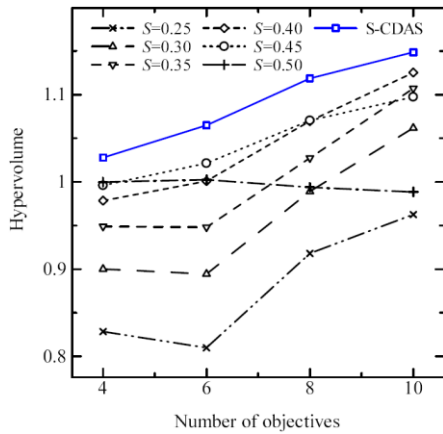


図 6: S-CDAS の解探索性能

が確かめられた。またその効果は、目的数の増加にともなって顕著になることがわかった。PPD-MOEA によって獲得された POS は、高い多様性を実現し、同時に解集団の収束性も改善されることから、最適なパレートフロントへの収束性と多様性の両面でバランスの良い解探索を実現できることがわかった。さらに、PPD-MOEA によって、計算時間も従来の MOEA と比較して削減可能であることが明らかになった。

さらに、解探索中に獲得した POS に対して、解の支配領域を拡大した CDAS によってアーカイブする解を取捨選択する方法を開発した。これにより、より最適なパレートフロントに対する収束性が高いアーカイブ集団から、パレート部分支配による親選択を繰り返すことによって、さらに解探索性能が改善されることがわかった。

## (2) 解の支配領域の自己制御法

パラメータ  $S$  を変化させた場合の従来の CDAS 法と本研究で開発した S-CDAS 法の解探索性能について、得られた Hypervolume 値を比較した結果を図 6 に示す。この結果から、すべての目的数について S-CDAS は、いずれの  $S$  を設定した CDAS 法より高い解探索性能を実現できることが確かめられた。S-CDAS では各目的関数の最大値を有する解を支配しない範囲で、それぞれの解の支配領域を自己制御することにより、CDAS からパラメータを排除すると同時に、最適なパレートフロントに対する高い収束性と多様性を同時に満足し、その結果、従来の CDAS より高い解探索性能を実現することに成功したといえる。

## (3) 交叉する遺伝子量の制御法

二点交叉の拡張である CCG<sub>TX</sub> において、交叉する遺伝子量を制御するパラメータ  $\alpha_i$  を変化させた場合の Hypervolume 値について図 7 に示す。 $\alpha_i=1.0$  のとき、従来の二点交叉と等価である。 $\alpha_i$  を減少させることによって交

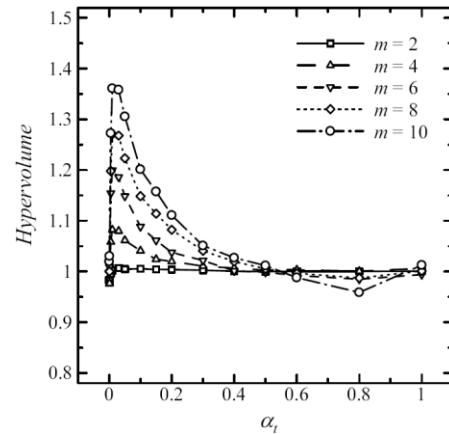


図 7: CCG<sub>TX</sub> の解探索性能

又する最大遺伝子長が短くなる。この結果より、 $\alpha_i$  を小さくして交叉する遺伝子長を制限した場合に解探索性能が著しく改善することがわかる。またその効果は、目的数  $m$  が増加するに伴って顕著になることがわかった。すなわち、多数目的最適化では交叉する遺伝子量を極めて小さく設定し、親の遺伝子構造を破壊しにくい遺伝的操作法が有効であることがわかった。

本研究で開発した PPD-MOEA, S-CDAS によって、目的数が増加した場合であっても、従来法より高い解探索性能を実現する MOEA を実現することができた。さらに多数目的最適化問題においては、親個体の選択方法だけでなく CCG のような遺伝的操作法が解探索性能を著しく改善することが確かめられた。従来の MOEA は、最適化する目的数が 4 以上になると、著しく最適化性能が低下するため、工学的応用範囲が限られていた。本研究で開発したアルゴリズムによって、MOEA の応用範囲の拡大が期待される。

