

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686015

研究課題名(和文) 学習・ゲーム理論に基づく多目的最適設計のための意思決定支援

研究課題名(英文) Aid for Decision Making in Multi-Objective Design Optimization Based on Learning and Game Theories

研究代表者

下山 幸治 (SHIMOYAMA, Koji)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号：80447185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,500,000円

研究成果の概要(和文)：多目的最適設計によって提示される無数の最適解集合の中から、設計者が採用すべき適切な設計候補を取捨選択するための意思決定アプローチを開発した。学習理論に基づくトレードオフの構造の識別、ゲーム理論に基づく中立的設計候補の提示のためのモジュールを新たに構築し、これらを既存の多目的最適設計モジュールと組み合わせた。こうして開発された本アプローチをテスト問題および実設計問題に適用した結果、従来手法に比べて優れた性能および有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：This study has developed an approach for decision making, which can choose appropriate design candidates to be adopted by designers from many optimal solutions available in multi-objective optimization. This approach consists of new modules for distinguishing a trade-off structure based on learning theory and for presenting neutral design candidates based on game theory together with the existing multi-objective design optimization module. This approach has been applied to test problems and real-world design problem, which demonstrates superior performance and effectiveness compared to conventional approaches.

研究分野：最適設計

キーワード：意思決定

## 1. 研究開始当初の背景

近頃の工学設計の現場では、膨大な数の形状寸法をパラメトリックに変えながら、発揮性能が最大となる設計候補を見つけ出すという、非常に複雑な設計問題を取り扱う必要性が高まってきている。このような設計問題に対して、人間の知識・経験・勘だけを頼りにした従来の設計方法では太刀打ちできない。そこで、勾配法や進化計算法などの最適化アルゴリズムを用いた自動探索によって、所望の設計候補を効率良く探索する方法が普及してきた。

最適設計の中でも最近では特に、異なる複数の性能を同時に改善することを目指した多目的最適設計への取り組みが盛んに行われている。ある一つの性能(目的)について最大値を発揮する最適解が唯一存在する単目的最適設計と異なり、多目的最適設計ではある一つの目的について改善しようとする他の目的について改悪せざるを得ない関係(トレードオフ)が設計問題を支配するため、最適解は唯一ではなく無数に存在する。これら無数の最適解からなる集合を探索し分析することは、多目的設計問題を支配するトレードオフの構造を理解する上で非常に重要である。

従来、多目的最適設計で探索された各最適解に対応する形状・トポロジーをトレードオフの方向に沿って順に見比べることで、トレードオフが意味する傾向を把握してきた。しかし、見た目判断でトレードオフの傾向が容易に掴めることは極めて稀である。実世界で設計対象とされる形状・トポロジーはもっと複雑であり、かつ相反する性能の組み合わせももっと多くなるのが一般的である。それにも関わらず、トレードオフの傾向を把握するための現状の方法は、最適解集合を座標グラフ表示・低次元空間射影するといった可視化に頼ったものに留まっている。したがって、設計者の主観の影響を受けにくい、トレードオフ構造把握のための系統的方法の確立が望まれている。

さらにいうと、トレードオフに関する定性的な傾向を提示しただけでは、実際の設計にはあまり役に立たない。そもそも、多目的最適設計によっていくら多数の最適解が提示されたとしても、実際の設計者はこれらすべての解を採用できる訳はなく、その中から自分が採用すべき解を数個選び出す作業が必要となる。この作業も結局のところ、設計者の知識・経験・勘に頼って行われているのが現状である。これでは、設計者の知識・経験・勘に依らない形で設計候補を自動探索するという最適設計本来の利点が損なわれてしまう。

## 2. 研究の目的

多目的最適設計によって提示される無数の最適解集合の中から、設計者が採用すべき適切な設計候補を取捨選択するための意思

決定アプローチを確立・実証する。これにより、多目的最適化から意思決定までの一連の設計作業を、設計者の知識・経験・勘に一切頼ることなくすべてシステムチックに完結できるようにする。

## 3. 研究の方法

### (1) 学習理論に基づくトレードオフ構造の識別

多目的最適設計で提示される無数の最適解集合の中に含まれる代表的な設計パターンを集約する手法を構築する。これらのパターンを識別するための数学モデルを構築することで、設計問題を支配する性能トレードオフの構造を系統的に記述する。

