

令和元年6月7日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03600

研究課題名(和文) 設計変数・条件に多様な不確かさを含むロバスト最適化問題のための高速近似解法の開発

研究課題名(英文) Development of a Fast Approximate Solver for Robust Optimization Problems Including Various Uncertainties in Design Variables and Conditions

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) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：設計変数・条件を構成する多くの次元に不確かさが存在する設計問題においても、目的関数の近似精度を損なうことなく、不確かさによる影響を受けにくいロバストな最適解を高速に見つけ出す方法を開発した。そのために、複雑な設計空間の次元を縮約してより単純な部分空間に分類して再構成する手法、近似関数の非定常性を上げて様々な目的関数の挙動に追従する手法、然るべきケースで目的関数(の真値)の評価結果を追加して近似関数を動的に更新する手法を提案した。これらを組み合わせて実設計問題に適用した結果、従来手法に比べて本手法の優れた有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工学製品の形状や使用環境が変わったりしても、当初の製品性能をある程度維持できる、ものづくりのための手法を開発した。手元にある限られた評価データを有効活用して、ありとあらゆる不測の事態に対する性能の変化を正しく予測できるように、独自の数学モデルを考案した。これを航空機・宇宙機の設計問題に適用した結果、不測の事態における設計の安全性がしっかり担保されることを実証できた。以上より、本研究の成果は、安心・安全なものづくり社会の確立に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：This study has developed numerical methods, which are fast and accurate to find robust optimization solutions whose objective functions are insensitive to various uncertainties in design variables and conditions. For this purpose, this study has proposed a method to reduce high-dimensional design space into a simplified space, a method to approximate various behaviors of the objective function as a non-stationary representation, and a method to adaptively update the approximated objective function with additional evaluations of the true objective function in proper cases. These methods have been applied to real-world design problems, which demonstrate superior effectiveness compared to conventional methods.

研究分野：最適設計

キーワード：近似最適化 不確かさの定量的評価

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

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（設計変数）をパラメトリックに変えながら、ある使用環境（設計条件）下で発揮される性能（目的関数）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は太刀打ちできない。そこで、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、所望の設計候補を機械的に効率良く探索する方法が普及してきた。

現実世界に見られる工学設計には、製造過程で含まれる誤差や使用環境の揺らぎなどが不可避免的に存在する。これは、最適化問題を構成する設計変数や設計条件に何らかの“不確かさ”が含まれることを意味する。例えば、ソニックブームの低減を目的とした超音速旅客機の空力設計では、目的関数であるソニックブームの強度は、設計変数である旅客機の形状や、設計条件である飛行状態・大気状態に対して非常に敏感に変化する。この空力設計を、設計の不確かさを考慮しないで最適化（決定論的最適化）すると、実際のソニックブーム強度が最適化で予想された理想値から大幅に悪化し、実用に耐えられない可能性がある。よって、設計の不確かさを考慮した最適化（ロバスト最適化）を行い、不確かさによる影響を受けにくい頑丈な設計候補を最適解として見つけ出すことが、現実世界の工学設計では必要不可欠である。

設計の不確かさに対する最適解のロバスト性は、設計変数・条件の変化に対する目的関数の変化の様子をもって評価される。最も典型的なのは、設計変数・条件にある確率分布を与え、その下で設計変数・条件をランダムに振って、目的関数の統計量（分散など）を評価する方法である。しかしこの方法では、目的関数の統計量を正確に評価するのに1000点オーダーのMonte Carlo サンプルングが必要となるため、数値流体力学（CFD）解析のように長時間かつ高コストな数値計算が目的関数の評価に用いられる最適化問題を解くことが難しい。そこで申請者は、Kriging モデルを用いて設計変数・条件に対する目的関数の分布を代数式として近似し、その近似関数上でサンプルングを行うことで、統計量の評価そしてロバスト最適化全体に要する計算時間を大幅に短縮する方法を提案し、自動車用タイヤの構造設計でその有効性を実証した。

しかし、不確かさをもつ設計変数・条件の次元が増えると、目的関数の近似精度が悪くなり、それを補うためにCFD解析などの大規模数値計算を行う必要ケース数が増えるため、近似関数を用いる恩恵が薄まる。前述の超音速旅客機の例では、大気湿度だけの1次元の変化に対するソニックブーム強度の統計量の近似には成功したが、大気湿度・温度・風速の高々3次元の変化に対する近似は現実的な計算コストで実現できていない。この類いの問題は“次元の呪い（Curse of Dimensionality）”と名付けられ、不確かさを伴う数値計算および最適化のコミュニティを中心に盛んに訴えられているが、これを確実に解決するための有望な策は未だに見出されていない。

