

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11968

研究課題名（和文）進化計算における深層学習を活用した汎用性と効率性を両立したメタ戦略の検討

研究課題名（英文）Deep Learning-Assisted Evolutionary Meta-Strategy Search Considering the Balance of Versatility and Efficiency

研究代表者

渡邊 真也（Watanabe, Shinya）

室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30388136

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：単目的、多目的における進化計算の汎用性と効率性の実現を目的としたメタ戦略の検討を行い、数値実験を通じた有効性の検証を行った。具体的には、(1)主成分分析を状況に応じて動的に活用するメタ戦略、(2)ベイズ最適化において局所的な探索と大域的な探索のバランスを動的に切り替えるメタ戦略の2つの異なるアプローチを開発した。前者が一般的な多目的最適化問題を対象としているのに対して、後者は計算資源が限定された環境下での単目的最適化問題を主な対象としている。代表的なテスト問題を用いた検証実験により、これらの手法が幅広い性質の問題で効果的であることを示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、単目的および多目的問題のための汎用性と効率性を両立した進化計算のためのメタ戦略アプローチを開発した。本成果は、進化計算および最適化の適用が難しかった多くの実問題において、有効な解決策となると考えている。高い汎用性を持つ進化計算はこれまで幅広い問題に応用されてきたものの、シミュレーション負荷が高くあまり試行錯誤が許容されない実問題への適用は難しかった。本研究成果は、その解決につながるものであり、その社会的意義は大きいと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated meta-strategies aimed at achieving versatility and efficiency in evolutionary computation for both single and multiple objective problems. Our research involved the development of two distinct approaches. Firstly, we proposed a meta-strategy that dynamically utilizes principal component analysis based on the specific situation. Secondly, we introduced a meta-strategy that dynamically adjusts the balance between local and global exploration in Bayesian optimization. The former approach was designed to address general multi-objective optimization problems, while the latter was tailored for single-objective optimization problems in environments with limited computational resources. To evaluate the effectiveness of these approaches, we conducted experiments by applying them to representative test problems. The results obtained from these validation experiments demonstrated the efficacy of our proposed meta-strategies across a wide range of problem domains.

研究分野：情報工学

キーワード：進化計算 進化型多目的最適化 主成分分析 ベイズ最適化

### 1. 研究開始当初の背景

高い汎用性を持つ進化計算はこれまで幅広い問題に応用されてきたものの、アルゴリズムと問題特性の相性によって探索の成否が決まるため、問題構造が完全に明らかとなっていない多くの実問題では必ずしも期待するような結果が得られないという問題点があった。

これは、進化計算を含んだ一般的な最適化アルゴリズムでは、探索戦略、具体的には解更新・解生成のルールが事前に固定的に定まっているため、対象問題の問題構造が明らかとなっておらず、問題特性にアルゴリズム特性を合わせることが難しい問題では、効果的な探索を実現することが難しいためである。このことは、シミュレーション負荷が高くあまり多くの試行錯誤が許容されない実問題においては、探索の信頼性がより深刻な問題となり、こういった問題へ進化計算、最適化アルゴリズムを適用する際の大きな壁となっている。

一方、進化計算アルゴリズムのこれまでの研究では、問題特性を踏まえたアルゴリズムについては数多く提案されており、その特定の問題に対しては優れた探索性能を示してきた。ただし、その多くが特性や問題サイズが明らかなベンチマーク問題を対象としている、もしくは実問題の限られた数例に対する有効性の検証にとどまっており、汎用的な観点での有用性の検証は十分ではない。

この問題点に対する有望な解決策の 1 つは、探索状況に応じて適応的に戦略を変化させるメタ戦略であり、近年、進化計算分野においてもメタ戦略に関する研究事例がいくつか報告されている。しかしながら、その多くは限られた内部パラメータの自動調整に関するものであり、探索履歴の情報分析を通して多面的に探索戦略を変化させるものではなく、探索の信頼性という意味では不十分であるものが多い。

### 2. 研究の目的

本研究では、図 1 に示すような高い探索性能と汎用性を併せ持つメタ戦略手法を開発し、幅広い分野での問題、特に問題特性が自明でない実問題に対して有効な解探索を実現することを最大の目的とする。

