

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K12106

研究課題名（和文）入れ子構造を持つ粒子群最適化を用いた分岐解析アルゴリズムの高速化

研究課題名（英文）Acceleration of bifurcation analysis algorithms using nested particle swarm optimisation

研究代表者

黒川 弘章（Kurokawa, Hiroaki）

東京工科大学・工学部・教授

研究者番号：20308282

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）：本研究の目的はNLPSOの並列化とパッケージ化である。NLPSOは群知能最適化をベースとした非線形力学系における分岐点探索法である。並列化についてはGPUを用いた並列化とマルチコアCPUを用いた並列化を行った。それぞれの並列に動作させる最適なタスク構成を設計し実装した。マルチコアCPUを用いた並列化においては並列化に適した非同期型のPSOを提案しその効果と動作の検証を行った。パッケージ化についてはNLPSOによる分岐点探索用ライブラリを作成し公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分岐現象とはパラメータの変化によりシステムの振る舞いが突然変わる現象を言う。分岐現象が生じる条件を知ることはシステムの振る舞いを掌握する上で重要である。本研究では分岐パラメータの有効な探索手法であるNLPSOを並列化し計算時間の削減を実現するとともに、高度な専門知識を要せずに利用できるソフトウェアライブラリを開発した。これにより、最低限の力学系の情報のみを与えることで分岐点探索が可能となる。このように、専門的な知識を有せずとも利用できる汎用性の高いソフトウェアを開発することで誰もが任意のシステムの振る舞いを掌握することができるようになり、学術的意義のみならず、社会的意義も持つ研究となった。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is the parallelization and packaging of NLPSO, a bifurcation point search method in non-linear dynamical systems based on group intelligence optimization. The parallelization was implemented using GPUs and multi-core CPUs. The optimum task configuration for each parallelization was designed and implemented. In parallelization using multi-core CPUs, an asynchronous PSO scheme is proposed, which is suitable for parallelization, and its effectiveness and operation are verified. As for packaging, a bifurcation point search software library using NLPSO was created and released. Bifurcation analysis can be performed with minimal information on the analysis target (system equation, type of bifurcation, number of cycles, and search range).

研究分野：計算知能

キーワード：分岐点探索 並列計算 群知能最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

非線形力学系における分岐解析は古くから盛んに研究が行われており、具体的な系や分岐の種類に応じた解析手法が数多く提案されてきた。このような研究の積み重ねをベースに BunKi や AUTO などの分岐解析ソフトウェアが開発されてきた。一方で、近年、申請者らによってメタヒューリスティクスを応用した新しい分岐パラメータ導出法である「入れ子構造を持つ群知能最適化 (NLPSO、Nested Layer Particle Swarm Optimization)」が提案されている。

NLPSO の従来手法に対する本質的な利点は高次元系や多数の分岐パラメータを持つ複雑な問題への適用が可能などところにある。しかしながら、複雑で大規模な問題においては計算時間が長くなるため、NLPSO の実用化にはアルゴリズムの高速化が必要であることが指摘されていた。

これまでの数々の研究において示されているように、アルゴリズムの並列化はその高速化に有効である。PSO は複数の粒子が最小限の情報だけを共有して解探索空間を探索するアルゴリズムであるため並列化により高速化を達成する可能性が高い。NLPSO は2つの PSO を入れ子構造で動作させるアルゴリズムであり、その特性を考慮すると、並列化は NLPSO の持つポテンシャルを最大限引き出すことのできる有効性の高い手法であり、高速化の手段として適切と考えた。また、従来手法をベースに開発された分岐解析ソフトウェアにおいては、機能的な制限以外にも操作性の煩雑さが指摘されることが多く改善の余地が指摘されていた。このような背景をベースに最終的なパッケージ化を想定し、処理の高速化や汎用性といった問題を具体的に解決することが必要と考えた。