2. 研究の目的

設計変数・条件を構成する多くの次元に不確かさが存在する設計問題においても、目的関数の近似精度を損なうことなく、不確かさによる影響を受けにくいロバストな最適解を高速に見つけ出す方法を開発し、その有効性を実証する。

3. 研究の方法

(1) 設計空間の次元縮役および分類

設計変数・条件とそれに対応する目的関数からなる多次元の設計空間について、構造的な特徴を分析する。そして、元の多次元空間の構造を損なうことなく2次元の平面上に射影する非線形写像を求めることで、複雑な設計空間の次元を縮役し、より単純な部分空間に分類して再構成する。

(2) 近似関数の非定常定式化

各々の部分設計空間ごとに、設計変数・条件に対する目的関数の相互関係を固有値解析によって評価し、目的関数を近似するKrigingモデルの定式化を個別に補正する。これにより、目的関数に突如現れる局所的挙動に追従できるように、Krigingモデルの非定常性（non-stationarity）を上げる。

(3) 近似関数の動的更新

Krigingモデルによる目的関数の近似挙動と推定誤差を参考に、目的関数（の真値）を評価すべき設計変数・条件のケースを特定する。このケースの数値計算結果を追加してKrigingモデルを更新することで、設計変数・条件の不確かさに対する目的関数の統計量の評価精度を改善する。

(4) 実設計問題への適用

以上の一連の作業を統合し、本研究で提案する高速近似解法として確立する。これを実際のロバスト最適化問題に適用し、その結果を従来手法と比較することで、本提案手法の有効性を実証する。

4. 研究成果

(1) 自己組織化マップによる非線形次元縮役法の開発

設計変数・条件の不確かさに対する目的関数の挙動を近似するために、通常は応答曲面モデルを用いる。しかし、設計変数の次元が増加すると、正確な応答曲面モデルを構築するために必要となるサンプル点数（すなわち計算コスト）も指数関数的に増加するため、次元を削減することによって計算コストを減らす手法が必要とされる。本研究では、教師なし学習ニューラルネットワークの1つである自己組織化マップと応答曲面モデル (Kriging) を組み合わせることにより、多次元の問題を二次元に落とし込む手法を開発した。そして、本手法を再突入軌道解析問題に適用し、Kriging 単独手法と比較した結果、本手法による近似精度の向上および計算コストの削減を実証した (図1)。

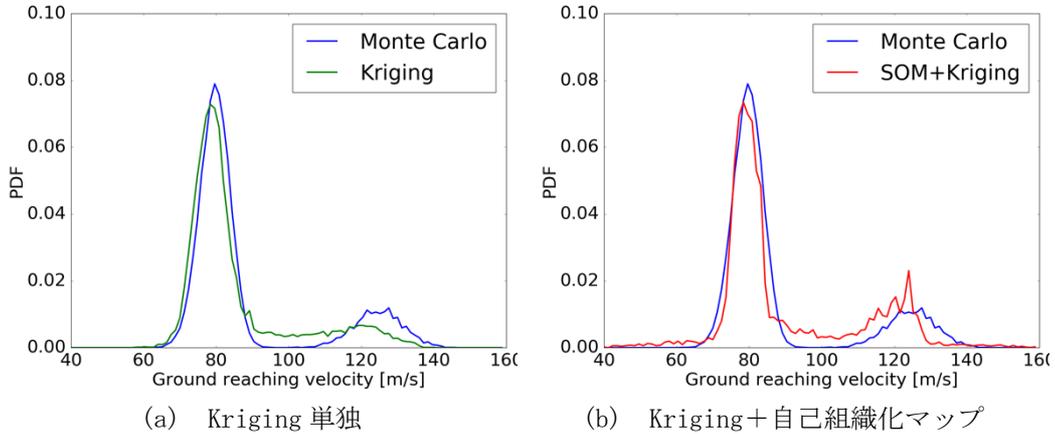


図1 自己組織化マップによる非線形次元縮役法の開発 (再突入軌道解析問題)

