

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330269

研究課題名(和文) 超大規模組み合わせ問題に対する進化型多目的最適化の開発とその解分析

研究課題名(英文) Development of new evolutionary multi-criterion optimization approaches for very large scale combinatorial optimization problems and its solution analysis

研究代表者

渡邊 真也 (WATANABE, Shinya)

室蘭工業大学・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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：大規模な組み合わせ最適化問題に特化した進化型多目的最適化アルゴリズムの開発を行った。具体的な対象問題としては、配送計画問題(Vehicle Routing Problem,VRP)と看護師勤務表作成問題(Nurse Scheduling Problem,NSP)の2つをとりあげ、それぞれの問題に対して、問題特性及び大規模化した場合に生じる問題を考慮したアプローチの開発に成功し、その有効性を検証することができた。

研究成果の概要(英文)：New evolutionary multi-criterion optimization (EMO) approaches specified for very large scale combinatorial optimization problems has been developed. In this research, we picked vehicle routing problem (VRP) and nurse scheduling problem (NSP) up, and new EMO approaches considering the characteristic of each problem were developed. Through numerical experiments, the effectiveness of these approaches could be verified.

研究分野：総合領域

キーワード：進化型多目的最適化 大規模問題 組み合わせ最適化 解分析

1. 研究開始当初の背景

進化型多目的最適化 (Evolutionary Multi-criterion Optimization: EMO)に関する研究は、NSGA-II といった高性能探索アルゴリズムの登場以降、実問題に対する応用事例が数多く行われるようになり、幅広い領域においてその成果が報告されるようになった(Coello etc., 2004). しかしながら、コンピュータの高性能化、クラウド技術の進歩にともなう情報のビッグデータ化に象徴される対象の超大規模化に対して、EMO の分野において真正面から取り組む研究はほとんど行われていない。

一方、今後のさらなる計算機技術の向上、インフラ整備の充実化に伴い超大規模データに対する多目的最適化の要求が高まるのは明らかであり、その点を見越した EMO アルゴリズム、及び EMO により得られた解分析に関する研究は社会的に強く求められている。

2. 研究の目的

超大規模と呼ばれるクラスの組み合わせ問題に対する新たな EMO アプローチの開発を試みる。また、そこで得られた解集合に対する分析支援についても検討を行い、解候補群からの対象問題特性の抽出を最終的な目標とする。

超大規模クラスへの方策としては、

- (1)設計パラメータの効率的な表現方法、
- (2)探索の重複を回避するメタ機能、
- (3)外部大規模計算システムを利用した並列分散処理

の大きく3つ視点からの検討を進め、それぞれの視点に基づく効果的なアルゴリズム、実装について検討を進める。

また、組み合わせ問題の具体的な対象問題としては、すでに著者らが取り組んだ経験のある配送計画問題 (Vehicle Routing Problem :VRP)、ナーススケジューリング問題 (Nurse Schedule Problem, NSP) の2つを対象とし、それぞれの問題において効果的なアプローチの開発を試みる。

3. 研究の方法

本申請では、(1)探索効率に優れたより汎用的なアルゴリズムの開発、(2)対象問題に特化することで効率化を試みるアルゴリズムの開発、(3)得られた解集合に対する分析ツールの開発の大きく3種類の研究を進めてきた。

以下、具体的な取り組み内容について、これら3種類の研究ごとに分けて示す。

(1) 探索効率に優れた EMO アルゴリズムの開発

大規模な問題へ対応するための1つの方策として、探索効率の優れた汎用 EMO アルゴリズムの開発を試みた。

従来の EMO アルゴリズムに比べ、より効率的な探索を実現するため、探索履歴を最大限

活用した局所解脱出及び集中探索という相異なる2つのメカニズムを有する新たな局所探索アプローチの開発を試みた。これは、探索履歴を活用することで無駄な重複を回避しつつ探索過程において浮かび上がってきた有望領域を重点的に探索することによる高効率化を目的としたものである。

我々は、この局所探索をその特徴から SPLASH(eScaPing from Local optima and convergence mechanisms based on Search History)と名付け、図1に示すような手順を持つアプローチとして完成させた。

