

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500268

研究課題名(和文) 局所パレート性を考慮した多目的最適化アルゴリズムの開発と逆問題への応用

研究課題名(英文) Development of a new multi-objective local search considering local Pareto optimality and its application to inverse problem

研究代表者

渡邊 真也 (WATANABE, Shinya)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30388136

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：多目的最適化において局所最適性を保証し隙間ない解分布を実現する局所探索法のメカニズムを実装し、代表的なテスト問題を用いた数値実験において期待通りの結果が得られることを示した。また、逆問題の1つである少数投影CTに対する進化型多目的最適化の応用についての検討も行い、位相回復の分野で広く用いられているGSアルゴリズムを最適化ツールとして組み込み周波数特性を考慮した遺伝的操作を実装したアプローチを開発した。数値実験を通して既存の手法と比較した本アプローチの優位性を確認することができた。

研究成果の概要(英文)：A new multi-objective local search approach considering local Pareto optimality has been proposed. This approach also has an interpolation mechanism for capturing the whole of Pareto subsets. Through the numerical examples, the effectiveness of the proposed approach could be indicated. Furthermore, a new approach based on Evolutionary Multi-criterion Optimization (EMO) for sparse CT problem were developed. This approach incorporates Gerchberg-Saxton algorithm (GS algorithm) that is the fact standard method in the field of phase retrieval problem as optimization tool and implements an original genetic operators utilizing the characteristics of strength distribution. The superiority of our approach could be confirmed by comparison to the existing approaches in sparse CT problem.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：進化型多目的最適化 局所探索 逆問題 少数投影CT 多目的最適化アルゴリズム

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, これまでに開発された EMO アルゴリズムでは得られた解候補の持つ幾何学的パレート最適性の保証がほとんど考慮されていないため, 探索により得られた解候補に対する合理的根拠および何らかの最適性の保証がなく実用的に EMO を適用する際の大きな問題点となっていた.

一方, EMO は幅広い分野において応用されているものの, 探索すべきパラメータが膨大に存在する問題, 不確定要素を多数含んでいる事例に対しての応用はこれまでほとんど行われていない. これは, もともと探索すべき点が膨大に存在し単目的に比べ最適解への収束能力が劣る EMO では, あまりに広すぎる探索空間を扱えないことに起因する. そのため, この種の特徴を有する問題に対しては EMO 単独で最適化を行うのではなく, その問題に特化した最適化ツールとの組み合わせを考慮する必要があるが, そもそも EMO と他のツールを組み合わせた研究自体が限られているのが現状である.

2. 研究の目的

本申請研究では, 設計変数空間でのパレート最適性を探索の中で検証し局所パレート性を判定するメカニズムを開発し, 得られた解に対して少なくとも局所的な最適性を保証した手法の開発を試みた. 本手法は, 局所的な最適性に関する情報を探索に活用し, 単に局所最適性を保障するだけでなく局所パレート領域を網羅的に探索するメカニズムを兼ね備えている. この手法の実現により, 信頼性のある高品質な非劣解集合を隙間無く求めることができ, 実用上の問題となっていた解の信頼性の問題を大部分解消できるものと期待できる.

また, これまで EMO の応用がほとんど行われてこなかった計測分野に存在する物理系逆問題を主な応用対象に扱い, 未知パラメータが膨大かつ不確定要素を含む問題に対する EMO 応用のさきがけとなることを目標とした. 具体的な逆問題の事例としては, 限定された投影方向データに基づき内部構造を推定する少数投影 CT 問題, 回折波計測で失われるフーリエ位相を復元する位相回復問題の 2 つの事例を取り上げ, EMO による効果的な最適化を実現するための方法について検討を行った.

3. 研究の方法

ここでは, 新たな EMO における局所探索手法に関する研究と逆問題に対する応用研究

を分けて示す.