(2) 複合カーネル学習を用いた Kriging 応答曲面モデルの開発

設計変数・条件に対する目的関数の応答を近似する Kriging 応答曲面モデルは従来、ある一つカーネル (相関関数) によって定式化される。単一のカーネルで、連続的・不連続的な応答に追従することはできない。さらに、実際の設計問題では真の応答が自明ではないため、真の応答に追従できそうなカーネルを試行錯誤的に選定することとなる。本研究では、任意のブラックボックスな目的関数の近似に適合できるように、複数のカーネルの線形結合によってカーネルを自由度高く定義し、対象とする設計問題に応じてその結合比を適宜学習・決定する手法を開発した。そして、本手法を遷音速軸流ロータ設計問題に適用し、従来の単一カーネルを利用した Kriging モデルと比較した結果、本手法は複雑な応答を示す目的関数の近似精度の改善に貢献できることを実証した (図2)。

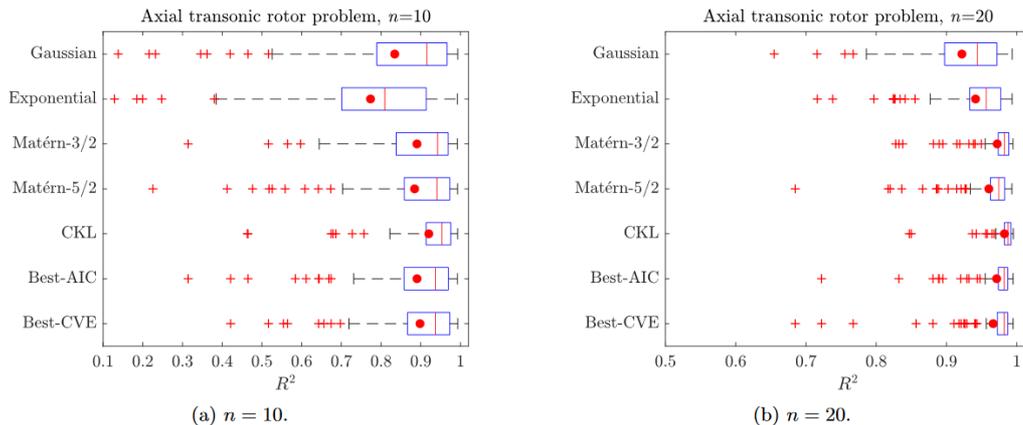


図2 複合カーネル学習を用いた Kriging 応答曲面モデルの開発 (遷音速軸流ロータ設計問題, サンプル点数 n を変えた時の決定係数 R^2 の比較)

(3) EHVI 指標に基づく多目的逐次近似最適化手法の開発

多目的の設計問題を必要最小限の目的関数評価回数をもって効率良く解くために、Kriging 応答曲面モデル上で EHVI (Expected Hypervolume Improvement) と呼ばれる指標が最大となる位置を特定し、その位置に逐次的にサンプル点を追加していくことで大域的最適解を求める方法を開発した。本手法をウィンドタービンの設計問題に適用した結果、既存の設計に比べて、トルクと重量の両面において優れた設計案を多数探索することができた (図3)。