単なるハイパーパラメータの動的な調整ではなく、特性の異なる複数の探索戦略を探索状況に応じて適切に切り替えることで、探索の停滞を最大限回避し、アルゴリズムと問題特性の相性に関する問題の解決を図る。

本研究の実現のためには、大域探索と局所探索、変数依存性に強い探索と直交座標探索といったように直交する複数のメカニズムを併用し、それぞれのメカニズムが補完的に探索する環境を整えた上での効果的な共用の形について検討する必要がある。

また、単目的と多目的、シミュレータの呼び出し回数に限られている場合とそうでない場合など本研究の利用が見込まれる状況を想定し、それぞれの状況に応じたメタ戦略手法を開発することで、幅広い状況に対して実用性の高い最適化手法を提供することも重要な目的である。

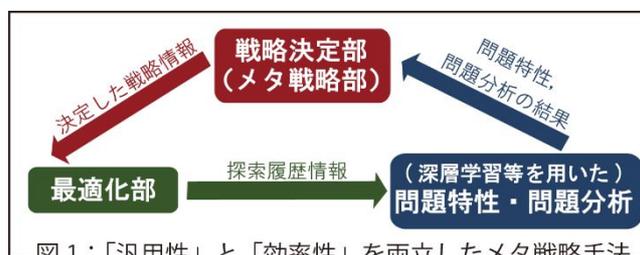


図 1: 「汎用性」と「効率性」を両立したメタ戦略手法

### 3. 研究の方法

本研究では、異なる状況下に対応したメタ戦略手法を開発するために、下記の 2 つの状況を想定し、それぞれの状況に対応したメタ戦略手法の開発を試みた。

[1] 一般的な多目的最適化問題

[2] 計算資源が限定された環境下での単目的最適化問題

上記 2 つは、単目的・多目的という違いだけでなく、最適化に利用できる計算資源(シミュレータの呼び出し回数)が異なるため、根本的に異なるアプローチに基づくメタ戦略手法を開発する必要がある。

以下、これら 2 つの具体的な取り組み内容について、2 種類の研究ごとに分けて示す。

#### (1) 一般的な多目的最適化問題を対象としたメタ戦略手法の開発

多目的最適化問題へ対応したメタ戦略手法として、「主成分分析を状況に応じて動的に活用するメタ戦略」を開発した。

本取り組みでは、現在、最も強力な進化型多目的最適化アルゴリズムの 1 つである MOEA/D (A Multiobjective Evolutionary Algorithm based on Decomposition) (引用文献) に主成分分析 (Principal Component Analysis, 以下 PCA) を適応的に組み込むことで、探索効率の向上を目指した。具体的には、PCA サンプルデータの集め方、PCA の活用是非の判断機能、PCA に起因する探索の停滞検知などについて検討を行い、「汎用性」かつ「効率的」なメタ戦略の実現を目指した。

以下、効果的な PCA 適用のための主な工夫を示す。

**PCA サンプルデータの収集方法:** 各部分問題の近傍解から、探索過程の過去解を含めた評価値上位の解へ変更

**PCA 適用の条件:** PCA 適用の効果が見込める場合に限定して適用するため、(a) 探索世代数が 10 世代目以降、(b) 元の問題の設計変数数の半分の主成分数で、積寄せ率が 80% を超えている、(c) 通常の探索での停滞数が一定数以上、のすべての条件を満たした場合、PCA 利用

**PCA の効果が見られない場合の対応:** PCA 次元削減空間で生成した解が連続して解更新に失敗した場合、その部分問題での PCA 利用を停止

**【追加条件】探索鈍化率:** PCA 空間での生成個体の解更新幅が、通常 MOEA/D での生成個体の解更新幅より劣っているかを検知し、劣っていた場合、PCA 利用を停止

本取り組みでは、上記のうち最初の 3 つの工夫のみを組み込んだ手法と、3 つの工夫に加えて、さらに【追加条件】を組み込んだ場合の 2 通りの手法について、実装、検証を行い、便宜上、前者を「MOEA/D~simple~Principal~Component~Analysis(MOEA/D-sPCA)」, 後者を「MOEA/D~revised~Principal~Component~Analysis(MOEA/D-rPCA)」と命名した。

