

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18121

研究課題名(和文) 評価回数制約付き最適化問題の提起と解法 - システム理論の融合 -

研究課題名(英文) Formulation and Solution for Evaluation-times Constrained Optimization

研究代表者

田村 健一 (Kenichi, Tamura)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号：40534912

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、事前に指定される任意の目的関数の評価回数制約のもとで可能な限り優れた解を求める問題を「評価回数制約付き最適化問題」と呼び、この問題を広く世の中に提起すること、そしてこの問題を解くための解法を構築することを目的とした。本研究期間を通して得られた成果は以下のように分類できる。(1)この問題の工学的な価値や要求される解法の仕様の新しさを明快に論じることができた。(2)この問題の解法の構築に寄与する直接探索理論や非凸性解析法を構築した。(3)この問題の解法としてベイズ的最適化アルゴリズムと進化計算アルゴリズムに立脚する方法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、様々な技術の進歩に伴い、大規模・複雑化したシステムに対する最適化の応用が広がる中で、従来の最適化問題とは本質的に異なる実情に即した新しい実際的问题として「評価回数制約付き最適化問題」を提起し、新しいアプローチでその具体的な解法を構築したことである。

研究成果の概要(英文)：This research project was concerned with the problem of finding the best possible solution under the constraint of the number of evaluations of the objective function specified in advance. The aim was to present the value and novelty of this problem widely and to construct solutions to solve this problem. The results obtained during this research period can be classified as follows. (1) The engineering value of this problem and the novelty of the required solution specifications were discussed and presented. (2) A direct search theory and a non-convex analysis method that can contribute to the construction of solutions to this problem were constructed. (3) Solutions to this problem based on Bayesian optimization algorithm and evolutionary algorithm were proposed.

研究分野：システム工学

キーワード：最適化 ブラックボックス問題

1. 研究開始当初の背景

近年、コンピュータ性能の飛躍的向上、ビッグデータの収集・処理技術の進歩、シミュレーション・センシング技術の発展などに伴い、最適化の応用範囲が急速に広がりつつある。それらの応用形態は図1のように整理できる。パス2やパス3は対象となる実システムが大規模・複雑な場合に現れる形態である。パス2は、実システムの数理モデルを解析的に解くことができないので、シミュレータを使って数値的に解くことにより、目的関数を評価する場合の形態である。パス3は、実システムの数理モデルを作ることが難しいので、実システムの状態を直接測定することで、目的関数を評価する場合の形態である。今後、様々なシステム技術の進歩に伴い、パス2やパス3のような応用形態が増えていくことは明らかである。

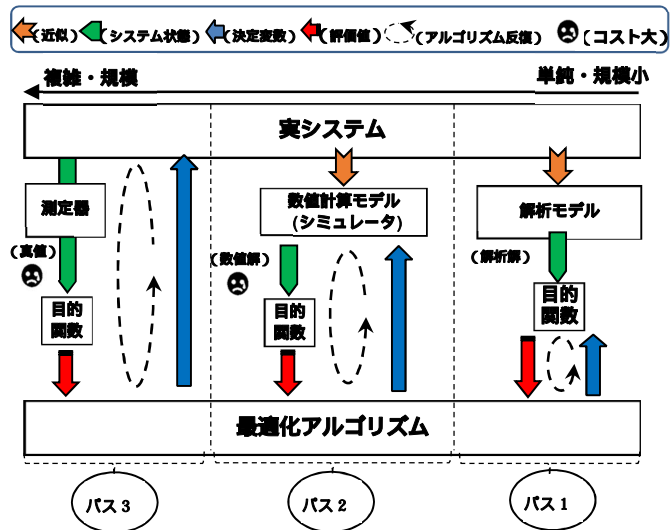


図1 最適化の応用形態

パス2やパス3の応用形態では、シミュレータや実システムを稼働させるので、目的関数の評価値を計算するたびに膨大な時間や費用等のコストがかかること、さらに、現実のプロジェクトでは、開発期限や予算などの存在から最適化にかけることのできる時間や費用等の総コストが事前に制限される、といった状況に直面する。これは、目的関数の総評価回数は事前に制限され、実務家たちは、その制限内で可能な限り優れた解を求めなければならないことを意味する。この志向は、最適解を求めることが最優先であり、最適解が求まるまでの評価回数を減少させることで探索効率の改善を目指してきた従来の解法（アルゴリズム）の志向とは逆である。今後、このような次世代の応用形態が増えていくのは明らかなので、このような問題に適した新しい解法の研究・開発が行われるべきである。