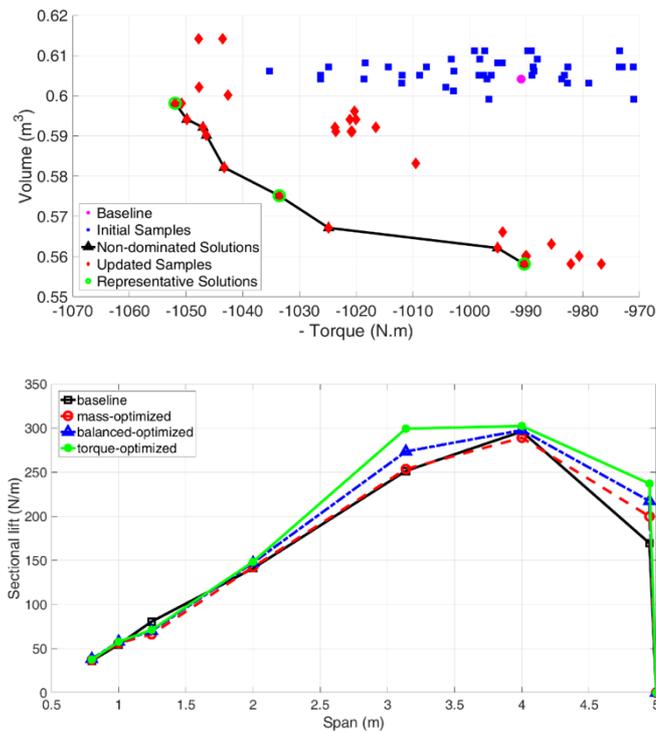


図3 EHVI 指標に基づく多目的逐次近似最適化手法の開発

(ウィンドタービン設計問題, 上図: サンプル点の比較, 下図: ブレード上揚力分布の比較)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① [Koji Shimoyama](#) and Soshi Kawai, "A Kriging-Based Dynamic Adaptive Sampling Method for Uncertainty Quantification," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 62, Issue 3, May 2019, pp. 137-150.
DOI: [10.2322/tjsass.62.137](https://doi.org/10.2322/tjsass.62.137)
- ② [Pramudita Satria Palar](#) and [Koji Shimoyama](#), "Efficient Global Optimization with Ensemble and Selection of Kernel Functions For Engineering Design," Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 59, Issue 1, January 2019, pp. 93-116.
DOI: [10.1007/s00158-018-2053-9](https://doi.org/10.1007/s00158-018-2053-9)
- ③ [下山幸治](#), "応答曲面法と翼型空力設計への適用事例", 日本航空宇宙学会誌, Vol. 66, No. 11, 2018年11月, pp. 325-330.
- ④ [Pramudita Satria Palar](#) and [Koji Shimoyama](#), "On Efficient Global Optimization via Universal Kriging Surrogate Models," Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 57, Issue 6, June 2018, pp. 2377-2397.
DOI: [10.1007/s00158-017-1867-1](https://doi.org/10.1007/s00158-017-1867-1)
- ⑤ [Pramudita Satria Palar](#), Lavi Rizki Zuhail, [Koji Shimoyama](#), and Takeshi Tsuchiya, "Global Sensitivity Analysis via Multi-Fidelity Polynomial Chaos Expansion," Reliability Engineering and System Safety, Vol. 170, February 2018, pp. 175-190.
DOI: [10.1016/j.ress.2017.10.013](https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.10.013)
- ⑥ [Koji Shimoyama](#) and Kazumasa Kamisori, "Study of Aerodynamic and Heat-Exhaust Characteristics for a High-Altitude Long-Endurance Unmanned-Aerial-Vehicle Airfoil," Journal of Aircraft, Vol. 54, No. 4, July-August 2017, pp. 1317-1327.
DOI: [10.2514/1.C033978](https://doi.org/10.2514/1.C033978)
- ⑦ [Koji Shimoyama](#) and Akihiro Inoue, "Uncertainty Quantification by the Nonintrusive Polynomial Chaos Expansion with an Adjustment Strategy," AIAA Journal, Vol. 54, No. 10, October 2016, pp. 3107-3116.
DOI: [10.2514/1.J054359](https://doi.org/10.2514/1.J054359)
- ⑧ Renata Troian, [Koji Shimoyama](#), Frédéric Gillot, and Sébastien Besset, "Methodology for the Design of the Geometry of a Cavity and its Absorption Coefficients as Random Design Variables Under Vibroacoustic Criteria," Journal of Computational Acoustics, Vol. 24, Issue 2, June 2016, pp. 1650006-1-12.
DOI: [10.1142/S0218396X16500065](https://doi.org/10.1142/S0218396X16500065)

〔学会発表〕(計 20 件)

