

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月21日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22700229

研究課題名（和文） 非線形力学系モデルを用いた種々の制約付き最適化手法の開発

研究課題名（英文） Development of optimization methods using nonlinear dynamics to solve optimization problems with various constraints

研究代表者

岡本 卓 (OKAMOTO TAKASHI)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40451752

研究成果の概要（和文）：本研究では、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た、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最適化問題を解くための最適化手法の開発を目的として研究を行った。その結果、等式・不等式制約条件付き問題のためのカオスラグランジュ関数法、厳密勾配を計算せずに探索可能な準カオス最適化手法、カオス最適化手法の安定性解析の結果に基づいたパラメータ調整を伴わないカオス最適化手法の提案等の成果を得た。

研究成果の概要（英文）：In this study, we studied to develop optimization methods which use nonlinear dynamics like the chaotic dynamics as their computation models to solve optimization problems with various constraints which includes the indifferentiability and equality and inequality constraints. We proposed the chaotic Lagrangian method for optimization problems with equality and inequality constraints, the quasi-chaotic optimization method which can implement without exact gradient computation, and the chaotic optimization method without the parameter tuning based on the stability analysis of the chaotic optimization method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：大域的最適化，カオス，システム工学，数理工学，複雑系

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、金融、通信、設計、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。これまでの「非線形力学系モデルを

用いた最適化手法」は、確定論的方程式に従うカオス軌道を発生させても、これをいわば「大域的探索可能なランダムサーチ軌道」としてしか利用せず、また、その有効性も数値実験的に確認するのみである「ヒューリスティクスの域を出ない」手法に過ぎなかった。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、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ている。これらの手法は、高次元（100 変数以上）多峰性関数に対して、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。

ところで、現実の最適化問題を解くことを考えると (1) 決定変数に対して、等式・不等式制約条件が課せられている問題（制約条件付き問題）、(2) たとえば、シミュレータから目的関数値を得る問題などのように、目的関数が解析的な形式で与えられていない、ないしは、目的関数の微分可能性が保障されていないなどの理由で、目的関数の勾配を計算することができない問題、(3) 決定変数が連続変数と離散変数によって構成されている問題（混合整数計画問題）、(4) パラメータ設定のための事前実験を行うことが難しい問題のように、さまざまな制約を考慮する必要がある。しかしながら、上述の非線形力学系モデルを用いた最適化手法は、連続変数の無制約問題に対する手法であり、探索の駆動力として勾配を用いるため勾配が直接計算可能な問題にしか適用することができず、上述のような種々の制約を有する現実の最適化問題への適用には大きな課題があるといえる。

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、現実の最適化問題に適用可能な「種々の制約を有する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」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4点についての研究を、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) ラグランジュ関数法と非線形力学系モデルを用いた制約条件付き最適化手法

等式・不等式制約条件付き最適化問題を解くための古典的な手法として「ラグランジュ関数法」がある。本研究では、ラグランジュ関数法に対して、結合構造を導入することで

局所的な収束特性を改善し、さらに、その勾配系から発生するカオス軌道を用いて大域的探索を行う手法を提案し、その有効性を検証する。また、その収束特性を理論的解析を通して明らかにする。

(2) 同時摂動勾配近似と非線形力学系モデルを用いた最適化手法

目的関数の勾配が直接計算できない場合に、2回の目的関数呼び出しのみで、勾配を近似的に計算する手法として「同時摂動勾配近似」が提案されている。本研究では、非線形力学系モデルに同時摂動勾配近似を導入した手法を提案し、勾配が直接計算できない問題に対して、その有効性を検証する。また、その収束特性を理論的解析を通して明らかにする。

(3) 非線形力学系モデルを用いた混合整数計画法

(2)で述べた手法に関連して、離散変数問題に対する同時摂動勾配近似法が提案されている。本研究では、これと(2)で提案した手法を組み合わせた混合整数計画法を提案し、その有効性を検証する。