2. 研究の目的

本研究課題では、前述した最適化の応用形態の実情に対して柔軟に対応できるように、事前に指定される任意の目的関数の評価回数制約のもとで可能な限り優れた解を求める問題を「評価回数制約付き最適化問題」と呼ぶことにし、(1)この問題の意義や新しさを示すことを通して世の中に提起すること、そして(2)この問題を解くための解法を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究目的を達成するためにそれぞれ以下の方法をとる。(1)評価回数制約付き最適化問題の意義・価値を図や例題など交えて明快に論じる方法を考える。(2)評価回数制約付き最適化は、図1のパス2やパス3の形態を想定するので、その目的関数は非凸性を有するブラックボックス関数として仮定するのが妥当である。そのため、この問題に適した解法の構造として、微分を用いない目的関数の評価値のみを用いて探索を行う解直接探索型を採用する。以上の前提のもとで以下の二つのアプローチを検討する。

- ・ボトムアップ型アプローチ：解直接探索型アルゴリズムに関する理論や方法、非凸性を解析する理論や方法をまず個々に独立して構築し、それら要素理論・方法を評価回数制約下で融合することで、この問題に対する解法を構築する。
- ・トップダウン型アプローチ：非凸関数に有効な既存の解直接探索型アルゴリズムに注目し、それらの性能を評価回数制約内で最大化するようにアレンジする。そのための方針として、評価回数が与えられた制約に近づくにつれて、アルゴリズムの探索状態を「exploration」から「exploitation」へ徐々に遷移させることを考える。なお、「exploration」は大域的に探索する状態を指し、「exploitation」は有望な領域を集中的に探索する状態を指す。

4. 研究成果

研究期間中に得られた主な研究成果は以下のとおりである。

(1) 評価回数制約付き最適化問題の提起：この問題の工学的な価値を簡易例を用いて論じることができた。また、この問題に要求される解法の仕様が通常の最適化問題に対する解法とは異なることを論じた。例えば、図2の最小化問題に対する3つのアルゴリズムの性能比較において、

通常の最適化では、最も早く最適解に到達するアルゴリズム A が最も優れているが、評価回数制約付き最適化では、評価回数制約が T2 のときは、アルゴリズム B が最も優れており、評価回数制約が T1 のときはアルゴリズム C が最も優れているということになる。つまり、通常の最適化問題の解法は最適解を求めることを「主」とし、評価回数の考慮を「従」とする仕様であるが、本問題においては、評価回数の考慮が「主」であり、最適解を求めることは「従」(最適解に拘らなくてもよいの意味)とするような仕様が要求される。また、この問題の定式化をいくつか示すことができた。これらの結果をまとめた内容を国際会議 (META2018, SISY2019) で発表した。

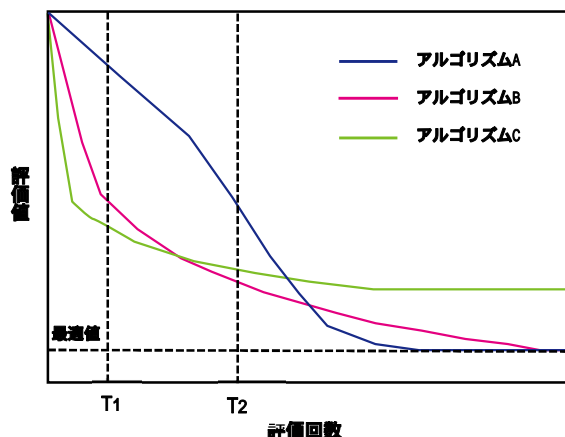


図2 アルゴリズムの性能比較

(2) 評価回数制約付き最適化問題に対する解法 (ボトムアップ型アプローチ): 解直接探索と非凸性解析に関する要素理論・方法として以下の成果を上げることができたが、それらを融合して本問題の解法を構築するところまではいかなかったため、その点については今後の課題とする。