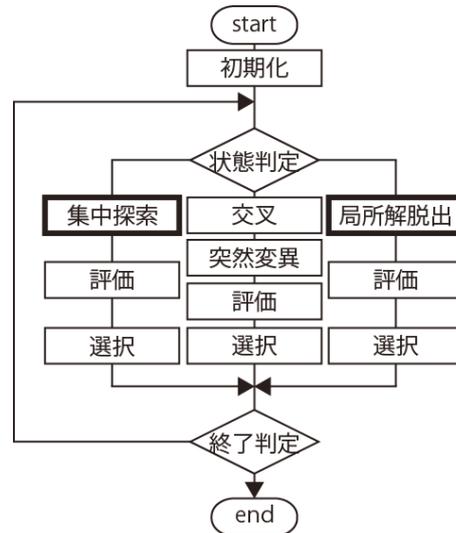


図1: SPLASH を組み込んだ EMO アルゴリズムのフロー

(2) 対象問題に特化した大規模問題向けアルゴリズムの開発

本申請では、VRP と NSP に対する大規模クラスへの対応を考慮したアルゴリズムの開発を行った。以下、それぞれのアプローチについて述べる。

大規模 VRP に対するアルゴリズムの開発

VRP の持つ特徴を活かすためカスタムのユークリッド空間上での位置情報に着目し問題領域の分割を行うアプローチの開発を試みた。開発したアプローチでは、この概念を用いて大規模問題を複数の小規模問題に分割(部分問題化)した上で適応的に統合することで効率よく元の大規模問題を解こうとするものである。

開発したアルゴリズムにおける部分問題化の概念図を図2に示す。

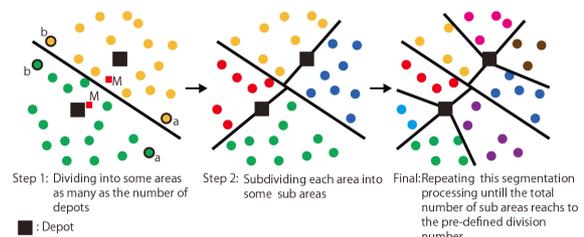


図2: VRP における問題分割の概念図

## NSP に対するアルゴリズムの開発

NSP における設計変数は、看護師数と考慮すべき日数を掛け合わせたものとなるため、20 人の看護師の 1 ヶ月の勤務表でさえ 600 を超える設計変数となり、既存のアルゴリズムでは制約充足解を得ることが困難であることが少なくなかった。

そこで、本研究では NSP の自動生成ソフトを開発する企業との共同研究の形で新たな効率的アルゴリズムの開発を行った。開発したアルゴリズムは、EMO アルゴリズムをベースに制約充足を考慮した初期解の生成、個体の特徴の異なりに基づく環境選択、探索停滞時におけるアーカイブのリフレッシュ機能など NSP の問題特性に特化した複数のメカニズムが有機的に連携したものとなっている。

一方、このアプローチとは全く異なるものとして厳密解法の 1 つである分枝価格法 (Branch & Price, B&P) と EMO アルゴリズムを組み合わせた新たな取り組みも行っている。このアプローチでは、B&P により得られた制約充足解を種に EMO アルゴリズムを適用し、多様で高品質な解集合を導出しようとする新しい試みに基づくものである。

### (3) EMO により得られた解集合に対する分析支援ツールの開発

EMO の適用により得られた解集合を分析するためのツールとして我々が開発した CIHSM (Correlation-based Information Hierarchical Structuring Method) を改良したオンデマンド型 CIHSM (improved on-demand CIHSM, CIHSM2) について検討を行った。

CIHSM2 では、ユーザーが視覚的に選択した関心領域に特化した分析を行うメカニズムと相関ルール抽出において重要な働きをするパラメータの自動調節メカニズムの 2 つの改良が加えられている。図 3 において、2 次元散布図から関心領域を選択する様子を示す。

