

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：10104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2023

課題番号：16K01231

研究課題名(和文)汎用的問題解決能力をもつ粒子エージェントによる最適化アプローチ

研究課題名(英文)Optimization approach with particle agents with generic problem-solving capabilities

研究代表者

加地 太一 (Kaji, Taichi)

小樽商科大学・商学部・教授

研究者番号：60214300

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：最適化問題の新たなパラダイムである粒子群最適化法(PSO)は、多峰性の大域的最適化問題に対して精度の高い解を導き出している。しかし、高次元空間では、早い段階で局所解に落ち込む特徴がPSOにあり、その能力が発揮されない。そこで、本研究では、高次元空間において早い段階で局所解に落ち込まず、より質の良い解を探索するPSOを検討した。ここでは、粒子の移動において特徴的な確率分布を導入し、かつ、粒子の集まりの構成を最構築する仕組みを作り上げ、その能力の改善を行った。

さらに、解(粒子)の移動を定義する近傍に関して確率的なモデル化を行い、粒子の移動に関して数理的な解析し、その性質、性能を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
システムの設計、計画、運用などで最適化手法の利用は欠かせない。しかし、最適化問題は緻密なクラスに分類され、その解法は様々な方法論をとる。提案する高精度なPSOにより汎用的に利用可能な最適化アルゴリズムが存在すれば、あらゆる分野において最適化の活用を推し進める。特に、PSOの欠点である高次元な問題に対して探索力を強化することは、未だ特効薬のない多峰性関数の最適化に対して有効な手立てを提案する特色ある研究となる。

さらに、粒子の近傍の理論的解析を行うことは、PSOのパフォーマンス、限界、およびPSOがもつパラメータによる効果、傾向の特徴が明らかとされる。

研究成果の概要(英文)：Particle Swarm Optimization (PSO), a new paradigm for optimization problems, has been used to obtain highly accurate solutions to multimodal global optimization problems. However, in high-dimensional spaces, PSO has the characteristic of falling into a local solution at an early stage, and its ability is not demonstrated. Therefore, in this study, we investigated a PSO that searches for better quality solutions in higher dimensional spaces without falling into the local solution at an early stage. We improved the ability of PSO by introducing a characteristic probability distribution for the movement of particles and by creating a mechanism for the best construction of the composition of a collection of particles.

In addition, we performed stochastic modeling of the neighborhood that defines the movement of the solution (particles), conducted a mathematical analysis of the movement of particles, and clarified its properties and performance.

研究分野：最適化問題

キーワード：最適化問題 メタヒューリスティクス 粒子群最適化法 アルゴリズム 多峰性関数 確率的解析 極値統計

### 1. 研究開始当初の背景

(1) システムの運用, 設計, 計画などで最適化手法を取り込むことは有効であり, システム上で最適化は欠かせないツールである. しかし, 最適化問題は線形, 非線型, 組合せなど緻密なクラスに分類され, その解法は様々な方法論をとる. したがって, 知識のないものにとってその利用は難しいと言える. これに対して, 問題を意識せず利用できる汎用型最適化アルゴリズムが存在すれば, あらゆる分野において最適化の活用を推し進めるであろう. その汎用型ソルバー構築のために, メタヒューリスティクスの一つである粒子群最適化法 (Particle Swarm Optimization, PSO) に着目する. PSO は, 粒子の動きにヒントを得たパラダイムであり, 多次元空間において位置と速度を持つ粒子群でモデル化され, 個々の粒子 (エージェント) が超空間を飛び回り相互作用を及ぼしながら最善の位置 (解) を探すマルチエージェント型最適化である. 先行研究では, 低次元な連続型多峰性関数などに対して有効な結果を示している. その強力な探索能力と動作の柔軟性から PSO を利用し汎用的なソルバーへの適用をはかりたい. しかし, 複雑な問題, たとえば高次元な問題に対してその能力は十分に発揮されない問題が残されている.

(2) 解 (粒子) の移動操作のベースを作り上げているものが解の近傍である. 近傍とは任意の解に対してなんらかの操作を加えることにより得られる解の集合である. メタヒューリスティクスはこの近傍にもとづいて解空間を探索し, より良い解へ到達することを目指すものである. この近傍の定義がメタヒューリスティクスの開発における基盤となり, より良い近傍のデザインが選り優れたメタヒューリスティクスの構築に繋がる. すなわち, 近傍はメタヒューリスティクスの基本的な役割を演じ, 質の良い解を得るために近傍をどのように設計するかが重要な問題となる. ここで, 設計した近傍の能力, 特性を分析, 比較できれば, メタヒューリスティクスの開発にとって有益な結果を導き出すであろう.

### 2. 研究の目的

(1) 高次元な問題に対して解決能力を持つ粒子エージェントの開発を行う. PSO の能力を向上させるため, 広く探索を行わせる戦略 (多様化), かつ良い解の周りを集中的に探索する戦略 (集中化) を強化した粒子の移動制御システムを開発することにより, 探索力が強化された粒子エージェントを作り上げる.

(2) 粒子群を意図的に操作し PSO の探索力をさらに強化する. 粒子群がもつ情報を多様化と集中化の戦略に基づき更新することにより過去の情報に束縛されず広い探索が実現され, 優位な解に到達できる. ここで, 粒子群中の各情報が与える影響, 効果などを明らかにし, より精度をあげる粒子群操作の戦略を築き上げる.

(3) アルゴリズムの特徴を検証するため, 動作の多様化, 集中化の状態を表す指標 (活性度など) を検討しその効果について解析する. その上で, PSO のパフォーマンス, PSO 自身の限界などを明らかにする実験データを広く体系的に集め一般性のある解析を示す. また, それらの実験解析から得られる優位点, 問題点に基づき, 粒子エージェントの移動制御システムを洗練する.

(4) PSO をはじめとするメタヒューリスティクスの能力を理論的に解明したい. そこで性能を左右するファクターである解 (粒子) の近傍に着目し, 問題事例に依存しない汎用的な近傍の数理モデルを用い, メタヒューリスティクスを, 理論的, かつ汎用的に解析しその優秀性を明らかにする. また, 経験的な構築に依存したメタヒューリスティクスに対して科学的な視点から開発を試み, 精度の高い解を導き出す. 精度の高い解を得ることにより, より難しい, かつ大規模な問題に対する実用的な意思決定支援システムの構築を可能とする.

### 3. 研究の方法

(1) コーシー分布による特徴的なランダム性を粒子の拡散能力に取り入れる. このコーシー分布の形状は, 分布の頂点が鋭く, また分布の両裾が正規分布に比べ長く広がっている. すなわち, 最頻値付近の値の確率密度が高く, また, 両裾が厚い分布になることにより, その両裾で生起する確率が伴っているという特徴がある. この特徴を移動オペレーターに利用することによって, 現在の粒子付近に高い確率で次状態が生成されるとともに, かつ広い領域を探索可能とする新たな粒子の生成が可能となる. すなわち, 解空間を局所的に探索する集中化に従った特徴, また, ロングジャンプを可能として大域的にも探索する多様化に従った特徴をもつこととなる. この2つの特徴を持った粒子移動オペレーターを作成する. このコーシー分布にもとづく粒子の拡散による PSO をコーシー適応型粒子群最適化法 (CPSO) と呼ぶこととする.

(2) 集団ヒューリスティックとして提案された散布探索法の考えを PSO に新たに適用し, その性能の向上をはかる. すなわち, 粒子の探索過程において段階的に粒子群を再構築し, その再構

築された粒子群に対して再度探索を進めていく。提案手法では、コーシー分布を利用した線形結合的合成方法をこの再構築に用いることにより、粒子群に多様性が導入され精度の悪い局所解へ落ち込むことを回避させる効果が得られることを期待する。また、コーシー分布の特性により探索過程で得られたより良い情報が再構築される粒子群に反映され質の良い解へ到達可能とさせる。この提案する粒子群の再構築により、高次元な問題において局所解への落ち込みを回避し、他より質の良い解を導出する PSO パラダイムを築き上げる。CPSO の拡散方式と、粒子群再構築の考えによる PSO をコーシー適応型散布探索粒子群最適化法(SCPSO) と呼ぶこととする。

(3) 提案するアルゴリズムの特徴と有効性を示すため、標準的に用いられる PSO と、提案するアルゴリズムを比較するため、高次元の多峰性関数に対しての数値実験を行う。そして、本研究での提案するアルゴリズムが標準的に用いられる PSO と比較して優位な結果を導くことを示す。

(4) 解(粒子)のランダムウォークにおいて、現在の解のコスト値が一つ前のコスト値の線形再帰式を満足する自己回帰モデルとなると仮定し、解の近傍の解析を行い、近傍の統計量を汎用的に導き出す。統計量とは、近傍の分布構造を表すパラメータ、近傍の最小コスト値の推定値である。それらの推定値から近傍の探索能力を解析する。

