

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2007～2009
課題番号：19500196
研究課題名（和文） 多様化・集中化機能によるロバスト・適応的多体結合型大域的最適化手法の開発
研究課題名（英文） Developments of Multiple Points Coupling Type of Global Optimization Methods with Adaptability and Robustness by Mechanisms of Diversification and Intensification
研究代表者 相吉 英太郎（AIYOSHI EITARO） 慶應義塾大学・理工学部・教授 研究者番号：90137985

研究成果の概要（和文）：最適化問題の構造に対する「適応性」や問題の規模に対する「ロバスト性」を具備させる方略として、最適解探索の「多様化」と「集中化」の機能を実現した新しい多点探索型大域的最適化アルゴリズムの開発や、Particle Swarm Optimization（以降 PSO）などの既存の多点探索型アルゴリズムの機能向上のための改良、さらには開発したアルゴリズムの機能強化のためのハイブリッド化手法の提案をおこない、大域的最適解を探索する多くのベンチマーク問題において、開発手法や提案手法の有用性を検証するとともに、制御系設計問題への応用を検討した。

研究成果の概要（英文）：In order to realize mechanisms of diversification and intensification in search for an optimal solution as strategies to provide adaptability to various structures and robustness against the problem scale, the new type of global optimization algorithms by multiple search points are developed, the existing multiple search point methods such as Particle Swarm Optimization (PSO) are improved, and hybridization methods to enlarge the mechanisms of developed method are proposed. Moreover, the searching abilities of the developed, improved and proposed methods are certified through many benchmark problems for global optimization as well as applications to designing of control systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
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

キーワード：最適化手法，大域的最適化，カオス，PSO，メタヒューリスティックス

1. 研究開始当初の背景

システムの設計・制御問題の多くは、最適化問題を解くことに帰着されるが、近年のシ

ステムの大規模化・複雑化、さらには設計・制御に対する要求の高度化に伴い、解くべき最適化問題の目的関数が多峰構造を有する

連続・離散最適化問題の大域的最適解を求めることのニーズが強く、より高い「大域的最適解探索性能」を有する最適化アルゴリズムの構築が不可欠な課題となっている。また、最適化アルゴリズムは、一般的に調整すべきパラメータを有しているが、問題の種類や問題の変数次元などの問題の規模ごとにパラメータ調整などの試行錯誤的な手間を必要としない「ロバスト性」や、問題の種類に応じて探索過程で得られる情報を用いて自律的にパラメータを調整する「適応性」が望まれている。そして、メタヒューリスティクスと称する多点探索型最適化アルゴリズムには、こうした性能があることが、申請者の過去の研究を含めて明らかにされてきていた。とくに、多点探索型最適化アルゴリズムにおいてこれらの性能を具備させる方略として、探索の「多様化」と「集中化」の機能を実現することが鍵と考えられていた。とくに勾配情報を用いないヒューリスティックな多点探索型の大域的最適化手法として注目を集めた Particle Swarm Optimization (PSO)法の出現は、大域的最適解探索アルゴリズムの開発に刺激を与えたと同時に、最適解探索アルゴリズムを複雑多体結合系とみなし、そこにおける相互作用（探索点間の相互作用）が作り出す多様かつ複雑なダイナミクスの特性を統一的に捉え、その解析を体系的に行うことによって、アルゴリズムのダイナミクスにロバスト性・適応性を有し、かつ大域的最適解探索性能の優れた新たな多点型最適化アルゴリズムの開発が可能であることが示唆されるに至っていた。一方において、非線形力学系の特徴的現象の一つであるカオス現象を用いた最適解探索手法も提案され、その解析的性質や大域的最適化手法としての性能が明らかにされており、アルゴリズムを非線形力学系としてみなすことによって得られる知見を用いることが可能な環境にあり、結合系カオスの力学現象を用いた大域的最適化手法の開発の可能性が予見されるに至っていた。

2. 研究の目的

上記の研究背景を下に、連続変数および離散変数の多点探索型最適化アルゴリズムを多体結合系とみなし、そこにおける相互作用（探索点間の相互作用）が作り出す多様かつ複雑な（とくに非線形な）探索ダイナミクスを活用することで、探索の「多様化」と「集中化」を実現し、「ロバスト性」「適応性」を有し、かつ大域的探索性能の優れた新たな連続変数および離散変数の多点探索型最適化アルゴリズムを体系的に構築することを目的とする。具体的には以下のとおりである。

