

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12138

研究課題名（和文）進化計算最適化法を用いた様々なシステムを対象とする手軽な分岐点導出法の提案と応用

研究課題名（英文）Proposal and application of a useful bifurcation point detection method for various systems using evolutionary computation optimization methods

研究代表者

松下 春奈（Matsushita, Haruna）

香川大学・創造工学部・准教授

研究者番号：00604539

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、群知能による入れ子構造型分岐点探索手法の拡張および改善を試みた。まず、提案手法を連続力学系における局所分岐点の導出へ拡張した。さらに、提案手法を連続力学系と離散力学系が混在した合成力学系へ拡張し、合成力学系の特徴的な分岐点の導出を成功させた。これらと同時に、従来法の問題点を調査し、正しく導出できない分岐点導出の改善を図った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案手法はいずれも非勾配法であることから、従来法では適用困難であった系の解析にも利用可能である。さらに、煩雑な前処理を必要としないため、分岐解析や群知能の専門家でなくとも利用可能である。つまり、様々なシステムを対象とする手軽な分岐点導出法を提案に成功した。これを利用することで、これまでは解析不可能であったシステムの知らざる現象を解明できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：We extended and improved the nested-layer bifurcation point search strategy using swarm intelligence. First, the proposed method was extended to the detection of local bifurcation points in continuous dynamical systems. Furthermore, we extended it to piecewise smooth maps which are a mixture of continuous and discrete dynamical systems, and succeeded in detecting characteristic bifurcation points of that systems. At the same time, we investigated the problems of conventional methods and tried to improve the detection of bifurcation points that could not be detected correctly. Since all the proposed methods are non-gradient methods, they can be used to analyze systems that are difficult to apply with conventional gradient-based methods. Furthermore, since they do not require complicated preprocessing, they can be used by non-experts in bifurcation analysis and swarm intelligence. In other words, we have proposed an easy-to-use bifurcation point detection method for a variety of systems.

研究分野：計算知能

キーワード：分岐点探索 分岐図 分岐解析 計算知能 力学系

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

現実世界の時間によって変化する複雑なダイナミクスや現象は、力学系としてモデル化することができる。常微分方程式 (ODE) によって記述されるシステムは連続力学系と呼ばれ、差分方程式によって記述されるシステムは離散時間力学系または写像と呼ばれる。さらに、スイッチングや微分方程式と写像の組み合わせを使用することで、様々な現実世界のシステムを数式による力学系として記述できる。したがって、このような力学系の解析は、現実世界の様々な問題を解決するために重要であり、力学系の研究は、工学、生物学、社会学、生態学などの幅広い分野にわたる。このような力学系には通常、1つ以上のパラメータが含まれている。一般に、系の振る舞いは非線形であり、分岐現象が観察されることがある。分岐とは、系のパラメータ値 (分岐パラメータ) に対して小さな変化が加えられたとき、周期点の振る舞いに急激な変化が生じる現象である。分岐解析は、分岐がシステムパラメータにどのように依存するかを調べるための最も重要な非線形解析技術の一つであり、パラメータ値の小さな変化がシステムの振る舞いに大きな影響を与える可能性があるため、系の理解に役立つ。分岐図は、複数の分岐点をグラフで表したものであり、分岐構造を視覚化するためによく用いられる。二つのパラメータに関する分岐図を描写する最も簡単な方法は、Brute-force 法である。しかし、Brute-force 分岐図の精度は、対象のパラメータ空間のグリッドの数に依存するため、より高い精度の分岐図を得るためにはより多くの計算量が必要となる。また、Brute-force 法では動的に不安定な周期点を検出することができない。