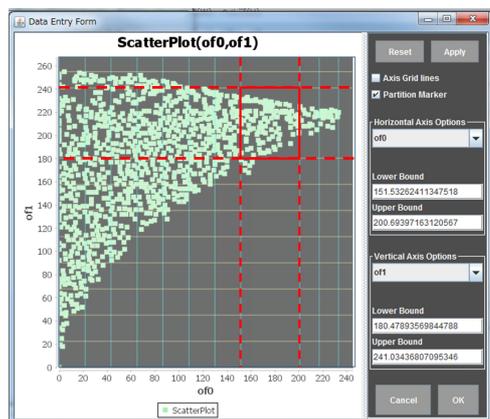


図 3：2 次元散布図から関心領域を選択する様子

## 4. 研究成果

ここでも前章と同様、(1) 高効率汎用的アルゴリズム、(2) 対象問題に特化したア

ルゴリズム、(3) 得られた解集合に対する分析ツールの 3 種類の研究に分けてそれぞれの成果について述べる。

### (1) 探索効率に優れた EMO アルゴリズムの開発

探索履歴を活用した局所脱出及び集中探索という 2 つのメカニズムを有する SPLASH の実験結果について示す。

多目的非劣解集合に対する評価指標としては、解集合の支配面積を表す Hyper Volume (HV) を用いて、代表的なテストスイツである WFG を対象に 2 目的から 8 目的までの 20 変数の場合における比較実験を行った。ここでは、紙面の都合から 2 目的と 8 目的のみの結果を表 1、表 2 に示す。

表 1：2 目的 20 変数の場合の結果

問題	従来手法	SPLASH
WFG1	0.960	<b>1.003</b>
WFG2	<b>1.803</b>	1.801
WFG3	<b>1.743</b>	1.741
WFG4	1.423	<b>1.453</b>
WFG5	1.367	1.367
WFG6	1.361	<b>1.367</b>
WFG7	1.460	1.460
WFG8	<b>1.381</b>	1.371
WFG9	<b>1.402</b>	1.397

表 2：8 目的 20 変数の場合の結果

問題	従来手法	SPLASH
WFG1	0.131	<b>0.153</b>
WFG2	0.255	<b>0.256</b>
WFG3	0.201	0.201
WFG4	0.214	<b>0.228</b>
WFG5	0.209	<b>0.219</b>
WFG6	0.226	<b>0.232</b>
WFG7	0.223	<b>0.230</b>
WFG8	0.209	<b>0.218</b>
WFG9	0.209	<b>0.216</b>

表 1 及び表 2 で示された HV は解の支配領域を表すため大きな値ほど高品質な解集合であることを示す。これらの結果から、目的数が 2 の場合には従来手法と差はないものの、目的数が多い場合には優位に優れた結果が得られることが分かる。

### (2) 対象問題に特化した大規模問題向けアルゴリズムの開発

VRP と NSP のそれぞれの場合について、その成果を述べる。

#### 大規模 VRP に対するアルゴリズムの開発

開発した大規模 VRP に特化したアルゴリズムの性能検証結果を示す。

ここでは、p08 及び pr06 という代表的な 2 つのテスト問題を対象に、総移動距離とルート間の分散を目的関数として用いた 2 目的最適化の場合における結果を示す。従来手法と提案手法の目的関数空間における最終的な解の分布図を図 4 及び図 5 に示す。

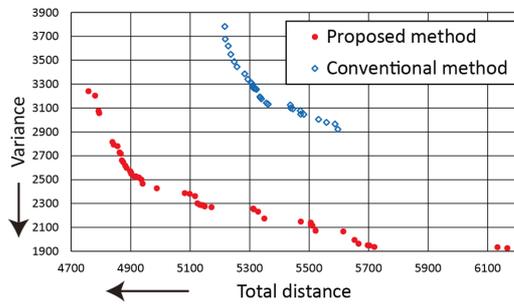


図 4 : p08 における (目的関数空間上の) 解の分布図

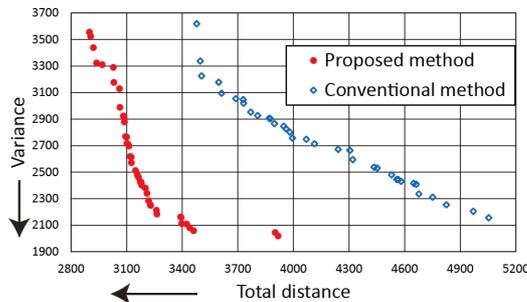


図 5: pr06 における (目的関数空間上の) 解の分布図

図 4 及び図 5 より, カスタマ数が 200 を超えるある程度以上の規模の問題において, 提案手法が圧倒的に良質な解の導出に成功している様子が読み取れる。

#### NSP に対するアルゴリズムの開発

NSP に特性を陽に組み込み効率化を図ったアルゴリズムの実験結果について述べる。

共同研究先がベンチマークとして用いている実際の病棟を想定した 3 つの例題に対する検証実験を行った。ここでは, 紙面の都合から例題 1 に関する探索推移を示した結果のみを図 6 に示す。