### (2) ゲーム理論に基づく中立的設計候補の提示

性能トレードオフ構造を記述する数学モデルを用いて、想定されるすべての性能の組み合わせについて利害関係を推定・評価する。そして、すべての性能について余計な損失をもたらさない中立的な組み合わせを定める手法を構築する。こうして定められた設計候補を、設計者が採用すべきものとして提示する。

### (3) 実設計問題への適用・実証

提案アプローチを実設計問題の両方に適用し、最終的に取捨選択された設計候補の優位性を戦略的・工学的観点から議論することによって、本提案手法の有効性を実証する。

## 4. 研究成果

### (1) 学習理論に基づくトレードオフ構造の識別

ベイズ統計ベースのクリギング法を用いて、与えられた学習データに対する不確実性を加味して、未学習のデータの確率的挙動を推定する。これを目的関数数可変の最適化テスト問題に適用し、目的関数空間における超体積の改善期待値を算出し、この値を参照して最適化計算を行う。これにより、任意の目的関数数に対して、パレート最適解とそうでない解の区別が明確となり、トレードオフ構造の識別が促され、最適解の探索性能の改善に繋がった(図1)。

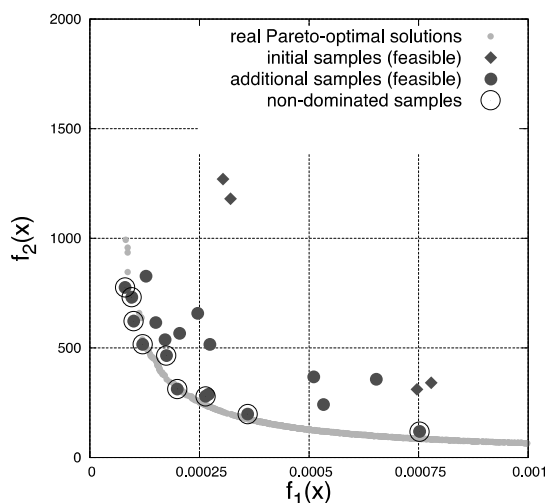


図1 超体積改善期待値に基づくパレート面の識別

(2) ゲーム理論に基づく中立的設計候補の提示

多目的最適化計算の過程で探索される解集団に対して、制約条件の総違反量を評価し、それらをもとに解集団を実行可能解集団と実行不可能解集団に分ける。各集団では、個別の最適化戦略ルールを設定して個別に進化させ、各世代の終わりに競合・融合させる。その結果、真のパレート面の近くで探索される解集団について、制約条件を容易に満たしそうな解とそうでない解の区別ができ、設計者が各解の実現性および安全性について意思決定を下すことが可能となった。さらに、制約条件が非常に厳しく最適解の探索が非常に難しいとされる問題においても、パレート最適解集合を確実に求めることが可能となった(図2)。

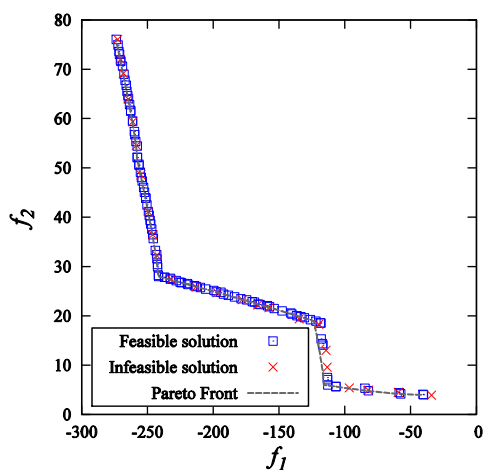


図2 実行可能解集団・実行不可能解集団の競合・融合によるパレート面の提示

(3) 実設計問題への適用・実証

エネルギー管理最適制御問題に取り組んだ。時系列として与えられたエネルギー需要を満たすべく、様々なエネルギー機

器を適宜組み合わせる際に発生する、コストとCO2の同時削減を目指した。その結果、これまでに予想されていなかった多様なパレート最適解集合が見つかり、さらに各解それぞれについて制約条件として表される様々な性能指標に則って意思決定を行い、各解の実用的価値を評価・議論した。以上より、本研究で構築された一連のアプローチの有効性を実証することができた(図3)。

