

航空宇宙機設計のための多次元可視化手法に対する一提案

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

^{††}電気通信大学 〒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。我々は多次元データ可視化手法Hidden を航空機設計最適化に適用するために拡張を試みてきた。散布図と並行座標法 (Parallel Coordinate Plots; PCP) の併用がその拡張の一つである。この拡張手法では、原則としてPCPで多次元データを可視化しつつ、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、それらについて散布図を併用するものである。本報告ではその拡張手法に関する続報と、航空宇宙機の設計最適化に関する事例を述べる。航空宇宙機への事例として、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および、ハイブリッドロケットの最適化結果に本手法を適用し、本報告の有用性を確認した。

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

多次元データ可視化は情報可視化の中でも重要な課題である。我々は多次元データ可視化手法 Hidden [1] 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並行座標法 (Parallel Coordinate Plots; 以下 PCP) で可視化する。我々は航空機設計の多目的最適化問題の可視化に適用するために、Hidden の拡張手法[2]を提案してきた。

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お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[3]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。

本報告は航空機設計最適化のための Hidden の拡張に関する続報を述べる。本報告では、散布図の併用による汎用的な可視化として、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[4] 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[5] 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 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[6,7]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.

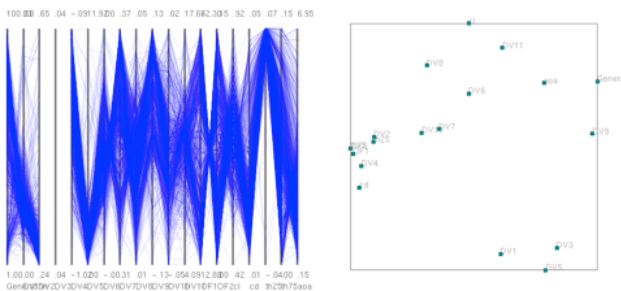


図1 Hiddenの可視化画面

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を用いて表示する. 図1にHiddenによる可視化の例を示す.

3. 散布図と並行座標法の併用による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.

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が画面の左半分複数のPCPを表示したのに対して, 提案手法では示すように, 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 [8]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.

3.1 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. 自動推薦にあたり, 散布図を取り除くための閾値を M_{select} と定義する.

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

3.2 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. ある2変数を2軸とした散布図において点群が細長く分布しているとき, 一方の変数を説明変数として他方の変数を回帰分析した際にある程度の精度が見込まれる. このような関係性のある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(1辺の長さが S_{select} 以上)を有する三角形も除去する. このとき残った三角形 A で構成される領域の周の長さ $perimeter(A)$ と面積 $area(A)$ の比を Skinnyと定義する.

$$Skinny = 1 - \sqrt{4\pi area(A)/perimeter(A)} \dots (2)$$

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値があると考えられる。

4. 対話処理

本手法を操作するためのユーザインタフェースを図2に示す。この実装では、画面上の描画領域の右側に従来の Hidden による表示が配置され、描画左側に「散布図を用いて可視化する値がある」と判断された2変数を可視化している。また、この実装では、描画領域左側に表示する散布図の優先順位を以下の方法で決定している。

1. 任意の2変数について Monotonic 値の絶対値を算出し、閾値 M_{select} との大小を比較する。
2. Monotonic 値の絶対値が M_{select} より小さい場合には、PCP での視認が難しい2変数であると判断し、上位の2変数とする。さもなければ下位の2変数とする。
3. 上位、下位それぞれで、2変数を Skinny 値でソートすることで、2変数の順位を決定する。

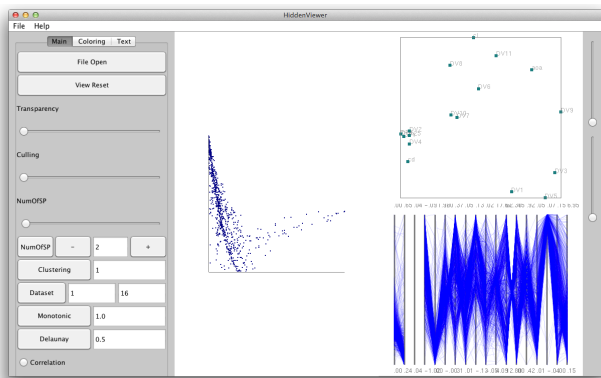


図2 著者らの実装のスナップショット

図2に示すウィンドウ左側にはスライダーとボックスボタン NumOFSP が搭載されている。これを操作することで、2変数群の中から任意の優先順の2変数を選択し、描画領域左側で散布図として表示できる。

スライダーでは左端に優先度1位の2変数が、右端に優先度最下位の2変数が割り当てられており、スライダーを動かすことでその位置の順位に対応する散布図が描画領域左側に描画される。また、スライダーを動かすことで、連動したボックスボタンにその順位が表示される。

ボックスボタンでは、散布図の順位を指定することが可能となっている。左のマイナスボタンを押すと順位が1つ下がり、それにとまって1つ低い優先順位の散布図がかわりに表示される。逆に右のプラスボタンを押すことで優先順位が1つあがる。このとき、スライダーのラジオボタンの位置もボックス内の順位と対応し変動する。

ボックスボタン Monotonic と Delaunay は、それぞれ

の評価基準の閾値を指定するために用いられる。Monotonic では M_{select} 、Skinny では S_{select} の値が変更される。

5. 適用事例

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[9]および、ハイブリッドロケットの最適化結果[10]のデータ概要について述べる。

5.1 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 $max(l/d)$
 - ・ 前縁より75%位置における翼厚 th_{75}
- 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。

5.2 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
- ・ 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、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。

6. 散布図による低次元空間の可視化

本章では、本最適化結果を構成する説明変数および目的関数の中からすべての 2 変数の組み合わせについて Monotonic 値と Skinny 値を算出し、これらをソートした結果を図 3~6 に示す。いずれの図においても縦軸は Monotonic 値または Skinny 値、横軸はその算出結果の順位を示す。

6.1 火星探査航空機主翼設計問題

算出結果の範囲は以下の通りであった。

- ・ Monotonic :
-0.98486 ~ 0.99999
- ・ Skinny :
0.52801 ~ 0.98291

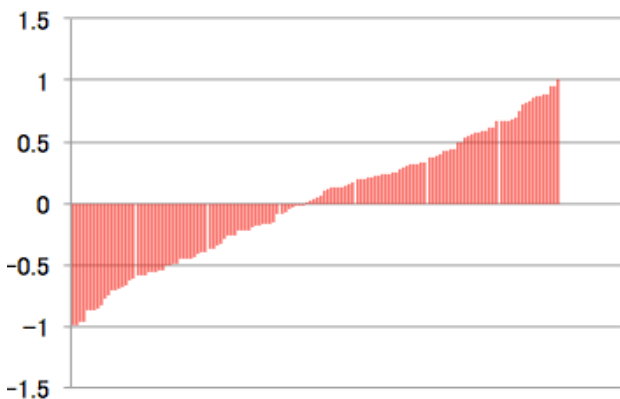


図 3 火星探査航空機主翼設計問題
すべての 2 変数間にたいする
Monotonic 値ソーティング結果.

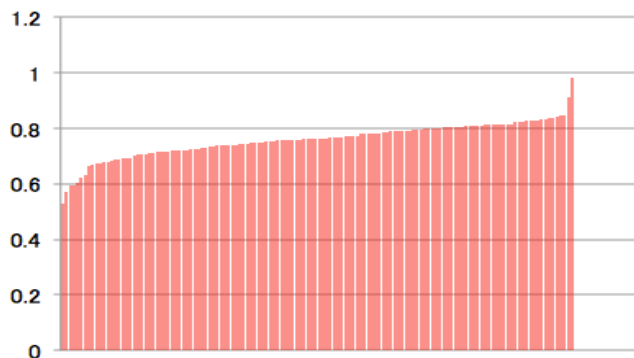


図 4 火星探査航空機主翼設計問題

すべての 2 変数間における
Skinny 値のソーティング結果.

図 3 に示すように、Monotonic 値については数値が -0.98486 ~ 0.99999 まで広く分散している。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図 4 からわかる。このことから本最適化結果では、いかなる組み合わせの 2 変数間においても散布図で可視化した際の点群の領域が一定の細長さを持ち、散布図で可視化する価値があることが示唆される。逆にいえば、Skinny 値を参照して少数の散布図を厳選することは難しいともいえる。

6.2 ハイブリッドロケット設計問題

算出結果の範囲は以下の通りであった。

- ・ Monotonic:
-0.90953 ~ 0.98071
- ・ Skinny:
0.35603 ~ 0.92343

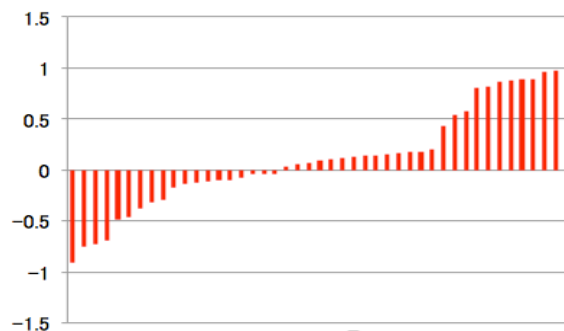


図 5 ハイブリッドロケット設計問題
すべての 2 変数間にたいする
Monotonic 値ソーティング結果.

