

令和 2 年 5 月 18 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K01269

研究課題名(和文)多目的逐次近似最適化における効率的学習法とその応用に関する研究

研究課題名(英文) Study on Effective Learning on Multi-objective Sequential Optimization and its Applications

研究代表者

尹 禮分 (YUN, YEBOON)

関西大学・環境都市工学部・教授

研究者番号：10325326

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：逐次近似最適化では、本来の目的関数の代わりに代用の近似関数が用いられる。いくつかのサンプル点に基づいて構築される近似関数の生成には、RBFネットワークやSVMなどの機械学習が有効である。得られた近似関数の精度は、使用される基底関数やカーネル関数によって変わり、それらの関数における内部パラメータの設定が重要になる。より精度の高い近似関数を生成することを目指し、SVMやRBFネットワークにおける最適な内部パラメータの決定法、すなわちメタ学習法の提案を行った。さらに、ダイナミックな多目的モデル予測制御問題へ拡張するとともに、工学設計問題を通じて様々な角度から提案手法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

計算知能や多目的最適化法に関し、そのものを対象とした研究はすでに多く存在する。しかし、基礎的研究にとどまることが多く、実際の応用という観点からの検討が不十分であるか、逆に理論的な根拠は希薄であるが、これまでの経験に基づく方法による試行錯誤的な研究も多いというのが現状である。さらに、GAやPSOの進化的アルゴリズムを用いたパレート解の生成法に関する研究は活発であるが、既存の方法では多くの計算回数を要する。これらのことを総合的に踏まえたうえで、多角な観点から、理論のみならず実問題へ適用性も考慮した成果であり、学術的にも実的にも有意義であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In optimization with high cost objective function, an approximate function is used as a surrogate. For generating an approximate function based on some sample points, machine learning such as Radial basis networks and Support vector machines is effective. The precision of approximate functions depends on hyper-parameters used in basis and kernel functions, which is deeply related to learning. The new methods of meta-learning in SVM and RBF networks were proposed with the aim of generating an approximate function of high accuracy with small number of function evaluations. Furthermore, for multi-objective optimal control problems based on meta-model under a dynamic environment, this study suggested the method of combining machine learning methods and predetermined linear model in order to construct more accurate and stable model prediction. Finally, the effectiveness of the proposed methods in this research was validated through some numerical examples and engineering design problems.

研究分野：社会システム工学

キーワード：逐次近似最適化 機械学習 モデル予測 メタ学習

1. 研究開始当初の背景

構造物をシステムとしてモデル化し、構造物に加わる荷重あるいはこれを支持する部材の強度等の不確定因子を考慮した上で、構造物の安全性および信頼性の立場から合理的に設計することは非常に重要な問題とされている [1]. 最近では単なる工学設計問題ではなく、製造ならびに後の維持保全も含めた企画から廃棄までの全期間が構造システムにおける管理問題として見直されている [2]. また、構造システムが所定の機能を維持するための様々な技術と、構造システムの評価法に関する技術が進歩してきている. 従来では、構造システムの安全性および信頼性を評価するため、故障や破損のデータが一つの確率分布に従うと仮定し、統計的解析によって破損確率を予測していた [3]. 破損の限界状態関数から破損確率を計算することになるが、限界状態関数の形は一般に不明であり、分かるとしても複雑な非線形関数であるため、破損確率の計算は非常に困難である. 便宜上線形式で限界状態関数を近似することが多く、結局どのような関数形で近似するかによって信頼度の評価は変わることもある. すなわち、効率よくより正確な信頼性評価を行うためには、いかに精度のよい限界状態の近似関数を求められるかが重要なポイントになる. 近年では数値計算の精度や効率上、様々な近似法 [2] が開発されている.

2. 研究の目的

工学設計のような実際問題は一般に評価関数が複数個ある多目的最適化問題として定式化される. また目的関数は設計変数に対し陽な関数として表すことができず設計変数の各値に対し構造解析, 熱解析, 流体解析のような解析や実験などによって初めて目的関数の値が求まることが多い. しかし, 多目的最適化問題の解は一意に定まらず満足のいく解を得るまでに必要となる解析や実験には多大のコストと時間を要する. 本研究では, なるべく少ない解析(実験)数で意思決定者の満足のいく解を見つけるために, 関数近似ベース(目的関数の予測)の多目的最適化問題における逐次学習(目的関数の予測精度を上げるための実験点の選定)法を開発するとともに実際問題への適用を試みる.

