

令和 4 年 6 月 30 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20346

研究課題名（和文）解の制約許容量を活用する進化計算による制約付き多目的最適化

研究課題名（英文）Evolutionary Constrained Multiobjective Optimization Utilizing Constraint Satisfaction Values of Solutions

研究代表者

宮川 みなみ（Miyakawa, Minami）

信州大学・学術研究院工学系・助教

研究者番号：40793964

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）：制約付き多目的最適化問題の進化計算による解法において、探索中の解集団からより多くの情報を引き出して利用することによって解探索性能を高めるため、本研究では制約条件を充足した場合の制約を違反するまでの余裕を新たに制約許容量として評価し活用する方法について検討した。ここでは制約の境界に最適解が存在する問題に注目し、探索中の解集団から各制約の違反量と許容量とのバランスを考慮し制約境界に子（解）を生成しやすくするための交配解ペアの選択法を提案してその有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの進化計算では、解探索中に生成された制約違反解は最終的に解として認められないため、制約充足解よりも解探索に用いられにくい。しかし、現実世界の多目的最適化問題では制約条件が多数設定されることが多く、また、制約境界に近づくほど目的が最適化される傾向があるため、解探索中には多数の制約違反解が生成される。そのため、制約違反解の活用による解探索の効率化は実応用に向けて重要な検討である。また、本研究で提案する制約許容量は制約違反解の活用手段をさらに増やすことが期待される。

研究成果の概要（英文）：To improve the search performance of evolutionary computation for solving constrained multi-objective optimization problems, it is important to elicit more information from candidate solutions and utilize it during the solutions search. This study newly introduced “constraint satisfaction values” evaluating how a solution is far from the boundary of a constraint when the solution satisfies the constraint. To utilize the values, this study focused on problems that the pareto optimal solutions are on a boundary of the constraints, and a mating method selecting a pair of parent solutions balancing the constraint violation value and constraint satisfaction value of solutions on the constraints is proposed and verified the effectiveness.

研究分野：進化計算

キーワード：進化計算 制約付き多目的最適化 制約許容量

1. 研究開始当初の背景

ひとつ以上の制約条件のもとで、複数の目的を同時に最適化する制約付き多目的最適化問題の解法のひとつである進化計算は、多点探索型のメタヒューリスティクスであり、一度の探索でパレート最適解集合の近似解集合を獲得可能であり、また、問題の特性に対する汎用性の高さから注目されている。進化計算では、ランダム生成した解集団から最適性の高い解を親としていくつか選択し、それらに交叉・突然変異といった遺伝的操作を加えて新たな解を生成して解集団を更新していくことを繰り返しながら確率的に解探索する。ここで解の最適性を高めるためには、膨大な数の解の生成・評価を繰り返す必要がある。しかし、実問題では、解の評価に時間がかかるシミュレーションを要することが少なくない。そのため、生成・評価した解を無駄にせず解が有する目的関数値、制約関数値、設計変数値といったあらゆる情報を十分に活用してより良い解を生成しやすくすることが重要である。また、実問題は多数の制約条件を含む場合が多く、解探索中に制約違反解が多く生成されやすいため、制約違反解の生成抑制や解探索への有効利用が求められる。これまでの研究代表者による研究において、従来法では解探索に利用されにくい制約違反解の中には制約充足解よりも目的関数値が良いものがあることに着目し、これらを解探索の手がかりとして積極的に活用することによって格段に短い時間で最適化できるだけでなく、制約充足解のみによる解探索では得られない良好な解を獲得できることがわかってきた。制約違反解には、最適化をさらに促進できる有益な情報が潜在していると考えられる。

2. 研究の目的

進化計算による制約付き多目的最適化問題の解探索性能向上のため、本研究では、解の制約条件に対する評価指標としてこれまで用いてきた制約違反量に加え、新たに制約許容量の概念を導入・活用することで最適化を促進する方法論を構築する。制約違反量は、制約条件をどれだけ超えているかを定量的に表す。そのため、制約条件を満たす場合、制約違反量はゼロであり制約条件までどれだけ余裕があるかはわからない。そこで本研究では、制約条件までの余裕を制約許容量として定量的に表して利用する。制約許容量に注目することで、制約条件に対して解をより精緻に評価できるようになり、これが制約違反解の活用手段を拡大させる。

3. 研究の方法

解の制約許容量を解探索に活用する方法を構築するため、以下の手順で研究を行った。また、本研究ではまず離散問題であり最適解がいずれかの制約の境界付近に存在する多目的ナップザック問題に焦点を当てて研究を行った。

- (1) 制約許容量を定義
- (2) 多目的ナップザック問題を2目的2制約20変数に設定し、全探索により全解集合と最適解集合の制約許容量と制約違反量について調査
- (3) 制約許容量を活用する解の交配法構築のため、複数の交配ペア評価法を作成しその解探索への効果検証と解析