一方、分岐パラメータの検出とその追跡のために、様々な手法が開発されている。また、AUTO や BunKi などの分岐解析のためのソフトウェアパッケージも利用可能である。しかし、これらの標準的な方法は Newton-Raphon 法に基づいており、勾配法であることから、関数の微分情報と適切な初期条件を必要とする。そのため、非線形解析に慣れていない初心者にとっては、しばしば使用が難しい。一方、分岐解析は、複数の解候補を持つメタヒューリスティックアルゴリズムである群知能型最適化によっても実行できる。群知能型最適化では、通常、目的関数の微分を必要としない。また、その代表的な手法として、Particle Swarm Optimization (PSO) が知られている。PSO はその単純さにもかかわらず、グローバルな探索を可能とすることから、様々な分野に応用されている。私たちの研究グループは、離散時間および非自律的な力学系において、分岐パラメータを検出するための PSO ベースの手法を提案した。この手法は、入れ子構造型粒子群最適化 (NLPSO) と呼ばれ、2つのネストされた PSO によって実行される。NLPSO は非勾配法であるため、厳密な初期値の設定や手間のかかる手動計算は不要であり、リアプノフ指数や勾配情報を必要とせず、周期点の安定性に関係なく正確かつ直接的に分岐パラメータを見つけることができる。ニュートン法に基づく分岐解析の初期値問題は、NLPSO で検出された単一の分岐パラメータセットを分岐曲線トレースの初期点として割り当てることで解決できる。さらに、NLPSO は、異なるランダムな初期状態で NLPSO の実装を繰り返し、検出された複数の分岐パラメータを描写することにより、不安定周期点と安定周期点の両方の分岐図を取得できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、群知能による入れ子構造型分岐点探索手法の拡張および改善を目的とする。まず、先行研究である NLPSO が探索不可能である、多次元離散力学系における局所分岐点 (Neimark-Sacker 分岐) を対象とした新たな分岐解析手法を提案する。次に、提案手法を連続力学系における局所分岐点の導出へ拡張する。さらに、提案手法を連続力学系と離散力学系が混在した合成力学系へ拡張し、合成力学系の特徴的な分岐点 (Border-collision 分岐) の導出を試みる。これらと同時に、従来法の問題点を調査し、正しく導出できない分岐点導出の改善を図る。

提案手法はいずれも非勾配法であることから、従来法では適用困難であった系の解析にも利用可能である。さらに、煩雑な前処理を必要としないため、分岐解析や群知能の専門家でなくとも利用可能である。つまり、様々なシステムを対象とする手軽な分岐点導出法の提案が研究目的となる。

## 3. 研究の方法

提案する NLPSO は 2つの PSO を入れ子型で用いることで最適化を行う。外側のループは分岐パラメータを探索し、内側のループは周期点を探索する。前処理は簡素であり、次のとおりである。まず、解析対象の系に合わせて、NLPSO 内の 2つの目的関数を定義する。次に、導出したい分岐の型に合わせて、特性乗数と目的の周期数を設定する。そして通常の PSO と同様に、2つの PSO をランダムに初期化する。

特性乗数に虚数を用いることで、NLPSO を Neimark-Sacker 分岐の導出に拡張した。また、ポアンカレ写像を用いることで、連続力学系を疑似的に離散化し、非自律系の分岐点導出を可能とした。さらに、ペナルティ項を用いた拡張目的関数を提案することで、対象としない分岐点の排除を可能とした。また、境界条件を目的関数に取り入れることで、Border-Collision 分岐の導出を可能とした。

#### 4. 研究成果

図 1 は離散力学系における分岐点導出の結果である。周期倍分岐 (PD) やサドルノード分岐 (SN) のみならず、Neimark-Sacker 分岐 (NS) も正しく導出できていることがわかる。

図 2 は、ペナルティ項を用いた拡張目的関数を有する改良型 NLPSO による、Circle 写像の分岐図導出結果である。従来型 NLPSO は無数の誤った分岐点を導出しているが、改良型 NLPSO はそれらを解消し、正しい分岐図を導出できていることがわかる。

図 3 は、区分線系写像における Border-Collision 分岐の導出結果を示している。様々な周期数の Border-Collision 分岐の導出に成功しており、また、周期点の安定性に関わらず、導出可能であることも特筆すべきである。

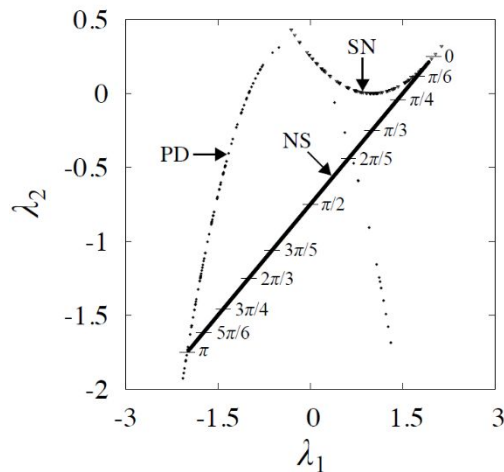
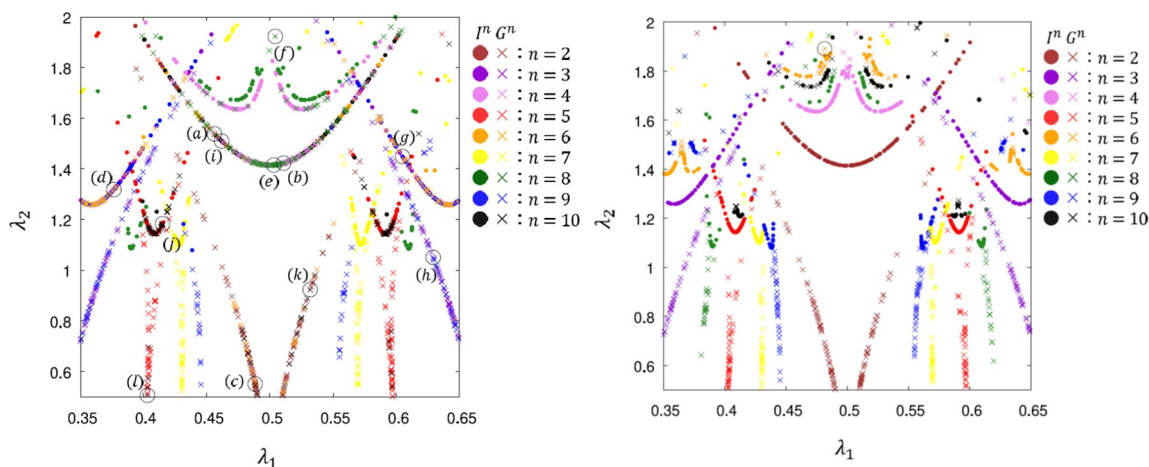


