

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330282

研究課題名(和文) 実問題への応用を指向した非線形力学系モデルを用いた最適化手法の開発

研究課題名(英文) Development of optimization methods using nonlinear dynamics for applications to real problems

研究代表者

岡本 卓 (OKAMOTO, TAKASHI)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40451752

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)：本研究では、非線形力学系(カオス力学系)を計算モデルとして用いた、実問題に応用可能な最適化手法の開発を目的として研究を行った。その結果、(1) パラメータ調整を伴わないカオス最適化手法、(2) ラグランジュ・準ニュートン力学系から発生するカオス軌道を用いた有制約最適化手法、(3) 自己組織化マップとその派生法を用いたパレート解集合の可視化手法、(4) 可変計量勾配射影法を用いたSVM学習法と利己的経路選択ゲームとその拡張問題の高速解法の提案等の成果を得た。

研究成果の概要(英文)：This project studied to develop optimization methods using nonlinear dynamics for applications to real problems. As a result, this project proposed (1) a chaotic optimization method without parameter tuning, (2) a constrained optimization method using chaotic search trajectory generated from the Lagrange-quasi-Newton dynamics, (3) Pareto optimal solution visualization methods using the self-organizing maps and its derivative methods, and (4) a support vector machine learning method and a fast solution method for the selfish routing game and its expansion problems using the variable metric gradient projection method.

研究分野：システム工学，最適化理論，ソフトコンピューティング，計算知能，複雑系

キーワード：大域的最適化 カオス システム工学 ソフトコンピューティング 数理工学 多目的最適化 複雑系
Selfish routing game

1. 研究開始当初の背景

等式・不等式制約条件下で、多くの解候補の中から評価値が最適であるような解を求める、いわゆる最適化手法の開発が長年の研究テーマとなっている。最適化手法は、システム工学、金融、通信、設計、機械学習など様々な分野で利用され、とくに、目的関数(評価関数)が多峰性で多数の局所的最適解を持つ問題に対する大域的最適化手法の開発が強く求められている。

本研究では、大域的最適化手法の中でも、カオス力学系などのいわゆる非線形力学系を計算モデルとして用いる最適化手法に注目する。「非線形力学系モデルを用いた最適化手法」は、高次元(100変数以上)多峰性関数最適化問題に対して、従来法と比較して、極めて優れた探索性能を持つことが、数値実験を通して確認されているが、理論的解析が不十分であり、その適用対象も勾配が計算可能な無制約最適化問題に限定されていた。しかし、近年では、その収束解の特徴と問題点が理論的に明らかになり、最適化手法としてカオス軌道を用いる意義が確立しつつあり、微分不可能性や等式・不等式制約条件などの種々の制約を有する問題を解くための手法の開発に至っている。

しかしながら、実問題への応用を考えると、(1) 有効な探索を実現するために事前にパラメータ調整が必要であること、(2) 有制約最適化問題に対する安定的かつ高速な解法が必要なこと、(3) 多目的最適化問題においては、優れた解が得られたとしても、解を選択する手法が必要であることが、依然として大きな課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、上述の研究背景を踏まえて、「3. 研究の方法」で説明する5点について研究を行い、その成果をまとめることで、「実問題に応用可能な非線形力学系モデルを用いた最適化手法」の開発を目指すことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、以下の5点について研究を理論的解析とコンピュータを用いた数値実験を通して行った。

(1) パラメータ調整を伴わない非線形力学系モデルを用いた最適化手法

非線形力学系を計算モデルとする最適化手法では、探索初期に大域的探索が可能なカオス軌道が発生するように、初期離散化幅とよばれるパラメータを事前に調整する必要がある。本研究では、これまでに得られた非線形力学系最適化モデルの収束特性の解析結果に基づいて、適切な初期離散化幅を推定する手法を提案し、その有効性を検証する。