4. 研究成果

(1) 制約許容量の定義

制約条件を $g_i(x) \leq 0$ とするとき、解 x の制約違反量 $v_i(x)$ は従来通り $g_i(x) \leq 0$ のとき $v_i(x) = 0$ 、 $g_i(x) > 0$ のとき $v_i(x) = g_i(x)$ であり、制約許容量 $s_i(x)$ は $g_i(x) \leq 0$ のとき $s_i(x) = -g_i(x)$ 、 $g_i(x) > 0$ のとき $s_i(x) = 0$ として定義する。図1(a)に2制約の制約違反量空間に制約充足解と制約違反量をプロットした場合の例を示す。このように制約について解を制約違反量のみで評価する場合、制約充足解はすべて原点にプロットされまったく差がみられないことがわかる。また、制約違反解もひとつの制約は満たすものは座標軸上にプロットされることがわかる。ここで、

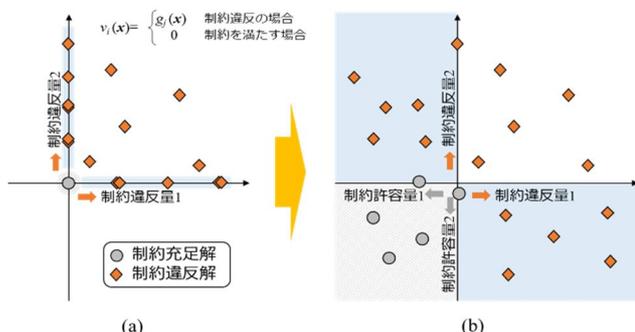


図1 制約空間上の解分布

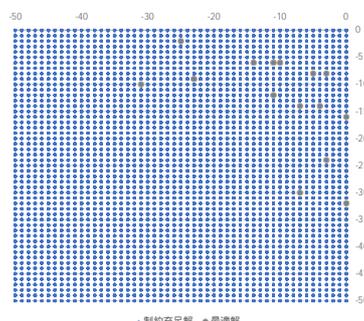


図2 多目的KPにおける解分布

これらの解を単に制約空間にプロットした場合を図1 (b)に示す．このように，制約充足解はそれぞれ異なる制約関数値を有しているにもかかわらず，制約違反量のみではこれらの情報が失われていることがわかる．また，制約違反解についても，(a)において座標軸上の同じ点にプロットされて差異がないと判断される解も，満たしている制約についての情報が異なるため(b)では異なる位置にプロットされ，制約について特徴の異なる解として判断することができる．このようにこれまで失われていた情報を制約許容量としてきちんと評価し活用することによって，効率的に制約条件を充足させながら最適化するための新たな探索手法の創出につながると考えられる．

(2) 多目的ナップザック問題における最適解の制約許容量の調査

現実世界の多目的最適化問題では，解は制約境界に近づくほど目的が最適化される傾向がある．ナップザック問題 (KP, Knapsack Problems) は最適解に対して選択していないアイテムを一つ足すことによって目的関数値が高まるが必ずいずれかの制約を違反してしまうため同様の性質を持つ問題と考えられる．確認のために，20変数の2目的2制約実行可能率0.1, 0.3, 0.5の場合の問題を生成し，解を全探索してそれぞれの解の制約違反量と許容量，特に最適解の制約許容量について調べた．制約関数を $g_i(x) = (\text{選択したアイテムの重量}i\text{の合計}) - (\text{ナップザック}i\text{の重量上限}) \leq 0$ としたときの制約充足解と最適解の制約空間へのプロットを図2に示す．ここで，実行可能率は0.5の結果をプロットしている．また，制約空間は一部に焦点を当てており，実際は(-572,-519)まで解が分布している．なお，最適解はすべて図中にプロットされている．まず，制約充足解をこれまで制約について制約違反量のみで評価していたためすべて差異のない解であったが，このように制約許容量を考慮するとそれぞれ制約において多様な情報を有していることがわかる．また，最適解よりも各制約において制約許容量の小さな制約充足解も存在するが，目的関数値は改悪していることがわかる．ナップザック問題においては，単純に制約許容量を小さくすることがよいわけではないが，やはり最適解は制約境界付近に存在し，最良解集団の制約許容量なども考慮しながら許容量を最小化することが有効と考えられる．