2. 研究の目的

本研究課題の最終的な目標は、並列計算により高速化された処理や、汎用性の高いインターフェースを提供する使い勝手の良い分岐パラメータ探索ソフトウェアパッケージの開発である。そのために、

- (1) 並列計算に特化した並列化 NLPSO の提案
 - (2) GPU を用いた並列化 NLPSO の実装
 - (3) 並列化 NLPSO のパッケージ化
- を具体的な目的として設定した。

研究計画当初は市販のグラフィックカードを用いた計算の並列化を想定していたが、研究計画を進める中でユーザビリティの向上にはマルチコア CPU を用いた並列化が有効であることが分かり、「マルチコア CPU を用いた共有メモリ向け NLPSO の開発」を追加の目的として設定した。

3. 研究の方法

上記のそれぞれの目的に対して以下の方法で研究を進めた。

- (1) 並列計算に特化した並列化 NLPSO の提案

NLPSO は二つの PSO が互いに探索結果をやり取りしながら分岐パラメータの探索を進める。すなわち、分岐パラメータを探索する親 PSO (PSO_{bif}) の各粒子は周期点の情報を必要とするが、その周期点は子 PSO (PSO_{pp}) での探索により求められる。この時 PSO_{pp} の探索ではその時点での対応する PSO_{bif} の粒子が示す分岐パラメータを必要とする。 PSO_{pp} が解を求めるために必要な時間は均一ではなく、長く時間のかかるものや、そもそも解が存在しないものもある。その際全ての PSO_{pp} が計算を終えるまで PSO_{bif} における粒子の更新を待たなくてはならないため、一定時間で PSO_{pp} の計算を打ち切ることで並列化の効果を高める方法を考案した。

- (2) GPU を用いた並列化 NLPSO の実装

並列化 NLPSO は、市販のグラフィックカードを用いた計算を念頭に、GPU コンピューティングの統合開発環境である CUDA 環境を用いて、上記(1)の並列化 PSO の実装を行う。実装においては、並列処理にかかるオーバーヘッドについての検証と、実際に分岐解析への適用からのフィードバックを元に問題点を洗い出し、細かい設計の変更を行いながら最適な実装を行った。いくつかの非線形力学系について適用し、計算時間短縮の有効性を確認した。

- (3) 並列化 NLPSO のパッケージ化

力学系を記述したファイルとコマンドラインからの操作で分岐図を表示し、独立して動作するアプリケーションを作成し、作成されたアプリケーションを公開した。

この時点で主に GPU 環境の管理の煩わしさを避けるため「マルチコア CPU を用いた共有メモリ向け NLPSO の開発」を追加の目的として設定した。一般的な PC に用いられる汎用性の高い 4 コアから 16 コアのマルチコア CPU を用いて GPU を搭載しない環境で計算を行うことを想定し NLPSO の並列化を行った。リソースの特性の違いから「並列計算に特化した並列化 NLPSO」を再考し、研究成果の項に示すように、非同期更新型 NLPSO の提案に至った。また、パッケージ化についても再度利便性の観点から検討し、Python から呼び出して使用できるソフトウェアライブラリを作成することにした。

4. 研究成果

(1) GPU を用いた NLPSO の並列化

研究方法(1)に従って CUDA 環境を用いた並列化 NLPSO の実装を行った。従来の NLPSO の処理は図 1 に示すように行われる。ここで 1 回の PSO_{bif} の更新の処理が示されており、particle と示された一連の処理は PSO_{bif} の粒子の処理を示している。多くの時間を PSO_{pp} の計算に費やすため PSO_{pp} の各粒子の計算を並列化する方針で並列化を考えた。ただし、この時点で並列化されたプロセスの中からさらに並列化されたプロセスを呼び出すことが困難であったため、図 2 のように全ての PSO_{pp} の計算を一度に行い、 PSO_{bif} の計算は全て CPU 側で逐次行うこととした。また、解を求めるまでに時間がかかる PSO_{pp} の計算を途中で打ち切る方法については、その処理のオーバーヘッドが多くかかったため実装を見送った。

