

航空機設計最適化のための多次元データ可視化

渡邊 彩華[†] 伊藤 貴之[†] 金崎 雅博[‡] 宇津木 基弘[‡] 千葉 一永^{††}

[†]お茶の水女子大学 〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

[‡]首都大学東京 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1

^{††}電機通信大学 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: [†] {aya, itot}@itolab.is.ocha.ac.jp, [‡] kana@sd.tmu.ac.jp, ^{††} kazchiba@uec.ac.jp

あらまし 航空機の機体設計において、多目的最適化問題は広く利用されている。多目的最適化における設計変数と目的関数は多次元変数の一種であることから、多次元データ可視化手法を用いることでその分布や相関の理解を支援できる。本報告では、我々が開発している多次元データ可視化手法 **Hidden** の航空機設計最適化のための拡張を提案する。1 つ目は進化計算過程の可視化である。具体的には、設計最適化に用いている遺伝的アルゴリズムの各世代を構成する多次元変数群を色分け表示して可視化することで、計算の進化にともなう探索空間の推移を理解し、ひいては進化計算過程の改善を支援できる。2 つ目は散布図の併用による汎用的な可視化である。具体的には、散布図の併用によって新たな知見を視覚的に発見できると期待される 2 変数の組み合わせを自動選出して、それらを散布図で表示する。

キーワード 高次元データ, 可視化手法, Parallel Coordinates Plot, Scatter Plot

1. はじめに

現在、航空機の機体設計において多目的最適化問題や、最適化の結果を可視化するデータマイニングの手法が採用されている。その中でも多目的最適化は産業界を中心に広く利用されている。航空機の機体設計における多目的最適化問題では、目的関数の増加とともにその解選択の過程も複雑化することが多い。そのため、多目的最適化問題の結果として得られる準最適解群をどのように解析者に提示するかが重要となる。

多目的最適化問題に置ける説明変数と目的関数はどちらも多次元変数の一種であることから、多次元データの可視化手法を用いることでその分布や相関の理解を支援することができる。航空機の機体設計のための可視化研究としては、説明変数と目的関数の連携可視化によるパレート解の対話的探索[1]がある。この手法を用いることで、説明変数どうし・目的関数どうしの関係を視認できたが、説明変数と目的関数の対応関係については視認を試みていなかった。

我々は多次元データ可視化手法 **Hidden** [2] を発表している。**Hidden** は多次元データを構成する次元間の相関を散布図で表現し、その散布図上での操作によって特定の次元群の数値分布を **PCP** (Parallel Coordinate Plots) で可視化する。

本報告は航空機設計最適化のための **Hidden** の拡張を提案する。本報告での提案内容は最適化のための進化計算に特化した拡張と汎用的な拡張の 2 点で構成される。

本報告の前半では、航空機設計最適化のための進化

計算過程の可視化を報告する。具体的には、航空機設計最適化に用いられている遺伝的アルゴリズムの各世代を構成する多次元変数群を色分け表示する。現時点での我々の実装では 2 種類の色表現を試みている。1 つ目の色表現では、進化計算による各世代を構成する変数群を観察しやすくするため、最新世代から順に異なる色相を割り振った。2 つ目の色表現では、進化過程をよりスムーズに理解するため、第 1 世代から最新世代までの進化過程を赤～黄色のグラデーションで表示した。

2 つ目は散布図の併用による汎用的な可視化である。具体的には、散布図の併用によって新たな知見が得られると期待される 2 変数の組み合わせを自動選出して、それらを散布図で表示する。ここで言う可視化する価値が高い 2 軸の組み合わせとは、特徴的な数値分布を有していながら **PCP** ではその視認が難しく、かわりに散布図を用いることでその特徴が視認しやすくなるような 2 軸を指す。一方で **PCP** には、次元数が多くなってもあまり広大な画面空間を必要としないという長所がある。そこで我々の設計方針としては、**PCP** で数値分布を視認できる次元については **PCP** を優先的に活用し、**PCP** では視認しにくい数値分布のみについて散布図を併用して可視化する、という可視化手法の確立を目指す。

2. 関連研究

多目的最適化問題を支援するための可視化手法としては **Eddy** ら[3] が、散布図の一種を用いてパレー

ト解を可視化する Cloud Visualization を提案している．また Obayashi ら[4] は、自己組織化マップ(SOM)を用いてパレート解をクラスタリングおよび可視化している．しかし、これらの可視化結果は目的関数の分布を表示しているだけであり、それをもたらした説明変数を直接表現しているものではない．

高次元データの可視化手法としてよく知られた手法に、Scatter Plot Matrix (SPM) や Parallel Coordinate Plots (PCP) があげられる． n 次元データが与えられた時に、SPM は画面空間を $n \times n$ の格子領域に分割し、その各々に散布図を表示する．PCP は n 本の平行な座標軸を並べ、その座標軸と交差する折れ線で高次元数値を表現する．しかしこれらの可視化手法をもってしても、次元が非常に高いデータにおける次元間の複雑な相関関係を網羅的に表現するのは容易ではない．我々は次元が非常に高いデータから可視化する価値のある PCP や散布図を自動選出して一覧表示する手法[5,6]を発表してきたが、これらの手法は PCP や散布図の選出数を対話的に操作する機能をもっていなかった．

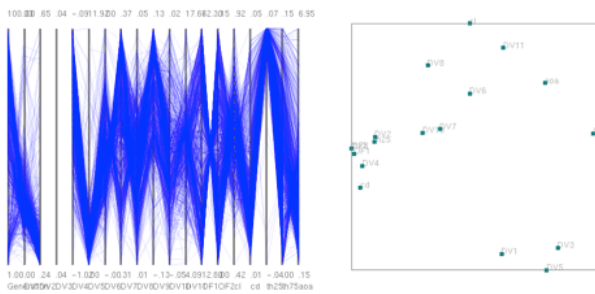


図 1 Hidden の可視化画面

多次元データ可視化手法 Hidden[1]では画面右側の次元散布図上での対話操作により半自動的に抽出された低次元空間群を、画面左側で複数の PCP (Parallel Coordinate Plots) を用いて表示する．図 1 に Hidden による可視化の例を示す．

3. 多次元データ可視化手法 Hidden の拡張

本章では航空機設計最適化のための多次元データ可視化手法 Hidden の拡張について提案する．3.1 節では航空機設計最適化のための進化計算に特化した拡張を提案する．3.2 節では航空機設計最適化に限定しない汎用的な拡張を提案する．

3.1 遺伝的アルゴリズムの各世代の色別表示

遺伝的アルゴリズムの進化過程を観察するため、各世代を構成する多次元変数群を抽出し可視化する．我々は現在、以下の 2 つの表現を試みている．1 つ目の表現では図 2(左)に示すように、最新世代から順に異なる色相を割り振ることで、進化計算による各世代を構成する変数群を観察しやすくする．2 つ目の表現で

は図 2(右)に示すように、第 1 世代から最新世代までの進化過程を赤～黄色のグラデーションで表示する．この表現を用いることで、進化過程をよりスムーズに理解できる．

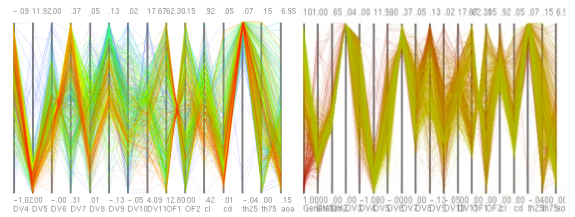


図 2 (左)新世代から順に異なる色相を割り当てる．
(右)赤～黄のグラデーションを割り当てる．

3.2 散布図の併用による次元選択

提案手法では散布図で可視化する価値のある 2 変数を自動推薦し、それらを散布図で表示する．従来の Hidden が画面の左半分に複数の PCP を表示したのに対して、提案手法では図 3 に示すように、PCP と散布図を併用することで可視化する価値のある次元をより効果的に表現する．ここで本報告における「可視化する価値の高い 2 変数」とは、特徴的な数値分布を有していながら、PCP で視認することが難しく、散布図で可視化することでその特徴が視認しやすくなるような 2 変数の組み合わせを指す．

散布図の評価には Wilkinson らが提唱した Graph-Theoretic Scagnostics [7]を適用し、散布図に関する 9 種類の特徴を定量評価する．この評価結果から、11 種類の特徴を持つ散布図をつくる 2 変数を推薦する．現時点での我々の実装では、Monotonic と Skinny の 2 種類の評価基準を試みている．

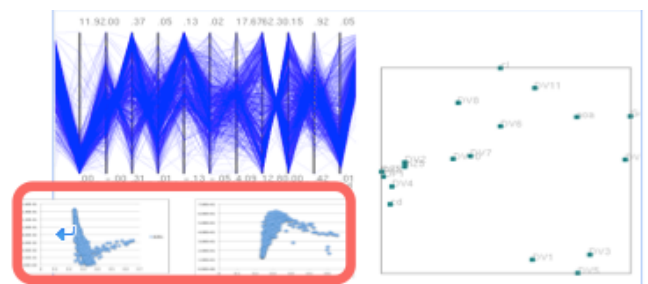


図 3 散布図を併用した可視化画面

3.2.1 Monotonic

Monotonic とは単調性（単調増加性または単調減少性）を示す評価基準である．単調性の高い数値分布は PCP でも視認しやすいため散布図を用いる必然性は低い．よって本研究では、Monotonic 値が高い 2 変数は積極的に選ぶ必要はないと判断する．

Monotonic を評価するにあたり、正規分布を想定できる場合ピアソン相関係数を、正規分布を想定できな

い場合はスピアマン順位相関係数を適用する．我々の用途では正規分布を想定できるとは限らないため，スピアマン順位相関係数を採用する．スピアマン順位相関係数は，変数を値で並び替えた際の順位についてピアソン相関係数を計算したものである．計算式は以下のとおりである．ここで n は標本数， d_i は順位の差であり，同順位が存在する場合には平均順位を用いることとする．

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_i d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

3.2.2 Skinny

Skinny とは散布図上の点群を包括する領域の細長さを表す．点群が細長く分布している 2 変数は可視化する意義がある可能性が高い．よって本研究では，Skinny 値が高い 2 変数を積極的に選ぶ．

Skinny の検出にあたり，我々の実装では Wilkinson らの実装と同様に，Delaunay 三角分割法を適用している．Delaunay 三角分割法は，与えられた点群を連結して三角メッシュを生成するために用いられる汎用的な手法である．具体的な基準として，三角メッシュを構成する三角形の最小角度が最大になるように三角メッシュを生成する．我々の実装では，散布図上の全ての点群を包括する大きな三角形を作成し，それから各点群を 1 個ずつ追加して，その頂点を連結することで三角形を更新し，最後に大きな三角形を削除するという逐次的なアルゴリズムを採用している．加えて，散布図上で十分離れた点を連結してできる非常に長い辺を有する三角形も除去する．このとき残った三角形で構成される領域の周りの長さとの面積の比を Skinny と定義する．

$$\text{Skinny} = 1 - \sqrt{4\pi \text{area}(A) / \text{perimeter}(A)}$$

1 に近い値を示せば領域が細いことを意味しており，散布図を用いて可視化する価値があると考えられる．

4. 実行例

我々は本手法を Java Development Kit (JDK) 1.7.0 で実装した．本章では，航空宇宙機の例として後縁翼厚を考慮した火星探査航空機主翼の最適設計結果[8]および，ハイブリッドロケットの最適化結果[9]に本手法を適用した結果を示す．

4.1 火星探査航空機主翼設計問題

この設計最適化では，以下の 2 種類の変数

- ・ 最大揚抗比 $maxl/d$
- ・ 前縁より 75%位置における翼厚 $th75$

の最大化を設計目的として，2 つの主翼形状について設計最適化を試みた．説明変数には以下の 11 種類

- 厚み分布に関する説明変数
 - ・ DV1:前縁曲率半径
 - ・ DV2:最大翼厚位置
 - ・ DV3:最大翼厚
 - ・ DV4:翼面曲率
 - ・ DV5:後縁開き角
- キャンバー形状に関する説明変数
 - ・ DV6:キャンバー前縁曲率
 - ・ DV7:キャンバー位置
 - ・ DV8:キャンバー高さ
 - ・ DV9:キャンバー曲率
 - ・ DV10:後縁角度
 - ・ DV11:後縁高さ

を適用した．以上の目的関数と設計変数を遺伝的アルゴリズムに適用することで 10 個体 100 世代の進化計算を実施した．この進化計算の結果として得られた 1000 個の解を，目的関数と設計変数をあわせた 13 次元ベクタの集合として可視化した．

4.1.1 各世代における解の色分け表示

色分け表示によって得られたいくつかの知見を以下に示す．図 4,5,6 はそれぞれ，Hidden の画面左側に表示される PCP のうち 2 軸を拡大表示したものである．

図 4 から，説明変数 4 は探索区間全体にわたって多くの色彩が見られることから，遺伝的アルゴリズムの進化計算の過程に関係なく幅広く探索され続けていたことがわかる．それに対して説明変数 5 は探索区間のうち値の小さい部位に折れ線が集中しているから，進化計算の過程において早期のうちから探索区間を絞っていることがわかる．

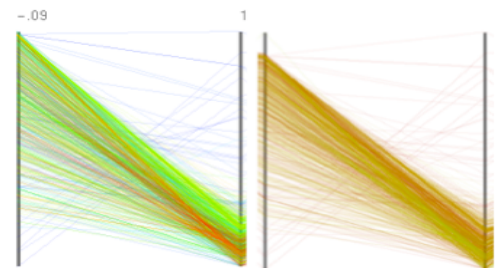


図 4 説明変数 4(左軸)と説明変数 5(右軸)

図 5 から，説明変数 10・説明変数 11 とともに，探索区間の中でも特定の区間に特定の色彩が見られる．これは進化計算の過程とともに主に探索される区間が移動していることがわかる．このことから，遺伝的アルゴリズムにおける突然変異が効果的に働いていたことが示唆される．

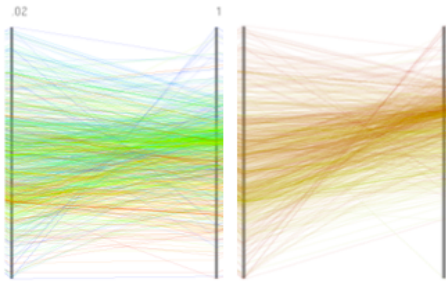


図 5 説明変数 10(左軸)と説明変数 11(右軸)

図 6 から，説明変数 1・説明変数 2 とともに，進化計算の初期段階を示す色彩のみが探索区間全体にみられ，それ以外の色彩は特定の狭い区間に集中していることがわかる．このことから説明変数 1・説明変数 2 とともに，探索区間全般にわたって探索されたのはほぼ初期世代のみで，すぐに探索区間が絞られたことがわかる．

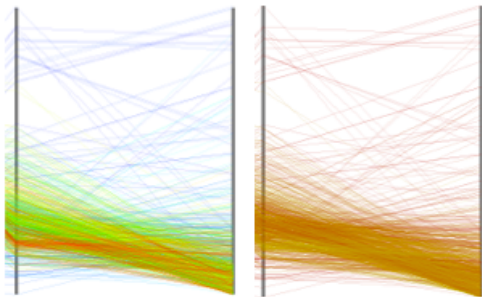


図 6 説明変数 1(左軸)と説明変数 2(右軸)

4.1.2 散布図による低次元空間の可視化

Monotonic 値と Skinny 値を図 8,9 に示す．

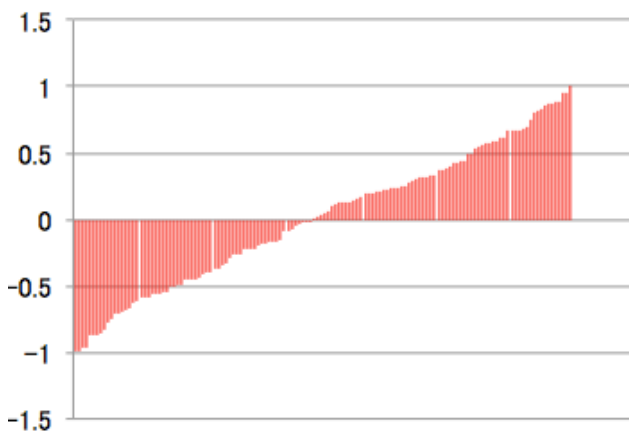


図 8 Monotonic

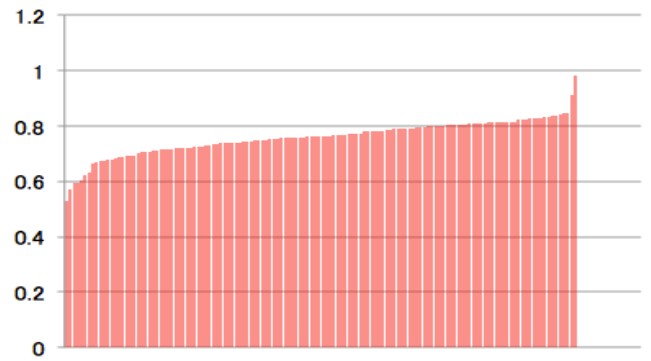


図 9 Skinny

Monotonic 値については数値が大きく分散しており，絶対値が一定以上である 2 変数は選ばないようにする，という基準として有効であるように見える．一方で，Skinny 値は 0.7～0.8 の区間に値が集中していることがわかる．このことは，今回適用した火星探査航空機翼型の設計最適化結果では，いかなる組み合わせの 2 変数間においても領域がある程度細長く，散布図で可視化する価値があると判断できる．以上のことから火星探査航空機翼型の設計最適化結果に関しては，Monotonic 値と Skinny 値の 2 値だけから少数の散布図を自動推奨することは簡単ではない．Monotonic 値と Skinny 値以外の評価基準も実装することが必要であることが示唆される．

4.2 ハイブリッドロケット設計問題

この設計最適化では，以下 3 種類の変数

- ・ 下部熱圏ダウンレンジ
- ・ 下部熱圏滞在時間
- ・ 前ロケット初期全備重量

に対し，下部熱圏ダウンレンジおよび下部熱圏滞在時間については最大化，前ロケット初期全備重量については最小化を設計目的として，以下 7 種類の説明変数を適用した．

- ・ DV1:初期酸化剤質量流量
- ・ DV2:燃料長
- ・ DV3:初期ポート半径
- ・ DV4:燃焼時間
- ・ DV5:初期燃焼室圧
- ・ DV6:ノズル開口比
- ・ DV7:射角

これらについて進化計算で得られた解を，目的関数と説明変数をあわせた 10 次元ベクタの集合として可視化した．この最適化結果では，進化計算の世代が保存されていなかったため，解の色分け表示は適用していない．

