

多目的空力最適化におけるデータマイニング手法の研究

Comparative Study of Data Mining Methods for Aerodynamic Multiobjective Optimizations

立川智章¹⁾, 大山聖²⁾, 藤井孝藏³⁾

Tomoaki TATSUKAWA and Akira OYAMA and Kozo FUJII

- 1)院生 東京大学大学院 (〒229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1, tatsukawa@flab.isas.jaxa.jp)
- 2)工博 宇宙航空研究開発機構, 宇宙科学研究本部 (〒229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1, oyama@flab.isas.jaxa.jp)
- 3)工博 宇宙航空研究開発機構, 宇宙科学研究本部 (〒229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1, fujii@flab.isas.jaxa.jp)

Scatter plot matrix(SPM) with quantitative evaluation method such as coefficient correlation are applied to the results of multi-objective aerodynamic flapping airfoil design optimization problem. This visualization method make it possible to find efficiently the trade-off information between objective functions and effect of each design parameters.

Key Words : Data Mining, Multiobjective Optimization, flapping airfoil

1. はじめに

現実の空力設計について考える場合、複数の相反する目的関数を持った多目的最適化問題となることが多い。多目的最適化問題では、パレート最適解と呼ばれる複数の最適解を得ること、それにより各目的関数のトレードオフ情報、目的関数と設計変数の相関情報など設計者にとって有益な情報を見つけることが目的となる。近年、多目的設計探索(multi-objective design exploration, MODE)が大森ら[1]によって提案され、進化的アルゴリズム[2]を用いて多数のパレート解を効率的に求め、データマイニング手法を用いてパレート解を分析する研究が進められている。

最適化により得られたパレート解を分析するデータマイニング手法としては、類似度によって低次元(2次元)のマップに写像する自己組織化マップ(Self-Organizing Map, SOM) [3], 決定属性(目的関数)を決定するための必要最小限の条件属性(設計変数)の組み合わせを見つけ、決定ルールを抽出するラフ集合[4], 各目的関数に対して設計変数の影響の大きさを求めるANOVA[5], 複数の変数を横軸に並べて個体ごとに線で結ぶProfile Chart[6] [7]などがある。それぞれの手法には一長一短があり、例えばSOMではトレードオフ情報の見落としや、定量的な情報が得られないなどの課題が挙げられる。

一方、一般的によく使われている散布図を拡張したものに散布図行列がある。散布図行列は定性的な相関を見るのに適しているが、定量的な指標も組み合わせて表示することが可能であり、多次元情報の分析に適していると考えられる。実際、古環境解析などの分野では散布図

行列とさまざまな定量的な統計手法を組み合わせた研究が行われている[8]。

本研究では、散布図行列と相関係数の組み合わせを考え、羽ばたき運動の多目的最適問題に適用し、その有効性を確認する。ここで、統計計算および可視化には「R」[9]というソフトウェアを用いた。

2. 羽ばたき運動の多目的最適化

2.1 問題設定

本研究では2次元の羽ばたき翼に働く空力を2次元非圧縮Navier-Stokes方程式を用いて解析を行った。羽ばたき運動は、Fig.1に示すようにストローク面内での上下運動とピッチ運動の組み合わせからなり、次の6つの設計変数を用いる。ストローク面内の運動は、

$$x = h \cos(\alpha_s) \cos(kt) \tag{1}$$

$$y = h \cos(\alpha_s) \sin(kt) \tag{2}$$

ピッチ運動は、

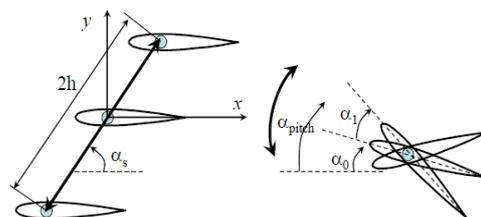


Fig.1 Definition of flapping motion

$$\alpha_{pitch} = \alpha_1 \sin(kt + \phi) + \alpha_0 \quad (3)$$

である。ここで、 x は翼の推進方向の変位、 y は翼の推進方向と直角方向の変位、 h はストローク運動の振幅、 α_s はストローク面の x 方向からの傾き、 α_{pitch} はピッチ角、 α_0 はピッチ角のオフセット角、 α_1 はピッチ運動の振幅、 ϕ はストローク運動とピッチ運動の位相差、 k は羽ばたきの無次元周波数を表す。

目的関数は、運動一周を平均した揚力係数($C_{L,ave}$)の最大化、運動一周の必要パワー係数(C_{pr})の最小化、運動一周を平均した推力係数($C_{T,ave}$)の最大化の3つを考える。