(2) ラグランジュ・ニュートン力学系モデ

ルを用いた有制約最適化手法

局所的探索手法でありながら、広範に用いられている有制約最適化手法として「逐次2次計画法」(SQP)がある。SQPの探索モデルの本質は、ラグランジュ・ニュートン力学系として考えることが可能である。本研究では、ラグランジュ・ニュートン力学系から発生するカオス探索軌道を利用した有制約最適化手法を提案し、その有効性を検証する。

(3) 自己組織化マップとその派生法を用いたパレート解集合の可視化手法

多目的最適化問題の解は、パレート解集合とよばれる無数の解集合として得られるが、目的関数の数が4以上の多目的問題においては、その可視化が困難である。本研究では、高次元データの可視化に有効な機械学習技術である自己組織化マップとその派生法を用いたパレート解の可視化手法を提案し、その有効性を検証する。

(4) 可変計量勾配射影法の SVM 学習法と利己的経路選択ゲームへの応用

成分変数不等式制約・線形等式制約最適化問題を解くための非線形力学系モデルを用いた最適化手法として、可変計量勾配射影法が提案されている。本研究では、可変計量勾配射影法を SVM 学習法と利己的経路選択ゲームに応用した手法を提案し、その有効性を検証する。

(5) 実問題をもとに定式化された最適化ベンチマーク問題集を用いた有効性の検証

非線形力学系モデルを用いた最適化手法を、エネルギープラント運転計画問題などを含む実問題をもとにした問題集に応用し、その有用性を検証する。また、問題集の解析と拡充についても検討を行う。

4. 研究成果

(1) パラメータ調整を伴わない非線形力学系モデルを用いた最適化手法

① カオス最適化手法に対する収束解の解析結果に基づく初期離散化幅調整法と、符号降下ベクトル法を組み合わせた手法を提案した。前者は、カオス軌道が発生するパラメータが2周期解分岐点の定数倍程度で与えられることに着目し、2周期解分岐点を準ニュートン法で得られる近似ヘッセ行列から算出する手法である。後者は、勾配から探索方向の符号のみを抽出し、その方向への移動量を大域的探索から局所的探索に移行するように調整する手法である。提案手法の有効性を様々な特性を有する最適化問題への適用実験を通して明らかにした。

② ファイゲンバウムシナリオに基づいた初期離散化幅調整を伴わないカオス最適化手法を提案した。本手法では、カオス最適化手法で用いる非線形力学系において、2周期

解分岐点, 4 周期解分岐点, 8 周期解分岐点を算出することで, ファイゲンバウム定数を推定し, ファイゲンバウムシナリオに基づいてカオス軌道が発生するパラメータを推定する。提案手法の有効性を様々な特性を有する最適化問題への適用実験を通して明らかにした。

これらの成果は, カオス最適化手法をパラメータ設定調整のための事前実験を行うことが難しい問題に応用することを可能とした研究成果であるといえ, 本研究課題の目的に大きく寄与する成果である。

本研究成果のうち, ①は「5. 主な発表論文等」の [学会発表] [32] で発表している。②は [学会発表] [17] で発表している。

(2) ラグランジュ・ニュートン力学系モデルを用いた有制約最適化手法

ラグランジュ・準ニュートン力学系から発生するカオス軌道を用いた新しい有制約最適化手法を提案した。具体的には, SQP の探索モデルをラグランジュ・準ニュートン力学系としてとらえ, カオス軌道の発生について, 従来のカオス最適化手法で得られた知見に基づいて, 理論的に解析した上で, これを大域的探索に応用した新たな手法を提示し, その有効性を主に数値実験を通して明らかにした。

提案手法は, これまでに提案されたカオス現象を用いた有制約最適化手法よりも安定的かつ高速に解を得ることができる手法であり, 本成果は, 本研究課題の目的に大きく寄与する成果である。