解析対象の系の複雑さに応じて並列化の効果は変わるが、検証に用いた例では 2 倍~20 倍程度の実行時間の短縮効果が得られた。詳細は文献[1]に示す。

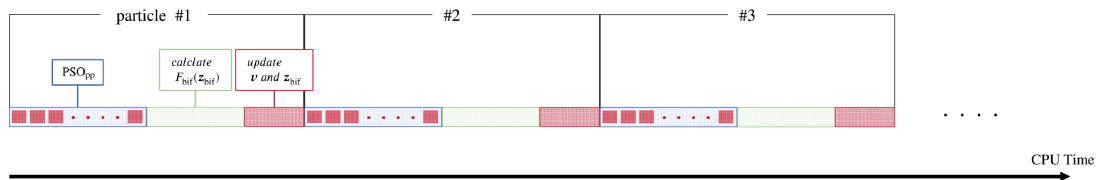


図 1 従来型 NLPSO の処理

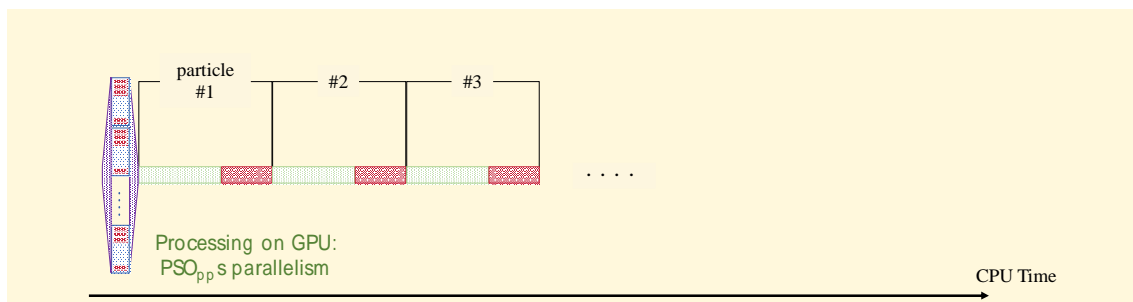


図 2 並列化 NLPSO の処理

(2) マルチコア CPU を用いた NLPSO の並列化

CUDA 環境を用いて並列化を行った(1)の成果を受けていくつかの問題点が浮かび上がった。一つはよく知られた問題で、分散メモリ型の構造を持つ GPU を使用した場合メモリ間の通信のコストが大きくなるという点である。PSO は並列性の高いアルゴリズムであるが各粒子の状態を更新するたびに各粒子の持つ情報を共有する必要があるため不利な面がある。また、本研究の目標である「使い勝手の良いパッケージ」を考えると GPU そのものの管理の煩わしさも不利な点である。

そこで一般的な PC に搭載されているマルチコア CPU で動作する並列化 NLPSO の開発に取り組んだ。並列に処理できるプロセス数は圧倒的に少ないものの、共有メモリ型であることからメモリ間の通信コストは低減する。一方でプロセスを各コアに振り分け、統合する (Fork-Join) 処理はコストがかかり、特に統合時に待ち時間が生じると致命的なロスとなる可能性が高い。そこでこの欠点を解決するために、非同期更新型 NLPSO を提案した。図 3 に同期更新を行う場合と非同期更新を行う場合の並列化の概念図を示す。ここで、図中の Segmented Process は PSO_{pp} の計算を含んだ PSO_{bif} の各粒子の計算である。