## (2) 計算資源が限定された環境下での単目的最適化問題を対象としたメタ戦略手法の開発

計算資源が限定された環境下、すなわち最適化のためのシミュレータ呼び出し回数が限定された状況に特化したメタ戦略手法として、ベイズ最適化 (Bayesian Optimization, BO) に対してメタ戦略機能を組み込んだ手法について検討を行った。具体的には、ベイズ最適化において局所的な探査と大局的な探索のバランスを動的に切り替えるメタ戦略であり、もともと探索効率の高いベイズ最適化に有望領域という概念を導入し、探索の早い段階でより良質な解が導出できることを目指した手法である。

本手法では、有望領域の限定の概念に分布推定アルゴリズム (Estimation of Distribution Algorithms, EDA) を活用しているため、BOEDA+(Bayesian Optimization with Estimation of Distribution Algorithms plus) と命名した。BOEDA+の特徴は、これまでの探索情報から推定した「探索有望領域の探索」と「問題全体領域での探索 (通常の BO 探索)」, つまり探索と探査を陽にバランスさせて探索することで、探索の効率化を図っている点である。図 2 に BOEDA+の流れ図を示す。

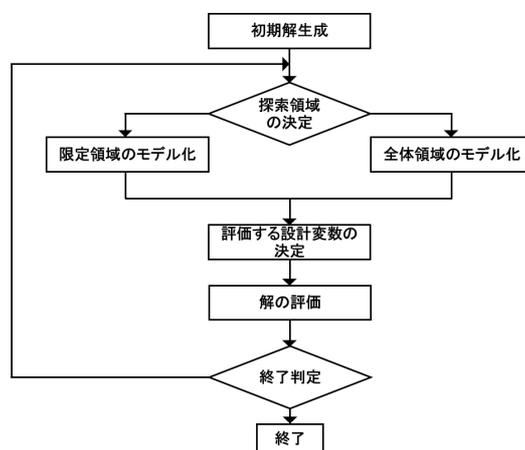


図 2: BOEDA+の流れ図

BOEDA+では、現在の解集合に対して評価値がある一定の上位にいるものをグループ化することで有望領域を定義している。探索においてポイントとなるのが、どちらの領域で探索を行うのかを決定する「探索領域の決定」のルールである。BOEDA+における領域決定では、探索序盤は探索重視、終盤は探査重視とするため下記の 2 つルールに基づき決定している。

**ルール 1:** 序盤は全体領域、終盤は限定領域が選択されるような単調な確率に基づき領域を決定

**ルール 2:** 2 回連続で同じ領域、かつ最適解の更新ができていなければ強制的にもう一つの領域に変更

## 4. 研究成果

本章でも前章と同様、(1) 多目的問題のためのメタ戦略手法、(2) 計算資源限定下の単目的問題のためのメタ戦略手法の 2 テーマごとに分けて、それぞれの成果について述べる。

### (1) 一般的な多目的最適化問題を対象としたメタ戦略手法に関する成果

MOEA/D に PCA の機能を組み込んだ 2 つの提案手法、MOEA/D-sPCA と MOEA/D-rPCA の有効性を検証するため、代表的なテスト問題 WFG Test Suite の 9 つの問題に対する実験を行った。前章で述べた通り MOEA/D-rPCA は、MOEA/D-sPCA に探索鈍化に関する工夫を加えたものである。

ここでは、MOEA/D との比較を示すため MOEA/D、MOEA/D-sPCA、MOEA/D-rPCA の 3 つの手法の真の解との誤差 (離れ具合) である IGD+ の値を表 1 に、また横軸を世代数、縦軸を IGD+ 値にとった探索の推移を図 3 に示す。

これらの結果から分かる通り、性質の異なる 9 つの問題において MOEA/D-sPCA、MOEA/D-rPCA は、MOEA/D に比べほぼ同等以上の性能を示していることが分かる。特に、探索鈍化に関する工夫を加えた MOEA/D-rPCA は、MOEA/D が得意とする問題においてほぼ同等の性能を示していることが分かる。一方、図 3 から分かる通り PCA が効果的に働く問題においては、