本研究成果は, 「5. 主な発表論文等」の [学会発表] [23], [34] で発表している。また, 関連する成果を [学会発表] [35] で発表している。

(3) 自己組織化マップとその派生法を用いたパレート解集合の可視化手法

① 有望なパレート解の可視化手法として, 自己組織化マップを用いたパレート解の可視化手法が知られている。本研究では, この可視化手法について解析し, 可視化マップ内にパレート解ではない解が含まれてしまうことと, パレート解集合の端領域に対する被覆性が良くないという問題点を明らかにした。

② 自己組織化マップの派生法の 1 つである成長階層型自己組織化マップを用いたパレート解の可視化手法を提案した。本手法は, ①で指摘した問題点を克服し, 従来法より優れていることを, 理論的解析と数値実験を通して明らかにした。

③ 自己組織化マップの派生法の 1 つである SOM-NG を用いたパレート解の可視化手法を提案した。本手法は, ①で指摘した問題点を克服し, 従来法より優れていることを, 理論的解析と数値実験を通して明らかにした。

④ 多目的差分進化法と自己組織化マップを用いた対話型満足パレート解探索法を提案し, その有効性を数値実験を通して明らかにした。

多目的最適化問題においては, 無数の解によって構成されるパレート解集合が得られるが, 実問題への応用を考えると, 得られた解集合からいくつかの選好解の選択が必須となる。本研究で得られた成果は, この選好解の絞り込みに有用な手法に関するもので, 本研究課題の目的に大きく寄与する成果である。

本研究成果のうち, ①は「5. 主な発表論文等」の [雑誌論文] [3], [学会発表] [30] で発表している。②は [雑誌論文] [1], [2], [学会発表] [7], [12], [25], [29] で発表している。③は [学会発表] [7], [14] で発表し, 最新の成果を査読付き国際会議に投稿中である。④は [学会発表] [22] で発表している。また, 関連する成果を [学会発表] [16] で発表している。

(4) 可変計量勾配射影法の SVM 学習法と利己的経路選択ゲームへの応用

① SVM 学習問題は成分変数不等式制約・線形等式制約最適化問題とみなすことができる。このクラスの問題に有用な可変計量勾配射影法を応用した新たな SVM 学習法を提案し, その有効性を数値実験を通して明らかにした。

② 従来の単制約型利己的経路選択ゲーム問題を拡張した多重制約型利己的経路選択ゲーム問題を新たに定式化し, その解法として, 可変計量勾配射影法を応用した手法を提案し, その有効性を数値実験を通して明らかにした。

③ 利己的経路選択ゲームの解の最適性条件に基づいて, 解探索に冗長な経路を事前に特定し, 特定した経路を解探索の決定変数に含めないことで, 探索の高速化を図った手法を提案し, その有効性を数値実験を通して明らかにした。

SVM 学習問題は機械学習の代表的な学習問題である。また, 利己的経路選択ゲーム問題と本成果で提案した手法を応用可能な最適経路選択問題は, ネットワーク設計の最適化, 交通整理計画, 避難経路選択問題など様々な実問題に現れる問題である。これらの問題に有用な手法を提案した本研究成果は, 本研究課題の目的に大きく寄与する成果である。

本研究成果のうち, ①は「5. 主な発表論文等」の [学会発表] [4], [8], [11] で発表している。②は [学会発表] [5], [10] で発表している。③は [学会発表] [5], [9] で発表し, 最新の成果を査読付き論文誌と査読付き国際会議に投稿中である。

(5) 実問題をもとに定式化された最適化ベンチマーク問題集を用いた有効性の検証

実問題をもとに定式化された産業応用のための最適化ベンチマーク問題集の策定に主要メンバーとして参画し、その解析と拡充を行った。また、本問題集のうち、エネルギープラント運転計画問題と太陽光発電モジュールの直並切り替え問題に対して、非線形力学系モデルを用いた最適化手法を応用した手法を提案した。

本研究成果と関連する成果は「5. 主な発表論文等」の [学会発表] [1], [2], [18], [19], [20], [26], [27], [28] で発表している。

