

令和元年5月22日現在

機関番号：16201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16124

研究課題名(和文) 群知能最適化手法による手軽かつ高精度な非線形解析手法の提案

研究課題名(英文) Proposal of Easy and Advanced Nonlinear Analysis method by Particle Swarm Optimization

研究代表者

松下 春奈 (Matsushita, Haruna)

香川大学・工学部・講師

研究者番号：00604539

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、まず、粒子群最適化(PSO)による分岐点導出法を提案した。この手法は勾配情報やリアプノフ指数を用いない全く新しい分岐点導出法である。提案した分岐点導出法は、入れ子構造となった2つのPSO(NLPSO)を用いることで、2つの独立した目的関数を多目的関数とすることなく、分岐パラメータとその周期点を探索する。NLPSOを用いることで、周期点の安定性に依存することなく、素早い収束性をもって高精度にPD分岐点を導出できることを確認した。次に、NLPSOのサドルノード(SN)分岐点導出における問題点を洗い出し、拡張型目的関数を提案することで、NLPSOによるSN分岐点導出に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分岐解析は、非線形動的挙動を取るあらゆる系にとって重要である。これは、数理モデルのみならず、自動車や電気回路、自然現象など実社会の多岐に渡る。提案手法は煩雑な式変形や注意深い初期値設定、厄介なパラメータ設定を必要としないため、従来はノウハウなしには行えなかった分岐解析の簡略化へ貢献するだけでなく、微分不可能なモデルの分岐解析を可能とするのではないかと考える。つまり、多くの現象やパラメータを含んだ高次元数理モデルの開発、およびそれらの詳細な非線形解析が期待できる。これにより、生体や自然現象等様々な分野の精密な理解、制御、予測、発展が期待できる。

研究成果の概要(英文)：This paper proposes a bifurcation point detection strategy based on nested layer particle swarm optimization (NLPSO). The NLPSO is performed by two particle swarm optimization (PSO) algorithms with a nesting structure. The proposed method is tested in detection experiments of local bifurcation points in discrete-time dynamical systems. The proposed method directly detected the parameters of period doubling bifurcation and saddle-node bifurcation in both discrete-time and continuous dynamical systems, regardless of the stability of the periodic point, but require no careful initialization, exact calculation or Lyapunov exponents. Moreover, the proposed method is an effective detection technique in terms of accuracy, robustness usability, and convergence speed.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：分岐点導出 分岐解析 初期値設定問題 力学系 粒子群最適化(PSO) 進化計算

1. 研究開始当初の背景

現代の我々の社会における解決すべき重要課題は、工学、医療、自然科学等の多種多様な分野に及んでいる。特に、脳、感染症、エネルギー、通信、経済、天気などは、一定の規則に従って時間の経過とともに状態が変化することから力学系としてとらえることができ、様々な数理モデルが提案されている。力学系の有効な解析手法に、分岐解析やカオス解析を始めとする非線形解析がある。諸問題の数理モデルを非線形解析する場合、最も基本となるのが平衡点を含む周期点の解析である。また分岐解析は、システムのパラメータを変化させた時のシステムの性質の急激な変化、つまり、周期点の安定性などの変化を調べることをいう。例えば、生体モデルの分岐解析は、神経細胞ネットワークの状態遷移機構の解明という医療問題への応用の足がかりとなり、自動車の運動特性の分岐解析は、効率よく安全なタイヤ特性を理論的に見つけることを可能とする。このように、非線形解析を行うことでシステムを詳細に分析することができ、これにより諸問題の解決、最適化、制御、予測に繋げることができるのである。

多岐に渡る分野においてこれほどまでに重要な非線形解析であるが、未だ統計的解析しか行われぬ分野も多く存在する。その理由の一つが、非線形解析の難解さにあると考えられる。例えば、システムの全体像の理解に必要な不可欠な周期点は、多くの場合手計算での導出は困難なため、何らかの数値計算を用いることとなる。そこで、非線形解析の分野で広く利用されているのがニュートン法である。ニュートン法を用いるということは、勾配情報を利用するために微分を行うということであり、また、ニュートン法は初期値の設定を適切に行わないと正しい解が求まらない。これらが、数理モデル化されていない多くのシステムにとって非線形解析に取り組むための大きな壁となっていると考えられる。さらに、周期点解析の応用である分岐解析は、周期点条件と分岐条件の2つの条件を満たす解を導く必要があることから、様々な数学的・力学的知識や経験、ノウハウを必要とする高度な解析手法であると言える。

