

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 9 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K00338

研究課題名(和文) 競合-協調系が創発する群のダイナミクスと進化計算

研究課題名(英文) Emergence of Evolutionary Computation in Population Dynamics of Competitive and Cooperative System

研究代表者

畠中 利治 (Hatanaka, Toshiharu)

大阪大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：10252884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：効率的な進化計算のアルゴリズムをデザインするうえで重要な概念である Exploitation と Exploration のバランスは、相反する競合と協調の両立と関連している。このように相反する作用が内在するシステムの挙動は本質的に複雑であるが、反応拡散モデルを用いた説明など、数理モデルに基づく説明が可能である。

進化計算や群知能の振る舞いも同様に複雑であるが、本課題では、競合と協調をベースにした数理モデルに基づく進化計算の一実現法を与えることを通じて、進化計算や群知能の実際の挙動の説明の可能性を示すことができた。また、それらの知見をもとにしたハイブリッド型の群知能モデルを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

進化計算は有用な最適化ツールとして知られているが、その理論的基盤は乏しい。個体の振る舞いを記述するモデルに一般性がないことがその遠因である。

そこで、本課題では、多峰性関数の最適化にとって有用な性質を有する数理モデルに着目し、モデルを通じた進化計算の手続きの説明のために、数理モデルから進化型の手続きを構築した。得られたアルゴリズムでは、効率的な進化計算のアルゴリズムをデザインするうえで重要な概念である Exploitation と Exploration のバランスが陽に説明でき、進化計算をデザインする上で有用な知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：The balance between exploitation and exploration, a key concept in the design of efficient evolutionary computation algorithms is related to both competitive and cooperative behavior. The nature of a system with such conflicting actions is inherently complex, but the reaction-diffusion model has been used to explain it. Although the actual behaviors of evolutionary computation and swarm intelligence are similarly complex, in this study, we aim to give an explanation by using a mathematical model based on competition and cooperation, in other words, repulsion, and chemotaxis. We have shown that a distribution estimation type evolutionary process is realized based on a partial differential equation model having a good property for optimization. Then, we would give an explanation for an actual behavior of evolutionary computation and swarm intelligence based on the mathematical model. Besides, we have proposed a hybrid type of swarm intelligence model based on such an explanation.

研究分野：数理学、進化計算

キーワード：進化計算 分布推定アルゴリズム 反応拡散方程式 数理モデル

## 1. 研究開始当初の背景

進化計算 (Evolutionary Computation) は、多数の探索点からなる集合の時間発展に基づく確率的最適化法の総称である。遺伝的アルゴリズムや進化戦略など、進化計算の個々の手法はそれぞれが異なるルーツをもつが、その共通点が認識されるようになり、現在では、群知能も含めて包括的な議論がなされている。また、計算知能 (Computational Intelligence) における主要な研究分野と位置付けられている。進化計算に共通する特徴は、複数の探索点からなる集団で駆動されること、評価関数の値のみによって次の探索点群が生成されること、その過程に確率的な要素があることおよび、ハイパーパラメータの設定が求解の効率に影響を及ぼすことである。このため、進化計算においては、探索点の生成方法が性能向上における研究対象となり、ハイパーパラメータの設定法が応用研究の本質であった。一方、進化計算では、最適解への収束に関する解析が、確率的要素、選択処理および振る舞いそのものが問題に依存することから、困難とされている。また、ハイパーパラメータの設定の指針を与えることの困難さが課題であった。このことから、実問題への進化計算の応用においては、必ずしも効果的に利用されていない状況があり、進化計算の計算過程、特に次世代の探索点の生成メカニズムに関する理論的基盤の確立が必要とされている。

## 2. 研究の目的

進化計算における探索点の振る舞いは「自然淘汰の原理による競合」と最適解という共通のゴールへ向かうための「情報共有などの協調」で構成されているとみなされる。言い換えれば、進化はより良い解を探索する探索のプロセスであるが、それが競合と協調という相反する作用から生じる振る舞いとして実現されている。そこで、このような「競合 協調系」のダイナミクスを有する群から作り出される群の振る舞いとして、探索点の生成メカニズムをモデル化し解析することが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