図 1 Neimark-Sacker 分岐を含む 2次元分岐図の導出結果



(a) 従来型 NLPSO

(b) 改良型 NLPSO

図 2 Circle 写像の 2次元分岐図

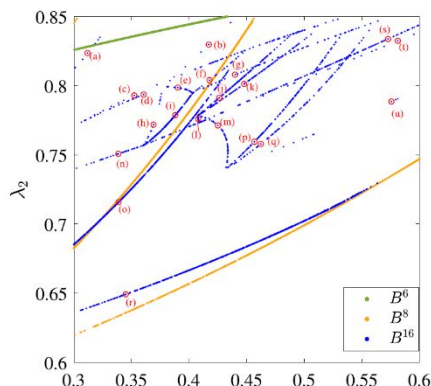


図 3 区分線系写像における Border-Collision 分岐

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Hasegawa Tomo, Matsushita Haruna, Kousaka Takuji, Kurokawa Hiroaki	4. 巻 13
2. 論文標題 Bifurcation point detection with parallel nested layer particle swarm optimization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 312~317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.13.312	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hirayama Takaya, Matsushita Haruna, Kurokawa Hiroaki, Kousaka Takuji	4. 巻 13
2. 論文標題 Improved nested-layer particle swarm optimization-based bifurcation point detection for the parameter space containing various bifurcation points	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 493~510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.13.493	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Matsushita H., Kinoshita W., Kurokawa H., Kousaka T.	4. 巻 95
2. 論文標題 Particle swarm optimization-based strategy for detecting border-collision bifurcation points in piecewise smooth maps	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Soft Computing	6. 最初と最後の頁 106319~106319
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asoc.2020.106319	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 Matsushita Haruna, Kurokawa Hiroaki, Kousaka Takuji	4. 巻 11
2. 論文標題 Bifurcation analysis by particle swarm optimization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 391~408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.11.391	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Gotoh Tomoki, Kurokawa Hiroaki, Matsushita Haruna, Kousaka Takuji	4. 巻 142
2. 論文標題 Neimark-Sacker Bifurcation Points Derivation Method in Nonlinear Dynamical Systems using Nested-Layer Particle Swarm Optimizations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 670 ~ 678
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.142.670	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 Matsushita Haruna, Kinoshita Wataru, Kurokawa Hiroaki, Kousaka Takuji	4. 巻 10
2. 論文標題 Nested-layer particle swarm optimization method for bifurcation point detection in non-autonomous systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 289 ~ 302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.10.289	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Tomoki GOTOH, Hiroaki KUROKAWA, Haruna MATSUSHITA and Takuji KOUSAKA
2. 発表標題 Local bifurcation points derivation method in autonomous systems using particle swarm optimization
3. 学会等名 The 53rd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomo HASEGAWA, Haruna MATSUSHITA, Takuji KOUSAKA and Hiroaki KUROKAWA
2. 発表標題 An Evaluation of Parallelized Nested Layer Particle Swarm Optimization for Bifurcation Point Detection
3. 学会等名 The 53rd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安達 良, 松下 春奈, 黒川 弘章, 高坂 拓司
2. 発表標題 差分進化による離散力学系における分岐点探索の性能調査
3. 学会等名 電子情報通信学会 非線形問題研究会 技術報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川 朝, 松下 春奈, 高坂 拓司, 黒川 弘章
2. 発表標題 並列化NLPS0による分岐点導出
3. 学会等名 2021年 電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川下 貴士, 松下 春奈, 黒川 弘章, 高坂 拓司
2. 発表標題 数値微分を利用した PSO による 1 次元写像の分岐点探索
3. 学会等名 令和3年度電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会 講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤 友綺, 黒川 弘章, 松下 春奈, 高坂 拓司
2. 発表標題 粒子群最適化を用いた自律系の局所的な分岐点導出法