一方、ニュートン法に変わるメタヒューリスティックな数値計算の手法として、粒子群最適化法 (Particle Swarm Optimizer: PSO) が広く知られている。PSO は最もシンプルな群知能型最適化アルゴリズムの一つで、粒子と呼ばれる複数の解候補が、互いに情報を共有しながら探索空間を移動することで最適解へ収束するという性質を持っている。アルゴリズムが簡素であること、勾配情報を用いないこと、改悪方向への更新を許すこと、局所解を含む最適化問題にも有効であること等から、幅広い分野で利用されている。

2. 研究の目的

本研究では、手軽かつ高度な新しい分岐点探索手法を提案する。提案手法を様々な力学系へ適用することで、煩雑な式変形や注意深い初期値設定、厄介なパラメータ設定を行わずとも、分岐点が求まることを示す。

3. 研究の方法

提案手法は、入れ子構造を持つ2つの PSO で構成されている (図1参照)。1つは周期点を探索する PSO で、それが分岐点を探索するもう1つの PSO に内包されている。これにより、状態空間とパラメータ空間を混ぜることなく、両方の制約条件および最適化条件を満たしたパラメータを探索することを可能とした。

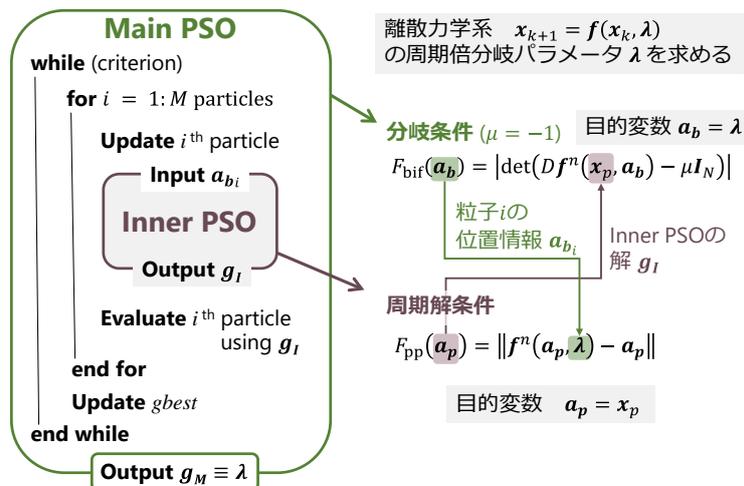


図1: 入れ子構造型 PSO による分岐点探索

さらに、分岐パラメータを構成する周期点の精度を保証する、新しい目的関数を提案することで、NLPSO がサドルノード分岐パラメータの探索を可能とした。また、ポアンカレ写像を用いることで、連続力学系へも適用可能とした。

#### 4. 研究成果

まず、NLPSO を離散力学系へ適用した。図 2 は、Circle 写像およびエノン写像における分岐点探索結果である。図において、 $I^n$  は  $n$  周期の周期倍分岐、 $G^n$  は  $n$  周期のサドルノード分岐点をそれぞれ示している。この図からもわかるように、高周期点や高次元の系であったとしても、周期点の安定性に依存することなく、素早い収束性をもって高精度で PD 分岐点を導出できることを確認した。また、初期値やパラメータの厳密な設定を必要としないことから、利便性も良くロバスト性も高いことを示した。

