

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11997

研究課題名(和文) 適応的モジュール選択と動的システム学習に基づく多目的進化計算手法の開発とその応用

研究課題名(英文) Development of Multi-objective Evolutionary Computation Algorithms Based on Adaptive Operator Selection and Dynamic System Learning

研究代表者

立川 智章 (Tatsukawa, Tomoaki)

東京理科大学・工学部情報工学科・准教授

研究者番号：90633959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：進化計算の各ステップはモジュール化が可能して交換することが可能であり、問題に応じて良い組合せをすれば性能向上が期待できる。しかし事前に最適な組合せを決めることは困難であることから、本研究では、適応的アプローチのハイパーパラメータの削減法、設計パラメータの次元削減法、実問題の並列実装を実施した。その結果、適応的交叉手法のパラメータの一つである最小選択確率を削減することができた。次元削減法としては主成分分析に基づく遺伝オペレータを提案し有効性を確認した。実問題として日本全国を対象とした航空交通流の多目的遅延最小化問題に取り組み、並列実装を用いた最適化を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

進化計算は対象をブラックボックスとして取り扱えるため、産業界でも広く使われている。アルゴリズムの適用自体は比較的容易であるものの、問題の規模が増大するにつれて、更なる効率化が求められている。本研究は進化計算アルゴリズムの更なる効率化を目指したものである。問題に応じて最適な遺伝オペレータを選択する手法や、主成分分析の基づく遺伝オペレータに焦点を当て、その有効性とパラメータの削減を実現した。また、実問題として航空交通流を考えその並列実装を行った。これらの成果は、大規模な最適化問題に取り組む際に適用できる基盤技術の一部となると考えられる。その適用範囲は広く、様々な分野での応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Each step of the evolutionary computation can be modularised and interchangeable, and a performance improvement can be expected if a good combination is made according to the problem. However, since it is difficult to determine the optimal combination in advance, this study carried out (i) a reduction method of the hyperparameters of the adaptive approach, (ii) a dimensionality reduction method of the design parameters, and (iii) a parallel implementation of a real problem.

As a result, the minimum selection probability, one of the parameters of the adaptive crossover approach, was reduced. As a dimensionality reduction method, a genetic operator based on principal component analysis was proposed and its effectiveness was confirmed.

As a real-world problem, a multi-objective delay minimisation problem for air traffic flow over Japan was tackled and optimised using a parallel implementation.

研究分野：進化計算

キーワード：多目的進化計算 適応的交叉 航空交通

### 1. 研究開始当初の背景

インダストリー 4.0 といった高度生産システムや航空機や列車に代表される大規模輸送システムは近年急速に複雑化している。このような複雑に相互作用する多数の要素からなるシステムのパラメータは膨大であり、システム全体を最適化し効率よく運用することは容易ではない。

大規模複雑化しているシステムの例として、航空機、列車、船舶といった計画に基づいて運航(運行)される大規模輸送システムを取り上げる。近年、これらの社会生活に不可欠な輸送システムの利便性や輸送量は向上している一方、混雑やシステムトラブル、気象の影響等に対して脆弱となり、日常的な遅延が頻発している。安全性と効率性という相反要素を有する運行システムには人や車の移動問題よりも複雑な拘束や不確定要素が存在する。結果、安全性が優先され、非効率なシステムに留まっている。監視技術等により個別課題の改善が図られてはいるが、これを複数運行システムをまたぐ相互作用を有する全体問題としてとらえ、最適なシステムを策定していくことが必要である。

効率性、安全性といった評価指標を目的関数と考えると、このシステムの最適化問題は多目的最適化問題となる。多目的最適化問題に対して近年研究が活発なアプローチの一つとして進化計算がある。進化計算は、(1)対象に対して盲目的、(2)勾配情報が必要ない、(3)不連続な問題にも適用可能、(4)多数の制約条件の取り扱いも可能、といった特徴を持つ。このことから実問題への適用が比較的容易であり、すでに多くの事例からその有効性が実証されている。しかし、一般的にパラメータの数が多くなるにつれて探索性能が著しく悪化する(=多くの繰り返し計算が必要となる)ことから、上述のような大規模システムへ適用する場合問題となる。個別問題に対しては、事前に影響のある少数のパラメータをあらかじめ抽出することが通常行われるが、人の手による試行錯誤が必要であり簡単ではない。