- (1) 多体結合系のダイナミクスをモデルとする最適解探索機構の解析

連続変数空間における多体結合系カオスの分岐特性や同調現象の解析

離散変数空間における近傍の定義と近傍受理機構に基づく近接最適性原理 (Proximate Optimality Principle : POP) の解析

- (2) 多体結合系のダイナミクスモデルによる「多様化」と「集中化」を実現した最適解探索機構の構築

連続変数空間における多体結合系カオスの分岐特性と同調現象に基づく、探索の「多様化」と「集中化」の実現

離散変数空間における近接最適性原理の定量評価に立脚した多体結合系の相互作用に基づく、探索の「多様化」と「集中化」の実現

- (3) 最適化アルゴリズムに対する「ロバスト性」「適応性」の付与

パラメータに対するフィードバック調整機構による「ロバスト性」「適応性」の付与

アルゴリズムコントローラ概念を用いたパラメータ自動調整法による「適応性」の付与

- (4) ベンチマークを用いた数値実験による開発アルゴリズムの性能評価と制御系設計などの応用問題への適用

3. 研究の方法

まず、本研究課題が対象とする最適化問題を、その決定変数が連続変数の場合と離散変数の場合とに大別する。そして、前者の連続変数最適化問題を主として研究代表者の相吉が、後者の離散変数最適化問題を主として研究分担者の安田が担当した。なお、両者ともに非線形力学系を用いた最適化手法の開発に関して、すでに研究実績があり、両者の知見を生かすため、両研究室間で合同の研究討論会を定期的に開催し、それによる成果発表を共同の形でおこなった。具体的には、相吉と安田は以下のように研究分担したが、その共通の主軸は、新しい多点探索型最適化アルゴリズムの提案である。

< 相吉の担当 >

- ・多体結合系カオスを用いた連続変数最適化アルゴリズムの提案
- ・多体結合系のダイナミクスの見地から PSO の改良アルゴリズムの提案

< 安田の担当 >

- ・近接最適性原理の検証とそれに基づく離散変数最適化アルゴリズムの提案

4. 研究成果

研究目的で記したとおり、多点探索型最適化アルゴリズムを多体結合系とみなし、探索点間の相互作用が作り出す多様かつ複雑な探索ダイナミクスを活用することで、探索の

「多様化」と「集中化」を実現し、大域的探索性能が優れ、同時に「ロバスト性」「適応性」を有する新たな連続変数および離散変数の多点探索型最適化アルゴリズムを構築し、当初の研究目的を達することができた。具体的に以下のとおりである。

(1) 探索の「多様化」と「集中化」による PSO の大域的探索性能の向上

PSO は、大域的最適解を求めるための有力かつ簡便な手法の一つとして知られており、とくに変数の数が比較的少ない多峰性関数の大域的最適解を実用的な計算時間内に高い精度で求めることができる手法として注目されているが、変数の数が多い問題には、必ずしも良好な性能があるとは限らないことが指摘されていた。これに対して、本研究課題において、以下の提案をおこなった。

PSO の計算モデルのダイナミクスの本質は、線形慣性系の力学系であるため、これを非線形化することにより、結合型非線形力学系とくに非線形振動固有の相互作用によって創発される探索の「多様化」と「集中化」を実現し、大域的最適解探索能力を大幅に高めると同時に、解きたい問題に対して「ロバスト性」「適応性」のある最適化アルゴリズムを提案した(雑誌論文, 学会発表)。

PSO の計算モデルのダイナミクスの安定性に対する解析的考察から、その安定な状態と不安定な状態の境界領域にパラメータを設定することによって、所与の計算時間内での持続探索性能の付与することで、大域的探索能力を高める方法を提案した(雑誌論文, 学会発表)。

PSO のアルゴリズムを他の局所的探索法と組合せ、階層的・ハイブリッド的に用いることで、その探索の「多様性」の機能を発揮させ、探索の「多様化」と「集中化」の機能分担をさせて、大域的探索能力を大幅に高めた方略を提案した(雑誌論文, 学会発表)。とくに雑誌論文において提案した方略は、進化計算におけるミメティックアルゴリズムとして PSO を用いることに相当しており、離散変数最適化問題にも適用することで、その組合せの爆発を回避することができるきわめて有望な手法と考えられる。また、学会発表では、巡回セールスマン問題に特化した順路生成のための動的なシステムである「アントシステム」に対して、PSO をハイブリッド的に冠することで最適化機能を能動的に付加した手法を提案した。

PSO の計算モデルのパラメータの調節機構として、フィードバック型の自律的調節機構を設けて、その大域的探索能力を高めると同時に、解きたい問題に対して「ロバスト性」「適応性」のある最適化アルゴ

リズムを提案した(雑誌論文, 学会発表)。とくに、雑誌論文では、探索点群の「活性度」という概念を提唱し、この活性度をフィードバック情報としてアルゴリズム中のパラメータを自動調整する手法を確立した。また、学会発表では、このアルゴリズムのパラメータ調節機構をアルゴリズムコントローラと称して、その調節機構の入出力関係の構造そのものを、遺伝プログラミングの概念を用いて自動的に生成する手法を確立した。