(5) その他関連する研究成果

① 多点型最適化手法の収束解の合理性について説明するために、最適化問題のゲーム化という概念を提示し、多点型最適化手法はゲーム化された最適化問題の Nash 均衡解に収束していることを理論的に明らかにした。

本研究成果は、「5. 主な発表論文等」の [学会発表] [31], [33] で発表している。

② 電力系統用蓄電池最適配置問題に対して、ラジアル基底関数を用いた応答曲面法を応用した手法を提案し、その有効性を数値実験を通して明らかにした。

本研究成果は、「5. 主な発表論文等」の [学会発表] [13], [15], [21] で発表している。

③ GPU を用いたカオス最適化手法の並列計算手法を提案し、その有効性をメタヒューリスティクスの代表的手法である粒子群最適化法 (PSO) と差分進化法 (DE) との比較を通して明らかにした。

本研究成果は、「5. 主な発表論文等」の [学会発表] [6] で発表している。

④ カスケード故障に対して頑健な複雑ネットワーク成長モデル設計手法を提案し、その有効性を数値実験を通して明らかにした。

本研究成果は、「5. 主な発表論文等」の [学会発表] [24] で発表している。

⑤ 過去のデータを考慮したラジアル基底関数ネットワークの学習法を提案し、その有効性を数値実験を通して明らかにした。

本研究成果は、「5. 主な発表論文等」の [学会発表] [3] で発表している。

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] N. Suzuki, T. Okamoto, S. Koakutsu, A Pareto optimal solution visualization method using an improved growing hierarchical self-organizing maps based on the batch learning, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 査読有, Vol. 20, 2016 (in Printing)
- [2] 鈴木 直人, 岡本 卓, 小坏 成一, 成長階層型自己組織化マップを用いたパレ

ート解集合の可視化, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol. 135, 2015, pp. 908-919, DOI: 10.1541/ieejieiss.135.908

- [3] A. Hironaka, T. Okamoto, S. Koakutsu, H. Hirata, Analysis and improvements of the Pareto optimal solution visualization method using the self-organizing maps, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 8, 2015, pp. 34-43, DOI: 10.9746/jcmsi.8.34

[学会発表] (計 35 件)

- [1] R. Suzuki, T. Okamoto, An optimization benchmark problem based on the energy plant model in the smart-community, IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization 2016, 2016 年 3 月 7 日~2016 年 3 月 8 日, 成蹊大学 (東京都武蔵野市)
- [2] T. Okamoto, T. Hayashi, Analysis of the optimization benchmark problem for series-parallel switching of photovoltaic modules under various conditions, IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization 2016, 2016 年 3 月 7 日~2016 年 3 月 8 日, 成蹊大学 (東京都武蔵野市)
- [3] 渡邊 悠和, 岡本 卓, 小坏 成一, 過去のデータを考慮したラジアル基底関数ネットワークの学習法, 計測自動制御学会 第 54 回システム工学部会研究会, 2016 年 3 月 7 日, 大阪大学東京オフィス (東京都千代田区)
- [4] 寺尾 啓, 岡本 卓, 小坏 成一, 可変計量勾配射影法と SMO を用いた SVM 学習, 計測自動制御学会 第 54 回システム工学部会研究会, 2016 年 3 月 7 日, 大阪大学東京オフィス (東京都千代田区)
- [5] 吉田 皓一, 岡本 卓, 小坏 成一, 冗長経路の除去による多重制約型 Selfish Routing Game の均衡解探索の高速化, 電気学会 電子・情報・システム部門システム / 産業応用部門 産業計測制御 合同研究会, 2015 年 12 月 5 日, 新潟県立看護大学 (新潟県上越市)
- [6] 唐子 顕児, 岡本 卓, 小坏 成一, GPU を用いたカオス最適化手法の高速化, 電気学会 電子・情報・システム部門システム / 産業応用部門 産業計測制御 合同研究会, 2015 年 12 月 5 日, 新潟県立看護大学 (新潟県上越市)
- [7] 鈴木 直人, 小林 祐介, 岡本 卓, 小坏 成一, 自己組織化マップとその派生法を用いたパレート解の可視化手法, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2015, 2015 年 11 月 18 日~2015 年 11 月 20 日, 函館アリーナ (北海

