

## 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 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21500223

研究課題名（和文） 適応型粒子群最適化法の構築とスイッチ力学系のパラメータ最適化

研究課題名（英文） Construction of adaptive particle swarm optimizers and optimization of parameters in switched dynamical systems

研究代表者

斉藤 利通 (SAITO TOSHIMICHI)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：30178496

研究成果の概要(和文):様々な問題に柔軟に適応できる粒子群最適化法(PSO)について考察し、3つの新しいPSOを提案した。(1) 確定的な差分方程式に支配されるPSO。これは安定性解析や再現性のある動作制御に有利である。(2) 粒子の動作を鈍感で接近粒子は衝突するPSO。これは複数解探索に有利である。(3) 粒子間の結合にスイッチを導入したPSO。スイッチ頻度を調節することにより、粒子間の疑似距離の制御や柔軟な粒子間の情報交換が可能である。

また、パワーエレクトロニクスへの応用を検討し、スイッチング電源の制御信号最適化や、光電変換系の電源の最大電力点探索への応用の基礎となる成果を得た。

研究成果の概要(英文): We have studied particle swarm optimizers (PSOs) with flexible adaptation function to various problems and have proposed three novel PSOs. (1) The PSO governed by a deterministic difference equation. It has advantages in analysis of stability and control of reproducible dynamics. (2) The PSO with insensitive particle movement and inter-near-particle collision. It is suitable for multi-solution problems. (3) The PSO with switched inter-particle connection. Adjusting the switching frequency, we can control inter-particle pseudo-distance and can realize flexible inter-particle communication. We have also studied applications to power electronics and have obtained basic results for applications to control signals optimization in switching power converters and to maximum power point search in photovoltaic systems.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：カオス、群知能

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 粒子群最適化法(PSO)は、動物の集団行動を参考とした最適値探索アルゴリズムである。基本的な PSO の粒子(潜在解に対応)は、探索のための情報を集団で共有する。適切な情報交換に基づいて多数の粒子が多次元空間内を動き回り、最適値を探索する。関数の勾配を利用しないので微分不能な問題にも適用でき、集団で探索するので初期値依存性が少ない、等の利点がある。柔軟で適用範囲の広い手法として、権威ある国際会議や学術雑誌等で盛んに議論されている。応用も様々なものが研究されている。工学的応用としては、電力ネットワーク、制御系設計、通信システム設計、ロボットの群行動、等に関する最適化が研究されている。複数解探索、多重目的関数最適化、動的環境への対応等の様々な問題も考察されている。

しかし、局所解からの脱出、適切なパラメータの設定、多重最適化、収束理論構築等、重要な未解決問題も多い。

(2) スイッチ力学系 (SDS)は、連続時間サブシステムがある条件によって切り替わる非線形システムであり、スイッチング電源、アナログ信号処理、スパイクニューロン等、様々なシステムと関連している。滑らかな系には見られない興味ある非線形現象を呈し、基礎応用両面から積極的に研究されている。基礎研究では、パラメータ空間のどこでどのような現象が生じるか、どこで現象が変化するか(分岐現象)を解明することが重要である。応用研究では、SDS が所望の動作をするパラメータ設定(パラメータ最適化)が重要である。パラメータ最適化は、パラメータに関する目的関数の最小値探索に帰着できる。

しかし、SDS の目的関数は一般に不連続点が多く、微分可能性を要求する勾配を用いた方法は有効でない。

## 2. 研究の目的

(1) PSO を改良するためには様々な視点があるが、本研究では、粒子群のグラフ構造のトポロジーが計算コストや探索性能に深く関係することに着目する。ある目的関数を最適化するために適切なトポロジーや粒子数は、その目的関数に依存するはずである。多種多様な目的関数に共通に有効なトポロジーや粒子数の存在は考えにくい。粒子のグラフ構造、粒子数、粒子群の時間発展に多様性を与え、様々な問題に適応できる PSO を構築することが第一の目的である。

(2) SDS の目的関数は不連続になる場合も多く、微分可能性を要求しない PSO の活用が期待される。適応型 PSO を SDS のパラメータ最適化に応用することを第二の目的とする。DC/AC インバータや光電変換系の最大電力点追尾などの例を念頭において研究を進める。