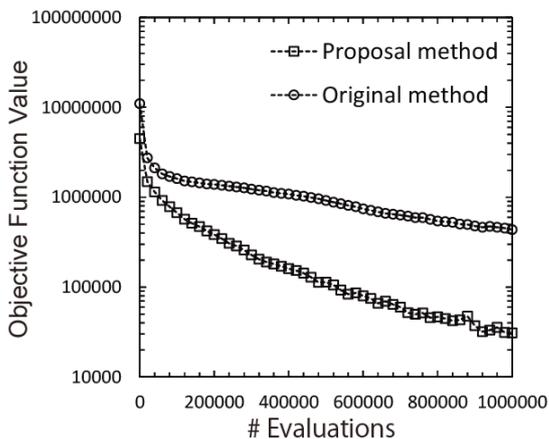


図 6 : 例題 1 の NSP に対する比較実験

図 6 を含めた全ての例題に対する比較実験で, 圧倒的な性能差を確認することができた。提案手法は, 終盤以降も停滞することなく着実に評価値を改善させており, 組み込んだメカニズムが探索に効果的であることを示唆

している。

#### (3) EMO により得られた解集合に対する分析支援ツールの開発

2 目的 6 変数のハイブリッドロケットエンジン概念設計問題に対して EMO を適用し, 得られた 800 個の解集合に分析ツール CIHSM2 を適用し, 得られた分析結果の一例を図 7 に示す。

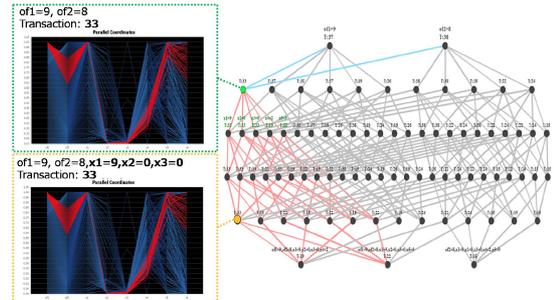


図 7 : CIHSM2 の適用事例

図 7 の例では, 目的関数の 1 つである最高到達高度が特に高い場合に着目した傾向抽出を行っており, その目的に該当する箇所が赤く強調され, 解集合全体の中で到達高度が高い場合に現われる特異的な傾向が読み取りやすくなっている。

#### 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 10 件)

[1]左文字 響, 渡邊 真也, "進化型多目的最適化における探索履歴を活用した局所解放出と集中探索メカニズム", 人工知能学会論文誌, 査読有, 第 32 巻 3 号 J-STAGE Vol. 32 (2017) No. 3 p. E-GB1\_1-12 DOI: 10.1527/tjsai.E-GB1

[2]渡邊 真也, "パレート解分析のための技術動向", システム制御情報学会論文誌 60 巻 7 号, 2016, 7 月, pp.272-277 DOI: 10.11509/isciesci.60.7.272

[3]渡邊 真也, 稲船 淳也, "看護師勤務表作成問題に対するヒューリスティクスおよび厳密解法に基づくアプローチの現在", 「オペレーションズ・リサーチ」誌, Vol.62, No.3, 2017 3 月号, pp.178-184

[4]Chiba, K., Kanazaki, M., Watanabe, S., Kitagawa, K., and Shimada, T.,

"Structurisation and Visualisation of Design Space for Launch Vehicle with Hybrid Rocket Engine," International Journal of Automation and Logistics, 査読有, Vol.2, Nos.1/2, 2016, pp.26-44 DOI: 10.1504/IJAL.2016.074912

[5]伊藤 匡志, 渡邊 真也, 榊原 一紀, "大規模 Vehicle Routing Problem に対する部分

問題化と適応的問題統合に基づく新たな探索フレームワークの提案", 進化計算学会論文誌, 査読有, Vol.6 No.3 pp.146-158,2015  
DOI: 10.11394/tjpnsec.6.146

[6]長舟 和馬,渡邊 真也,塩谷 浩之, "フリエスペクトル特性を考慮した進化型多目的最適化による少数投影CTの再構成",情報処理学会論文誌数理モデル化と応用(TOM), 査読有, Vol.8, No.1, pp.45-61,2015