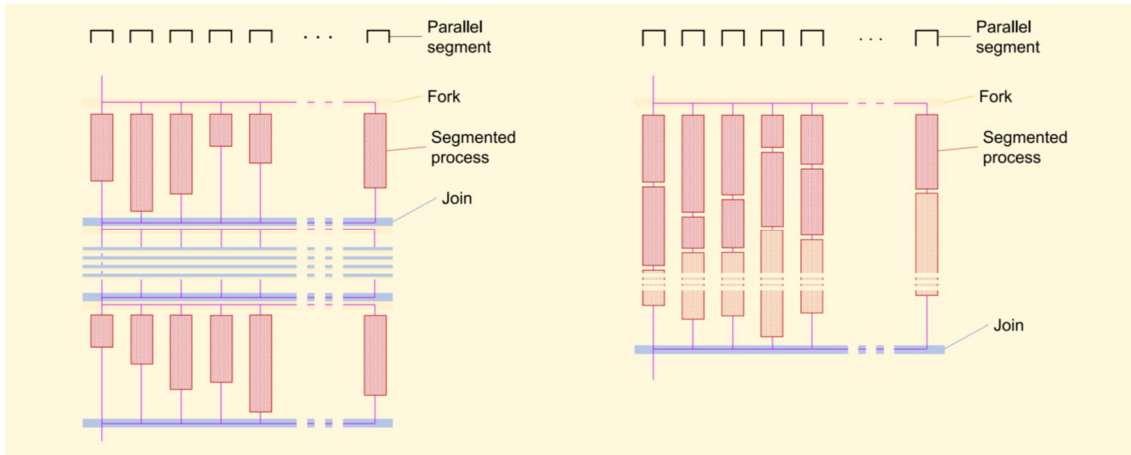


図3 マルチコアCPUにおける並列化NLPSOの概念図、左図：同期を取って PSO_{bif} の粒子の更新を行う場合、右図：非同期型並列化NLPSO

図3より非同期更新型NLPSOでは明らかにFork-Joinのコストを低減できることが分かる。PSOでは粒子の状態を更新するために、全ての粒子の状態の履歴から得られるグローバルベストと呼ばれる指標が使用される。しかしながら、非同期更新型NLPSOでは PSO_{bif} の全ての粒子の状態更新が終わる前に次の状態更新を行うことになるため、厳密なグローバルベストの値を得ることなく状態更新を進めることになる。この状態更新ルールの緩和が結果に影響を及ぼすかどうかを含めて数値実験により非同期更新型NLPSOの性能を検証した。

結果的に非同期更新型NLPSOにより正しい分岐パラメータが得られ、16コアのCPU(12900K)を用いた場合で10倍から20倍程度の計算時間の改善が得られた。用いるデバイスが異なることから単純な性能比較は難しいが、GPUを用いた(1)の結果と比べて同等な効果が得られたと言える。詳細は文献[2]に示す。

(3) ソフトウェアライブラリの開発。

GPUを用いた並列化NLPSOについては、力学系を記述したファイルとコマンドラインからの操作で分岐図を表示し独立して動作するアプリケーションを作成した。開発は.NET Frameworkを用いて行った。一方でマルチコアCPUを用いた非同期更新型NLPSOの実装は並列化におけるスレッド管理の容易さからRustライブラリとして実装し、Pythonから呼び出す形で分岐図の表示まで行うことができるようになっている。与える情報は系の方程式、分岐の種類、周期数、探索範囲だけであり、専門的な知識を必要としない使い勝手の良いソフトウェアライブラリとなっている。

<引用文献>

[1]Bifurcation point detection with parallel nested layer particle swarm optimization, Tomo Hasegawa, Haruna Matsushita, Takuji Kousaka, Hiroaki Kurokawa, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, vol. 13, no. 2, pp. 312-317, April. 2022.