#### 4. 研究成果

(1) ロングジャンプを伴う多様化と集中化の実現として、アニーリング法における高速探索アルゴリズムの1つである Fast SA で用いられているコーシー分布に着目する。Fast SA ではこのコーシー分布を用いることにより、解移動においてロングジャンプを可能とし、より早い解収束をアニーリング法で実現している。また、進化的プログラミングにおける突然変異にコーシー分布を組み込むことにより、個体の変化において広い探索を実現し、効果を上げた報告などもある。同様に、粒子の移動にもコーシー分布の特徴を組み込むことは、粒子のロングジャンプを可能とし広い探索をもたらすことが本研究により証明された。さらに、移動を定義する確率分布においてコーシー分布以外の確率分布によりより改善が予想されることも予想され、今後、さらなる検討の余地が残された。

(2) 集団ヒューリスティクスの一つの考え方として、散布探索法がある。この解法は、解集合を基盤としており、その解集合の再構築において多様性を組み込むところに特徴がある。この散布探索法の考えを用いて、粒子群の段階的な再構築を繰り返し、その再構築された粒子群の上で改めて粒子の探索を進めていく。また、粒子の再構築においてもコーシー分布を取り入れ、粒子群に対する再構成においても集中化と多様性の性質を取り組んでいる。より良い解同士は似通った構造をもつ集中化という概念と、選りすぐった解が異なる構造を持つという多様化という概念にもとづく戦略がより優れた結果を導き出すことが明らかにされた研究の1つとなる。ここで、再構築の回数、粒子群の大きさなどはパラメータとして与えねばならないが、これらのベストな値を推定する必要性が残されている。

(3) 提案した新たな PSO の探索能力の特徴について、一例として 200 次元のベンチマーク問題である Rastrigin 関数, Alpine 関数, Griewank 関数に対してのコストの性能比較を行って見た結果を示しておく。その他の事例においても同様な結果が得られ、数値実験を通して性能が明らかにされた。標準的な PSO, および先行研究で提案された手法、そして、CPSO と SCPSO を比較検証しその優劣を示したい。先行研究では、Inertia Weight Approach(IWA), Adaptive PSO(APSO)の2つを加えて評価を試みる。表1に、その実験を10回行い、それぞれの得られた値の平均値、最良値、最悪値が記されている。さて、本研究での提案手法である CPSO の結果をみると、標準タイプの PSO に対して大きく改善した値を導き出し、高次元問題に対してコーシー分布にもとづく粒子拡散法の有効性が示された。さらに、先の先行研究のうち改善がみられた APSO と比べても大きな改善の差を示している。そして、最終的な提案手法である SCPSO においては、大きな改善が得られた CPSO と比較しても、それをさらに凌駕する結果となった。すなわち、コーシー分布的な線形結合を用いた粒子の合成、そしてその合成された粒子による粒子群の再構築が、複雑な高次元の問題に対して強力な探索能力を与えた結果と言える。ただし、実験したベンチマーク問題は限られ一般性を明らかにするためには、広く、多用に数値実験を行う必要性は残さ

表 1: Computational results for 200-dimensional problems.

| Function  |         | PSO     | IWA     | APSO    | CPSO    | SCPSO   |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Rastrigin | Average | 115847  | 185703  | 65594.2 | 7579.74 | 1512.94 |
|           | Best    | 87963.1 | 133512  | 22946.2 | 6289.32 | 1346.01 |
|           | Worst   | 147767  | 233234  | 113792  | 8434.64 | 1771.36 |
| Griewank  | Average | 28.1977 | 45.9564 | 15.6239 | 1.00501 | 0.02046 |
|           | Best    | 19.3814 | 32.4081 | 3.5287  | 0.76286 | 0.00085 |
|           | Worst   | 38.385  | 59.7923 | 21.1225 | 1.18323 | 0.11426 |
| Alpine    | Average | 1764.66 | 2247.17 | 967.686 | 104.179 | 12.5341 |
|           | Best    | 1397.49 | 1832.53 | 701.636 | 78.6569 | 9.74166 |
|           | Worst   | 2218.23 | 2616.71 | 1281.18 | 141.818 | 15.9843 |