## 3. 研究の方法

(1) 基本的な PSO の探索特性のパラメータ依存性を詳しく調べ、その結果を参考に、簡素で適応力のある PSO アルゴリズムを開発する。

(2) パラメータ最適化に関する複数解探索や多目的最適化問題にアプローチするための手法を考案し、その基本性能を考察する。

(3) 応用については、まず、典型的なベンチマークに対する基礎実験を行い、その結果を参考に、DC/AC インバータのスイッチ信号最適化や光電入力スイッチング電源の最大電力点探索等への応用を検討する。

## 4. 研究成果

柔軟な適応能力のある PSO の開発と、その工学的応用について研究した。主な成果は以下の5点である。全て査読を経て公表された。

(1) 「確定的 PSO」の基本アルゴリズムを構築し、その基本性能を検討した。目的値を探索するための粒子の動作を支配するパラメータには確定的な数値を用い、再現性のある様々な動作を実現した。典型的なベンチマークに対する数値実験を行い、パラメータと探索性能の関係を調べた。探索性能は、主に近似解探索成功率と探索に要する計算コストによって評価した。この結果は、様々な PSO の改良版の構築や、その工学的応用の基礎となる。なお、古典的な PSO は乱数パラメータを含む場合が多く、安定性の解析や動作の再現性に問題がある場合が多い。

(2) 「鈍感衝突 PSO」の基本アルゴリズムを構築し、複数解探索問題に対してその基本性能を検討した。同 PSO は、局所解にトラップされた粒子がその周りの粒子に影響を及ぼすのを避けるために、粒子間の情報伝達に鈍感さを導入している。また、多くの粒子が一か所に集中をするのを避けるために、粒子同士が接近すると衝突して遠ざかるようにしてある。同 PSO を典型的ないくつかの例題に適用し、ある程度複雑な複数解探索では、鈍感と衝突がかなり有効に機能し、探索性能向上に貢献しうることを確認した。

(3) 「スイッチトポロジーPSO」の基本アルゴリズムを構築し、その基本性能を検討した。粒子群のトポロジーは、粒子間の情報伝達に影響を与え、探索性能を大きく左右する。このトポロジーに多様性を与えるために、粒子間の結合をスイッチで制御する。スイッチの頻度を変化させると、等価的に粒子間の平均頂点距離を様々に変化させることができる。これによって、スイッチの無しのPSOよりもはるかに多種多様な粒子群構造を実現できる。これを、典型的な複数解探索問題に適用し、スイッチの動作と探索性能の関係を調べ、スイッチングが適切であれば、探索性能をかなり向上させられることを解明した。また、非線形力学系の分岐現象解析への新しい応用を提案し、基本的な数値実験を行った。同PSOのアルゴリズムは、IEEE-CEC[学会発表①]で公表する予定である。これは権威のある国際会議であり、本研究はその査読で高い評価を受けて採録となった。

(4) DC-ACインバータを制御するためのスイッチ信号最適化への応用を検討した。スイッチ位相を粒子の次元に対応させ、歪率と所望供給電力によって評価関数を構成した。この問題では、所望電力によってスイッチの平均頻度が変化するので、その変化に追従できる信号の生成が重要である。しかし、従来のPSOでは各粒子の次元は固定されており、スイッチ頻度の変化の実現は難しい。この問題を解決するために、スイッチ位相の相互関係に依存して、スイッチ頻度を適切に変化させる「可変次元PSO」を考案した。同PSOを基本的なDC/ACインバータのスイッチ信号最適化に応用し、所望出力に従って、スイッチ頻度を適切に制御できることを確認した。図1はその一例である。初期値として与えたスイッチ位相が、探索過程で適切に減少し、所望の目的波形が得られている。この成果は、IEEE/IECON[学会発表⑤]などで公表された。

(5) 光電変換入力スイッチング電源のパラメータ最適化への応用への第一歩として、所望動作を実現するパラメータ探索に関する基本問題を検討した。まず、同電源回路の簡略モデルを導入し、系が安定に動作するパラメータを探索するための評価関数と、最大電力を供給するパラメータを探索するための評価関数を導出した。パラメータ探索はこの2つの評価関数に基づく多目的最適化問題となる。図2のように、パラメータ空間が2次元の場合、各々の評価関数の最適値は曲線となるので、最適解はその交点で与えられる。この問題に、複数の評価関数を線形結合する方法や、全探索法を用いると、パレート最適解に捕われ、最適解を求めること困難となる。これに対して、各目的関数を論理演算で結合するハイブリッド適合度を用いる方法を導