[2]Modified parallel nested-layer particle swarm optimization algorithm for fast bifurcation point detection and its software implementation, Tomo Hasegawa, Haruna Matsushita, Takuji Kousaka, Hiroaki Kurokawa, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, vol.E14-N, no.2, pp. 308-318, April. 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Tomo Hasegawa, Haruna Matsushita, Takuji Kousaka, Hiroaki Kurokawa	4. 巻 E14-N
2. 論文標題 Modified parallel nested-layer particle swarm optimization algorithm for fast bifurcation point detection and its software implementation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 308-318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.14.308	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 Tomoki Gotoh, Hiroaki Kurokawa, Haruna Matsushita, Takuji Kousaka	4. 巻 36
2. 論文標題 Derivation of Local Bifurcation Points in Autonomous Systems by Using Particle Swarm Optimization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers	6. 最初と最後の頁 121-129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.36.121	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 Haruna Matsushita, Hiroaki Kurokawa, Takuji Kousaka	4. 巻 176
2. 論文標題 Non-gradient-based simultaneous strategy for bifurcation parameter detection	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chaos, Solitons & Fractals	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chaos.2023.114124	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 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 無
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 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 Haruna MATSUSHITA, Hiroaki KUROKAWA, Takuji KOUSAKA	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 Haruna MATSUSHITA, Wataru KINOSHITA, Hiroaki KUROKAWA, Takuji KOUSAKA	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 106319-1-11
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, 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30件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 松下春奈、黒川弘章、高坂拓司
2. 発表標題 差分進化を用いた分岐点導出法の非自律系への適用
3. 学会等名 電子情報通信学会 非線形問題研究会
4. 発表年 2023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による分岐点探索アプリケーションの連続時間力学系への拡張
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 2023年

1. 発表者名 Haruna Matsushita, Hiroaki Kurokawa, Takuji Kousaka
2. 発表標題 Bifurcation Point Detection of Non-Autonomous Systems with Differential Evolution
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA'23)
4. 発表年 2023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 Periods
3. 学会等名 2022 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomo HASEGAWA, Haruna MATSUSHITA, Takuji KOUSAKA and Hiroaki KUROKAWA
2. 発表標題 An application software for bifurcation point detection of dynamical systems with nested-layer particle swarm optimization
3. 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (国際学会)
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 Investigation of Bifurcation Point Detection Method Based on a Differential Evolution
3. 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2022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 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

1. 発表者名 Tomo Hasegawa, Haruna Matsushita, Takuji Kousaka, 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 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoki Gotoh, Hiroaki Kurokawa, Haruna Matsushita, 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 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomo Hasegawa, Haruna Matsushita, Takuji Kousaka, Hiroaki Kurokawa
2. 発表標題 Bifurcation Point Detection with Parallel Nested Layer Particle Swarm Optimization
3. 学会等名 Nonlinear Science Worksop (国際学会)
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 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (国際学会)
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 2021NOLTAソサイエティ大会
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
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PS0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
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
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
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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takaya Hirayama, Haruna Matsushita, Hiroaki Kurokawa, 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, 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 Takaya Hirayama, Haruna Matsushita, Hiroaki Kurokawa, Takuji Kousaka
2. 発表標題 NLPSO-Based Bifurcation Point Detection That Improves Divisor Problem
3. 学会等名 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks
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 2020年電気関係学会 四国支部連合大会
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 2020年電気関係学会 四国支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷川朝、黒川弘章
2. 発表標題 並列化PSOの評価
3. 学会等名 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究合同研究会
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 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 W. Kinoshita, H. Kato, H. Kurokawa, H. Matsushita, T. Kousaka
2. 発表標題 Application of Particle Swarm Optimization to the Calculation of Border-Collision Bifurcation Point in a One-dimensional Piecewise Nonlinear Discrete Dynamical System
3. 学会等名 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks
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 電気学会 全国大会
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 電子情報通信学会 総合大会
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 電子情報通信学会 総合大会
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 電気関係学会 四国支部連合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

BADotNet https://github.com/kuro-lab/BADotNet pnlpso-rust https://github.com/tm-hsgw/pnlpso-rust

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
研究 分 担 者	高坂 拓司 (KOUSAKA TAKUJI) (80320034)	中京大学・工学部・教授 (33908)	

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