## 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 2 件)

- ① 佐藤 寛之, エルナン・アギレ, 田中 清, “多数目的 0/1 ナップザック問題における部分支配を時間的に切り替える MOEA の効果”, 人工知能学会論文誌, 25 巻 2 号 SP-G, pp. 320-311, 2010, 査読有り
- ② 佐藤 寛之, エルナン・アギレ, 田中 清, “解の支配領域の自己制御による進化型多数目的最適化: 多数目的 0/1 ナップザック問題における性能検証と挙動解析”, 進化計算学会論文誌, Vol. 1, No. 1, pp. 32-42, 2010, 査読有り

[学会発表] (計 3 5 件)

- ① Sato, H., “Genetic Diversity and

- Effective Crossover in Evolutionary Many-objective Optimization”, 5th Learning and Intelligent Optimization (LION 5), イタリア ローマ, 2011年1月19日
- ② 佐藤 寛之, “多数目的最適化における変数空間の解析と遺伝的操作の検討”, 進化計算研究会 進化計算シンポジウム 2010, 福岡県糟屋郡久山町 レイクサイドホテル久山, 2010年12月18日
- ③ Sato, H., “Self-Controlling Dominance Area of Solutions in Evolutionary Many-objective Optimization”, 8th International Conference on Simulated Evolution and Learning (SEAL2010), インド カンパール, 2010年12月2日
- ④ Sato, H., “A Many-objective Evolutionary Self-Controlling Dominance Area of Solutions”, IEEE Session in the IEICE Shin-etsu Section Conference, 新潟県長岡市 長岡技術科学大学, 2010年10月2日
- ⑤ 佐藤 寛之, “部分支配を用いる MOEA におけるアーカイブ戦略と効果”, 平成 22 年度電子情報通信学会信越支部大会, 新潟県長岡市 長岡技術科学大学, 2010年10月2日
- ⑥ 佐藤 寛之, “MOEA による多数目的最適化における遺伝子情報の解析と操作に関する検討”, 平成 22 年度電子情報通信学会信越支部大会, 新潟県長岡市 長岡技術科学大学, 2010年10月2日
- ⑦ Sato, H., “A Study on Interval to Switch Combination of Objectives Considered in Pareto Partial Dominance MOEA”, 2010 World Automation Congress (WAC 2010), 兵庫県神戸市 神戸コンベンションセンター, 2010年9月20日
- ⑧ Sato, H., “A Study on Archiving Strategy in Partial Dominance MOEA”, 2010 International Symposium on Intelligent Systems (iFAN 2010), 東京都八王子市 首都大学東京, 2010年9月25日
- ⑨ Sato, H., “Pareto Partial Dominance MOEA and Hybrid Archiving Strategy Included CDAS in Many-Objective Optimization”, 2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2010), スペイン バルセロナ, 2010年7月20日
- ⑩ 佐藤 寛之, “解の支配領域を自己制御可能な CDAS 法に関する一検討”, 人工知能学会 第4回進化計算フロンティア研究会, 東京都目黒区 東京工業大学 大岡

- 山キャンパス, 2010年6月5日
- ⑪ 佐藤 寛之, “パレート部分支配を用いる MOEA の多数目的最適化における効果の検討”, 進化計算研究会 進化計算シンポジウム 2009, pp.31-38, 沖縄県那覇市かんぼの宿那覇レクセンター, 2009年12月19日
- ⑫ Sato, H., “Pareto Partial Dominance MOEA in Many-Objective Optimization”, 2009 AI\*IA Workshop on Complexity, Evolution and Emergent Intelligence, イタリア レッジョ・エミリア, 2009年12月12日
- ⑬ 佐藤 寛之, “部分支配を用いる多目的進化型アルゴリズムの検討(その1) - 部分支配によるフロント分布の推移の調査 -”, 平成 21 年度電子情報通信学会信越支部大会, 長野県長野市 信州大学工学部, 2009年10月3日
- ⑭ 佐藤 寛之, “部分支配を用いる多目的進化型アルゴリズムの検討(その2) - 多数目的最適化問題における効果の検証 -”, 平成 21 年度電子情報通信学会信越支部大会, 長野県長野市 信州大学工学部, 2009年10月3日
- ⑮ 佐藤 寛之, “多目的進化型アルゴリズムにおける支配の拡張と効果”, 人工知能学会 第一回進化計算フロンティア研究会, 東京都目黒区 東京工業大学大岡山キャンパス, 2009年5月29日

[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]

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 寛之 (SATO HIROYUKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号: 60550978

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし