

線形重回帰分析を用いた評価値空間と設計変数空間との非対応領域抽出法に関する検討

A Study on Extraction Method of Non-Correspondence Area between Objective Space and Design Variable Space with Linear Multiple Regression Analysis

吉田 徹^{*1}
Toru Yoshida

吉川 大弘^{*2}
Tomohiro Yoshikawa

^{*1}名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering Nagoya University

Recently, a lot of studies on Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA), in which Genetic Algorithm is applied to Multi-objective Optimization Problems (MOPs), have been reported actively. MOGA has been also applied to engineering design fields, then it is important not only to obtain high-performance Pareto solutions but also to analyze the obtained Pareto solutions and extract the knowledge in the problem. In order to analyze Pareto solutions obtained by MOGA, it is required to consider both the objective space and the design variable space. In this paper, we define “Non-Correspondence in Linear Relationship” between the objective space and the design variable space. We also try to extract the Non-Correspondence area in Linear Relationship with the index defined in this paper. This paper applies the proposed method to the trajectory designing optimization problem and extracts Non-Correspondence area in Linear Relationship in the acquired Pareto solutions.

1. はじめに

近年、多目的最適化問題 (Multi-objective Optimization Problems : MOPs) に遺伝的アルゴリズムを応用した、多目的遺伝的アルゴリズム (Multi-objective Genetic Algorithm : MOGA) に関する研究が盛んに行われている [Deb 01]。多目的最適化問題とは、複数の目的関数を同時に最大化もしくは最小化する問題である。しかし、通常これらの目的関数にはトレードオフの関係があり、全ての目的関数について優れた解を一意に求めることはできない。そのため、他の解に対して、少なくとも一つの目的関数において劣っていない解であるパレート解の集合を求める必要がある。

さらに近年では、計算機の性能向上にともない、MOGA の工学分野への応用に関する研究が報告され始めている [Deb 03][大林 07]。それにより、MOGA を用いて精度の高いパレート解集合を得るだけでなく、得られた解集合を解析することで、対象問題に対する設計知識を獲得することが求められている。

大林 [大林 07] は、航空機主翼の形状設計最適化問題において、MOGA によりパレート解集合の獲得を行うとともに、自己組織化マップ (Self Organizing Map: SOM) を用いて、得られた解集合の評価値と設計変数との関係を可視化し、問題の性質に対する解析を行っている。

本稿では、評価値空間と設計変数空間を共に考慮したパレート解の解析を行うことを想定し、その中でも特に、評価値空間と設計変数空間における“非対応性”に注目する。本研究では、評価値空間と設計変数空間の非対応性について、以下の3つを定義する。

- 個体間距離関係の非対応性
- 分布領域の非対応性
- 線形関係の非対応性

筆者らはこれまで、個体間距離関係の非対応性 [吉田 13a]、分布領域の非対応性 [吉田 13b] について検討を行ってきた。本稿では、線形関係の非対応性について定義するとともに、線形重回帰分析 [Draper 66] を用いた非対応性の指標を定義し、その非対応領域の抽出を試みる。JAXA (宇宙航空研究開発機構) が現在取り組んでいる DESTINY ミッションのひとつである月遷移フェーズにおける軌道設計最適化問題を対象とし、得られたパレート解に対して、上記非対応性をもつ領域の抽出、及びそれらに対する解析を行う。

2. 線形関係の非対応性

本稿では、線形関係の非対応性について注目する。線形関係の非対応性とは、文字通り、設計変数の変化と評価値の変化とが線形関係にない度合いであり、特にその非対応性の高い個体が集まった領域を“非対応領域”と呼ぶ。1 目的 1 設計変数の場合の例を図 1 に示す。図 1 において、ラベル 1,2,3,4 が付いている個体のように、設計変数 $V1$ の変化に対して、評価値 $Obj1$ が線形に変化をする領域を対応領域、ラベル 5,6,7,8 が付いている個体のように、設計変数 $V1$ の変化に対して、評価値 $Obj1$ が非線形に変化をする領域を非対応領域と定義する。

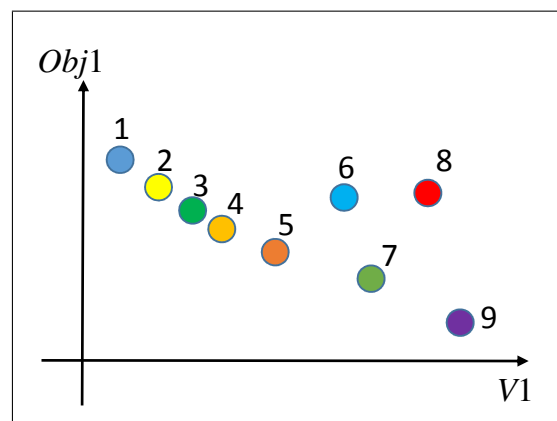


図 1: 線形関係の非対応領域

連絡先: 吉田 徹, 名古屋大学大学院工学研究科, 名古屋市千種区不老町, 052-789-2793, 052-789-3166, yoshida@cmlpx.cse.nagoya-u.ac.jp

この非対応領域を抽出するための、線形重回帰分析 [Draper 66] を用いた非対応性の度合いを表す指標 NL の算出法を以下に示す。

1. 設計変数空間における近傍を、近傍個体数 N として定義する。
2. 個体 i に注目し、個体 i の近傍にある N 個体を対象個体（個体 i は含まない）として抽出する。
3. 対象個体の各評価値を目的変数、設計変数を説明変数として、線形重回帰分析 [Draper 66] を行い、各評価値に対応する回帰式を算出する。
4. 式 (1) に従い、個体 i に対する非対応性指標 NL_i を計算する。

$$NL_i = \sum_{l=1}^M nl_{li} \quad (1)$$

$$nl_{li} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |f_{lik} - \hat{f}_{lik}| \quad (2)$$

上記の手順を各個体に適用することにより、全個体に対する指標 NL を算出する。なお式 (1)、式 (2) において、 M は目的関数の数、 f_{lik} は対象個体 k の l 番目の目的関数に対する評価値、 $\hat{f}_{lik}$ は回帰式により予測された対象個体 k の l 番目の評価値、 N は対象個体の数である。指標 NL の値が大きい個体については、近傍となる対象個体が回帰式から大きく離れている、すなわち、局所的にであっても線形重回帰分析をうまく適用できない非対応領域に存在する個体であると考えられる。一方、指標 NL の値が小さい個体の周辺については、局所的に線形重回帰分析を適用しやすい対応領域であり、例えば周辺の個体の評価値情報を用いて評価値を推論する評価値推論手法 [Jin 05] などの適用が行いやすい領域であると考えられる。

3. 実験

3.1 実験条件

本稿では多目的最適化問題の実問題として、JAXA が現在取り組んでいる“DESTINY(Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage) ミッション [Antonio 12]”の一つである、月遷移フェーズにおける軌道設計最適化問題を対象として解析を行う。図 2 に示すように、DESTINY はイプシロンロケットにより打ち上げられ、地球周囲楕円軌道に投入される。そして、搭載されている大型イオンエンジンにより加速、高度を上げ月軌道に到達する。本問題では、この月遷移フェーズ（図 2(1)、(2)）における軌道設計最適化を行う。

本問題における各設計変数、目的関数をそれぞれ表 1、表 2、表 3 に示す。表 1 に示すように、本問題では最大 6 目的まで拡張可能であるが、本稿では $Obj1 \sim Obj5$ を用いた 5 目的の最適化問題として扱う。

この問題について、NSGA-II を用いて探索を行い、2000 個のパレート解を得た。このとき、個体数は 680 個体、世代数は 100 世代であり、交叉率は 1.0、突然変異率は 0.2 として探索を行った。交叉には SBX[Deb 94]、突然変異には Polynomial Mutation[Deb 96] を用いた。

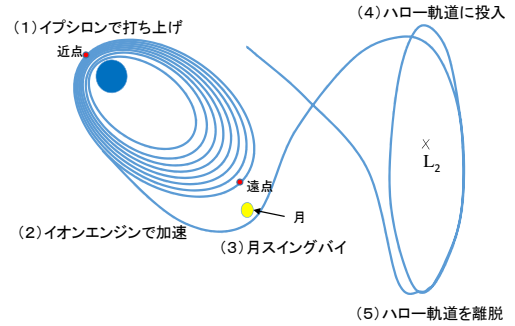


図 2: DESTINY の概要

表 1: 目的関数

$Obj1$	高度 20,000km 以下の通過時間	の最小化
$Obj2$	イオンエンジン噴射時間	の最小化
$Obj3$	月までの飛行時間	の最小化
$Obj4$	最長日陰時間	の最小化
$Obj5$	高度 5,000km 以下の通過時間	の最小化
$Obj6$	宇宙機の初期質量	の最大化

3.2 線形関係の非対応領域の抽出

得られたパレート解集合 2000 個体に対して、式 (1) により指標 NL の値を算出した結果を図 3 に示す。なお、指標を計算する際に用いた近傍個体数 N は 50 個体とした。また図 3 において、横軸は各個体の NL の値が大きい順にソートしたときの個体番号を表し、縦軸はそれぞれの指標 NL の値を表している。さらに図 4 に、図 3 の指標値により評価値空間、設計変数空間それぞれにグラデーション (NL 大 $\rightarrow$ NL 小: 赤 $\rightarrow$ 黄緑) で色付けして多次元尺度構成法により可視化したものを示す。2 節で述べた通り、指標 NL の値が小さいほど、その個体の周辺において局所的に線形性が高い対応領域であるため、実評価回数の削減を目的として用いられる評価値推論手法などの適用が行いやすい領域であると考えられる。

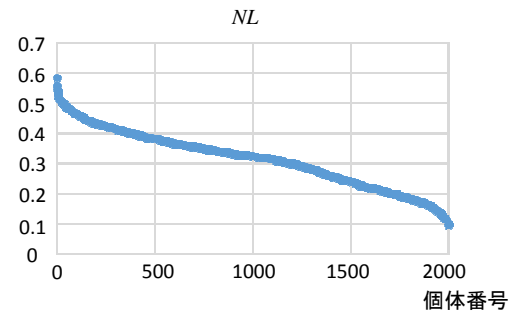


図 3: 線形関係の非対応性指標 NL

3.3 各目的関数における非対応領域

次に、各目的関数に対して算出される式 (2) の指標値 nl を図 5 に示す。

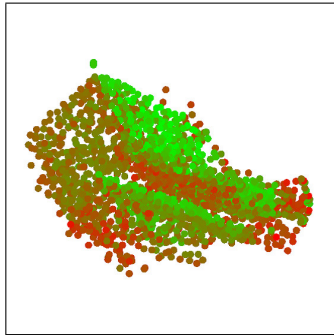
図 5 より、それぞれ $Obj1$, $Obj2$, $Obj3$, $Obj5$ に対する指標値 nl が、全個体において小さい値となる傾向にあることがわかる。これより、 $Obj1$ （高度 20,000km 以下の通過時間）、 $Obj2$ （イオンエンジン噴射時間）、 $Obj3$ （月までの飛行時間）、及び $Obj5$ （高度 5,000km 以下の通過時間）は、設計変数に対して非線形に変化する領域が比較的少なく、関数の構造が簡単

表 2: 設計変数

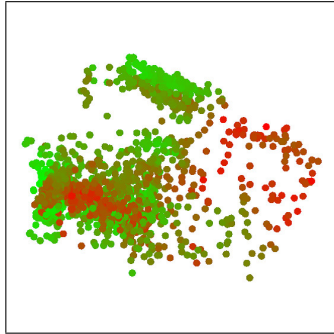
V1	: 伝播開始日時の日付
V2	: 伝播開始日時の時間
V3	: 近点上昇から遠点上昇への切り替え日
V4	: 遠点上昇のためのイオンエンジンを噴く真近点離角の範囲
V5	: 近点上昇のためのイオンエンジンを噴く真近点離角の範囲

表 3: 設計変数の設定領域

V1	: 2017/1/1~2017/12/31
V2	: 00:00:00~24:00:00
V3	: 90~365[days]
V4	: 0~180[degrees]
V5	: 0~180[degrees]



(a) 評価値空間

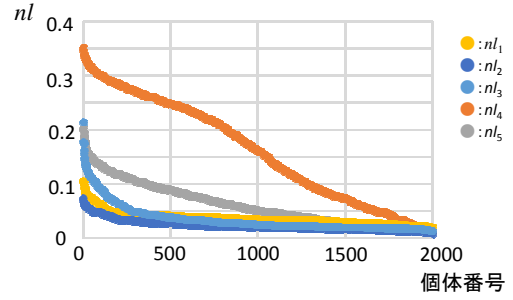


(b) 設計変数空間

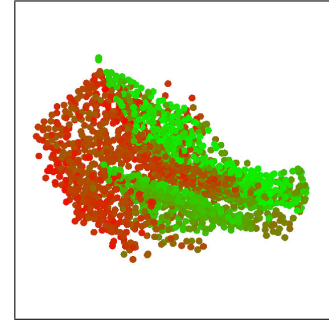
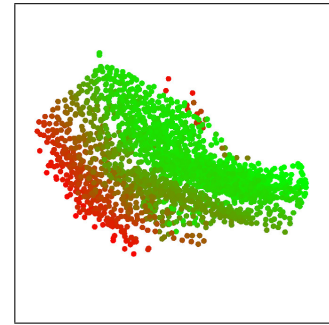
図 4: パレート解の分布 (指標 NL によるグラデーション)

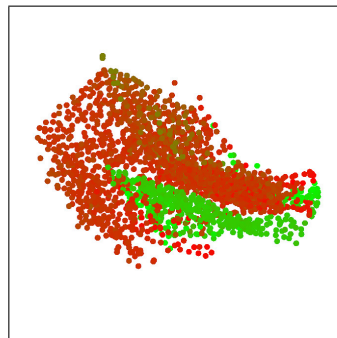
な目的関数であると考えられる。

一方、図 6 より、 $Obj4$ である最長日陰時間に着目すると、指標値 nl_4 が他の目的関数と比較して大きい値をとっており、非対応領域が多いことがわかる。その一方で、指標値の小さい対応領域も存在している。すなわち、最長日陰時間においては、設計変数に対する非線形性の強い領域と弱い領域が存在することを意味する。特徴を把握するため、評価値空間を nl_4 の値により、グラデーション (nl_4 大→小: 赤→黄緑) で色付けした様子を図 6 に、 $Obj4$ の値により、グラデーション ($Obj4$ 大→小: 赤→黄緑) で色付けした様子を図 7 に示す。図 6、図 7 より、最長日陰時間が小さい領域では、 $Obj4$ に対する指標値 nl_4 の値が小さい傾向があり、逆に $Obj4$ の値が大きい領域では nl_4 の値が大きい傾向があることがわかる。この

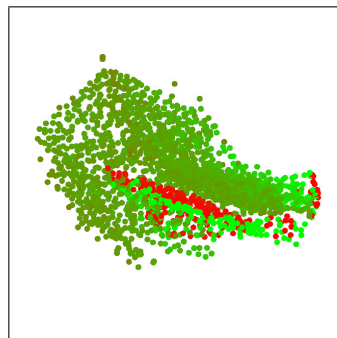

図 5: 各目的関数における非対応性指標 nl

結果から、最長日陰時間の小さいパレート解においては、設計変数と最長日陰時間は比較的線形な関係にあり、逆に最長日陰時間の大きい解は非線形な関係にあることがわかる。さらに、評価値空間を (a)V1 (伝播開始日時の日付) と (b)V2 (伝播開始日時の時間) で色付けした様子を図 8 に示す。ただし、図 8 におけるグラデーションは、V1 では、2017/1/1 が黄緑、2017/12/31 が赤とし、V2 では、00:00:00 が黄緑、23:59:59 が赤となるようにそれぞれ色づけをしている。なお演算の上では、V1 と V2 は、それぞれサイクリックにつながっている。すなわち、2017/12/31 と 2017/1/1 は 1 日違いであり、00:00:00 と 23:59:59 との差は 1s である。図 8 において、指標値 NL が小さい領域では、伝播開始日時の特徴として、伝播開始日時の日付が 3 月～4 月、時間帯が 22 時から 0 時となる個体が多く存在していた。これらの領域では、全体としては比較的 non-correspondence の高い最長日陰時間に関して、線形性の高い領域であると考えられ、評価値推論手法などの適用も行いやすく、また $Obj4$ に対して設計の行いやすい領域であると考えられる。


図 6: 評価値空間 ($nl_4(Obj4)$ によるグラデーション)

図 7: 評価値空間 ($Obj4$ によるグラデーション)



(a) V1 (伝播開始日時の日付)



(b) V2 (伝播開始日時の時間)

図 8: 評価値空間 (伝播開始日時によるグラデーション)

4. まとめ

本稿では、評価値空間と設計変数空間における、線形関係の非対応性を定義した。また線形重回帰分析を用いた線形関係の非対応性の指標を定義し、その指標値に基づく線形関係の対応領域、非対応領域の抽出方法を示した。多目的最適化問題の実問題として、DESTINY ミッションの一つである月遷移フェーズにおける軌道設計最適化問題において、得られたパレート解により、抽出された対応領域／非対応領域に対する検討を行った。その結果、本問題においては、主に最長日陰時間について、非線形性を有する目的関数であることを示した。今後は目的関数の数を増やした場合の検討や、線形関係の対応領域の解に対する評価値推論手法の適用に関する検討をしていく予定である。

謝辞

本研究は、HPCI 戦略プログラム分野4次世代ものづくり研究開発課題4「多目的設計探索による設計手法の革新に関する研究開発」[url]の研究の一環として遂行された。

参考文献

- [Antonio 12] Antonio L´opez, Oyama, A., Fujii, K.: Evaluating Two Evolutionary Approaches to Solve a Many-objective Space Trajectory Design Problem, *The Japanese Society for Evolutionary Computation* (2012)
- [Deb 94] Deb, K. and Agrawal, R.: Simulated binary crossover for continuous search space, *Complex Systems*, Vol. 1, No. 9, pp. 115–148 (1994)

- [Deb 96] Deb, K. and Goyal, M.: A combined genetic adaptive search (GeneAS) for engineering design, *Computer Science and Informatics*, Vol. 26, pp. 30–45 (1996)
- [Deb 01] Deb, K.: *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, Wiley (2001)
- [Deb 03] Deb, K.: Unveiling innovative design principles by means of multiple conflicting objectives, *Engineering Optimization*, Vol. 35, No. 5, pp. 445–470 (2003)
- [Draper 66] Draper, N. R., Smith, H., and Pownell, E.: *Applied regression analysis*, Vol. 3, Wiley New York (1966)
- [Jin 05] Jin, Y.: A comprehensive survey of fitness approximation in evolutionary computation, *Soft computing*, Vol. 9, No. 1, pp. 3–12 (2005)
- [url] <http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/supercomputer/about/>.
- [吉田 13a] 吉田徹, 吉川大弘: 評価値空間と設計変数空間における個体間の距離関係に基づく相関非対応性の導出, 人工知能学会 (2013)
- [吉田 13b] 吉田徹, 吉川大弘: 評価値空間と設計変数空間の分布領域の非対応性に基づく設計変数解析支援, 進化計算シンポジウム 2013 (2013)
- [大林 07] 大林茂: 多目的最適化と設計探索, 進化計算研究会, pp. 67–72 (2007)