3. 研究の方法

RBF ネットワークや SVM の計算知能技法を用いて目的関数の形を精度よく予測する方法を開発し, 予測した目的関数に対し GA や PSO のようなメタヒューリスティクス法によって精度の高い最適解を見つける方法を提案する. なるべく少ない解析(実験)数で高精度の関数近似を行うために, 多目的最適化問題に適した追加実験データの選定法を考案する. 既存法より少ない解析や実験(データ数)でより精度のよい破損の限界状態関数を近似するために, 計算知能技法 [4, 5] を用いて関数近似ベース(関数の予測法)の逐次学習法を提案し, 構造システムの安全性および信頼性が精度よく評価ができるか否か検討する.

次に, 従来のシステム評価法との比較により, 本研究で得られる手法の有用性についての検証を行う. 単なる構造システムの評価だけではなく, システムの運用や管理などの全般の評価と経済性評価を共に行う必要性 [6] があることから, 経営工学を導入して設計費用や破損損失費用などを考慮した多基準意思決定問題として検討を行う. その結果, リスク(信頼性および安全性)評価とコスト評価が同時にでき, 効率よく設計, 管理, 運用などが可能であることを検証する.

さらに, 設計者の多様な要求を同時に満足するという状況の下で, 多様な選好にあう代替案をどのようにして求めるか, 得られた代替案の中から最終的にはどれを選べばよいのかということは, 現在の意思決定論においては非常に重要な問題である. そこで, 各種の指標との間(特に信頼性指標とコスト)の関係を明らかにするために, 多目的最適化問題として定式化を行い, 評価指標の効率フロンティアを求める方法を提案する. 望んでいる信頼度に到達するためにはどれだけのコストが必要であるか, 逆に 現在のコストならば, どの程度まで信頼度を上げることができるか, などが把握できることを示す. その結果, システム評価尺度の算出法の改善とともに, 経済的な面(損失や維持費等)も考慮でき, 得られた研究成果は現実の工学設計システムの安全性および信頼性評価と, 様々な分野において実践的に役立つものと期待する.

4. 研究成果

(1) サポートベクターマシン(SVM)において学習性能および計算効率を向上させるために Ensemble Learning 法(図1)を提案し, 既存の方法と比較することで開発手法の有効性の検証を行った. さらに, 大規模のビックデータに対する学習方法の効率化をはかるために, 既存法の改良を試みた結果, 図2で示すように, より短い計算時間でほぼ同程度の精度をもつ関数の生成ができた. また, RBF ネットワークを用いて関数形を予測しながら多目的遺伝的アルゴリズムによる最適化を行う, 知能化多目的モデル予測制御法を提案するとともに, 具体的な問題へ適用することで提案手法の有効性を検証した.