最終的に、CFDと多目的進化アルゴリズムを用いて561個のパレート解が得られた。詳細については文献[10]を参照のこと。

2.2 目的関数空間での可視化

本研究では目的関数が3つであることから、3次元の散布図に図示することができる(Fig. 2)。ここで、必要パワー係数 C_{pr} は逆数をとっているため、すべての軸について値が大きいくほど良い個体となる。薄い灰色の点が得られたすべての解、濃い灰色の点がパレート解を表す。それぞれの目的関数がトレードオフの関係になっていることがわかるが、本来立体的である3次元の図を2次元(ここでは紙面)に投影して図示しているため奥行き感がつかみにくく、正確に状態を把握することは難しい。また、目的関数が4つ以上ある場合は、図示そのものが不可能である。

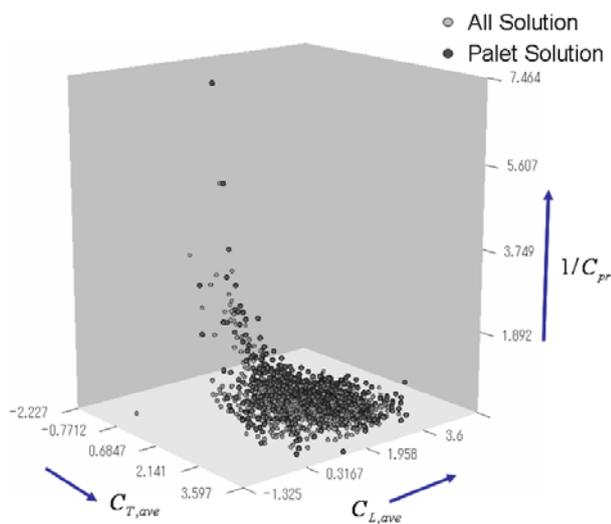


Fig.2 3D Scatter Plot

2.3 SOMでの可視化

SOMは、教師なし学習のニューラルネットワークの一種であり、多次元のデータを2次元のマッピングに写像することが可能である。このとき相似性の高い個体同士が近くなるように配置される。SOMを用いることで多数の目的関数、設計変数であっても可視化することができる。目的関数の類似性をもとにパレート解にSOMを適用した結果をFig.3に示す。

ここで、それぞれの図の同じ位置にある点はすべて同じ個体を表している。

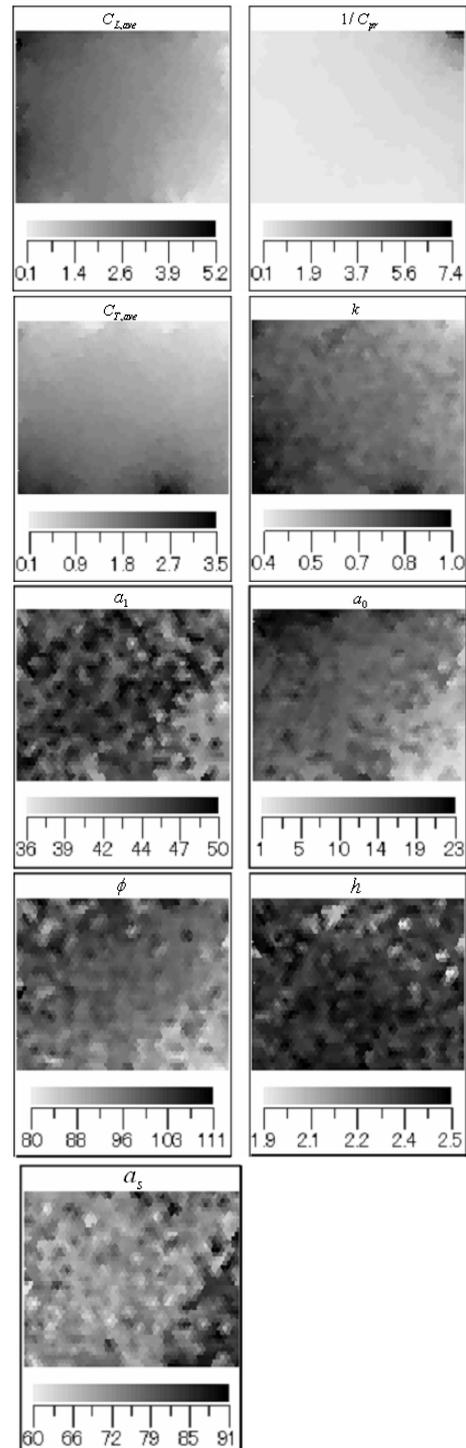


Fig.3 Self-organizing map

目的関数のマップを見ると、揚力係数 $C_{L,ave}$ と必要パワー係数 C_{pr} 、推力係数 $C_{T,ave}$ と必要パワー係数 C_{pr} にそれぞれトレードオフの関係があることがわかる。

目的関数と設計変数を見ると、揚力係数 $C_{L,ave}$ とピッチ角のオフセット角 α_0 の間に、必要パワー係数 C_{pr} と無次元周波数 k の間に相関があることがわかる。

設計変数間の相関に関しては、ピッチ角のオフセット角 α_0 はストローク運動とピッチ運動の位相差 ϕ に相関が見られる。

このように、SOMを用いることで目的関数間のトレードオフ情報、目的関数と設計変数の相関関係を見つけ出すことができる。しかし、トレードオフおよび相関の有無に関して観察者の主観で判断するため、どうしても情報を見落としてしまうという可能性が考えられる。また、目的関数、設計変数が増えてくると、マップの数も目的関数、設計変数の数だけ必要になってくるため、ひと目で全体を把握することが難しい。

3. 散布図行列と相関係数による可視化

散布図の拡張として、散布図行列 (Scatter Plot Matrix) がある。対散布図、一般化三面図とも呼ばれる。これは、各変数のすべての組の散布図を作成し、それらの散布図を行列状に配置したグラフである。 n 個の変数があった場合、 $n(n-1)$ 枚の散布図、または下三角部分を除いた $n(n-1)/2$ 枚の散布図ができる (Fig.4)。

ここで、散布図行列の目的関数で作る三角部分は、目的関数間のトレードオフを示している。目的関数と設計変数で作る四角の部分は設計変数の目的関数への影響を表している。設計変数間で作っている三角部は、パレート解のみを表示した場合、パレート解になるための設計変数の組み合わせを示している。

