

航空宇宙機設計のための多次元可視化に対する一提案

理学専攻・情報科学コース 渡邊彩華 (指導教員: 伊藤 貴之)

1. 概要

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。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的一种であることから、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。

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。伊藤ら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。本論文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 の拡張手法を提案する。

本論文では、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 [2]。また Obayashi らは、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 [3]。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、それをもたらし説明変数を直接表現しているものではない。

3. 多次元データ可視化手法 Hidden

図 1 に Hidden [1] による可視化の例を示す。Hidden では、画面右側の次元散布図上での対話的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。画面右側における要素群の配置には、Multi-Dimensional Scaling (MDS) を用いている。また対話的操作によって選択された各次元の並び順を決定するために、クリーク (部分完全グラフ) を構成する次元群に対して巡回セールスマン問題を適用し、その経路順を PCP の次元の並び順としている。Hidden では他にも、次元サンプリング処理やクラスタリングなどを搭載しており、多次元データへの対話的な操作を実現している。

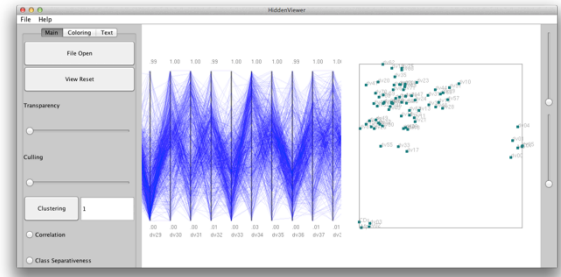


図 1 Hidden の可視化画面の例。

4. 提案手法

本論文では、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ことを提案する。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変数をより効果的に表現する。

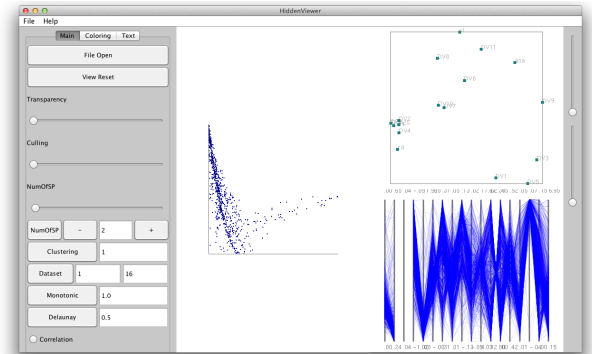


図 2 実装のスナップショット

散布図の評価には Wilkinson らが提唱した Graph-Theoretic Scagnostics [4] を適用し、散布図に関する 9 種類の特徴 (Outlying, Skewed, Clumpy, Convex, Skinny, Striated, Stringy, Straight, Monotonic) を定量評価する。この評価結果から特徴的な散布図として指標とされた 11 種の散布図に分類し、特徴的な散布図を構成する 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。

4.1 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 の計算にあたり、我々の実装では Spearman 順位相関係数を採用した。Spearman 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 Pearson 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。

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

4.2 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。散布図上で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。

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の長さとの面積の比を Skinny と定義する。領域 A に対する面積を $area(A)$ 、周の長さを $perimeter(A)$ として、

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

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。

5. 適用事例

提案手法の適用事例として、火星探査航空機翼型のデータ[5]を使用し、検証を行った。

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 $th75$

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。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。

6. 実行結果と考察

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。

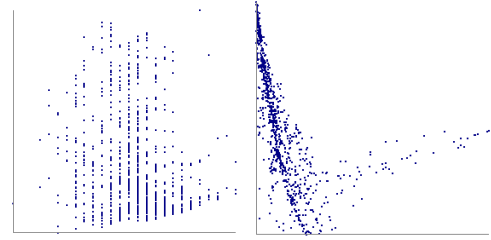


図3 (左)第1位として自動選出された散布図

図4 (右)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3)。第2位は、最大翼厚位置と前縁より75%位置における翼厚 $th75$ の組み合わせが選出された(図4)。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 変数間関係を視認しにくいものである。

7. まとめと今後の課題

本論文では、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、火星探査航空機翼型に対する実行例を紹介した。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、Monotonic と Skinny 以外の評価基準の実装や、自動選出した散布図に対する対話的なユーザーインターフェースの追加があげられる。

8. 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, Journal of Visual Languages and Computing, 2017.
- [2] J. Eddy, K. Lewis, Visualization of Multidimensional Design and Optimization Using Cloud Visualization, ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC02/DAC-2006.
- [3] 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.
- [4] Wilkinson, R. Anushka, L. Grossman, Graph Theoretic Scagnostics, IEEE Symposium on Information Visualization, pp. 21-28, 2005.
- [5] 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.