

令和元年6月6日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00324

研究課題名(和文) 実応用に向けた非線形力学系を用いた最適化手法と機械学習の融合技術の開発

研究課題名(英文) Development of new computational intelligence techniques fusing the optimization techniques using nonlinear dynamics and the machine learning technologies for the real applications

研究代表者

岡本 卓 (Okamoto, Takashi)

千葉大学・グローバルプロミネント研究基幹・特任准教授

研究者番号：40451752

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、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と機械学習の融合技術の開発を行った。具体的には、冗長経路除去とSequential Minimal Optimizationを用いたネットワークルーティング問題の高速解法の開発、非線形力学系モデルを用いた最適化手法の深層学習問題への応用と新たな深層学習アルゴリズムの開発、自己組織化マップとその派生法を用いたパレート解可視化手法の開発、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の開発と並列化を行った。そして、これらを含む計算知能技術の実問題への応用を行い、その有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

昨今、人工知能技術が大きな注目を集めているが、その根幹をなすのが、機械学習と最適化技術を中心とする計算知能技術である。本研究課題は、この計算知能技術のうち、非線形力学系を用いた最適化手法と機械学習の融合技術の開発に関するものである。また、その有用性を実問題を用いて検証しており、計算知能技術、ひいては人工知能技術の発展に資する研究成果であるといえる。

研究成果の概要(英文)：In this research, new computational intelligence techniques fusing the optimization techniques using nonlinear dynamics and the machine learning technologies for the real applications has been developed. Specifically, a fast solver for the network routing problems using a redundant paths removing techniques and the sequential minimal optimization has been developed. Applications of the optimization techniques using the nonlinear dynamics to the deep learning have been investigated, and then, a new deep learning algorithm has been developed. A new Pareto solution visualization method using the self-organizing maps and its derived method has been developed. A new optimization techniques using the nonlinear dynamics without the parameter tuning and its parallelization have been developed. Then, the computational intelligence techniques including the developed methods in this research have been applied to the real problems; consequently, their effectiveness have been confirmed.

研究分野：計算知能

キーワード：大域的最適化 システム工学 ソフトコンピューティング 機械学習 計算知能 ニューラルネットワーク  
非線形力学

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

## 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、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。また、近年では、複数の意思決定基準が存在する複雑なシステムの問題解決に向けて、多目的最適化技術の開発も大きな研究テーマとなっている。

本研究では、大域的最適化手法の中でも、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とは、勾配法に代表される最適化計算モデルを非線形力学系として解釈し、この力学系から発生する探索軌道を最適化計算に利用しようとする枠組みの総称である。研究代表者らは、非線形力学系モデルを用いた最適化手法の中でも、大域的探索能力に優れたカオス軌道を用いた最適化手法を中心に研究を行い、その収束解の特徴と問題点を理論的に明らかにし、その特性を生かした新しい最適化の枠組みを持つ手法をいくつか提案するに至った。そして、その成果をさらに発展させ、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を通して、実問題への応用を指向した手法の開発に至っている。これらの手法は、とくに、多くの局所的最適解をもつ高次元（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。

近年、深層学習(Deep Learning)の登場を契機として、機械学習技術に大きな注目が集まり、その技術開発が大きく進展されると同時に、さまざまな分野への応用が始まっている。多くの機械学習技術における学習則は「最適化技術」に立脚したものであり、これまでに開発した非線形力学系モデルを用いた最適化手法を応用することで、学習精度の向上と学習の高速化が期待される。その一方で、多目的最適化問題やエネルギーシステム最適化問題に対して、機械学習技術を援用した最適化手法が提案されており、その有効性が検証されている。このように、非線形力学系モデルを用いた最適化手法と機械学習を互いに援用する融合技術開発は、実応用を指向したシステム解析・設計における強力な手段の開発につながると期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では、上述した研究背景を踏まえて、「3. 研究の方法」で説明する4点について研究を行い、その研究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と機械学習の融合技術」の開発を行い、開発した手法を実問題をもとに定式化された問題集や研究代表者らによって定式化した実問題に適用することで、その有効性を検証することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の4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) 冗長経路除去と Sequential Minimal Optimization を用いたネットワークルーティング問題の高速解法の開発