- 道函館市)
- [8] 岡本 卓, 吉田 皓一, 寺尾 啓, 相吉 英太郎, 小塚 成一, 可変計量勾配射影法のSVM学習と多重制約型Selfish routing gameへの応用, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2015, 2015年11月18日~2015年11月20日, 函館アリーナ (北海道函館市)
- [9] 吉田 皓一, 岡本 卓, 小塚 成一, 冗長経路の除去による Selfish routing game の均衡解探索の高速化, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2015, 2015年11月18日~2015年11月20日, 函館アリーナ (北海道函館市)
- [10] K. Yoshida, T. Okamoto, S. Koakutsu, Equilibrium solution search on a selfish routing problem with multiple constraints using the variable metric gradient projection method, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2015, 2015年10月9日~2015年10月12日, Hong Kong SAR (China)
- [11] 寺尾 啓, 岡本 卓, 相吉 英太郎, 小塚 成一, 可変計量勾配射影法を用いたサポートベクターマシン学習法, 第25回 インテリジェント・システム・シンポジウム, 2015年9月24日~2015年9月25日, 東北大学片平キャンパス (宮城県仙台市)
- [12] 鈴木 直人, 岡本 卓, 小塚 成一, バッチ型 GHSOM を用いたパレート解集合の可視化, 第25回 インテリジェント・システム・シンポジウム, 2015年9月24日~2015年9月25日, 東北大学片平キャンパス (宮城県仙台市)
- [13] N. Takase, T. Okamoto, S. Koakutsu, Optimal battery assignment method by response surface method with radial basis function networks against N-1 line accidents with node voltage constraint, 平成 27 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2015年8月26日~2015年8月29日, 長崎大学文教キャンパス (長崎県長崎市)
- [14] 小林 祐介, 岡本 卓, 小塚 成一, SOM-NG を用いたパレート解の可視化, 平成 27 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2015年8月26日~2015年8月29日, 長崎大学文教キャンパス (長崎県長崎市)
- [15] N. Takase, T. Okamoto, S. Koakutsu, Optimal assignment of the battery for the power system by the response surface method with the radial basis function networks, SICE Annual Conference 2015, 2015年7月28日~2015年7月30日, Hangzhou (China)
- [16] N. Suzuki, T. Okamoto, S. Koakutsu, Visualization of Pareto optimal solutions using MIGSOM, IEEE Congress on Evolutionary Computation 2015, 2015年5月25日~2015年5月28日, 仙台国際センター (宮城県仙台市)
- [17] 鈴木 慎一郎, 岡本 卓, 小塚 成一, ファイゲンバウムシナリオに基づくカオス最適化手法の初期離散化幅推定, 計測自動制御学会 第 52 回システム工学部会研究会, 2015年3月10日, 近畿大学東京センター (東京都中央区)
- [18] T. Okamoto, Overview of optimization benchmark problems for industrial applications and review of conventional problems, the 1st IEEJ international workshop on sensing, actuation, and motion, control, 2015年3月9日~2015年3月10日, 名古屋工業大学 (愛知県名古屋市)
- [19] K. Yokokawa, T. Okamoto, A. Kawagoe, Y. Ueno, K. Mori, Formulation and solutions for daily operation scheduling problem of water supply pump, the 1st IEEJ international workshop on sensing, actuation, and motion, control, 2015年3月9日~2015年3月10日, 名古屋工業大学 (愛知県名古屋市)
- [20] R. Suzuki, T. Okamoto, An introduction of the energy plant operational planning problem: A formulation and solutions, the 1st IEEJ international workshop on sensing, actuation, and motion, control, 2015年3月9日~2015年3月10日, 名古屋工業大学 (愛知県名古屋市)
- [21] 高瀬 信彰, 岡本 卓, 小塚 成一, ラジアル基底関数ネットワークを用いた応答曲面法による電力系統用蓄電池の最適配置, 電気学会 電子・情報・システム部門 システム / 産業応用部門 産業計測制御 合同研究会, 2014年12月6日, 大洗ホテル (茨城県大洗町)
- [22] 山田 勇樹, 岡本 卓, 小塚 成一, 多目的差分進化法と自己組織化マップを用いた対話型満足パレート解探索法, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2014, 2014年11月21日~2014年11月23日, 岡山大学津島キャンパス (岡山県岡山市)
- [23] T. Okamoto, Constrained optimization using the chaotic sequential quadratic approximation type Lagrange quasi-Newton method, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2014, 2014年10月5日~2014年10月8日, San Diego (USA)
- [24] H. Mizuno, T. Okamoto, S. Koakutsu, A design method of complex network growth model robust over the casca