PSO を探索空間の部分空間で繰り返し用いることで大域的探索性能を高める方略を提案した(雑誌論文)。PSO の大域的最適解探索性能は、変数が少ない問題に対してその威力を発揮することを利用して、部分空間での大域的探索を繰り返す手法を提案し、大域的最適解への収束割合を段階に高めることに成功した。

PSO の探索点に対して、生物種の動特性の違いに対応づけることができる個性を持たせ、これによって探索の「多様化」を実現したアルゴリズムを考案した(学会発表)。とくに生物種間に捕食-被食関係がある場合に、探索ダイナミクスの挙動に多様性をもたせることができることをシミュレーションにより確認した。

(2) 多体結合系カオスをを用いた最適化手法の多点探索化による大域的最適解探索性能の向上

多体結合系カオスの分岐特性を用いたカオス最適化手法を多点探索化することによって、非線形現象の同調現象を利用した新しい多点探索型最適化アルゴリズムを提案した(雑誌論文)。非線形力学系の特徴として、カオス振動が発生する以外に、結合系を構成することで、同調現象が創発することが知られている。提案手法では、カオス振動によって探索の「多様化」を、同調現象によって探索の「集中化」を実現しており、この機能によってカオス最適化手法の大域的最適解探索性能を大幅に向上させることに成功した。とくにカオス振動を同調させるために PD(比例-微分)結合と称する結合を提案し、カオス同調のための有効性を確認している。

多体結合系カオスの結合構造として、PSO と同様の探索履歴の中でもっとも最良の探索点へ移流する「g-best 結合」を導入することによって、カオス最適化手法の大域的最適解探索性能を高めた手法を提案した(雑誌論文)。

勾配情報を用いた非線形慣性モデルの多体結合系における非線形振動現象を応用した多点探索型最適化アルゴリズムを提案し、その大域的最適解探索性能がきわ

めて優れていることを確認した(学会発表, ,)。学会発表は, 単点探索の場合の非線形慣性モデルの動特性をシミュレーションにより解析したもので, 学会発表は, この結果を踏まえて, 多体結合化したものである。学会発表は, さらに等式制約条件のある問題に拡張したものである。

(3) 組合せ最適化問題に対する POP に関する情報を用いた多点探索アルゴリズムの提案

ナップサック問題や巡回セールスマン問題に対しては, 解の「部品構造」の概念を導入し, またより一般的には, 解の間の「距離」の概念を導入して, 探索個体間の平均距離を目標値をできるかぎり維持するように移動操作をおこなう多点探索型 Tabu Search を提案した(雑誌論文, 学会発表)

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)

小熊祐司, 相吉英太郎:「Particle Swarm Optimization の力学系に対する乱数を考慮した安定性解析: 持続探索のため最良パラメータ」電気学会論文誌 C, Vol.130, No.1, pp.29-38 (2010-1) 【査読有】

小熊祐司, 古澤敦郎, 相吉英太郎:「離散構造制約条件付き最適化問題に対する PSO を用いた進化計算」計測自動制御学会論文誌, Vol.45, No.10, pp.512-521 (2009-10) 【査読有】

神内宏幸, 安田恵一郎, 石亀篤司:「距離構造に基づく相互作用を用いた多点探索型 Tabu Search」電気学会論文誌 C, Vol.129, Vol.7, pp.1379-1380 (2009-7) 【査読有】

銭晨, 安田恵一郎:「パラメータ空間における逐次最適化に基づく Particle Swarm Optimization」電気学会論文誌 C, Vol.129, Vol.7, pp.1246-1252 (2009-7) 【査読有】

鈴木亮平, 河合富貴子, 中沢親志, 松井哲郎, 相吉英太郎:「PSO を用いたモデル予測制御のパラメータ最適化」電気学会論文誌 C, Vol.129, No.3, pp.432-440 (2009-3) 【査読有】

K. Yasuda, N. Iwasaki, G. Ueno, and E. Aiyoshi, “Particle Swarm Optimization : A Numerical Stability Analysis and Parameter Adjustment Based on Swarm Activity,” IEEJ Trans. on

Electrical and Electronic Engineering, Vol. 3, No.6, pp.642-659 (2008-11) 【査読有】

平岡創士, 岡本卓, 相吉英太郎:「繰り返し型探索指針による Particle Swarm Optimization の改良」電気学会論文誌 C, Vol.128, Vol.7, pp.1143-1153 (2008-7) 【査読有】

T.Okamoto, and E.Aiyoshi: “Global Optimization with the PSO Coupling-Type Discrete Gradient Chaos Model,” Electrical Engineering Japan, Vol.165, No.2, pp.67-73 (2008-6) 【査読有】