ネットワークルーティング問題の高速解法として、解探索に冗長な経路を事前に特定し除去することで解探索を高速化する解法と、機械学習の1手法である Support Vector Machine の学習手法である Sequential Minimal Optimization 法を応用することで解探索を高速化する手法を提案し、その有効性を検証する。

### (2) 非線形力学系モデルを用いた最適化手法の深層学習問題への応用と新たな深層学習アルゴリズムの開発

深層学習による多層ニューラルネットワークの学習法は、最急降下法に基づくバックプロパゲーションに立脚した方法である。本研究では、最急降下法の自然な拡張といえる非線形力学系モデルを用いた最適化手法を深層学習をはじめとするニューラルネットワーク学習問題に応用した手法を提案し、その有効性を検証する。また、基底関数の改良や事前学習機構を改良した深層学習アルゴリズムの開発も行い、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可視化手法の開発

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以上の多数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の改良手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) 計算知能技術の実問題への応用

非線形力学系モデルを用いた最適化手法、メタヒューリスティクス、進化計算技術を中心とした最適化手法とニューラルネットワークを中心とした機械学習技術を、実問題をもとに定式化された問題集や研究代表者らによって定式化した実問題に応用し、その有効性を検証する。

#### (5) 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の開発と並列化

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。また、非線形力学系モデルを用いた最適化手法のアルゴリズムを GPU を用いて並列化した手法を提案し、その有効性を検証する。

### 4. 研究成果

#### (1) 冗長経路除去と Sequential Minimal Optimization を用いたネットワークルーティング問題の高速解法の開発

① ネットワークルーティング問題における可変計量勾配射影力学系を計算モデルとする解法において、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。

② SVM 学習問題とネットワークルーティング問題は、ともに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、同じ解法を応用することが可能である。SVM 学習問題の高速解法として、Sequential Minimal Optimization 法が提案されているが、これをネットワークルーティング問題の解法に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 ①で提案した冗長経路の除去手法と②で提案した Sequential Minimal Optimization を用いた解法を組み合わせた高速解法を提案し、その有効性を数値実験を通して明らかにした。

ネットワークルーティング問題は、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〔雑誌論文〕[2]、〔学会発表〕[16]、[19]で発表している。②は〔学会発表〕[10]、[11]、[13]、[14]で発表している。③は〔学会発表〕[3]で発表している。

#### (2) 非線形力学系モデルを用いた最適化手法の深層学習問題への応用と新たな深層学習アルゴリズムの開発

① 深層学習の学習アルゴリズムの 1 つである勾配正規化機構を有するミニバッチアルゴリズムに対して、勾配の符号変化に基づいた学習率調整機構を導入したアルゴリズムを提案し、その有効性を数値実験を通して明らかにした。

② ニューラルネットワークの 1 種であるラジアル基底関数ネットワークについて、学習データの分布に基づいて基底関数の数と形状を自動的に調整する学習法を提案し、その有効性を数値実験を通して明らかにした。

③ 深層学習の事前学習に用いられる Auto Encoder という技術について、事前学習と本学習を同時に行うことで Autoencoder 性能を改善し、全体の学習性能を改善する手法を提案し、その有効性を数値実験を通して明らかにした。

①の手法は、深層学習の学習速度の高速化に寄与するもので、②と③の手法は、深層学習で用いるニューラルネットワークの構造に関する研究成果であり、ともに、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〕[6]、[9]で発表している。②は〔学会発表〕[22]、[23]で発表している。③は〔学会発表〕[4]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可視化手法の開発

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、従来の自己組織化マップを用いたパレート解可視化を用いると、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問題点があったが、これを SOM-NG を用いることで克服できることを、理論的解析と数値実験を通して明らかにした。