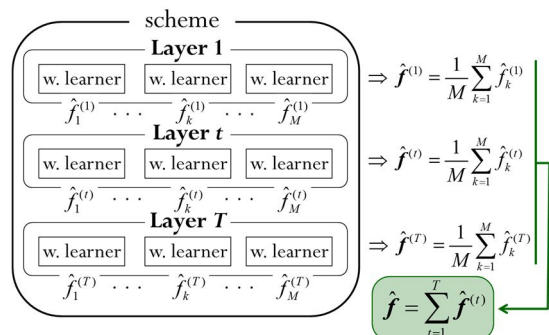


図1 提案手法のスキーム

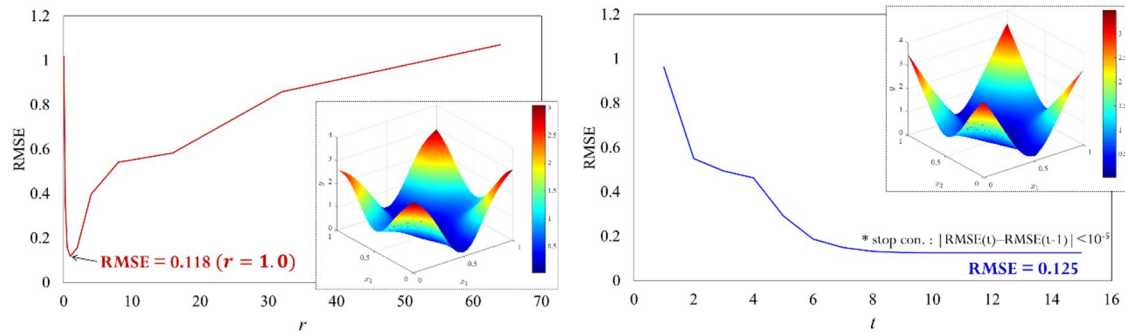


図2 既存法による結果（左）と提案手法による結果（右）の比較

(2) 多目的最適化問題の解は一意に定まらず満足いく解を得るまでに必要となる解析や実験には多大のコストと時間を要する．関数近似ベース多目的最適化法を提案し，時系列データを用いて検証を行った．ダイナミックな多目的モデル予測制御問題に対し，統計的機械学習の一種であるサポートベクター回帰と線形回帰の併用を試み，線形回帰によりモデルの全体像をつかみながらサポートベクター回帰により近似の微調整を行うことにより，安定かつ精度の高いモデル予測ができ，その結果サポートベクター回帰だけでモデル予測するときと比べ，予測精度が高く，より安定的な制御ができた．また，航空機モデルを用いて，提案手法の有効性を検証した（図3）．

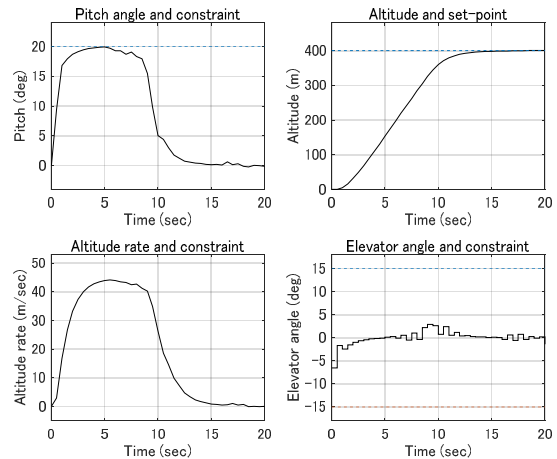


図3 提案手法による多目的モデル予測制御の結果例

(3) 逐次近似最適化 (sequential approximate optimization) では，本来の目的関数の代わりに，代用の近似関数がいられる．いくつかのサンプル点に基づいて生成される近似関数の構築には，RBF ネットワークや SVM などの機械学習がよく用いられ，その有効性も検証されている．その近似精度は基底関数やカーネル関数によって変わり，それらの関数における内部パラメータ (hyper-parameter) の設定が重要になる．高精度の近似関数を生成するために，RBF ネットワークにおけるメタ学習法の提案を行った．サンプル点間の距離と疎密を考慮し，ガウス (Gaussian) 基底関数における最適なパラメータ (中心および半径) の決定法を提案 (図4) し，いくつかの数値例を通して，得られた解の精度と関数評価数の両観点から，提案手法の有効性を検証した．

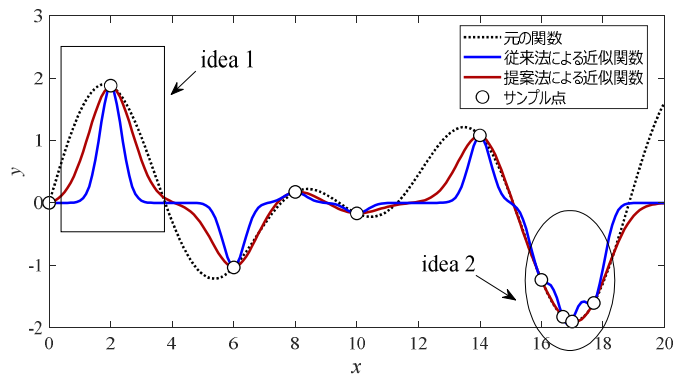


図4 提案法における改善案

<引用文献>

[1] 室津義定, 邵曉文, 米沢 政昭 (1996); システム信頼性工学, 共立出版  
 [2] Jorge Eduardo Hurtado (2004); Structural Reliability: Statistical Learning Perspectives (Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics), Springer, 2004  
 [3] Patrick O'Connor (2002); Practical Reliability Engineering, Wiley 4 版  
 [4] Nello Cristianini, John Shawe-Taylor (2000); An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods, Cambridge University Press  
 [5] Bernhard Schölkopf, Alexander J. Smola (2002); Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond, MIT Press  
 [6] Hirotaka Nakayama, Yeboon Yun, Min Yoon (2009); Sequential Approximate Multi-objective Optimization Using Computational Intelligence, Springer

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 S. Yoshida, Y. B. Yun, H. Nakayama, M. Yoon	4. 巻 Vol.62
2. 論文標題 Meta-Learning of Selecting Optimal Hyperparameters for RBF Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第62回自動制御連合講演会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 該当する
1. 著者名 S. Yoshida, Y. B. Yun, H. Nakayama, M. Yoon	4. 巻 -
2. 論文標題 On selecting hyper-parameters in RBF networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Conference on Nonlinear Analysis and Convex Analysis and International Conference on Optimization: Techniques and Applications	6. 最初と最後の頁 185
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 該当する
1. 著者名 Y. B. Yun, G. Kaneko, H. Kusumi, A. Nishio, T. Kurotani	4. 巻 -
2. 論文標題 Design for Support Patterns of NATM Tunnel Using Machine Learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ICITG 2019: Information Technology in Geo-Engineering	6. 最初と最後の頁 376-382
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1007/978-3-030-32029-4_32">https://doi.org/10.1007/978-3-030-32029-4_32</a>	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 尹 禮分、中山弘隆、尹 敏	4. 巻 1
2. 論文標題 機械学習を用いた多目的モデル予測制御	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第61回自動制御連合講演会論文集	6. 最初と最後の頁 1337, 1340
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 該当する

1. 著者名 Yeboon Yun, Hirotaka Nakayama, Min Yoon	4. 巻 1
2. 論文標題 Multi-Objective Model Predictive Control	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 2018 Joint 10th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 19th International Symposium on Advanced Intelligent Systems	6. 最初と最後の頁 304, 308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SCIS-ISIS.2018.00067	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 該当する

1. 著者名 Masakazu SHIRAKAWA, Yeboon YUN, Masao ARAKAWA	4. 巻 12(1)
2. 論文標題 Intelligent multi-objective model predictive control applied to steam turbine start-up	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1299/jamdsm.2018jamdsm0007">https://doi.org/10.1299/jamdsm.2018jamdsm0007</a>	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 Yeboon Yun and Hirotaka Nakayama	4. 巻 660
2. 論文標題 Ensembled Support Vector Machines for Meta-Modeling	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science: Knowledge and Systems Sciences	6. 最初と最後の頁 203 - 212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1007/978-981-10-2857-1_18	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 該当する

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 S. Yoshida, Y. B. Yun
2. 発表標題 Proposal of Meta-Learning in RBF Networks
3. 学会等名 The 14th International Symposium in Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yeboon Yun
2. 発表標題 Model Predictive Control with Multiple Objectives
3. 学会等名 The 13th International Symposium in Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yeboon Yun
2. 発表標題 Multi-Objective Model Predictive Control and Its Applications
3. 学会等名 The International Workshop on Nonlinear Analysis and Optimization (IWNAO2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yeboon Yun
2. 発表標題 On Disposal Planning of Debris and Waste for Large-Scale Disasters
3. 学会等名 The 24th International Conference on Multiple Criteria Decision Making (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yeboon Yun
2. 発表標題 Ensembled Support Vector Machines for Meta-Modeling
3. 学会等名 The 17th international symposium on Knowledge and Systems Sciences (国際学会)
4. 発表年 2016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
研究協力者	中山 弘隆  (Nakayama Hirotaka)	甲南大学・名誉教授	
研究協力者	尹 敏  (YOON MIN)	韓国釜慶大学・Department of Applied Mathematics・ Professor	