(1) 局所最適性を考慮した局所探索手法

提案手法は, EMO 探索により得られた解候補に対してその質を最終的に向上させる posteriori 型の局所探索であり, 与えられた解候補に対して「(局所最適性を満たすまで)改善」, 「隙間ない解分布の導出」を行うことにより高品質なパレートフロント全体の近似を実現しようとするものである. そのため, 膨大な計算コストを必要とする一方, 高い解候補の質保証を実現しようとする手法と位置づけることができる.

本手法の実現のためのキーとなる要素およびメカニズムを下記に示す.

- ・多目的における局所最適性の定義
- ・局所最適性を保障した局所探索メカニズム
- ・解候補同士の隙間を埋める補完メカニズム

多目的における局所最適性として KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件を多目的へ拡張した Fritz-John 必要条件を採用し, この条件を満たすような解の改善を検討した. 具体的な解の改善方法としては, 近似勾配を利用しパレート降下方向(少なくとももどの目的も改悪されない方向)に対する移動を条件が満たされるまで繰り返すというアプローチを採用した.

また, 隙間のない解分布を実現する方法として, 「解集合のパレートサブセットの特定」および「各パレートサブセットの端点を利用した補完」の大きく 2 つのメカニズムを実装した. 前者のパレートサブセットの特定では, 図 1 に示すように目的関数空間と設計変数空間の関係において矛盾が存在するか否かで判断するという方法を用いた. また, 後者の補完では, まずサブセット内の端点(各目的関数値が最良の点)を求め, 端点間を補完するという方法を採用した.

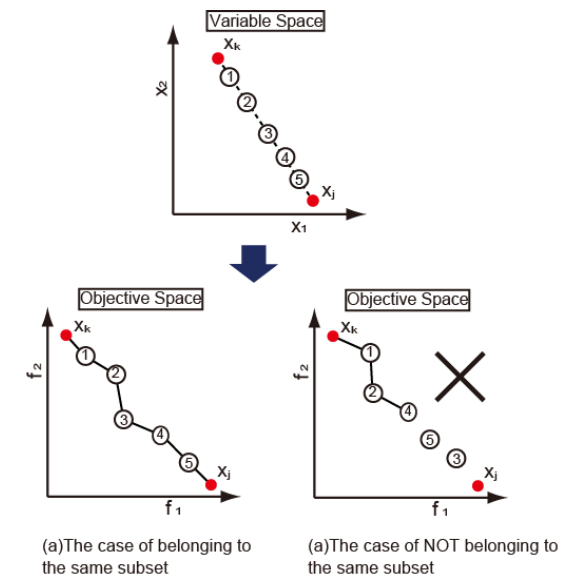


図 1: サブセット特定のための, 設計変数-目的関数空間での位置関係の相関

## (2) 逆問題に対する EMO の応用研究

逆問題に対する EMO の応用事例として「位相回復」と「少数投影 CT」への適用を行った。両問題は、実空間と位相空間の2つの空間で最適化を考える必要があること、探索すべき未知パラメータ数が非常に膨大であること、不確定要素が多く解を一意に定めることができないことなど多数の共通点を持っている。

中でも膨大な未知パラメータの推定は非常に大きな問題であり、EMO 単独では良質な解候補を導出することができない。そのため、本研究では、位相回復の分野において広く利用されている GS アルゴリズム (Gerchberg - Saxton algorithm) をパラメータ最適化ツールとして EMO に組み込みこの問題の克服を試みた。

GS アルゴリズムは、図2に示すように逆空間拘束条件(に示されるサポートと呼ばれる対象画像が存在しない領域)と実空間拘束条件(に示される観測データ)の2つの拘束条件を交互に適用することにより未知パラメータの推定を行う手法であり、単純に違反量の訂正を行うだけの ER(Error Reduction)と違反に対してペナルティを加えて修正を行う HIO (Hybrid Input-Output) が代表的なアプローチとして存在する。一般的に ER と HIO を組み合わせて利用することが探索に効果的であることが知られており、本研究においても ER と HIO を組み合わせた実装を行った。