### 2. 研究の目的

本研究は、進化計算の更なる効率化を目指したものである。パラメータ数が膨大となる大規模システムへの適用を想定し、(1)問題に応じた最適な遺伝オペレータを選択する方法、(2)設計パラメータの次元削減法、(3)実問題の並列実装、に関して研究を進めた。

### 3. 研究の方法

(1) 適応的アプローチの課題の一つにパラメータの数が挙げられる。これは交叉プールに用意する各交叉手法が持つパラメータに加え、交叉の選択戦略に関わるパラメータが含まれるためである。実利用のためには可能な限りパラメータが少ないことが望ましい。そこで、パラメータの削減の一環として各交叉の最小選択確率の削減を行いその影響評価を行った。削減方法として、最小選択確率を母集団のサイズに応じて自動的に決定する方法を提案した。

(2) 設計パラメータの次元削減法として既存の交叉手法とは異なる新たな遺伝オペレータの開発に取り組む。新たに開発した遺伝オペレータ手法は主成分分析に基づく手法である。既存のオペレータを適用する前に、累積非劣解集合を用いて設計空間を縮約することでより良い解の生成を目指す。

(3) 実問題として航空交通流の多目的遅延最小化問題の並列実装に取り組む。この問題は国内/国際線を含む羽田到着便の到着遅延最小化問題である。変数の数が 1000 近くあり、最適化のためには多くの評価がかかる。1 回の評価に時間がかかる時間は 5 分程度であるものの逐次的に評価すると時間が非常にかかることから、並列評価フレームワークを構築し、大幅に最適化時間が削減できることを確認する。

### 4. 研究成果

研究期間において、主に以下に挙げる研究成果を得た。

#### (1) 適応的オペレータのパラメータ削減法の提案

本研究では、Hitomi らの適応的オペレータ選択法(Adaptive Operator Selection, AOS)を用いる。AOS では親個体と新たに生成された子個体との優劣評価を行い、その結果に基づいて選択確率を更新する。ここでは Q 学習に基づく Probability Matching(PM)方式を考える。PM を用いた際の選択確率の更新式は以下の通りである。

$$q_{i,t+1} = (1 - \alpha) \cdot q_{i,t} + \alpha \cdot c_{i,t}$$

$$p_{i,t+1} = p_{min} + (1 - |O| \cdot p_{min}) \cdot \frac{q_{i,t+1}}{\sum_{j=1}^{|O|} q_{j,t+1}}$$

$O$  は交叉オペレータの集合、 $t$  回目の反復において交叉オペレータ  $o_i \in O$  は選択確率  $p_{i,t}$  で選択される。 $c_{i,t}$  は  $i$  番目の交叉オペレータの優劣評価値である。 $\alpha$  は適応率、 $q_{i,t}$  は Quality(いわゆる報酬)である。 $q_{i,t}$  に基づき選択確率が更新される。ここで  $q_{min}$  は最小選択確率であり、パフォーマンス

ンスの悪いオペレータもある程度選択されるために  $q_{min} > 0$  が設定される。このパラメータが探索性能の大きく影響することが分かっているものの、適切なパラメータ値を設定することは難しい。そこで本研究では最小選択確率を  $1/\text{集団サイズ}$  として集団サイズに応じて設定することを提案した。ベンチマーク問題を用いて有効性の検証を行った結果（図1）最小選択確率を集団サイズに基づいて決めることで、AOS がロバスト性に優れ、従来の AOS と比べ同等あるいはそれ以上の性能を示すことがわかった。