(3) 制約許容量と制約違反量を考慮した交配法

制約許容量を活用する方法のひとつとして，制約境界付近に解を生成しやすくする手法を検討した．研究代表者がこれまでに提案した制約充足解と制約違反解とを交配させる指向性交配法をベースとして，制約違反量と目的関数値のみを考慮した従来の交配相手選択を制約許容量と制約違反量のバランスを考慮した交配相手選択に変更する．指向性交配は，図3の左図のように，解集団から第一親 p_a として制約充足解を選択し，それを目的空間上で支配する解集合 \mathcal{M} (制約違反解が多い) から制約違反量と目的関数値を用いた評価に基づいたバイナリトーナメント選択により第二親 p_b を選択して交配させる．これらの交配により制約充足解の目的関数値が高まりやすく，最適化効率が高まることが確認されている．しかし，制約充足解 p_a の制約許容量が小さい場合にも制約違反量の大きな制約違反解と交配される可能性があり，制約違反解が生成される確率が高かった．そこで，本研究では図3の式 $S(x)$ と中央図に示すように第一親 p_a の

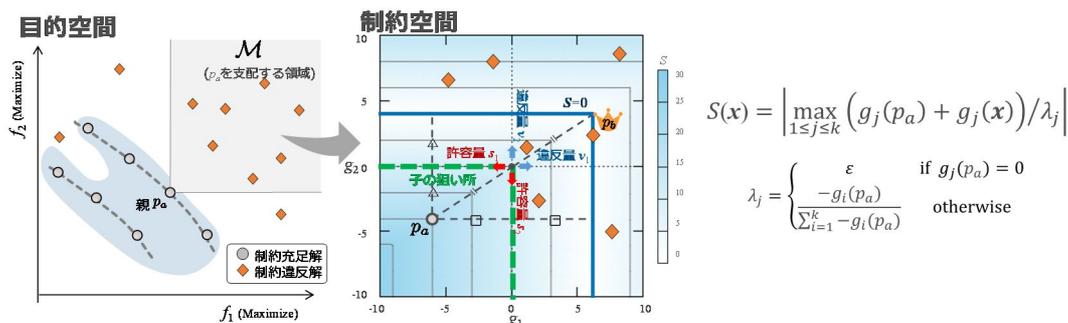


図3 制約許容量と制約違反量を考慮した交配法

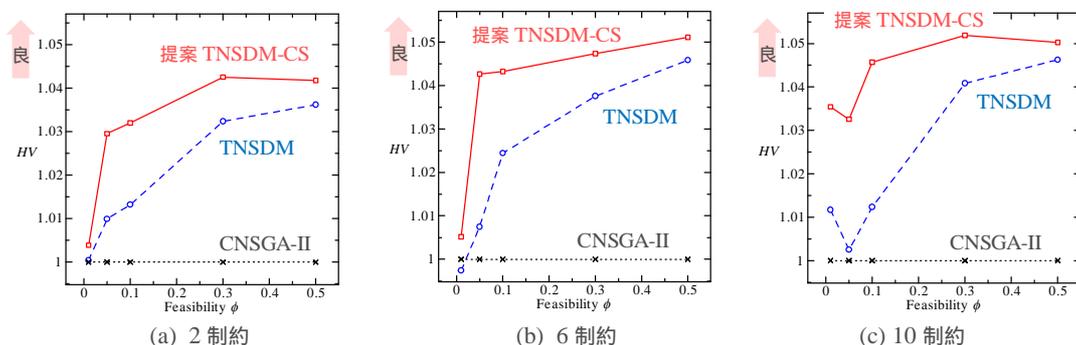


図4 解探索性能比較

制約許容量を考慮して，解集合 \mathcal{M} の制約許容量と違反量から制約境界に解を生成しやすい第二親 p_b を評価式 $S(x)$ の値の小さなものを選出する．なお，評価式 $S(x)$ は子の生成を狙うエリアによって複数考慮することができ，その効果を検証した．ここでは，ナップザック問題で最も性能の良い図 3 中の式を用いた結果についてのみ記述する．実験では，テスト問題に 2 目的 500 変数のナップザック問題を用い，制約の厳しさを表す実行可能率と制約数を変化させて解探索性能を検証した．制約違反解を活用しない CNSGA-II，提案法のベースとなる指向性交配を用いている TNSDM と提案法 TNSDM-CS の解探索性能を評価指標 Hypervolume (HV)を用いて比較した結果を図 4 に示す．HV は高い値ほど良い性能を示す．なお，CNSGA-II で得られた HV 値を 1.0 として正規化している．図 4 に示されるように，提案手法は制約の厳しい問題においても高い解探索性能を示すことが確かめられた．

今後は複数のテスト問題による実験のまとめや，制約許容量の活用を高めるための解生成法などの構築を行う．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮川みなみ, 佐藤寛之, エルナンアギレ, 田中清
2. 発表標題 制約許容量を導入した指向性交配による制約付き多目的最適化の一検討
3. 学会等名 進化計算学会 進化計算シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------