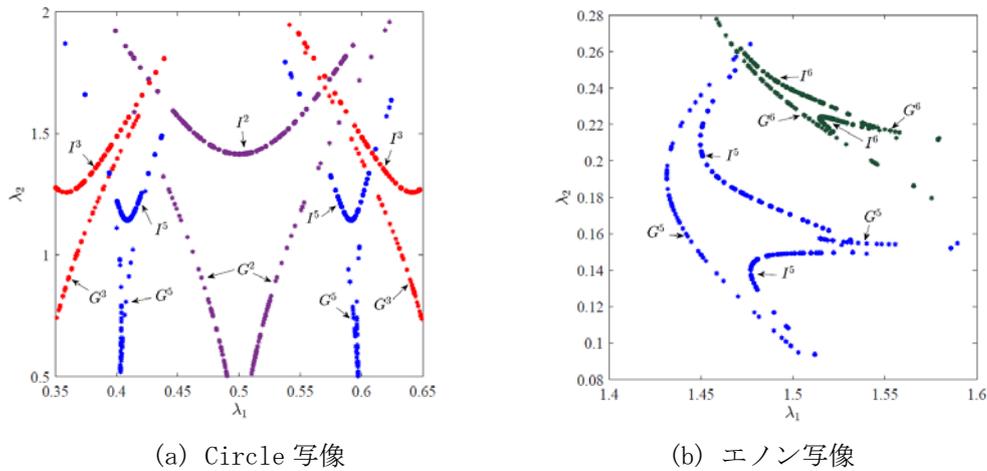


図 3 : NLPSO による離散力学系の分岐点探索結果

次に、NLPSO を非自立系の連続力学系であるダフィング方程式へ応用した結果が図 3 である。この図から、非自立系においても問題なく多様な分岐点が導出出来ていることがわかる。

これらの結果から、提案手法は系の勾配情報や厳密な初期値設定、煩雑な式変形を必要とせず、周期数及び特性乗数の値を設定するだけで、所望する局所分岐点を高精度に導出できることを示した。求めた分岐点を分岐曲線追跡手法の初期値として利用することで、従来型分岐解析法における初期値問題を解決できる。

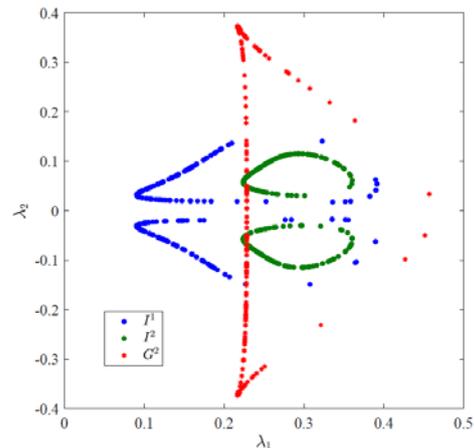


図 4 : NLPSO によるダフィング方程式の分岐点探索結果

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 松下 春奈, 黒川弘章, 高坂拓司, "2 種類の粒子群最適化法による太陽電池モデルの最大電力点探索," 電気学会論文誌 C, 査読有, vol. 136, no. 11, pp. 1610-1611, 2016.
- ② H. Matsushita, Y. Tomimura, H. Kurokawa and T. Kousaka, "Period Doubling Bifurcation Point Detection Strategy with Nested Layer Particle Swarm Optimization, International Journal of Bifurcation and Chaos, 査読有, vol. 27, no. 7, pp. 1-16, 2017.
- ③ 松下 春奈, 富村祐翔, 黒川弘章, 高坂拓司, "1 次元離散力学系における入れ子構造型粒子群最適化法によるサドルノード分岐点導出," 電気学会論文誌 C, 査読有, vol. 138, no. 12, pp. 1646-1647, 2018.
- ④ H. Matsushita, H. Kurokawa and T. Kousaka, "Saddle-node bifurcation parameter detection strategy with nested-layer particle swarm optimization," Chaos, Solitons & Fractals, 査読有, vol. 119, pp. 126-134, 2019.
- ⑤ H. Matsushita, W. Kinoshita, H. Kurokawa and T. Kousaka, "Nested-layer particle swarm optimization method for bifurcation point detection in non-autonomous systems," Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, 査読有, vol. E10-N, no. 3, 2019. (印刷中)

[学会発表] (計 16 件)

- ① 富村 祐翔, 黒川 弘章, 松下 春奈, 高坂 拓司, "粒子群最適化を用いた一次元離散時間力学系の周期倍分岐点導出法," 電子情報通信学会 非線形問題研究会 技術報告, no. NLP2016-35, pp. 9-12, 2016.