関数最適化における進化計算として、代表的な群知能のアルゴリズムの挙動を調査する。ここでは、代表的な手法として、粒子群最適化 (PSO, Particle Swarm Optimization) とホタルのアルゴリズム (FA, Firefly Algorithm) を取り上げる。PSO はメモリーを使うモデルである一方で、FA は現時点での情報のみを参照するモデルである。さらに、直接的に勾配方向への集中化と局所解への集中を回避する分散化のメカニズムをモデル化した群知能型のモデルを考察する。これは、生物の振る舞いのアナロジーによることなく、解の探索における協調と競合に対応する作用から群知能を構築する立場であるが、構築したモデルの振る舞いを関数最適化のベンチマーク問題を用いて調査する。

また、拡散と凝集からなる偏微分方程式モデルに着目する。連続系のモデルは密度の振る舞いを記述したものとみなせるが、探索点集合の要素の増加の極限もしくは、要素がサンプルされる分布の振る舞いと考えることに基づいている。偏微分方程式モデルに従うエージェントモデルの挙動を、誘因物質の濃度関数を関数最適化問題の目的関数とみなした数値的検討を進め、拡散と凝集からなる偏微分方程式モデルから、進化計算型の多峰性関数の最適化のための計算手続きを構成し、その機能を数値実験により検証することによって、進化計算の基盤となる数理モデルについて考察を進める。

#### 4 . 研究成果

PSO については、探索点が探索における移動の向きと大きさを決定する際に群で共有する情報（局所ベスト）の共有範囲を可変することが性能の改善に寄与する理由を定量的に説明するとともに、そのメカニズムを実装したアルゴリズムの多目的最適化における性能検証結果を IEEE の進化計算に関する国際会議（CEC2015）[1]で発表した。さらに、PSO と FA とが異なる特性をもつことから、自律的にその利点を組み合わせるアルゴリズムを開発し、ACM の進化計算に関する国際会議（GECCO2018）[2]やその多因子最適化への展開を 2019 年の IEEE Systems, Man and Cybernetics に関する国際会議（SMC2019）[3]で発表した。2021 年、2022 年に関連した 2 編の論文が公開される予定である。

必要とする機能から進化計算型の探索アルゴリズムを生物の振る舞いのアナロジーによることなく、直接的に勾配方向への集中化と局所解への集中を回避する分散化のメカニズムをモデル化した群知能型のモデルを提案した。そのモデルの性質をベンチマーク問題で調査、Springer の LNCS シリーズから刊行された SEAL2017 のプロシーディングス[4]で発表した。これは競合と協調のように相反する効果から構成され、進化計算や群知能の基盤を検討する上で有用なモデルと考えられる。

2017 年から、拡散と凝集からなる系として、分子ロボットの分野で提案された偏微分方程式モデルに注目し、連続系のモデルからエージェント型の進化計算を構成することによって、進化計算の基盤となる数理モデルについての検討をはじめた。取り上げた偏微分方程式モデルでは、解析的に凝集点が外生入力関数の極値に一致することが示されている（S. Iwasaki, 2018）。この特性は、時空間発展が目的関数とみなせる外生入力関数の極値を探索する過程をモデル化していることに相当すると考えられ、この偏微分方程式モデルに従うエージェントモデルの挙動の数値的検討を行った。具体的には、この偏微分方程式モデルに従う多数のエージェントを用いた分布推定アルゴリズムの形式の関数最適化アルゴリズムを与え、数値実験からそのシステムが本質的に多峰性関数の最適化機能を有することを示した。これらの結果は、IEEE の計算知能に関するシンポジウム（SSCI2017）[5]と確率システムの理論と応用に関するシンポジウムのプロシーディングス[6]で報告した。ここでは、ベースとなる偏微分方程式の性質から、部分的に最適性が保証され確率的多点探索法の課題である理論的側面に一定の貢献がなされたと考えている。また、モデルのパラメータが挙動に与える影響が明確であり、挙動の理解に有用である。

相反する競合作用と協調作用の両立は、効率的な進化計算の構築における重要な概念である探査と探索のバランス（Exploitation と Exploration のバランス）と関連している。しかし、これらの作用が内在する動的なシステムの挙動は本質的に複雑であり、進化計算や群知能の振る舞いも同様の複雑さを有している。一方で、反応拡散系のモデルに代表されるように、確定的なシステムであっても、その時空間発展にはさまざまなパターンが現れることが示されている。ここから、適切なモデルを用いることによる進化計算や群知能の振る舞いが説明可能であるという仮説が得られ、本課題の成果は、ある偏微分方程式モデルが進化計算と同様に振る舞うことを示していることから、この仮説を支持している。また、今後の課題としては、逆にある進化計算のモデルが適切にモデル化され、偏微分方程式モデルで説明可能か否かを検証することがあげられる。なお、本課題の成果は理論面でのものであり、進化計算が求める実応用における計算効率や大規模問題への適用について、実際に適用できるアルゴリズムとの関係性の整理についても課題が残っている。

- [1] Takeshi Uchitane, Toshiharu Hatanaka, A study on multi-objective particle swarm model by personal archives with regular graph, Proceedings of the 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp.2685-2690, 2015.
- [2] Heng Xiao and Toshiharu Hatanaka, Heterogenous swarm with first and second order dynamics for function optimization, Proceedings of the 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp.2077-2082, 2016.
- [3] Heng Xiao and Toshiharu Hatanaka, Hybrid swarm of particle swarm with firefly for complex function optimization, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion GECCO'18, pp. 73-74, 2018
- [4] Heng Xiao, Gen Yokoya, and Toshiharu Hatanaka, Multifactorial PSO-FA Hybrid Algorithm for Multiple Car Design Benchmark, Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), pp. 1926-1931, 2019.
- [5] Satoru Iwasaki, Heng Xiao, Toshiharu Hatanaka, and Takeshi Uchitane, A general swarm intelligence model for continuous function optimization, Proceedings of 11th International Conference on Simulated Evolution and Learning, pp.972-980, 2018.
- [6] Satoru Iwasaki and Toshiharu Hatanaka, A study on estimation of distribution algorithm based on a partial differential equation model, Proceedings of 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, pp.1-6, 2017.
- [7] Satoru Iwasaki and Toshiharu Hatanaka, Estimation distribution algorithm based on a molecular target detector model, Proceedings of the ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and its Applications, Volume 2017, 105-110, 2017.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4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<br>Heng Xiao and Toshiharu Hatanaka                                 | 4. 巻<br>Vol. 12, Issue 4 |
| 2. 論文標題<br>Model selecting PSO-FA hybrid for Complex Function Optimization | 5. 発行年<br>2021年          |
| 3. 雑誌名<br>International Journal of Swarm Intelligence Research             | 6. 最初と最後の頁<br>-          |
| 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>有               |
| 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>Heng Xiao, Gen Yokoya, and Toshiharu Hatanaka   | 4. 巻<br>Vol. 13, Issue 1 |
| 2. 論文標題<br>Multifactorial Particle Swarm Optimization Enhanced by Hybridization with Firefly Algorithm, | 5. 発行年<br>2022年          |
| 3. 雑誌名<br>International Journal of Swarm Intelligence Research  | 6. 最初と最後の頁<br>-          |
| 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>有               |
| 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>Satoru Iwasaki and Toshiharu Hatanaka  | 4. 巻<br>2017          |
| 2. 論文標題<br>Estimation distribution algorithm based on a molecular target detector model                            | 5. 発行年<br>2017年       |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the 48th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications  | 6. 最初と最後の頁<br>105,110 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br><a href="https://doi.org/10.5687/sss.2017.105">https://doi.org/10.5687/sss.2017.105</a> | 査読の有無<br>有            |
| 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>Satoru Iwasaki and Toshiharu Hatanaka   | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>Estimation distribution algorithm based on a molecular target detector model | 5. 発行年<br>2017年 |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the SSS'16   | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 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>有      |
| 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>田邊遼司, 串田淳一, 畠中利治  | 4. 巻<br>8             |
| 2. 論文標題<br>関数最適化における進化計算  | 5. 発行年<br>2015年       |
| 3. 雑誌名<br>計測と制御   | 6. 最初と最後の頁<br>567/572 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br><a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicejl/54/8/54_567/_article/-char/ja/">https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicejl/54/8/54_567/_article/-char/ja/</a> | 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>-             |