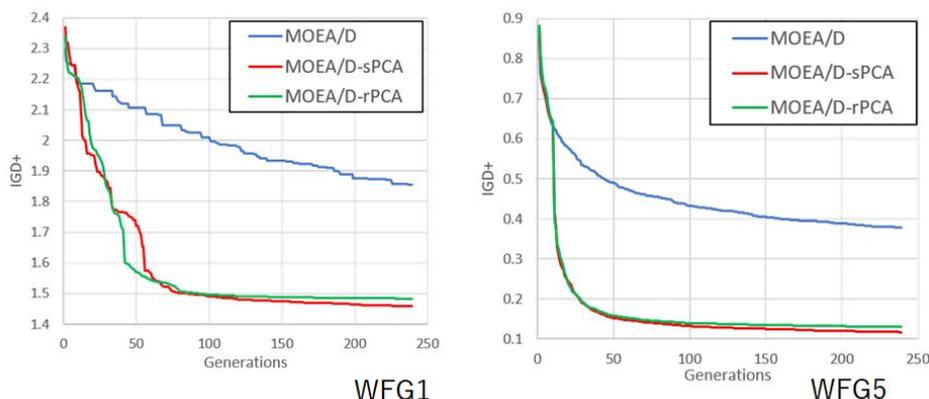


図 3: IGD+の推移

表 1: IGD+の比較

Problem	MOEA/D	MOEA/D-sPCA	MOEA/D-rPCA
WFG1	1.85642	<u>1.45897</u>	1.48306
WFG2	<u>0.325537</u>	0.410842	0.358903
WFG3	<u>0.334284</u>	0.417691	0.367752
WFG4	<u>0.260586</u>	0.297672	0.274762
WFG5	0.377954	<u>0.117283</u>	0.130396
WFG6	0.527395	<u>0.119593</u>	0.153184
WFG7	<u>0.347377</u>	0.412240	0.370276
WFG8	<u>0.418415</u>	0.472672	0.434621
WFG9	0.220943	<u>0.180702</u>	0.206023

従来の MOEA/D に比べ 2 つの提案手法が圧倒的な性能を示していることが分かる。

(2) 計算資源が限定された環境下での単目的最適化問題を対象としたメタ戦略手法に関する成果

ベイズ最適化にメタ戦略機能を組み込んだ BOEDA+の有効性を検証するため Sphere 関数, Rastrigin 関数といった代表的な 5 つのテスト関数を用いて, 提案手法の有用性と汎用性について考察した。

本実験では, 通常のベイズ最適化 (BO) と BOEDA+ との比較実験を行い, メタ戦略機能の有用性について検証した。ここでは, 評価回数を横軸に, 縦軸に評価値をとった探索の推移を図 4 に示す。

図 4 から分かるように, すべての問題において BOEDA+ 良好な結果を示している。特に, Rastrigin 関数, Ackley 関数, Schwefel 関数といった多峰性が強い問題において従来の BO に比べ圧倒的に早い探索の進捗であることが分かる。

