

3次元流体シミュレーション結果比較可視化のための流線選択

澤田 頌子 (指導教員: 伊藤 貴之)

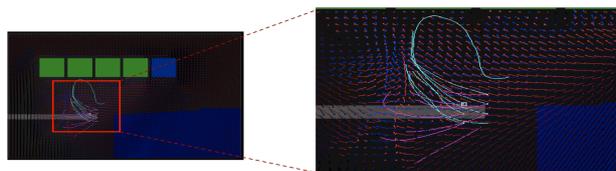


図 1: 流線生成結果の例 [1]

1 はじめに

目に見えない流体を扱う分野において、シミュレーションと可視化は非常に重要な役割を果たしている。一般的に流体シミュレーションは異なる条件で繰り返し実施するため、大量の CFD (流体力学計算) 結果が生成される。これらの計算結果を比較分析することで、流体現象の理解促進やシミュレーションの精度向上に貢献できる。本研究では異なる条件で実行された複数の CFD 結果を効率的に比較するために、流線を 3次元空間に重ねて表示する比較可視化 [1] の自動化手法を提案する。具体的には流れ場全体を大域的に把握しつつ、差分が大きい箇所注目できる流線群を自動選択して可視化する。これによって条件変更の影響を確実に発見できる、効率的な比較可視化を目指す。

2 関連研究

比較に特化した流体可視化の手法はこれまでもいくつか提案されてきた [2]。しかし多くの手法がスカラ場を対象としており、複数の結果画像を並べて表示して、ユーザに見比べさせる可視化手法である。

CFD 結果から得られるベクタ場を明確に比較するための手法として、文献 [1] があげられる。この手法では、異なる条件で実施した 2つの CFD 結果から生成される流線を 3次元空間に重ねて表示することで、流れ場の差分を明瞭化している。図 1 は羽田空港滑走路のデータを可視化した例である。異なる条件で実施した 2つの CFD 結果として得られる流れ場を、ピンクとシアンの流れで可視化しており、条件変更によって風の流れが変化することをひと目で確認できる。ただしこの手法では、表示する流線の開始点は対話的に 1つずつ設定する必要がある。そのため操作が煩雑になるだけでなく、適切な開始点設定のためには知識や経験が必要となるという問題点も残っている。

単一の CFD 結果を対象とした流線自動選択手法は既に多数発表されている。文献 [3] は、遮蔽を考慮した視認性の高い流線選択手法である。また文献 [4] は、視点操作が可能な環境下における流線選択の手法である。

3 提案手法

本手法では 2つの 3次元 CFD 結果を比較するための流線自動選択手法を提案する。これ以降、同一点を開始点とする異なる条件で行った 2つのシミュレーション結果の流線をまとめて流線ペアと呼ぶこととする。本手法では、計算対象となる 3次元空間に分布する全ての格子点を流線の開始点としており、すべての開始点において流線はペアとなっている。本手法における流線自動選択とは、流線ペアを自動選択することを意

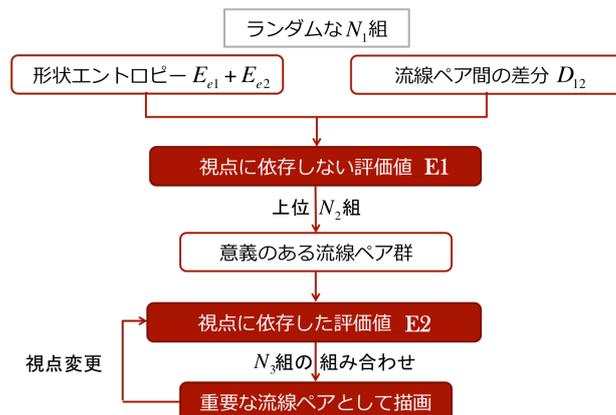


図 2: 流線自動選択の処理手順

味する。

図 2 に流線自動選択の処理手順を示す。

まず、すべての流線ペアの中からランダムに N_1 組の流線ペアを選択する。続いて N_1 組の流線ペアについて以下の 2つの評価値

- 形状エントロピー $E_{e_1} + E_{e_2}$
- 流線ペア間の差分 D_{12}

を計算する。この 2つの評価値から視点に依存しない評価値 E_1 を求め、この値の上位 N_2 組 ($N_1 > N_2$) の流線ペアを、可視化する意義のある流線ペア群として保存する。そしてこの中から、視点に依存した評価値 E_2 を最適化する N_3 組 ($N_2 > N_3$) の流線ペアの組み合わせを求め、この N_3 組を重要な流線ペアとして 3次元空間に描画する。ここで、ユーザが視点を変更するたびに E_2 は再計算されるものとする。なお以後の説明において、流線は多数の短い線分が連結された折れ線で近似生成されているものとする。