- ① 下山幸治, Palar Pramudita Satria, “複合カーネル学習を用いた Kriging 応答曲面法”, 第2回航空機空力研究ワークショップ, 遠刈田, 2019年3月14-15日.
- ② Pramudita Satria Palar and Koji Shimoyama, “Kriging with Composite Kernel Learning for Surrogate Modeling in Computer Experiments,” 2019 AIAA Science and Technology Forum and Exposition (AIAA SciTech 2019), San Diego, CA, USA, 7-11 January 2019.
- ③ Akira Tokunaga, Akie Sotoguchi, Koji Shimoyama, and Keiichiro Fujimoto, “Stochastic Re-entry Trajectory Analysis with Uncertain Initial Conditions for Safety Assessment,” 2019 AIAA Science and Technology Forum and Exposition (AIAA SciTech 2019), San Diego, CA, USA, 7-11 January 2019.
- ④ Akira Tokunaga, Akie Sotoguchi, Koji Shimoyama, and Keiichiro Fujimoto, “Uncertainty Quantification in Re-entry Trajectory Analysis for Safety Assessment,” 15th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, 7-9 November 2018.
- ⑤ 下山幸治, 徳永輝, 外口秋絵, “空力問題における不確かさの定量的評価のための自己組織化マップの応用”, 日本流体力学会年会 2018, 豊中, 2018年9月3-6日.
- ⑥ 太田力, 下山幸治, 河合宗司, “Kriging モデルに基づく動的サンプリング法を用いた遷音速翼周りの不確かさ評価”, 第50回流体力学講演会/第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 宮崎, 2018年7月4-6日.
- ⑦ 徳永輝, 外口秋絵, 下山幸治, 藤本圭一郎, “初期条件の不確定性を考慮したアポロ型カプセルの再突入軌道解析”, 第50回流体力学講演会/第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 宮崎, 2018年7月4-6日.
- ⑧ Pramudita Satria Palar and Koji Shimoyama, “Ensemble of Kriging with Multiple Kernel Functions for Engineering Design Optimization,” 8th International Conference on Bioinspired Optimization Methods and their Applications, Paris, France, 16-18 May 2018.
- ⑨ 外口秋絵, 下山幸治, “不確かさの定量的評価のための非線形次元縮約法”, 第1回航空機空力研究ワークショップ, 仙台, 2018年3月19-20日.
- ⑩ 下山幸治, Palar Pramudita Satria, “Active Subspace 法を併用した Kriging 近似最適化手法”, 平成29年度航空宇宙空力シンポジウム, 天童, 2018年1月26-27日.
- ⑪ Yoshifumi Kashiwagura and Koji Shimoyama, “A Study on the Aerodynamic Efficiency and Static Stability of a Tailless Aircraft,” 2018 AIAA Science and Technology Forum and Exposition (AIAA SciTech 2018), Kissimmee, FL, USA, 8-12 January 2018.
- ⑫ Pramudita Satria Palar and Koji Shimoyama, “On The Accuracy of Kriging Model in Active Subspaces,” 2018 AIAA Science and Technology Forum and Exposition (AIAA SciTech 2018), Kissimmee, FL, USA, 8-12 January 2018.
- ⑬ Pramudita Satria Palar and Koji Shimoyama, “Exploiting Gradient for Kriging-based Multi-Objective Aerodynamic Optimization,” 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, Honolulu, HI, USA, 27 November-1 December 2017.
- ⑭ Pramudita Satria Palar and Koji Shimoyama, “Polynomial-Chaos-Kriging-Assisted Efficient Global Optimization,” 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, Honolulu, HI, USA, 27 November-1 December 2017.
- ⑮ Pramudita Satria Palar and Koji Shimoyama, “Exploiting Active Subspaces in Global Optimization: How Complex is your Problem?,” Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2017), Berlin, Germany, 15-19 July 2017.
- ⑯ Pramudita Satria Palar and Koji Shimoyama, “Multi-Fidelity Uncertainty Analysis in CFD Using Hierarchical Kriging,” 35th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Denver, CO, USA, 5-9 June 2017.
- ⑰ Pramudita Satria Palar and Koji Shimoyama, “On Multi-Objective Efficient Global Optimization via Universal Kriging Surrogate Model,” 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation, San Sebastián, Spain, 5-8 June 2017.
- ⑱ Koji Shimoyama, “Surrogate Modeling for Numerical Simulation and Design,” Simulations Encounter with Data Science: Data Assimilation, Emulators, Rare Events and Design, Tachikawa, Tokyo, Japan, 9-11 March 2017 (invited).
- ⑲ 下山幸治, “流体機械の最適設計と不確かさの定量的評価”, STE シミュレーション研究会—太陽地球惑星系探査とシミュレーション研究—, 仙台, 2016年8月31日-9月2日(招待講演).
- ⑳ Koji Shimoyama, “Uncertainty Quantification by the Polynomial Chaos Expansion Method with Order Adjustment,” 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Crete, Greece, 5-10 June 2016.

〔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) 研究分担者

研究分担者氏名：パラル プラムヂタ サトリア

ローマ字氏名：Pramudita Satria Palar

所属研究機関名：東北大学

部局名：流体科学研究所

職名：学術研究員

研究者番号（8桁）：30792163

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：河合 宗司

ローマ字氏名：Soshi Kawai

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。