入した。この方法では、ある目的関数は与えられたしきい値以下では増大することが可能であり、この増大が他の目的関数の減少を助けることができる。この方法によって、目的とした交点を求めることに成功した。その例を図2に示す。この結果は、系の安定性と最大電力供給にはトレードオフが存在し、不安定周期解が最大電力を与える場合があることを示唆している。これは従来知られていなかった知見であり、新しいエネルギー供給系開発のトリガーとなる可能性がある。この成果は、電子情報通信学会のオンラインジャーナル[雑誌論文④]などで公表した。

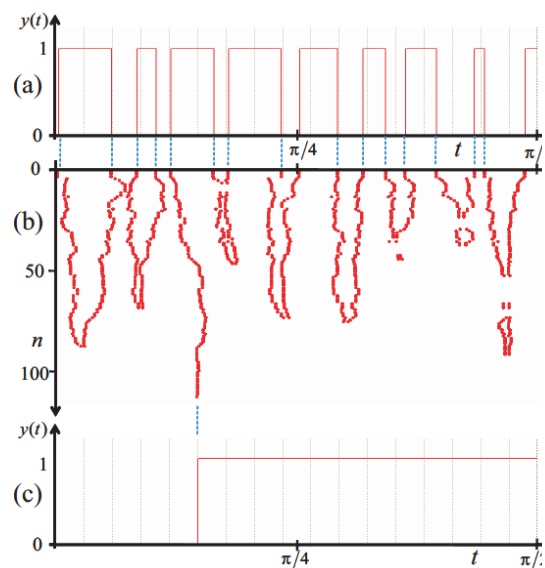


図1: インバータのスイッチ信号の最適化。(a) 初期波形, (b) 探索過程, (c) 最終波形

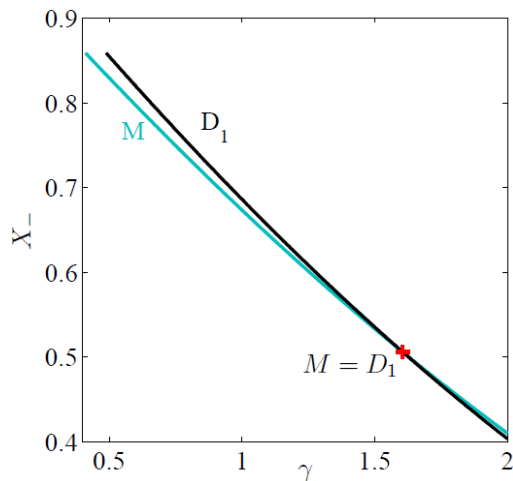


図2: 2目的パラメータ探索。 $X_c$ は制御しきい値、 $\gamma$ は制御クロックに対応するパラメータ。カーブ  $D_1$  は安定境界、カーブ  $M$  は最大電力点に対応。その交点(赤)が目標値。

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 12 件), (全て査読有)