4.2.1 散布図による低次元空間の可視化

Monotonic 値と Skinny 値を図 10,11 に示す。

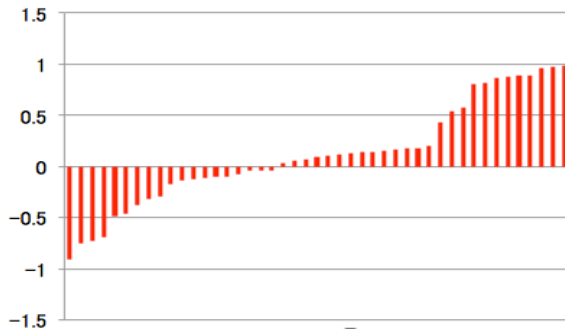


図 10 Monotonic

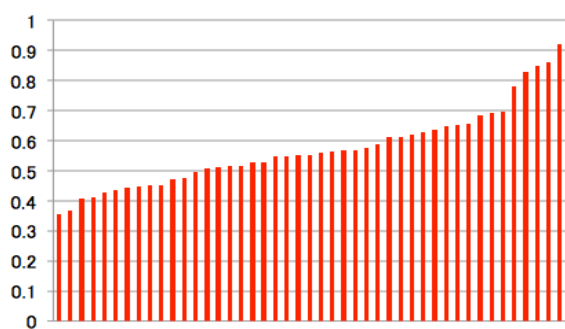


図 11 Skinny

Monotonic 値・Skinny 値のどちらも数値が大きく分散している。特に Monotonic 値に関しては、0.3 付近を境に値が変動しているため、散布図を選出する際の基準としてこの値を判断基準にすることが可能であると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本報告では、航空機設計最適化を目的とした多次元データ可視化手法 Hidden の拡張を提案した。具体的には、遺伝的アルゴリズムの進化過程の表示、可視化する価値の高い散布図の自動推薦表示、の 2 点について提案した。遺伝的アルゴリズムの進化過程の表示では、最新世代から順に異なる色相を割り当てるという色表現、第 1 世代から最終世代までを赤～黄のグラデーション表示する色表現、の 2 種類について実装を試みた。可視化する価値の高い散布図の自動推薦表示では、Wilkinson らの提唱する散布図評価基準の中から、Monotonic と Skinny の 2 種類の評価基準を実装し、その数値分布を検証した。

火星探査航空機翼型およびハイブリッドロケットエンジンに対する Monotonic 値・Skinny 値の算出結果から、扱うデータにより散布図を選ぶ際の基準として使用できる判断基準と使用しづらい判断基準が存在するという知見が得られた。特に、火星探査航空機翼型

の設計最適化結果からは、Skinny 値だけで散布図を選出することは困難である。つまり、個々の散布図の判断基準が有用であるかどうかはデータの性質に強く依存することが明らかになった。

今後の課題として、まず Monotonic と Skinny 以外の評価基準の実装があげられる。Skinny の実装については、本手法では Delaunay 三角分割アルゴリズムを適用したが、Skinny の値が一定の範囲内に収まってしまっていることから他の算出方法を検討したい。

また、現時点で著者らは航空機設計最適化結果を例として Hidden の拡張を進めているが、遺伝的アルゴリズムに代表される進化計算の結果であれば航空機設計最適化に限らず汎用的に適用可能である。このことから、より汎用的な利用を想定して引き続き研究開発を進めたい。

参考文献

- [1] M. Kubota, T. Itoh, S. Obayashi, Y. Takeshima, EVOLVE: A Visualization Tool for Multi Objective Optimization Featuring Linked View of Explanatory Variables and Objective Functions, 18th International Conference on Information Visualisation (IV2014), pp. 351-356, 2014.
- [2] 伊藤, 多次元データ可視化手法 Hidden によるコンテンツ印象分析のフレームワーク, 可視化情報シンポジウム, D106, 2015.
- [3] J. Eddy, K. Lewis, Visualization of Multidimensional Design and Optimization Using Cloud Visualization, ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC02/DAC-2006.
- [4] S. Obayashi, D. Sasaki, Visualization and Data Mining of Pareto Solutions Using Self-Organizing Map, Lecture Notes in Computer Science 2632: Evolutionary Multi-Criterion Optimization 2003, pp. 796-809.
- [5] H. Suematsu, Y. Zheng, T. Itoh, R. Fujimaki, S. Morinaga, Y. Kawahara, Arrangement of Low Dimensional Parallel Coordinate Plots for High Dimensional Data Visualization, 17th International Conference on Information Visualisation (IV2013), pp. 59-65, 2013.
- [6] Y. Zheng, H. Suematsu, T. Itoh, R. Fujimaki, S. Morinaga, Y. Kawahara, Scatterplot Layout for High Dimensional Data Visualization, Journal of Visualization, Vol. 18, No. 1, pp. 111-119, 2015.
- [7] A. Wilkinson, R. Anushka, L. Grossman, Graph Theoretic Scagnostics, IEEE Symposium on Information Visualization, pp. 21-28, 2005.
- [8] M. Utsugi, M. Kanazaki, T. Sato, K. Matsushima, Multi-Objective Design of Airfoil for Martin Airplane considering Trailing Edge Thickness, 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe, Japan, July, 2015.
- [9] K. Chiba, M. Kanazaki, M. Nakamiya, K. Kitagawa, and T. Shimada, Diversity of Design Knowledge for Launch Vehicle in View of Fuels on Hybrid Rocket Engine. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 8, No. 3, p. JAMDSM0023, pp.1-14, 2014