これらの結果から BOEDA+ は, 汎用性を担保しつつ効率的な探索を実現していることが確認できた。

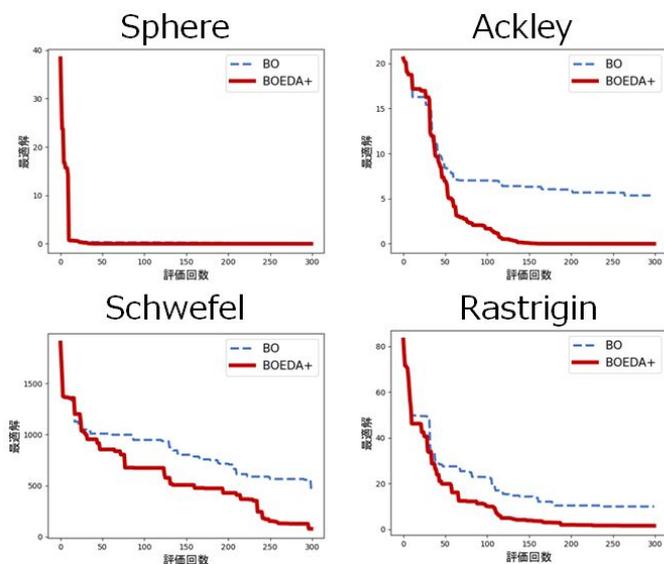


図 4: BOEDA+の探索の推移

< 引用文献 >

Qingfu Zhang and Hui Li. "MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition", IEEE Trans. Evolutionary Computation, Vol. 11, No. 6, pp. 712-731, 2007.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tomoki Kaho, Shinya Watanabe and Kazutoshi Sakakibara	4. 巻 142
2. 論文標題 Multi-objective Branch and Bound based on Decomposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C（電子・情報・システム部門誌）	6. 最初と最後の頁 373-381
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.142.373	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 Stefan Baar, Yosuke Kobayashi, Tatsuro Horie, Kazuhiko Sato, Hidetsugu Suto and Shinya Watanabe	4. 巻 197
2. 論文標題 Non-destructive Leaf Area Index estimation via guided optical imaging for large scale greenhouse environments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computers and Electronics in Agriculture	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compag.2022.106911	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 佐藤 輝, 渡邊 真也, 下保 知輝	4. 巻 15
2. 論文標題 電気炉製鋼法におけるスクラップ配合に対するモデル化とその解法の提案	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌「数理モデル化と応用」	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 佐藤 輝, 渡邊 真也, 下保 知輝
2. 発表標題 多目的スクラップ配合問題に対する解法とその解分析
3. 学会等名 第135回数理モデル化と問題解決研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松山 蓮, 渡邊 真也
2. 発表標題 学習データが限定された環境下における汎用制御実現のためのアプローチ -汚泥乾燥機自動制御-
3. 学会等名 第135回数理モデル化と問題解決研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩村泰河, 渡邊真也, 泉井 一浩
2. 発表標題 非劣解分析よる問題特性理解に向けた方法論の提案 ~トラス構造最適化への適用を通じて~
3. 学会等名 インテリジェント・システム・シンポジウム 2021(FAN 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本 祥平, 渡邊 真也
2. 発表標題 分布情報を活用した応答曲面探索アプローチの検討
3. 学会等名 進化計算シンポジウム 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊池秀和, 半田久志, 渡邊真也
2. 発表標題 Mario AI における進化学習と得られた知識の精練の検討
3. 学会等名 第14 回 進化計算シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮本将英, 渡邊真也
2. 発表標題 EMOアルゴリズムにおける交叉と分布推定を組み合わせた新たな新規個体生成手法の提案
3. 学会等名 第14回 進化計算シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 椎橋宏文, 渡邊真也, 榊原一紀
2. 発表標題 Dial-a-ride 問題における乗車降車位置の変更も考慮した運行スケジュール作成の検討
3. 学会等名 進化計算学会 第19回進化計算学会研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田涼介, 渡邊真也, 泉井一浩
2. 発表標題 優越の概念を組み入れた多目的ベイズ最適化手法の検討
3. 学会等名 進化計算学会 第19回進化計算学会研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下保知輝, 渡邊真也, 榊原一紀
2. 発表標題 単目的問題への分割に基づく多目的分枝限定法の提案
3. 学会等名 情報処理学会 第83回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 輝, 渡邊 真也, 高橋一樹, 生方 貴
2. 発表標題 多目的スクラップ配合問題に対する解法とその解分析
3. 学会等名 情報処理学会 第83回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiayi Han and Shinya Watanabe
2. 発表標題 A New Ensemble Framework based on MOEA/D
3. 学会等名 The 2022 World Congress in Computer Science, Computer Engineering, & Applied Computing (CSCE'22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo Sato, Shinya Watanabe and Yoshiaki Katada
2. 発表標題 Study on the incorporation of PCA into EMO for high dimensional multi-objective problems
3. 学会等名 2022 Joint 12th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 23rd International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成田竜也, 渡邊 真也, 半田久志
2. 発表標題 DeepRacerにおけるミラーコース学習の効果検証
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤諒, 渡邊真也, 片田喜章
2. 発表標題 進化型多目的最適化におけるPCA を活用した探索空間圧縮の有効性についての検討
3. 学会等名 進化計算シンポジウム 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 情報処理学会一般情報教育委員会 編, 稲垣 知宏 著 他	4. 発行年 2020年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 251
3. 書名 IT Text (一般教育シリーズ) 一般情報教育	

1. 著者名 室蘭工業大学現代情報学研究会 著	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 145
3. 書名 現代社会と情報システム	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 機械学習モデルに誤差補正を組み込んだシステムの構築と安定制御の向上提案	発明者 渡邊 真也, 松山 蓮	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-042277	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

## 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	榊原 一紀  (Sakakibara Kazutoshi)  (30388110)	富山県立大学・工学部・准教授     (23201)	

## 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
---------	---------