次に、変数間の相関を定量的に調べるために、2変数間の相関係数を求める。2変数を x, y とすると相関係数 $r_{x,y}$ は、

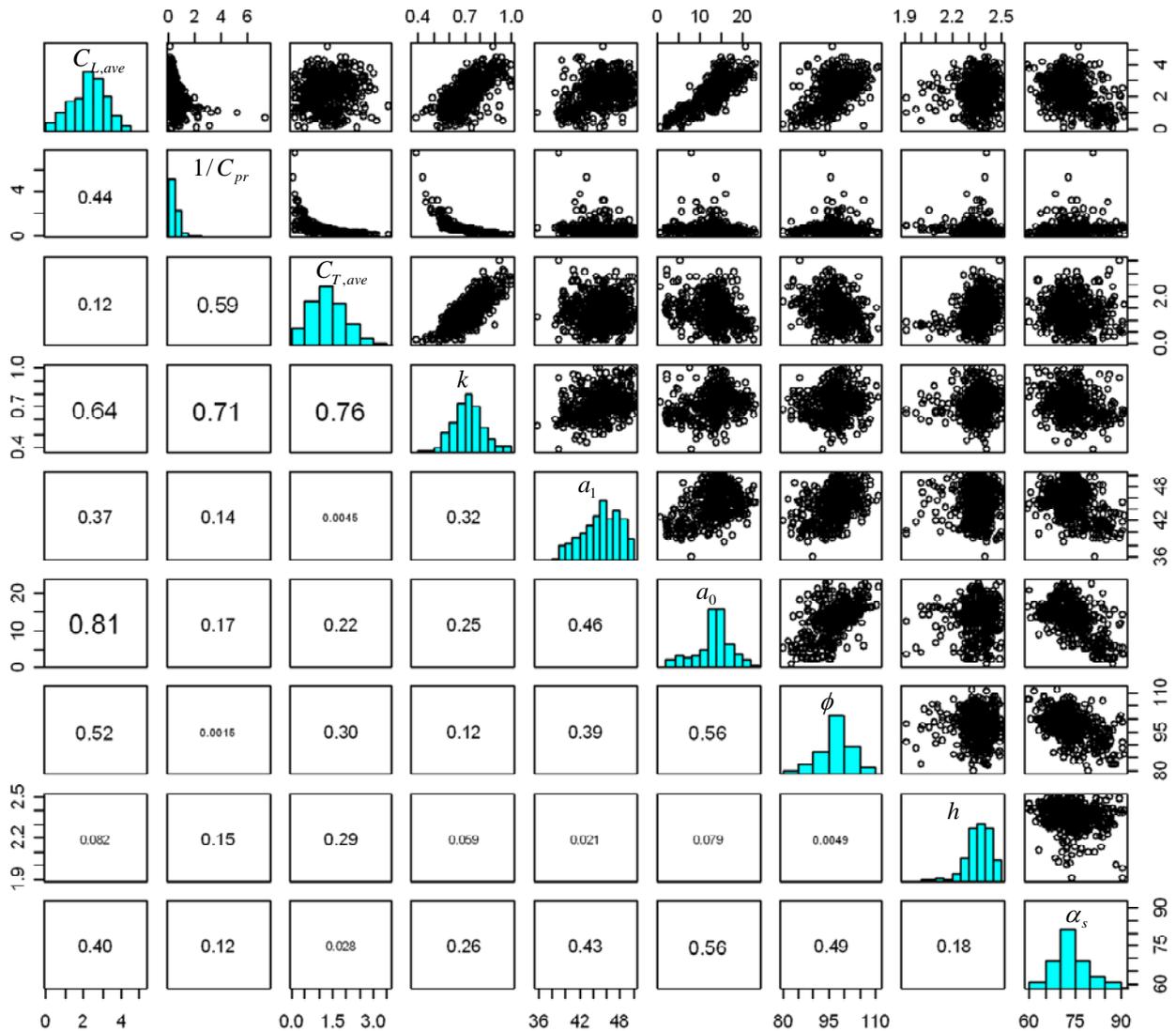


Fig.4 Scatter Plot Matrix and Coefficient of Correlation

$$r_{x,y} = \frac{S_{x,y}}{S_x \times S_y}, \quad (-1 \leq r_{x,y} \leq 1) \quad (4)$$

と表される．ここで $S_{x,y}$ は変数 x と y の共分散， S_x と S_y はそれぞれ x と y の標準偏差である．相関係数が正の値をとるときは正の相関，負の値を取るときは負の相関を表す．

散布図行列と相関係数を同時にプロットしたものを Fig. 4 に示す．上三角部分に散布図行列を，下三角部分に相関係数の絶対値を並べている．また，相関係数は絶対値の大きさによって文字の大きさを変えている．対角成分の棒グラフは，個体数のヒストグラムである．

散布図行列だけから得られる情報は，SOM から得られる情報と同じであると考えられる．しかし，相関係数と一緒に可視化ことで見落としていた情報を見つけられる可能性がある．

まず，無次元周波数 k を見ると，3つの目的関数すべてに対して大きな相関があることがわかる．一方，他の設計変数とは相関がないことがわかる．

揚力係数 $C_{L,ave}$ とピッチ角のオフセット角 α_0 の相関係数の大きさは，6つの設計変数の中で最も大きいことがわかる．

設計変数間の相関を見ると，ピッチ角のオフセット角 α_0 とストローク運動とピッチ運動の位相差 ϕ ，ピッチ角のオフセット角 α_0 とピッチ運動の振幅 α_1 ，ピッチ角のオフセット角 α_0 とストローク面の x 方向からの傾き α_s に弱い相関が見られる．

このように，散布図行列は点群の分布からからトレードオフ情報，相関情報を読み取ることができるが，相関の強弱まで読み取るとは観察者の主観だけでは難しい．これは，SOM にも同じことが言える．明らかに相関が見られる場合はすぐにわかるが，そうでない場合は相関係数といった定量的評価手法を同時に見ることで相関の強弱を客観的に見ることは有用であると考えられる．

4. 結論

最適化により得られたパレート解に対して相関係数を組み合わせた散布図行列を適用し，その有効性について検討を行った．その結果，目的関数のトレードオフ情報，設計変数の相関情報をより容易に見つけることができることがわかった．散布図行列といった定性的な可視化手法だけでなく，相関係数といった定量的な指標を用いることは有効だと考えられる．

また，散布図行列の各行および列を相関係数の大きさ等でならべ替えたり，色情報を付加することにより，より有用な可視化手法となると考えられる．

参考文献

- 1) S. Obayashi, S. Jeong, and K. Chiba: "Multi-Objective Design Exploration for Aerodynamic Configurations", AIAA Paper, 2005-4666, 2005
- 2) Kalyanmoy Deb : "Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms", John Wiley & Sons, Ltd., 2001
- 3) T. Kohonen: "Self-Organizing Maps. 2nd ed.", Springer, Berlin, Heidelberg, 1997.
- 4) 大林: ラフ集合による多目的最適化データマイニング」, 科研費シンポ原稿改訂版 (2006 年 1 月)
- 5) S. Jeong, K. Chiba and S. Obayashi : "Data Mining for Aerodynamic Design Space," AIAA Paper 2005-5079, June 2005.
- 6) 酒井, 大林: 多次元変数空間のプロファイルチャートなどによる可視化, 第 17 回設計工学・システム部門講演会, 2007
- 7) 酒井, 大林: 可視化による設計空間特徴抽出, 第 17 回設計工学・システム部門講演会, 2007
- 8) W.A. Green: Loosening The CLAMP: An Exploratory Graphical Approach to The Climate Leaf Analysis Multivariate Program, Palaeontologia Electronica, 2006
- 9) <http://www.r-project.org/>
- 10) A. Oyama, Y. Okabe, K Shimoyama, and K. Fujii: "Aerodynamic Design Exploration of a Flapping Airfoil Using a Navier-Stokes Solver", AIAA Paper,