本研究成果は、機械学習技術の 1 つである自己組織化マップを多目的最適化とそれを用いた意思決定に応用しその有用性を示した点において、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〕[17]、[18]で発表している。

#### (4) 計算知能技術の実問題への応用

① 生産機器に付属された記録媒体にテキスト形式で保存されているデータの形式ないしは仕様が不明な場合に、最適化技術を応用して、データを自動分割する手法を提案し、その有効性を数値実験を通して明らかにした。

② トイレの内部状態をセンシングし、ボクセルデータとしてモニタリングできるシステムにおいて、深層ニューラルネットワークの1つであるCNNを応用した安全性判断システムを提案し、その有用性を、数値実験を通して明らかにした。

③ 実問題をもとに定式化されたベンチマーク問題集について、非線形力学系モデルを用いた最適化手法を応用した熱源機器運用計画問題の解法、メタヒューリスティクスを応用した自動ピッキングシステムの運用計画問題の解法、上水道ポンプ運用計画問題の解法を提案し、その有用性を数値実験を通して明らかにした。

いずれの研究成果も、最適化手法と機械学習技術を実問題に応用した研究成果であり、計算知能技術の実応用可能性を示した点において、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〕[7]で発表している。②は〔学会発表〕[8]で発表している。③は〔雑誌論文〕[1]、〔学会発表〕[1]、[2]で発表している。

#### (5) 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の開発と並列化

① 数値微分によるカオス最適化手法の勾配計算をGPUを用いて並列化し、探索を高速化した手法を提案し、その有効性を数値実験を通して確認した。

② すでに提案した準カオス最適化手法のパラメータ調整則を遺伝的プログラミングを用いて進化させる手法を提案し、その有効性を数値実験を通して確認した。

③ すでに提案したファイゲンバウム定数の計算法に基づいたカオス最適化手法の初期離散化幅調整手法について、その高速化アルゴリズムを提案し、その有効性を数値実験を通して確認した。

いずれの研究成果も、非線形力学系モデルを用いた最適化手法の代表的な手法であるカオス最適化手法のパラメータ調整の自動化と並列計算による高速化に関する成果であり、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〕[20]で発表している。②は〔学会発表〕[15]で発表している。③は〔学会発表〕[12]で発表している。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

[1] 竹内 一生, 小坏 成一, 岡本 卓, 伊藤 智義, 下馬場 朋禄: 分枝限定法を用いた上水道ポンプ運用計画問題の最適化, 電気学会論文誌C, 査読有, Vol. 138, 2018, pp. 1287-1288, doi: 10.1541/ieejieiss.138.1287

[2] K. Yoshida, T. Okamoto, S. Koakutsu: An efficiency improvement of the equilibrium solution search on the selfish routing game by removing redundant paths, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 9, 2016, pp. 234-241, doi: 10.9746/jcmsi.9.234

〔学会発表〕(計 23 件)

[1] 金谷 凌, 小坏 成一, 岡本 卓, 下馬場 朋禄, 伊藤 智義: Simulated Annealing と Graph-based heuristics を用いた自動ピッキングシステムの運用計画法, 電気学会 システム/産業計測制御合同研究会, 2018

[2] 田中 康平, 藤原 滉士, 岡本 卓, 小坏 成一, 下馬場 朋禄, 伊藤 智義: 熱源機器運用計画のための最適化ベンチマーク問題の解探索とそれに基づく改良, 電気学会 システム/産業計測制御合同研究会, 2018

[3] 樋田 一博, 岡本 卓, 小坏 成一, 下馬場 朋禄, 伊藤 智義: 冗長経路除去と Sequential Minimal Optimization を用いたネットワークルーティング問題の高速解法, 第28回 インテリジェント・システム・シンポジウム, 2018

[4] 松井 央佑, 岡本 卓, 小坏 成一, 下馬場 朋禄, 伊藤 智義: Autoencoder による特徴抽出機構を伴ったニューラルネットワークの並列学習法, 第28回 インテリジェント・システム・シンポジウム, 2018