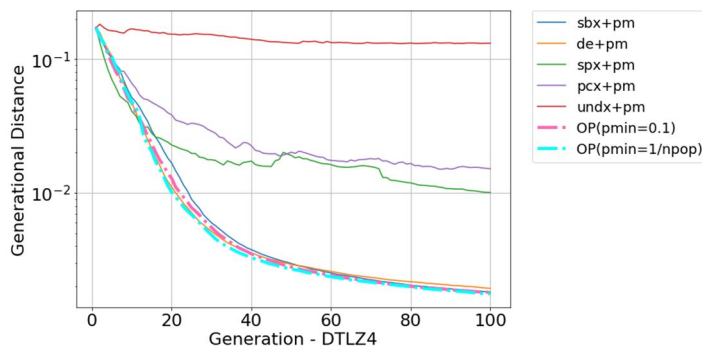


図1 Generational Distance の推移

### (2) 主成分分析に基づく遺伝オペレータの提案

遺伝オペレータを適用する際、相関の大きな変数同士はまとめた方が効率が良くなる可能性がある。そこで本研究では累積非劣解に主成分分析を適用し、変数間に相関を持たせた modified DTLZ ベンチマーク問題を用いてその有効性を検証した(図2)。

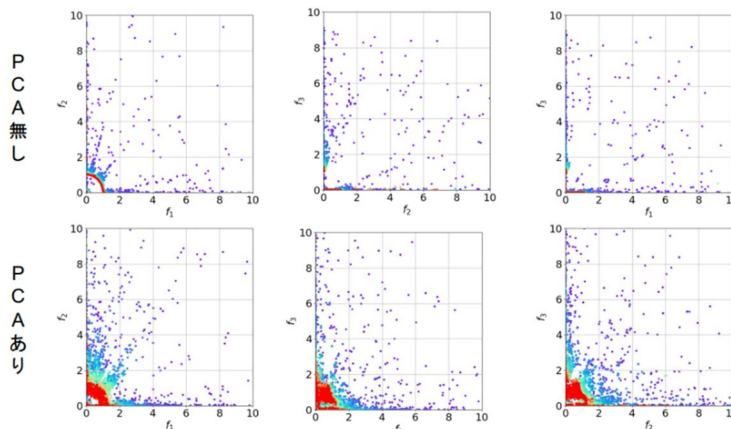


図2 非劣解の推移(3目的, mDTLZ3)

### (3) 航空交通流の多目的遅延最小化

実問題として、航空交通流の多目的遅延最小化問題の並列実装を行った。ベースの進化計算手法は NSGA-II を用い、解の評価に MPI を用いて並列評価を行った。最適化結果を図3に示す。計算環境としては Ubuntu 20.04, Rome 7702P(128Core), 64GB Memory を用いた。MPI を用いたフレームワークによりマルチコア環境を効率よく使用することが可能となり、200 個体、200 世代の計算を約 2 時間で実行することが可能となった。

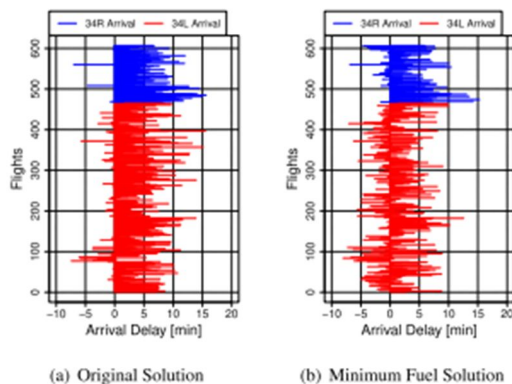


図3 最適化結果（オリジナル解と消費燃料最小解）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 関根将弘, 立川智章, 藤井孝藏, 伊藤恵理	4. 巻 13
2. 論文標題 多目的最適化と決定木を用いたエンルート交通流における速度制御戦略の抽出	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 進化計算学会論文誌	6. 最初と最後の頁 010-022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11394/tjpnsec.13.10	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 Sekine Katsuhiko, Tatsukawa Tomoaki, Itoh Eri, Fujii Kozo	4. 巻 9
2. 論文標題 Multi-Objective Takeoff Time Optimization Using Cellular Automaton-Based Simulator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 79461 ~ 79476
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3084215	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 T. Tatsukawa, K. Fujii
2. 発表標題 Extraction of Speed-Control Strategy in En-Route Air Traffic Flows using Multi-Objective Optimization and Machine Learning
3. 学会等名 2nd US-Japan Workshop on Data-Driven Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 張 強, 立川 智章, 藤井 孝藏
2. 発表標題 適応型交叉オペレータ選択における最小選択確率に関する影響評価
3. 学会等名 進化計算シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------