れている。

(4) 近傍の分布の特性を確率的に解析するための2つのアプローチを示した。1つの方法は、解空間、近傍点の特性を示す統計量を導出するために、評価値ランドスケープ上の評価値系列がAR(1)プロセスと呼ばれる特徴的な性質を有する仮定のもと必要な統計量を導き出した。さらに、AR(1)プロセスから導き出した統計量と、解空間にガウス性を伴う仮定を用いて近傍の構造を確率的にモデル化し、汎用的な近傍の特性の解析に成功した。もう1つは、極値統計学の考えに基づき、容易な方法で近傍の最小値を推定し近傍の解析への応用をはかる。極値統計学は、極端な現象、すなわち、母集団分布の端(裾)に対する推測を行うことを対象とし、災害における極端な自然現象や、ファイナンスなどでのリスク評価のために応用される統計手法である。この考えを用い、近傍集合の分布の端(裾)における値を推定し、近傍の最小値に関して検討し近傍の特徴を明らかにすると共に、極値統計の可能性を広げたものである。ただし、この確率的解析の実用性に関しては、幅広く実践的な問題事例に対して調査する必用があり、ここでは、幾つかの問題を取り上げその可能性を示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Kaji Taichi  | 4. 巻<br>27                |
| 2. 論文標題<br>A probabilistic analysis of neighborhoods for combinatorial optimization problems and its application | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Heuristics  | 6. 最初と最後の頁<br>1057 ~ 1079 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/s10732-021-09484-y   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|  |                    |
|--|--------------------|
| 1. 著者名<br>加地太一                         | 4. 巻<br>72         |
| 2. 論文標題<br>巡回セールスマン問題の近傍に対する数理的解析      | 5. 発行年<br>2022年    |
| 3. 雑誌名<br>商学討究 (小樽商科大学)                | 6. 最初と最後の頁<br>1-21 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>無         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>加地太一                         | 4. 巻<br>26            |
| 2. 論文標題<br>コーシー適応型粒子群最適化法に対する考察        | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>スケジューリング・シンポジウム 2018 講演論文集   | 6. 最初と最後の頁<br>163-168 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>大堀、加地、穴澤                     | 4. 巻<br>26            |
| 2. 論文標題<br>組合せ最適化問題の導入教育               | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>スケジューリング・シンポジウム 2018 講演論文集   | 6. 最初と最後の頁<br>175-177 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>大堀、木下、加地、西川                        | 4. 巻<br>Vol.61, No.3  |
| 2. 論文標題<br>OR普及のためのモチベーション教育の試み 北海道支部の支部活動より | 5. 発行年<br>2016年       |
| 3. 雑誌名<br>オペレーションズ・リサーチ                      | 6. 最初と最後の頁<br>137-141 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし               | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>加地太一                         | 4. 巻<br>Vol.74, No.1 |
| 2. 論文標題<br>極値統計による近傍構造解析               | 5. 発行年<br>2023年      |
| 3. 雑誌名<br>商学討究 (小樽商科大学)                | 6. 最初と最後の頁<br>17-34  |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>無           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

[学会発表] 計3件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

|                            |
|----------------------------|
| 1. 発表者名<br>加地太一            |
| 2. 発表標題<br>極値統計に基づく近傍構造解析  |
| 3. 学会等名<br>オペレーションズ・リサーチ学会 |
| 4. 発表年<br>2023年            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>加地太一   |
| 2. 発表標題<br>組合せ最適化問題における近傍の確率的解析とElementary Landscapesからの視点    |
| 3. 学会等名<br>令和3年度 日本オペレーションズ・リサーチ学会 中国・四国支部 最適化問題シンポジウム (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>加地太一                         |
| 2. 発表標題<br>逆関数法を用いた近傍構造解析               |
| 3. 学会等名<br>2024年度オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会 |
| 4. 発表年<br>2024年                         |

〔図書〕 計2件

|                                |                 |
|--------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名<br>加地太一（編著）、大堀隆文、穴沢務（著） | 4. 発行年<br>2019年 |
| 2. 出版社<br>小樽商科大学出版会            | 5. 総ページ数<br>272 |
| 3. 書名<br>例題で学ぶExcel VBA入門      |                 |

|                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| 1. 著者名<br>大堀隆文、加地太一、穴沢務 | 4. 発行年<br>2017年 |
| 2. 出版社<br>コロナ社          | 5. 総ページ数<br>189 |
| 3. 書名<br>例題で学ぶOR入門      |                 |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

| 6. 研究組織 | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|