[5] O. Matsui, T. Okamoto, S. Koakutsu, T. Shimobaba, T. Ito: A parallel learning method of neural networks with feature extraction mechanism by autoencoder, 平成30年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2018

[6] 上原 賢太, 岡本 卓, 小坏 成一, 下馬場 朋禄, 伊藤 智義: 勾配正規化と学習率自動調整

機構を伴ったミニバッチ学習アルゴリズム, 平成 30 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会 講演論文集, 2018

[7] 長谷川 翼, 岡本 卓, 仲吉 良彰, 矢野 和隆, 小坏 成一, 下馬場 朋禄, 伊藤 智義: 最適化手法を用いた形式不明データの自動分割法, 電気学会 システム/産業計測制御合同研究会, 2017

[8] S. Minami, T. Okamoto, S. Koakutsu, T. Shimobaba, T. Ito: A safety discrimination of a bathroom monitoring system using the convolutional neural networks, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2017, 2017

[9] D. Ito, T. Okamoto, S. Koakutsu: A learning algorithm with a gradient normalization and a learning rate adaptation for the mini-batch type learning, SICE Annual Conference 2017 (国際学会), 2017

[10] K. Toyoda, T. Okamoto, S. Koakutsu: An optimal routing search method on the network routing problem using the sequential minimal optimization, SICE Annual Conference 2017 (国際学会), 2017

[11] 樋田 一博, 岡本 卓, 小坏 成一: 逐次最小問題最適化法を用いた経路選択問題の解探索法, 平成 29 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2017

[12] 菌部 達哉, 岡本 卓, 小坏 成一: ファイゲンバウム定数の計算法に基づくカオス最適化手法の初期離散化幅推定法の高速度化, 平成 29 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2017

[13] 樋田 一博, 岡本 卓, 小坏 成一: SMO を用いた利己的経路選択問題の解法における変数選択法の検討, 第 56 回 システム工学部会研究会, 2017

[14] 樋田 一博, 吉田 皓一, 岡本 卓, 小坏 成一, SMO を用いた利己的経路選択ゲーム問題の均衡解探索の高速度化, 第 10 回 コンピュータショナル・インテリジェンス研究会, 2016

[15] 笛田 翔, 岡本 卓, 小坏 成一: 遺伝的プログラミングを用いた多点型準カオス最適化手法のパラメータ調整則設計, 進化計算シンポジウム 2016, 2016

[16] 吉田 皓一, 岡本 卓, 小坏 成一: 冗長経路の除去によるネットワーク経路選択問題の解探索の高速度化, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2016, 2016

[17] 小林 祐介, 岡本 卓, 小坏 成一: パラメータ最適化を伴った SOM-NG を用いたパレート解の可視化, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2016, 2016

[18] Y. Kobayashi, T. Okamoto, S. Koakutsu, A pareto optimal solution visualization method using SOM-NG with learning parameter optimization, IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics 2016 (国際学会), 2016

[19] K. Yoshida, T. Okamoto, S. Koakutsu: An efficient improvement of the optimal routing search on the network routing problem by removing redundant paths, SICE Annual Conference 2016 (国際学会), 2016

[20] 唐子 顕児, 岡本 卓, 小坏 成一: GPU を用いた多点型カオス最適化手法の高速度化, 平成 28 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2016

[21] 村上 敬祐, 岡本 卓, 小坏 成一: ラグランジュ関数の鞍点探索法を用いたサポートベクターマシンの学習, 平成 28 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2016

[22] T. Shimizu, T. Okamoto, S. Koakutsu: A Basis Function Consolidation Method of Radial Basis Function Networks, 平成 28 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2016

[23] 杉浦 宏樹, 岡本 卓, 小坏 成一: 学習データの分布に基づいた楕円形基底関数を用いたラジアル基底関数ネットワーク, 第 9 回 コンピュータショナル・インテリジェンス研究会, 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)

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者: なし

(2) 研究協力者: なし