(4) 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

非線形力学系モデルのうち離散化勾配系を用いたカオス最適化手法を有効に機能させるためには、初期離散化幅とよばれるパラメータを適切に調整する必要がある。本研究では、パラメータ調整を伴わないカオス最適化手法として、勾配ベクトルから算出した方向ベクトルを用いる方法と、カオス最適化手法の安定性解析の結果を利用して適切なパラメータを推定する手法を提案し、その有効性を検討する。

4. 研究成果

(1) ラグランジュ関数法と非線形力学系モデルを用いた制約条件付き最適化手法

ラグランジュ関数を用いた勾配系から発生するカオス軌道を用いた最適化手法として「多点型カオスラグランジュ関数法」を提案した。この手法では、ラグランジュ関数法に対して、結合構造を導入することで局所的な収束特性を改善し、さらに、その勾配系から発生するカオス軌道を用いて大域的探索を行う。理論的解析と数値実験結果から、結合構造を導入した勾配系からカオス軌道が発生することを確認した。さらに、制約条件付き最適化問題の標準的なベンチマーク問題に対する数値実験結果から、多点型カオスラグランジュ関数法は他手法と比較して優れた探索性能を有することを確認した。

この成果は、等式・不等式制約条件付き最適化問題に対して有効な非線形力学系モデルを用いた最適化手法に関する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。

本研究成果は「5. 主な発表論文等」の〔雑誌論文〕[1]で発表している。

(2) 同時摂動勾配近似と非線形力学系モデルを用いた最適化手法

① 非線形力学系モデルに同時摂動勾配近似を導入した手法として「準カオス最適化手法」を提案した。具体的には、非線形力学系モデルに同時摂動勾配近似を導入した探索モデルから発生する軌道について、厳密勾配力学系から発生するカオス軌道との関連を理論的に明らかにし、これを準カオス軌道と命名した。つぎに、準カオス軌道を用いた多点型探索モデルを提案し、その有効性を数値実験を通して検証した。結果として、多変数(100変数以上)多峰性関数最適化問題において、多点型準カオス最適化手法は、他のメタヒューリスティクス(PSO, DEなど)と比較して優れた探索性能を有することを確認した。また、準カオス軌道を利用した探索モデルと水抜き法とよばれる手法を組み合わせた手法を提案し、その有効性を主に数値実験を通して明らかにした。

② 準カオス最適化手法を用いた制約条件付き最適化手法を提案した。具体的には、準カオス最適化手法と精密ペナルティ法を組み合わせた探索モデルを用いて大域的探索を行い、逐次2次計画法を用いて局所的探索を行う手法を提案し、その有効性を主に数値実験を通して明らかにした。

これらの成果は、目的関数の勾配を計算することができない制約を有する最適化問題に対して有効な非線形力学系モデルを用いた最適化手法に関する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〔雑誌論文〕[2]と〔学会発表〕[11], [14]で発表している。②は〔学会発表〕[6]で発表している。

(3) 非線形力学系モデルを用いた混合整数計画法

① 離散変数問題に対する同時摂動勾配近似法と準カオス最適化手法を組み合わせた混合整数計画法を提案した。また、この手法と精密ペナルティ法と組み合わせた制約条件付き混合整数計画法を提案した。機械系分野で定式化される最適設計問題に対する数値実験の結果、提案手法が他手法と比較して優れた探索性能を有することを確認した。

② 混合整数計画問題に対する①で説明し

た手法とは別のアプローチとして、原問題を三角関数を用いた等式制約条件付き問題に変換することで連続緩和するアプローチがある。本研究では、①で説明した手法と連続緩和を用いた手法を主に数値実験を通して比較し、後者は連続緩和を用いた手法は離散変数のみで構成された問題に有効であるが、前者は連続変数も含まれる混合整数計画問題に対して有効であることを明らかにした。