3. 学会等名 電子情報通信学会 非線形問題研究会 技術報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo ADACHI, Haruna MATSUSHITA, Hiroaki KUROKAWA and Takuji KOUSAKA
2. 発表標題 Proposal of a Bifurcation Point Search Method Based on Differential Evolution
3. 学会等名 Proceedings of IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (NCN'21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomo HASEGAWA, Haruna MATSUSHITA, Takuji KOUSAKA and Hiroaki KUROKAWA
2. 発表標題 Bifurcation Point Detection with Parallel Nested Layer Particle Swarm Optimization
3. 学会等名 Proceedings of the 2021 NonLinear Science Workshop (NLSW'21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川下 貴士, 松下 春奈, 黒川 弘章, 高坂 拓司
2. 発表標題 数値微分を利用したPSOによる離散力学系の分岐点探索
3. 学会等名 電子情報通信学会 非線形問題研究会 技術報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平山 鷹哉, 松下 春奈, 黒川 弘章, 高坂 拓司
2. 発表標題 改良型入れ子構造型粒子群最適化による分岐点導出法の2次元離散力学系への適用
3. 学会等名 電子情報通信学会 非線形問題研究会 技術報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 牧野 達海, 松下 春奈, 美井野 優, 高坂 拓司
2. 発表標題 粒子群最適化を用いた2次元離散力学系におけるHomoclinic点計算法
3. 学会等名 電子情報通信学会 非線形問題研究会 技術報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takaya HIRAYAMA, Haruna MATSUSHITA, Hiroaki KUROKAWA and Takuji KOUSAKA
2. 発表標題 Improved NLPSO-Based Bifurcation Point Detection for the Parameter Space Containing Various Bifurcation Points
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Juri SHIRASAKA, Haruna MATSUSHITA, Hiroaki KUROKAWA and Takuji KOUSAKA
2. 発表標題 Improved Nested-Layer Particle Swarm Optimization for Bifurcation Point Detection on Discrete Dynamic Systems
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平山 鷹哉, 松下 春奈, 黒川 弘章, 高坂 拓司
2. 発表標題 ペナルティ法を適用した改良型NLPSOによる分岐点探索
3. 学会等名 令和2年度電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会 講演論文集
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 白坂 樹里, 松下 春奈, 黒川 弘章, 高坂 拓司
2. 発表標題 NLPSOによる効率的な分岐点導出法の連続力学系への応用
3. 学会等名 令和2年度電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会 講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takaya HIRAYAMA, Haruna MATSUSHITA, Hiroaki KUROKAWA and Takuji KOUSAKA
2. 発表標題 NLPSO-Based Bifurcation Point Detection That Improves Divisor Problem
3. 学会等名 Proceedings of IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (NCN'20)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安達 良, 松下 春奈, 黒川 弘章, 高坂 拓司
2. 発表標題 差分進化による分岐点探索手法の検討
3. 学会等名 2021年 電子情報通信学会 総合大会 講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白坂 樹里, 松下 春奈, 黒川 弘章, 高坂 拓司
2. 発表標題 入れ子構造型PSO による1次元離散写像の効率的な分岐点導出
3. 学会等名 令和元年度 電気関係学会 四国支部連合大会 講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤 友綺, 木下 航, 黒川 弘章, 松下 春奈, 高坂 拓司
2. 発表標題 PSOを用いた離散力学系のBorder-Collision分岐点探索手法
3. 学会等名 令和2年 電気学会 全国大会 講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白坂 樹里, 松下 春奈, 黒川 弘章, 高坂 拓司
2. 発表標題 入れ子構造型PSOによる離散写像の効率的な分岐点導出
3. 学会等名 2020年 電子情報通信学会 総合大会 講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷森 翔太, 松下 春奈, 高坂 拓司, 黒川 弘章
2. 発表標題 入れ子構造を持つ粒子群最適化の並列化
3. 学会等名 2020年 電子情報通信学会 総合大会 講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安達 良, 松下 春奈, 黒川 弘章, 高坂 拓司
2. 発表標題 単構造型差分進化による分岐点探索手法の提案
3. 学会等名 令和4年度電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo ADACHI, Haruna MATSUSHITA, Hiroaki KUROKAWA and Takuji KOUSAKA
2. 発表標題 Application of Differential Evolution to Detect Bifurcation Point with High Number of Pe
3. 学会等名 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (NCN'22)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長谷川 朝, 松下 春奈, 高坂 拓司, 黒川 弘章
2. 発表標題 並列NLPSOによる分岐点探索のアルゴリズムとソフトウェア実装
3. 学会等名 電子情報通信学会 非線形問題研究会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------