[7] Jun Mao, Uthai Phommasak, Shinya Watanabe and Hiroyuki Shioya, "Detecting Foggy Images and Estimating the Haze Degree Factor", J. Comput. Sci. and Syst. Biol., 査読有, 7, 6, pp. 226-228 (2014)

[8] 渡邊 真也,奥寺 将至, "看護師勤務表作成問題に対する進化型多目的最適化に基づくアプローチの提案",進化計算学会論文誌, 査読有, Vol.5 No.3 pp.32-44,2014  
DOI: 10.11394/tjpnsec.5.32

[9] 千葉 一永, 渡邊 真也, 金崎 雅博, 北川 幸樹, 嶋田 徹, "設計情報学を用いたハイブリッドロケットエンジン搭載単段式宇宙輸送機の概念設計" 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.80, No.818, 「設計工学とシステム工学の新展開2014」特集号, p.TRANS0287, pp.1-13,(2014)

DOI: 10.1299/transjsme.2014trans0287

[10] Yongwen Hu, Jianming Shi and Shinya Watanabe, "A Revised Algorithm for Solving the Sum of Linear Ratios Problem with Lower Dimension Using Linear Relaxation", International Journal of Operations Research, 査読有, Vol. 11, No. 1, pp.28-39, (2014)

〔学会発表〕(計 17件)

[1]Shinya Watanabe, Sho Nakano, Kazuhisa Chiba and Masahiro Kanazaki, "On-demand correlation-based information hierarchical structuring method (CIHSM) for non-dominated solutions",2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2016), 査読有, CDR0M-paper (E-16702), 2016, Vancouver(Canada)

DOI: 10.1109/CEC.2016.7744030

[2]Kazuhisa Chiba, Shinya Watanabe, and Masahiro Kanazaki, "Physical Construction of Local Design Information for Sounding Hybrid Rocket Design via Correlation-based Information Hierarchical Structure", 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2016), 査読有, CDR0M-paper (E-16721), 2016, Vancouver(Canada)

DOI: 10.1109/CEC.2016.7744112

[3]Junya Inafune and Shinya Watanabe, "The effectiveness of considering the intrinsic characteristics for nurse scheduling problem",Proceedings of Joint 8th International Conference on Soft

Computing and Intelligent Systems and 17th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS 2016), 査読有, pp.36-41, 2016,Sapporo(Japan)  
DOI: 10.1109/SCIS-ISIS.2016.0022

[4]Shinya Watanabe, Tetsuya Sato, Kazutoshi Sakakibara, "A New Approach Based on Simplifying Problem and Partially Fixing Customers Sequence for Large Scale Vehicle Routing Problem", EUROSIM 2016 (9th Congress on Modelling and Simulation), 査読有, pp.1017-1022, 2016, Oulu(Finland)

[5]Masashi Ito, Shinya Watanabe and Kazutoshi Sakakibara, "A proposal on a new efficient framework dedicated to large scale vehicle routing problems -FOCUS-", Proceedings of The 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2016), 査読有, pp.451-454,2016,Atami(Japan)

[6]Hibiki Samonji and Shinya Watanabe, "A proposal of a new approach for strengthening the search ability of EMO algorithm-SPLASH", The 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications(NOLTA2016), 査読有, pp.447-450, 2016,Atami(Japan)

[7] 伊藤 匡志, 渡邊 真也, 榊原 一紀, "大規模配送計画問題に対する分割統治型フレームワークの改良",第12回進化計算学会研究会資料集, pp.107-114,2017年3月13日(月)~14日(火),九州大学大橋キャンパス

[8] 稲船 淳也, 渡邊 真也, "看護師勤務表作成問題における分枝価格法とメタヒューリスティクスを組み合わせた新たなアプローチの提案",第12回進化計算学会研究会資料集, pp.115-122,2017年3月13日(月)~14日(火),九州大学大橋キャンパス

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

渡邊 真也 (WATANABE, Shinya)  
室蘭工業大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 3 0 3 8 8 1 3 6

### (2)研究分担者

榊原 一紀 (SAKAKIBARA, Kazuto)  
富山県立大学・工学部・准教授  
研究者番号: 3 0 3 8 8 1 1 0

廣安 知之 (HIROYASU, Tomoyuki)  
同志社大学・公私立大学の部局等・教授  
研究者番号: 2 0 2 9 8 1 4 4