これらの成果は、目的関数に離散変数を含む制約を有する最適化問題に対して有効な非線形力学系モデルを用いた最適化手法に関する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〕[7], [8]で発表している。②は〔学会発表〕[5]で発表している。

(4) 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 パラメータ調整を伴わないカオス最適化手法として、勾配ベクトルから降下方向の符号ベクトルのみを算出し、その方向への移動量を強制的に決定する手法を提案した。主に数値実験を通して、提案手法は、パラメータを適切に調整した従来のカオス最適化手法と同等の探索性能を有することを確認した。

② カオス最適化手法の安定性解析結果に基づいて、適切な離散化幅を推定する手法を2つ提案した。1つは、リアプノフ指数とその計算法を応用して、2周期解分岐パラメータとよばれるパラメータを推定し、この結果を利用して適切な初期離散化幅を推定する手法である。もう1つは、準ニュートン法を利用して目的関数のヘッセ行列を推定し、この推定行列から2周期解分岐パラメータを算出し、この結果を利用して適切な初期離散化幅を推定する手法である。主に数値実験を通して、提案手法は、パラメータを適切に調整した従来のカオス最適化手法と同等の探索性能を有することを確認した。

③ ①で提案した手法を準カオス最適化手法に応用した手法を提案し、その有効性を主に数値実験を通して確認した。

これらの成果は、パラメータ設定のための事前実験を行うことが難しいという意味での制約を有する最適化問題に対して有効な非線形力学系モデルを用いた最適化手法に関する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〔雑誌論文〕[3]と〔学会発表〕[10]で発表している。②は〔学会発表〕の[3], [4]で発表している。③は〔学会発表〕の[9]で発表している。

(5) その他関連する研究成果

① 慣性付き降下型勾配系から発生するカオス軌道を用いた手法について、その探索特性を理論的に明らかにした上で、これを用いた多点型最適化手法を提案し、その有効性を主に数値実験を通して明らかにした。本研究課題では、主に離散化最急降下型勾配系から発生するカオス軌道を用いた手法に注目しているが、本研究成果を本研究課題で得られた成果に応用することで、新たな探索モデルの提案が期待される。なお、本研究成果は、「5. 主な発表論文等」の〔雑誌論文〕[4]で発表している。

② 現実の最適化問題では、その目的関数と制約条件式の形状が不明な場合や、その値を得るのに膨大な時間を要する場合がある。このような場合に有効な手法として、実験計画法による応答曲面法が提案されており、近年では、多峰性関数最適化問題も扱うことが可能なラジアル基底関数を用いた手法が提案されている。本研究では、ラジアル基底関数を用いた応答曲面法にカオス最適化手法を組み合わせた手法を提案し、その有効性を数値実験を通して確認した。さらに、ラジアル基底関数の半径の最適化を伴う手法を提案し、その有効性を数値実験を通して確認した。本研究成果は、目的関数と制約条件式が陽に与えられないという意味の制約を有する最適化問題に対して有効な非線形力学系モデルを用いた最適化手法に関する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。なお、本研究成果は「5. 主な発表論文等」の〔学会発表〕[1], [12], [13]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4件)