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 13件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Heng Xiao and Toshiharu Hatanka  |
| 2. 発表標題<br>Hybrid Swarm of Particle Swarm with Firefly for Complex Function Optimization                |
| 3. 学会等名<br>Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion GECCO'18 (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Satoru Iwasaki and Toshiharu Hatanaka  |
| 2. 発表標題<br>A study on estimation of distribution algorithm based on a partial differential equation model |
| 3. 学会等名<br>2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (国際学会)                                |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Satoru Iwasaki, Heng Xiao, Toshiharu Hatanaka and Takeshi Uchitane       |
| 2. 発表標題<br>A general swarm intelligence model for continuous function optimization  |
| 3. 学会等名<br>11th International Conference on Simulated Evolution and Learning (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>横谷元、山下憂起、肖恒、畠中利治                           |
| 2. 発表標題<br>AC-ABCと重み付き投票法による離散化を用いた複数車種同時重量最小化へのアプローチ |
| 3. 学会等名<br>進化計算シンポジウム2017                             |
| 4. 発表年<br>2017年                                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>岩崎悟、畠中利治                       |
| 2. 発表標題<br>ターゲット検出モデルに基づく関数最適 化法の動的環境への適用 |
| 3. 学会等名<br>第33回ファジィシステムシンポジウム             |
| 4. 発表年<br>2017年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Heng Xiao ad Toshiharu Hatanaka  |
| 2. 発表標題<br>Heterogeneous Swarm with First and Second Order Dynamics for Function Optimization |
| 3. 学会等名<br>2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation ( 国際学会 )                            |
| 4. 発表年<br>2016年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Heng Xiao ad Toshiharu Hatanaka  |
| 2. 発表標題<br>Hybrid Swarm with Property Changing Particles for Function Optimization                        |
| 3. 学会等名<br>7th International Symposium on Computational Intelligence and Industrial Applications ( 国際学会 ) |
| 4. 発表年<br>2016年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Satoru Iwasaki and Toshiharu Hatanaka   |
| 2. 発表標題<br>Estimation Distribution Algorithm Based on a Molecular Target Detector Model                |
| 3. 学会等名<br>48th ISCTE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2016年  |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>大井允人、畠中利治                |
| 2. 発表標題<br>ホタルのアルゴリズムにおける勾配推定に関する考察 |
| 3. 学会等名<br>第26回インテリジェントシステムシンポジウム   |
| 4. 発表年<br>2016年                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Takeshi Uchitane, Toshiharu Hatanaka  |
| 2. 発表標題<br>A Study on Multi-objective Particle Swarm Model by Personal Archives with Regular Graph |
| 3. 学会等名<br>2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (国際学会)                                   |
| 4. 発表年<br>2015年  |

|                               |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名<br>肖恒, 畠中利治           |
| 2. 発表標題<br>PSO-FAハイブリッドに関する考察 |
| 3. 学会等名<br>第10回進化計算学会研究会      |
| 4. 発表年<br>2016年               |



|                                |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名<br>大井允人, 畠中利治          |
| 2. 発表標題<br>FAに進化戦略を組み込んだ複数解探索法 |
| 3. 学会等名<br>第10回進化計算学会研究会       |
| 4. 発表年<br>2016年                |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Heng Xiao, Toshiharu Hatanaka   |
| 2. 発表標題<br>Heterogenous Swarm with First and Second Order Dynamics for Function Optimization |
| 3. 学会等名<br>2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (国際学会)                             |
| 4. 発表年<br>2016年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Heng Xiao, Gen Yokoya, and Toshiharu Hatanaka                             |
| 2. 発表標題<br>Multifactorial PSO-FA Hybrid Algorithm for Multiple Car Design Benchmark  |
| 3. 学会等名<br>2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

〔図書〕 計0件

〔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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|  |                           |                       |    |