- ・「Spiral Optimization Algorithm」と呼ばれる多点型の直接探索型のアルゴリズムにおいて周期的に降下方向が生成される条件と設定法を構築し、投稿論文として発表した (SICE JCMSI)。さらに条件を追加することで停留点へ収束する設定方法を提案し、投稿論文として発表した (IEEE Tans. SMC: Systems)。
- ・「Nonconvex Ratio」と呼ばれる目的関数の評価値情報のみを用いて非凸関数の非凸性の程度を効率的に定量的に評価する手法を構築した。提案手法の有用性を多種多様なベンチマーク問題を通して検証することができた。この結果を投稿論文として発表した (Information Sciences)。

(3) 評価回数制約付き最適化問題に対する解法 (トップダウン型アプローチ): 非凸関数に有効な既存の解直接探索型アルゴリズムとして、ベイズの最適化アルゴリズムと進化計算アルゴリズムに注目し、それらを本問題に対する解法として下記のとおりアレンジすることができた。

- ・ベイズの最適化アプローチ: 獲得関数として GP-UCB モデルを採用したベイズの最適化アルゴリズムを与えられた評価回数制約に適應させる方法である。ここで GP-UCB モデルとはガウス過程の平均に重みパラメータをかけた標準偏差を足した関数である。この方法では評価回数が評価回数制約に近づくにつれて探索状態を「exploration」から「exploitation」に徐々に遷移するように獲得関数 GP-UCB に存在するパラメータを調整する。その調整ルールとして3種類の方法を提案している。いくつかの評価回数制約の設定のもとで、特徴の異なるいくつかのベンチマーク問題に対する数値実験を行い、提案手法のほうがオリジナルの手法よりも優れていることを確認した。本研究成果を国際会議 (ICACI 2018) で発表した。
- ・進化計算アプローチ: 探索点群の期待値に基づいた探索状態を評価する指標を定義し、その指標を評価回数制約に対応させた理想曲線に追従させるようにアルゴリズム内のパラメータを調整する方法である。これによって指標で定義された探索状態を評価回数が与えられた制約に近づくにつれて「exploration」から「exploitation」へ徐々に遷移させることができる。具体的にはパラメータは理想曲線と指標の誤差を最小にするように決定される。したがって、毎イテレーションでその最小化問題を解く逐次最適化アルゴリズムを内包している。また、一般化した枠組みとして構築しているので、ほとんどすべての既存の多点型大域的最適化手法に対して適用することができる。強力な進化計算アルゴリズムである Particle Swarm Optimization と Differential Evolution に対して提案手法を適用し、その有効性を確認した。Particle Swarm Optimization に対する結果を国際会議 (SISY2019) で発表した。Differential Evolution に対する結果も国際会議や論文誌などで発表する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kenichi Tamura, Marcus Gallagher	4. 巻 476
2. 論文標題 Quantitative measure of nonconvexity for black-box continuous functions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Information Sciences	6. 最初と最後の頁 64 ~ 82
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ins.2018.10.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Kenichi Tamura, Keiichiro Yasuda	4. 巻 60
2. 論文標題 The Spiral Optimization Algorithm: Convergence Conditions and Settings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems	6. 最初と最後の頁 360-375
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TSMC.2017.2695577	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Tamura and K. Yasuda	4. 巻 9
2. 論文標題 Spiral Optimization Algorithm Using Periodic Descent Directions	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 SICE JCMSI	6. 最初と最後の頁 134-143
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） http://doi.org/10.9746/jcmsi.9.134	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kenichi Tamura
2. 発表標題 The Evaluation-times Constrained Optimization (ECO) Problem and Its General Solver Model
3. 学会等名 7th International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenichi Tamura
2. 発表標題 A Heuristic Strategy of a Bayesian Optimization Algorithm for Evaluation-times Constrained Optimization (ECO) Problems
3. 学会等名 2018 Tenth International Conference on Advanced Computational Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenichi Tamura
2. 発表標題 Adaptive Framework for Evolutionary Algorithms to Evaluation-iteration Constrained Optimization Problems
3. 学会等名 IEEE 17th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics
4. 発表年 2019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