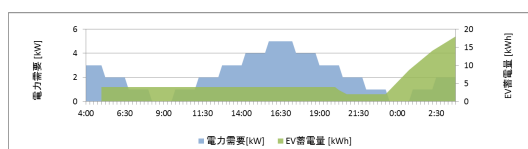
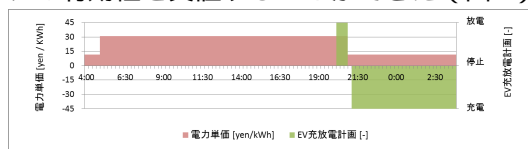


図3 エネルギー管理最適制御問題で得られたパレート最適解の一例

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 3 件)

1. Chang Luo, Koji Shimoyama, and Shigeru Obayashi, "A Study on Many-Objective Optimization Using the Kriging-Surrogate-Based Evolutionary Algorithm Maximizing Expected Hypervolume Improvement," Mathematical Problems in Engineering, 2015, pp. 162712-1-55 (査読有). <http://www.hindawi.com/journals/mpe/aa/162712/>
2. Koji Shimoyama, Koma Sato, Shinkyu Jeong, and Shigeru Obayashi, "Updating Kriging Surrogate Models Based on the Hypervolume Indicator in Multi-Objective Optimization," Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, Vol. 135, No. 9, September 2013, pp. 094503-1-7 (査読有). <http://dx.doi.org/10.1115/1.4024849>
3. 下山幸治, 鄭信圭, 大林茂, "多目的最適化における Kriging 応答曲面法のためのサンプル追加指標の比較", 進化計算学会論文誌, Vol. 3, No. 3, 2012年12月, pp. 173-184 (査読有). <http://dx.doi.org/10.11394/tjpnsec.3.173>

[学会発表](計 9 件)

1. 嘉藤太河, 下山幸治, 秋山直寛, 江原由希子, 山田想, 國領喬, 大林茂, "多数

- 制約進化計算法を用いたスマートホームシステム最適制御の基礎研究”, 日本機械学会東北支部第 50 期総会・講演会, 仙台, 2015 年 3 月 13 日 .
- 2 . 嘉藤太河, 下山幸治, 大林茂, ロッケンバツハ怜, “多数制約条件下での制約違反量を考慮した実行可能解・実行不可能解の並列評価による進化計算法”, 進化計算シンポジウム 2014, 廿日市, 2014 年 12 月 20–21 日 .
  - 3 . Luo Chang, 下山幸治, 大林茂, “高効率 EHVI 計算を用いた Kriging モデルベース多数目的最適化”, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月 22–24 日 .
  - 4 . Koji Shimoyama, “Multi-Objective Design Exploration Toward Intelligent Energy Management,” 11th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, 8–10 October 2014 (invited).
  - 5 . Soshi Kawai and Koji Shimoyama, “Uncertainty Quantification in Fluid Dynamics: Kriging Model Based Approach,” 11th World Congress on Computational Mechanics, 5th European Conference on Computational Mechanics, and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics, Barcelona, Spain, 20–25 July 2014.
  - 6 . Koji Shimoyama and Soshi Kawai, “Kriging-Based Dynamic Adaptive Sampling for Effective Uncertainty Quantification,” 11th World Congress on Computational Mechanics, 5th European Conference on Computational Mechanics, and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics, Barcelona, Spain, 20–25 July 2014.
  - 7 . Chang Luo, Koji Shimoyama and Shigeru Obayashi, “Kriging Model Based Many-Objective Optimization with Efficient Calculation of Expected Hypervolume Improvement,” 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Beijing, China, 6–11 July 2014.
  - 8 . Soshi Kawai and Koji Shimoyama, “Kriging-Model-Based Uncertainty Quantification in Computational Fluid Dynamics,” 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference, Atlanta, GA, USA, 16–20 June 2014.
  - 9 . Koji Shimoyama, Shinkyu Jeong, and Shigeru Obayashi, “Kriging-Surrogate-Based Optimization Considering Expected Hypervolume Improvement in Non-Constrained Many-Objective Test

Problems,” 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Cancún, México, 20–23 June 2013.

〔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

下山 幸治 (SHIMOYAMA, Koji)  
東北大学・流体科学研究所・准教授  
研究者番号 : 80447185