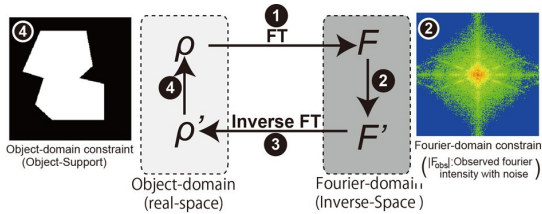


図2: GS アルゴリズム

## 4. 研究成果

ここでも前章と同様、局所探索手法に関する研究と逆問題に対する応用研究に分けてそれぞれの成果について述べる。

### (1) 局所最適性を考慮した局所探索手法

提案する局所探索は、局所最適性を考慮し、かつ隙間ない解分布を得ることを目的としている。そのため、代表的な EMO の分野における幾つかの例題に対して「(局所最適性を満たすまでの) 解の改善によりどの程度の精度向上が実現されたのか」、「(隙間を埋めるための補完メカニズムにより) 真の解分布に対してどの程度近似した解集合が最終的に得られたのか」という視点からの考察を行いその有効性を検証した。

また、本手法における最大の問題点である計算コストを削減させるための検討も行ったのでその結果についても述べる。

### (1-a) テスト関数に対する結果

KUR, MHHM2 といった EMO における代表的なテスト関数に対する有効性の検証を行った。一例として、MHHM2 に対する適用結果を図3に示す。

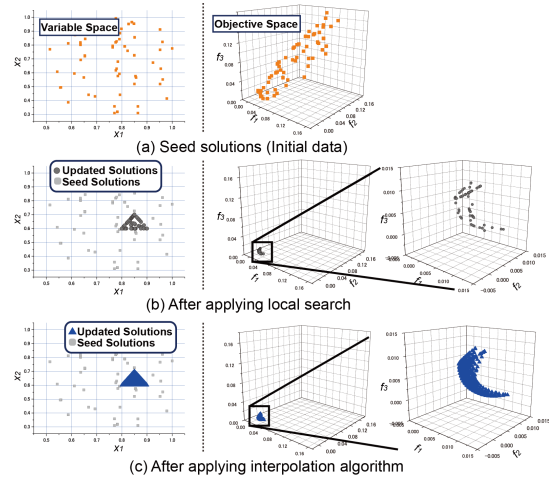


図3: MHHM2 に対する適用結果

図3では、初期個体(a)が解の改善により真の解付近(b)まで収束し、解補完により幅広く隙間のない解分布(c)の探索に成功している様子を確認することができる。

(1-b) 計算コスト削減を考慮した場合の結果

計算コスト削減するための方策として、「改善対象個体の選別 (Filtering)」と「応答局面法による近似関数の利用」を提案手法へ組み込む取り組みを行った。一例として KUR に対する適用結果を図4に、費やした計算コストを表1に示す。

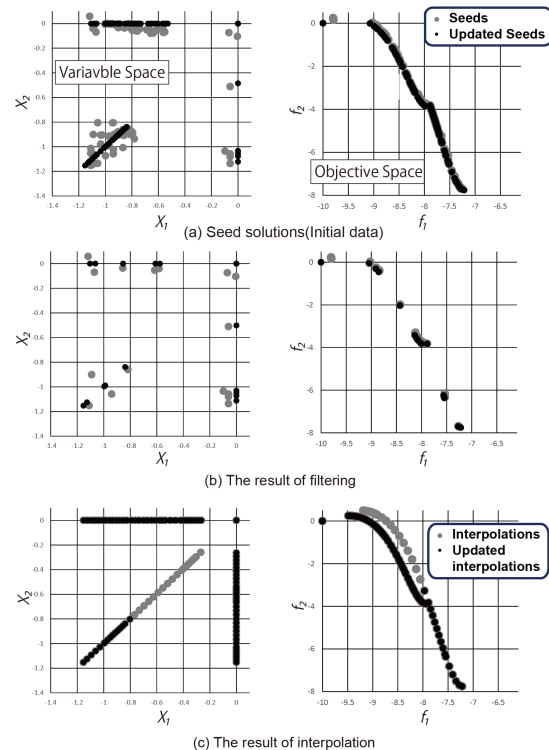


図4: 計算コスト削減メカニズムを組み込んだ場合の結果 (KUR)



表 1：評価回数の比較

手法	評価回数
従来の局所探索	31506
コスト削減メカニズムを組み込んだ局所探索	12403

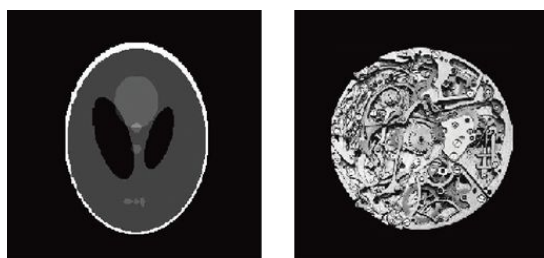
表 1 および図 4 から分かるように従来の方法に比べ約 3 分の 1 程度の計算コストで、従来とほぼ同程度の高品質な解集合が得られている様子が分かる。

(2) 逆問題に対する EMO の応用研究

逆問題に対する応用事例として少数投影 CT に対する EMO の適用結果について述べる。ここでは、図 5 に示す 2 つの画像に対する結果について述べる。

図 5 に示す画像に対して投影方向が 4 方向と 20 方向の 2 つの場合について実験を行った。比較手法としてフィルター逆投影法 (Filtered Back Projection, FBP) および Egiazarian らの提案する手法 (Recursive Spatially Adaptive Filtering, RSAF) の 2 手法を使用し、これらの手法に対する優位性の有無について検証を行った。

ここでは、Phantom 画像に対する 4 方向の結果と Watch 画像に対する 20 方向の場合の結果について図 6 および図 7 に示す。



(a) Phantom (b) Watch

図 5: 対象画像

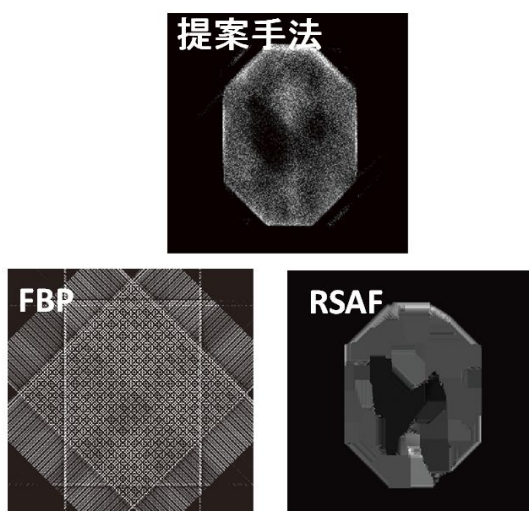


図 6: Phantom 画像における 4 方向の結果

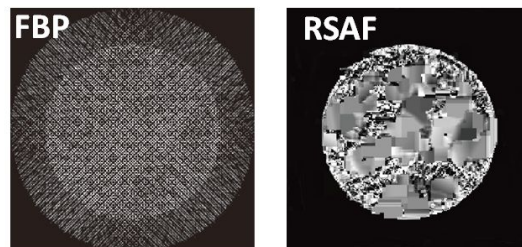
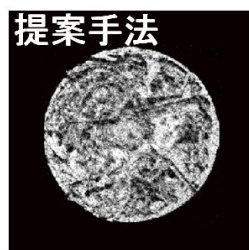


図 7: Watch 画像における 20 方向の結果

数値実験の結果、より複雑な画像、投影方向がある一定度以上ある場合において明らかに優れた結果が得られることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

[1] 渡邊 真也, 千葉 祐大, 金崎 雅博, "相関ルール分析に基づく非劣解分析支援システムの提案", 人工知能学会論文誌, 査読有, 第 29 巻, 第 2 号, 2014, pp.219-233.

DOI: 10.1527/tjsai.29.219

[2] 渡邊 真也, 斗澤 将大, 中野 啓佑, 小野 智司, "ユーザシステム協調型進化計算を用いたアバタ作成支援システムの提案", 情報処理学会論文誌「数理モデル化と応用」, 査読有, 第 7 巻, 第 1 号, 2014, pp.22-33.

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009691638>

[3] Shunsuke Hattanda, Hiroyuki Shioya, Yosuke Maehara, and Kazutoshi Gohara, K-means clustering for support construction in diffractive imaging, Journal of the Optical Society of America, 査読有, A, 31, 3, pp. 470-474 (2014)

DOI: 10.1364/JOSAA.31.000470

[4] 渡邊 真也, 横内 直樹, "多目的最適化問題に対する近似勾配を利用した新たな局所探索手法の提案", 進化計算学会論文誌, 査読有, Vol.3, No.3, 2012, pp.143-154.

DOI: 10.11394/tjpnsec.3.143

[5] Jun Mao, Jianming Shi, Jirapat Wanitwattanakosol and Shinya Watanabe, "An ACO-based algorithm for optimising the revenue of TV advertisement using credit information", International Journal of Revenue Management, 査読有, Vol.5 Nos.2/3, 2011, pp.109-120.

DOI: 10.1504/IJRM.2011.040304

[6] M. Uchida, Y. Maehara and H. Shioya, Unsupervised Weight Parameter Estimation Method for Ensemble Learning, Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, 査

読有, Volume 10, Issue 4, pp. 307-322  
(2011)  
DOI: 10.1007/s10852-011-9157-1

〔学会発表〕(計 19 件)

[1]横内直樹、渡邊真也, "勾配を利用した多目的局所探索法における計算コスト削減の検討", 進化計算シンポジウム 2013, 講演論文集, pp.247-254, 2013/12/14-15, 霧島ホテル(鹿児島県)

[2] 渡邊真也, 長舟 和馬, 塩谷 浩之, "少数投影 CT への進化型多目的最適化の応用", 電気学会研究会資料(システム研究会), ST13-114, pp.31-36, 2013.11.23, 愛知県立大学サテライトキャンパス(愛知県)

[3] 長舟和馬、渡邊真也、塩谷浩之, "強度分布特性を活かした進化型多目的最適化に基づく少数投影 CT 再構成アプローチの検討", 第 4 回進化計算学会研究会 講演論文集, pp.30-35, 2013/3/18-19, 防衛大学(神奈川県)

[4] 横内 直樹, 渡邊 真也, "勾配を利用した局所探索法によるハイブリッドロケットエンジン概念設計への応用", 進化計算シンポジウム 2012, 講演論文集, pp.18-25, 2012/12/15-16, 軽井沢(長野県)

[5] 渡邊真也, "進化型多目的最適化に関する最近の動向", 平成 24 年度電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集, CD-ROM, 2012.9.4-7, 弘前大学(青森県)

[6] 大江 将悟, 渡邊真也, 塩谷 浩之, "進化型多目的最適化に基づく少数方向投影からの CT 画像再構成", 情報処理学会 数理モデル化と問題解決研究報告, Vol.2011-MPS-85, No.14, pp.1-6, 2011.9.16, 室蘭工業大学(北海道)

[7] 渡邊真也, "進化型多目的最適化における最適性を考慮した局所探索法の提案", 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, CD-ROM, 2011.9.8, 富山大学(富山県)

〔図書〕(計 1 件)

[1]Ayanendranath Basu, Hiroyuki Shioya, Chanseok Park, Statistical Inference: The Minimum Distance Approach, Chapman & Hall/CRC Monographs on Statistics & Applied Probability 120 (2011)

DOI: 10.1111/insr.12011\_14

ISBN-10: 1420099655

〔その他〕

ホームページ等

<http://is.csse.muroran-it.ac.jp/>

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: 30388136

(2)研究分担者

塩谷 浩之 (SHIOYA, Hiroyuki)

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 90271642