- de failure, SICE Annual Conference 2014, 2014年9月9日~2014年9月12日, 北海道大学札幌キャンパス (北海道札幌市)
- [25] 鈴木 直人, 岡本 卓, 小坏 成一, マップの対称変換を導入した成長階層型自己組織化マップを用いたパレート解集合の可視化, 平成 26 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2014年9月3日~2014年9月6日, 島根大学松江キャンパス (島根県松江市)
- [26] 岡本 卓, ベンチマーク問題の実装と公開, 平成 26 年電気学会全国大会, 2014年3月18日~2014年3月20日, 愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山市)
- [27] 横川 勝也, 岡本 卓, 上水道送水ポンプ運転計画問題とその解法例, 平成 26 年電気学会全国大会, 2014年3月18日~2014年3月20日, 愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山市)
- [28] 岡本 卓, 足立 直紀, 鈴木 亮平, 小坏 成一, 平田 廣則, エネルギープラント運用計画問題と最適化手法の適用例, 平成 26 年電気学会全国大会, 2014年3月18日~2014年3月20日, 愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山市)
- [29] 鈴木 直人, 岡本 卓, 小坏 成一, 平田 廣則, GHSOM を用いたパレート解集合の可視化, 電気学会 電子・情報・システム部門 システム研究会, 2013年11月23日, 愛知県立大学サテライトキャンパス (愛知県名古屋市)
- [30] 弘中 篤史, 岡本 卓, 小坏 成一, 平田 廣則, 自己組織化マップを用いたパレート解の可視化手法の解析, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2013, 2013年11月18日~2013年11月20日, ピアザ淡海 (滋賀県大津市)
- [31] T. Okamoto, E. Aiyoshi, Gamification of the optimization problem and multi-point type optimization method, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2013, 2013年10月13日~2013年10月16日, Manchester (UK)
- [32] T. Okamoto, H. Hirata, Chaotic optimization method without initial sampling parameter tuning — Empirical comparisons of two approaches in various problems, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2013, 2013年10月13日~2013年10月16日, Manchester (UK)
- [33] 相吉 英太郎, 岡本 卓, 最適化問題のゲーム化変換と多点型最適化手法, 第 23 回 インテリジェント・システム・シンポジウム, 2013年9月25日~2013年9月26日, 九州大学医学部百年講堂 (福岡県福岡市)
- [34] T. Okamoto, H. Hirata, Constrained optimization using the chaotic Lagrange quasi-Newton method — A basic study of its search trajectory and its search capability, SICE Annual Conference 2013, 2013年9月14日~2013年9月17日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市)
- [35] 森 雅成, 岡本 卓, 小坏 成一, 平田 廣則, 指数関数型拡大ラグランジュ関数を用いたカオスラグランジュ関数法とその改良, 平成 25 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2013年9月4日~2013年9月7日, 北見工業大学 (北海道北見市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 卓 (OKAMOTO TAKASHI)
千葉大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40451752

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者