T. Okamoto and E. Aiyoshi: “Global Optimization Using a Synchronization of Multiple Search Points Autonomously Driven by a Chaotic Dynamical Model,” Journal of Global Optimization, Vol.41, No.2, pp.219-244 (2008-2) 【査読有】

佐々木琢一, 相吉英太郎:「多様化と集中化の探索戦略を階層的に併用する大域的最適化手法」, 計測自動制御学会論文集, Vol.43, No.11, pp.1055-1064 (2007-11) 【査読有】

D. Niizuma, K. Yasuda, and A. Ishigame, “Multi-point Tabu Search Based on Proximate Optimality Principal - Application of Parts Concept -,” IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, Vol.2, No.6, pp.635-642 (2007-6) 【査読有】

村田秀樹, 安田恵一郎, 相吉英太郎:「非線形散逸項を有する Particle Swarm Optimization 法の提案」, 電気学会論文誌 C, Vol.127, No.5, pp.787-792 (2007-5) 【査読有】

[学会発表](計 15 件)

池田泰弘, 相吉英太郎:「超局面上の非線形力学系による制約条件付き最適化手法」電気学会産業計測制御研究会資料, 関東学院 KGU 関内メディアセンター (2010-3-3) 【査読無】

古澤敦郎, 相吉英太郎:「PSO を用いた進化計算による複雑な制約条件付き最適化問題の解法」計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 SSI2009, 東京工業大学長津田キャンパス (2009-11-25) 【査読無】

岡本卓, 浜田憲一郎, 相吉英太郎:「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 システム・情報部門学術講演会 SSI2009, 東京工業大学長津田キャンパス (2009-11-25) 【査読無】

森井宣人, 相吉英太郎: 「Particle Swarm Optimization を用いたアトシステムの進化的最適化」平成 21 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 徳島大学常三島キャンパス (2009-9-4) 【査読無】

K. Yazawa, M. Motoki, and K. Yasuda: "Cluster-Structured Particle Swarm Optimization with interaction," The ICROS-SICE International Joint Conference 2009 (2009-8-18) 【査読有】
金政実, 相吉英太郎: 「遺伝プログラミングによるアルゴリズムコントローラの設計」電気学会産業計測制御研究会資料, 関東学院 KGU 関内メディアセンター (2009-3-3) 【査読無】

石井良尚, 岡本卓, 相吉英太郎: 「個体年齢と世代交代の概念を取り入れた持続探索型 Particle Swarm Optimization」計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 SSI2008 姫路市国際交流センター (2008-11-26) 【査読無】

古林史裕, 石亀篤司, 安田恵一郎, 相吉英太郎: 「生物種を考慮した適応型 Particle Swarm Optimization」計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 SSI2008 姫路市国際交流センター (2008-11-26) 【査読無】

杉野弘和, 安田恵一郎, 相吉英太郎: 「適応型時変慣性系モデルによる Particle Swarm Optimization」計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 SSI2008, 姫路市国際交流センター (2008-11-26) 【査読無】

相吉英太郎, 古澤敦郎: 「最適化手法としてのボールドウィン型進化戦略とラマルク型進化戦略」第 18 回インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN 2008), 広島県情報プラザ (2008-10-23) 【査読無】

浜田憲一郎, 安田恵一郎, 相吉英太郎: 「適応型時変慣性系による大域的最適化手法」平成 20 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, はこだて未来大学 (2008-8-21) 【査読無】

小熊祐司, 古林史裕, 相吉英太郎: 「Nelder-Mead 法に基づく新しい大域的最適化手法」平成 20 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, はこだて未来大学 (2008-8-21) 【査読無】

R. Suzuki, F. Kawai, C. Nakazawa, T. Matsui and E. Aiyoshi: "Parameter Optimization of Model Predictive Control Using PSO," SICE Annual Conf. 2008 電気通信大学 (2008-8-20) 【査読有】

平岡創土, 岡本卓, 相吉英太郎: 「繰り返し型探索指針とそれに基づく Particle Swarm Optimization の改良手法の提

案」平成 19 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス (2007-9-5) 【査読無】

前田恵美, 安田恵一郎: 「組合せ最適化問題に対する部品構造を用いた最適化手法」平成 19 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス (2007-9-4) 【査読無】

〔図書〕(計 1 件)

相吉英太郎, 安田恵一郎 編著: 「メタヒューリスティクスと応用」pp.91-103, 電気学会, オーム社 (2007-10)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

相吉 英太郎 (AIYOSHI EITARO)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号: 90137985

(2) 研究分担者

安田 恵一郎 (YASUDA KEIITIRO)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号: 30220148

(3) 連携研究者

岡本 卓 (OKAMOTO TAKASHI)
千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・助教
研究者番号: 40451752

増田和明 (MASUDA KAZUAKI)
神奈川大学・工学部・特別助教
研究者番号: 30409924