- [1] T. Okamoto, H. Hirata, Constrained Optimization using a Multipoint Type Chaotic Lagrangian Method with a Coupling Structure, Engineering Optimization, 査読有, 第45巻, 2013年, pp. 311-336, DOI: 10.1080/0305215X.2012.675060
 - [2] T. Okamoto, H. Hirata, Global optimization using a multipoint type quasi-chaotic optimization method, Applied Soft Computing, 査読有, 第13巻, 2013年, pp. 1247-1264, DOI: 10.1016/j.asoc.2012.10.025
 - [3] 岡本卓, 平田廣則, 初期離散化幅の調整を伴わないカオス最適化手法, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 第48巻, 2012年, pp. 125-133, DOI: 10.9746/sicetr.48.125
 - [4] 岡本卓, 相吉英太郎, 浜田憲一郎, 多点型離散化時変慣性系モデルを用いた大域的最適化, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 第46巻, 2010年, pp. 642-650, DOI: 10.9746/sicetr.46.642
- 〔学会発表〕(計14件)
- [1] 島谷修平, 岡本卓, 小坏成一, 平田廣則, 基底半径最適化を伴うラジアル基底関数ネットワークを用いた応答曲面法, 計測自動制御学会 第48回システム工学部会研究会, 2013年3月6日, 東京工業大学田町キャンパス (東京都)
 - [2] 丹治瑛一, 岡本卓, 小坏成一, 平田廣則, 生存選択型情報交換を導入した多点型準カオス最適化手法, 電気学会システム研究会「確率的最適化」, 2012年12月2日, 近畿大学会館 (大阪府)
 - [3] 岡本卓, 平田廣則, カオス力学系の分岐特性に基づいた初期離散化幅の推定を伴うカオス最適化手法, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2012, 2012年11月21日~2012年11月23日, ウィルあいち (愛知県)
 - [4] 小野涉, 岡本卓, 小坏成一, 平田廣則, 初期離散化幅の推定を伴うカオス最適化手法, 計測自動制御学会 第39回知能システムシンポジウム, 2012年3月16日, 千葉大学 (千葉県)
 - [5] 岡本卓, 都築浩平, 小坏成一, 平田廣則, 混合整数最適化問題に対する準カオス最適化手法の有効性の検証, 計測自動制御学会 第46回システム工学部会研究会, 2012年3月8日, 東京工業大学田町キャンパス (東京都)
 - [6] T. Okamoto, H. Hirata, Constrained optimization using the quasi-chaotic optimization method with the exact penalty function and the sequential quadratic programming, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2011, 2011年10月11日, Hilton Anchorage Hotel (Anchorage, USA)
 - [7] T. Okamoto, H. Hirata, Mixed integer optimization using the quasi-chaotic optimization with the discrete simultaneous perturbation stochastic approximation, SICE Annual Conference 2011, 2011年9月14日, 早稲田大学(東京都)
 - [8] 都築浩平, 岡本卓, 小坏成一, 平田廣則, 離散変数最適化問題のための同時摂動法を用いた多点型準カオス最適化手法, 平成23年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2011年9月8

- 日, 富山大学五福キャンパス (富山県)
- [9] T. Okamoto, H. Hirata, Global Optimization using a Multi-point type Quasi-chaotic Optimization Method without Initial Sampling Parameter Tuning, Joint 5th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 11th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, 2010年12月12日, Okayama Convention Center (Okayama, Japan)
 - [10] 岡本卓, 平田廣則, パラメータの調整を伴わないカオス最適化手法に関する一検討, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2010, 2010年11月25日, キャンパスプラザ京都 (京都府)
 - [11] T. Okamoto, H. Hirata, Global Optimization using a Multi-point type Quasi-chaotic Optimization Method with the Simultaneous Perturbation Gradient Approximation, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2010, 2010年10月11日, Military Museum (Istanbul, Turkey)
 - [12] 小野渉, 岡本卓, 小塚成一, 平田廣則, 半径の最適化をとまなうラジアル基底関数ネットワークを用いた最適化, 第20回 インテリジェント・システム・シンポジウム, 2010年9月25日, 首都大学東京 南大沢キャンパス (東京都)
 - [13] 小野渉, 岡本卓, 小塚成一, 平田廣則, カオス最適化手法とラジアル基底関数ネットワークを用いた最適化, 平成22年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2010年9月3日, 熊本大学 (熊本県)
 - [14] T. Okamoto, H. Hirata, Global Optimization using the Draining Method and the Simultaneous Perturbation Gradient Approximation, SICE Annual Conference 2010, 2010年8月19日, Grand Hotel (Taipei, Taiwan)

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・助教
研究者番号: 4051752

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者