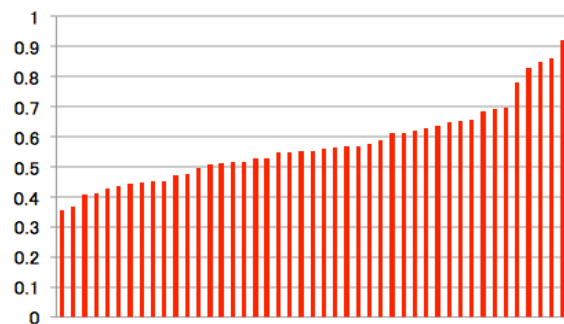


図 6 ハイブリッドロケット設計問題
すべての 2 変数間における
Skinny 値のソーティング結果.

Monotonic 値・Skinny 値のどちらも数値が広く分散していることがわかる(図 5, 図 6). 特に Skinny 値は図 4 に比べ値に偏りが見られず, 点群の領域の大きさに差があることが見てとれる.

7. 実行例

Monotonic に対する閾値 M_{select} を 0.8, Skinny に対する閾値 S_{select} を 0.6 とした際の実行結果を以下に示す.

7.1 火星探査航空機主翼設計問題

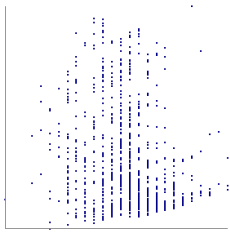


図 7 第 1 位として自動選出された散布図

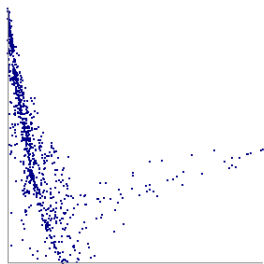


図 8 第 2 位として自動選出された散布図

火星探査航空機主翼設計問題については, 第 1 位として, 揚力係数と抗力係数の組み合わせが選出された(図 7). 第 2 位は, 最大翼厚位置と前縁より 75%位置における翼厚 th_{75} の組み合わせが選出された(図 8). どちらも点群がまとまりをもった Skinny なものであり, 点群の形の傾向は異なるもののどちらも PCP では 2 変数間の関係を視認しにくいものである.

7.2 ハイブリッドロケット設計問題

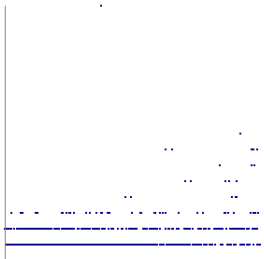


図 9 第 1 位として自動選出された散布図

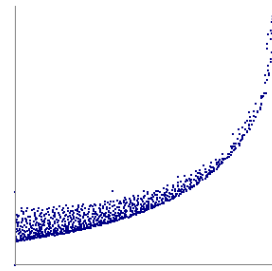


図 10 第 5 位として自動選出された散布図

ハイブリッドロケット設計問題では, 第 1 位として初期酸化剤質量流量とノズル開口比の組み合わせが選ばれた(図 9). 第 1 位から第 4 位までは第 1 位と同様複数の直線を構成する点群で表された散布図が選出された. 第 5 位として選出された散布図は燃料長と初期ポート半径の組み合わせである(図 10).

以上の結果から, 火星探査航空機主翼設計問題, ハイブリッドロケット設計問題のどちらについても, Monotonic 値は高くないが Skinny な散布図が算出されたことを確認できた.

8. 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, 多次元データを構成する変数群のうち各々の 2 変数について, 散布図として可視化する価値の高さを推測する評価手法を提案した. 具体的には, Wilkinson らの提唱する散布図評価基準の中から, Monotonic と Skinny の 2 種類の評価基準を採用した. また, それを対話処理によって操作するユーザインタフェースを示した.

さらに本報告では, 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 値の算出結果と実行例を紹介した. 実行例では, Monotonic に対する閾値 M_{select} を 0.8, Skinny に対する閾値 S_{select} を 0.6 とした際の実行結果を確認し, 本手法の有効性を確認した.

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. 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] T. Itoh, A. Kumar, K. Klein, J. Kim, High-Dimensional Data Visualization by Interactive Construction of Low-Dimensional Parallel Coordinate Plots, arXiv preprint, 1609.05268, 2016.

- [2] A. Watanabe, T. Itoh, M. Kanazaki, M. Utsugi, K. Chiba, Multidimensional data visualization for airplane design optimization, DEIM Forum 2016 F4-3, 2016.
- [3] 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.
- [4] J. Eddy, K. Lewis, Visualization of Multidimensional Design and Optimization Using Cloud Visualization, ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC02/DAC-2006.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] A. Wilkinson, R. Anushka, L. Grossman, Graph Theoretic Scagnostics, IEEE Symposium on Information Visualization, pp. 21-28, 2005.
- [9] 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.
- [10] 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