- ② 松下 春奈, 黒川 弘章, 高坂 拓司, “粒子群最適化による固定点検出法の太陽電池モデルにおける最大電力点探索への応用,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会 技術報告, no. NLP2016-62, pp. 93-96, 2016.
- ③ K. Yamazaki, H. Kurokawa, T. Kousaka and H. Matsushita, “Application of PSO with Deflection Technique to Bifurcation Analysis,” 平成 28 年度 電気関係学会 四国支部連合大会 講演論文集, no. 1-5, p. 5, 2016.
- ④ 松下 春奈, 富村 祐翔, 黒川 弘章, 高坂 拓司, “2 つの PSO による分岐点導出手法のサドルノード分岐への適用,” 2016 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, no. N-1-8, p. 234, 2016.
- ⑤ 富村 祐翔, 黒川 弘章, 松下 春奈, 高坂 拓司, “粒子群最適化を用いた一次元離散時間力学系の分岐点導出法の拡張,” 平成 28 年度(第 69 回)電気・情報関係学会九州支部連合大会, p. 194, 2016.
- ⑥ K. Yamazaki, H. Kurokawa, T. Kousaka and H. Matsushita, “Deriving Method of Multiple Period Doubling Bifurcation Points by Using PSO,” Proc. of IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (NCN'16), 査読有, pp. 59-61, 2016.
- ⑦ 富村 祐翔, 黒川 弘章, 松下 春奈, 高坂 拓司, “2 つの PSO を用いた一次元離散時間力学系の局所分岐点導出法,” 2017 年 電子情報通信学会 総合大会 講演論文集, p. 287, 2017.
- ⑧ K. Yamazaki, H. Kitajima, H. Kurokawa, T. Kousaka and H. Matsushita, “Bifurcation Analysis Method by Using PSO with Fluctuating Acceleration Coefficients,” 平成 29 年度 電気関係学会 四国支部連合大会 講演論文集, no. 1-15, p. 15, 2017.
- ⑨ 酒井 基光, 富村 祐翔, 黒川 弘章, 松下 春奈, 高坂 拓司, “粒子群最適化を用いた一次元離散力学系に対する border collision 分岐点導出法,” 平成 29 年度(第 70)電気・情報関係学会九州支部連合大会, p. 117, 2017.
- ⑩ Y. Tomimura, H. Kurokawa, H. Matsushita and T. Kousaka, “Particle Swarm Optimization for Calculating Local Bifurcation Point in One-dimensional Discrete Dynamical Systems,” Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA'17), 査読有, pp. 498-501, 2017.
- ⑪ K. Yamazaki, H. Kurokawa, H. Matsushita and T. Kousaka, “Deriving Method of Period Doubling Bifurcation Point by Modified PSO,” Proc. of IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (NCN'17), 査読有, pp. 15-18, 2017.
- ⑫ K. Yamazaki, H. Kurokawa, H. Matsushita and T. Kousaka, “Deriving Method of a Period Doubling Bifurcation Point by Piecewise-Linear Particle Swarm Optimizer,” Proc. of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'18), 査読有, pp. 491-494, 2018.
- ⑬ 松下 春奈, 黒川 弘章, 高坂 拓司, “入れ子構造型粒子群最適化による分岐点探索手法のサドルノード分岐点探索への拡張,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会 技術報告, no. NLP2018-69, pp. 87-90, 2018.
- ⑭ W. Kinoshita, M. Sakai, H. Kato, H. Kurokawa, H. Matsushita and T. Kousaka, “Application of Particle Swarm Optimization to the Calculation of Border Collision Bifurcation Point in a One-dimensional map,” Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA'18), 査読有, pp. 355-358, 2018.
- ⑮ W. Kinoshita, H. Kato, H. Kurokawa, H. Matsushita and T. Kousaka, “Application of Particle Swarm Optimization for Calculating Local Bifurcation Point in Two-dimensional Continuous Dynamical Systems,” Proc. of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'19), 査読有, pp. 386-389, 2019.
- ⑯ 松下 春奈, 黒川 弘章, 高坂 拓司, “様々な分岐点が混在する領域における NLPSO による分岐点探索の問題点,” 2019 年 電子情報通信学会 総合大会 講演論文集, no. N-1-5, p. 253, 2019.

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。