- ① M. Kubota and T. Saito, A Discrete Particle Swarm Optimizer for Multi-Solution Problems, IEICE Trans. Fundamentals, E95-A, 1, 2012, pp. 406-409
- ② T. Ogawa and T. Saito, Self-organizing Digital Spike Maps for Learning of Spike-Trains, IEICE Trans. Fund., E94-A, 12, 2011, pp. 2845-2852
- ③ R. Ito, Y. Nakayama and T. Saito, Learning of Dynamic BNN toward Storing-and-Stabilizing Periodic Patterns, Lecture Notes in Computational Science, 7063, 2011, pp. 606-611.
- ④ H. Matsushita and T. Saito, Application of Particle Swarm Optimization to Parameter Search in Dynamical Systems, NOLTA, IEICE, E94-N, 10, 2011, pp. 458-471
- ⑤ Y. Nakayama, R. Ito and T. Saito, A Simple Class of Binary Neural Networks and Logical Synthesis, IEICE Trans. Fund., E94-A, 9, 2011, pp. 1586-1589
- ⑥ D. Kimura and T. Saito, A Trade-Off between the Maximum Power Point and Stability, IEICE Trans. Fund., E94-A, 7, 2011, pp.1513-1518
- ⑦ K. Hisamatsu and T. Saito, Basic Dynamics of Simple Delay-Coupled Bifurcating Neurons, IEICE Trans. Fundamentals, E94-A, 3, 2011, pp. 1006-1009
- ⑧ K. Ono, K. Jin'no and T. Saito, Growing Particle Swarm Optimizers for Multi-Objective Problems in Design of DC-AC Inverters, IEICE Trans. Fund., E94-A, 1, 2011, pp. 430-433
- ⑨ H. Nakamura and T. Saito, Switched Capacitor Boost Converter including Voltage-Mode Threshold Switching, IEICE Trans. Fund., , E93-A, 7, 2010, pp. 1388-1391
- ⑩ E. Miyagawa and T. Saito, Particle Swarm Optimizers with Growing Tree Topology, IEICE Trans. Fund., E92-A, 9, 2009, pp. 2275-2282
- ⑪ T. Saito and D. Kimura, Synchronization and Hyperchaos in Switched Dynamical Systems based on Parallel Buck Converters, IEICE Trans. Fundamentals, E92-A, 8, 2009, pp. 2061-2066
- ⑫ 斎藤利通, 粒子群最適化と非線形システム, IEICE Fundamental Reviews, 5, 2, 2011, pp. 155-161

[学会発表] (計 13 件), (全て査読有)

- ① R. Sano, T. Shindo, K. Jin'no and T. Saito, PSO-based Multiple Optima Search Systems with Switched Topology, IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2012年6月15日発表確定, オーストラリア, ブリスベン.
- ② T. Saito and K. Kawamura, Varying Dimensional Particle Swarm Optimizers for Design of Switching Signals, International Conference on Evolutionary Computation Theory and Applications, 2011年10月24日, フランス, パリ.
- ③ T. Saito and M. Kubota, Discrete Particle Swarm Optimizers for Numerical Analysis of Dynamical Systems, 非線形理論とその応用国際会議, 2011年9月6日, 神戸, 神戸市産業振興センター.
- ④ R. Sano, K. Jin'no and T. Saito, Basic Characteristics of Deterministic PSO with Rotational Dynamics, 非線形理論とその応用国際会議, 2011年9月6日, 神戸, 神戸市産業振興センター.
- ⑤ K. Kawamura and T. Saito, Design of Switching Circuits based on Particle Swarm Optimizer and Hybrid Fitness Function, the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2010年11月9日, 米国, フェニックス.
- ⑥ T. Maeda and T. Saito, Analysis of Stability and Bifurcation in a Simple Model of Power Converters with Solar Cell Input, the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2010年11月9日, 米国, フェニックス.
- ⑦ H. Matsushita and T. Saito, Application of Particle Swarm Optimizers to Finding Desired Parameters of Switched Dynamical Systems, 非線形理論とその応用国際会議, 2010年9月7日, ポーランド, クラクフ.
- ⑧ R. Ito and T. Saito, Dynamic Binary Neural Networks and Evolutionary Learning, International Joint Conference on Neural Networks, 2010年7月22日, スペイン, バルセロナ.
- ⑨ K. Hisamatsu and T. Saito, Delay-Induced Order in Pulse-Coupled Bifurcating Neurons, International Joint Conference on Neural Networks, 2010年7月20日, スペイン, バルセロナ.
- ⑩ C. Kurosu and T. Saito, Growing Particle Swarm Optimizers with Variable Topology and Dynamic Parameter, IEEE International Congress on Evolutionary Computation, 2010年7月22日, スペイン, バルセロナ.

- ⑪ T. Saito and E. Miyagawa, Growing-tree particle swarm optimizer with simple tabu search function, 非線形理論とその応用国際会議, 2009年10月20日, 札幌, シャトレーゼガトーキングダムサッポロ.
- ⑫ D. Kimura and T. Saito, A Simple Switched Dynamical System based on Photovoltaic Systems, 非線形理論とその応用国際会議, 2009年10月20日, 札幌, シャトレーゼガトーキングダムサッポロ.
- ⑬ K. Ono and T. Saito, Application of Particle Swarm Optimizers to Two-Objective Problems in Design of Switching Inverters, International Joint Conference on Neural Networks, 2009年6月16日, 米国, アトランタ.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

斉藤 利通 (SAITO TOSHIMICHI)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：30178496