3.1 視点に依存しない評価値

まず視点に依存しない評価値の計算方法について説明する。これは形状エントロピー $E_{e_1} + E_{e_2}$ と流線ペア間の差分 D_{12} の線形和をとって求める (1)。

$$E_1 = \alpha(E_{e_1} + E_{e_2}) + (1 - \alpha)D_{12} \quad (1)$$

α の値を調節させることによって、流れ場の特徴把握と、差分が大きい箇所の発見と、どちらに重みをおくかを調整できる。

なおこの計算は、CFD 結果が与えられたとき一度だけ実施すればよい前処理である。

3.1.1 形状エントロピー

E_{e_1} と E_{e_2} は、ペアとなる 2つの流線それぞれの形状エントロピーで、この 2つは独立に計算を行うため、ここでは流線がペアになっていることを意識する必要はない。そこで、本手法のように流線ペアを選択するのではなく、ペアになっていない単一の流線自動選択の手法 [4] を適用して E_{e_1} と E_{e_2} を計算する。これによって短い流線や直線的な流線の優先度を下げ、長くうねっている流線の優先度を上げる。短い流線は視認性が低いため、そして直線的な流線は流れの特徴を

持っていないため、本手法では積極的に選択しない。本手法では (2) に示される情報エントロピーの公式をそのまま利用する。

$$E_{e_i} = - \sum_x p(x) \log(x) \quad (2)$$

形状エントロピーを算出するにあたり、まず流線を構成する各線分の速度と方向を算出する。そして各線分の速度と方向を变量とする 2 次元ヒストグラムを生成する。ここで、ヒストグラムを構成するすべての格子を X 、各々の格子を x と記述する。このヒストグラムに対して、各線分を x のいずれかに割り振り、 x の各々に対して所属線分数を集計する、ヒストグラムを構成する各区間の高さから、線分が x の各々に属する確率 $p(x)$ を求める。

3.1.2 流線ペア間の差分

続いて流線ペア間の差分 D_{12} について述べる。本手法では、ペアとなる 2 つの流線が大きく離れているほど、可視化する意義のある流線ペアであるとみなす。本研究における実装では、一方の流線を構成するある線分の端点について、他方の流線中で最も距離の近い端点を特定し、その 2 点間の距離を算出する。全ての端点について同様に距離を算出し、その平均をこの流線ペアにおける差分 D_{12} とする。

3.2 視点に依存する評価値

次に視点に依存する評価値 E_2 について説明する。本手法では、画面上での流線どうしの遮蔽や干渉を最小にする組み合わせの流線群を求めるものとする。

この問題も形状エントロピーと同様に、単一の流線自動選択の手法 [3] を参考にしている。本手法では、まず視点に依存しない評価値 E_1 が 1 位となった流線ペアを描画する。そして E_1 が 2 位の流線ペアから降順に、当該流線ペアを構成する線分の端点について、既に描画されている流線ペアの中で最も画面上での距離の近い端点を特定し、その 2 点間の 2 次元距離を算出する。全ての端点について同様に距離を算出し、この距離が閾値 δ 以下の端点が閾値 λ 以上存在すれば、当該流線ペアを描画しないことにする。これを N_3 組の流線ペアが描画されるまで繰り返す。

4 実行例

4.1 使用データ

本研究では、迎え角が異なるケースにおけるデルタ翼の CFD 結果のデータを適用した。デルタ翼とは、ギリシャ文字 Δ とよく似た平面型を持つ航空機の翼のことである。また迎え角とは、図 3 に示すように、翼の前端と後端を結んだ直線である翼弦線と、飛行方向がなす角のことで、端的に言うと、流れに対して機体がどれほど傾いているかを示す値である。

本研究では、迎え角を 20 度および 27 度に設定して実行した 2 つのシミュレーション結果を比較する。なお $N_1 = 10000$ 、 $N_2 = 1000$ 、 $N_3 = 20$ とした。

4.2 実行結果

図 4 に示す 2 つの結果は本手法を用いて流線ペア群を可視化した結果である。迎え角 20 度のシミュレーション結果から生成した流線をピンクで、迎え角 27 度

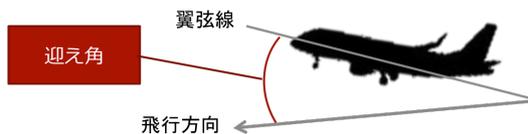


図 3: 迎え角

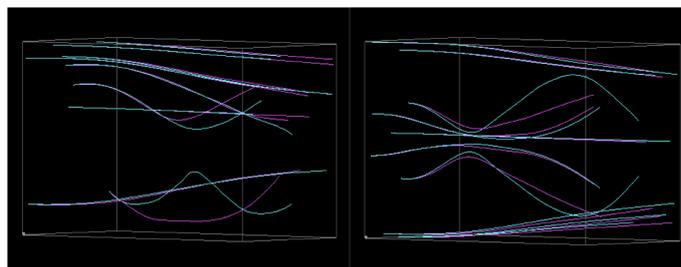


図 4: 実行例

のシミュレーション結果から生成した流線をシアンで描画している。この 2 つの結果はどちらも同じ視点であるが、図 4(右) は、現在の視点で自動選択を行った結果で、図 4(左) は、別の視点で自動選択を行った後、現在の視点に変更した結果である。図 4(左) に比べて、現在の視点で自動選択を行った図 4(右) の方が流線どうしの重なりが少ないことが見て取れる。またうねりの大きい流線や、条件変更の影響を大きく受けた差分の大きい流線ペアが選択されていることも確認できる。

5 まとめと今後の課題

本研究では条件を変更して実施した 2 つの 3 次元 CFD 結果から流線ペアを生成し、その中から適切な本数の可視化する意義のある流線群を自動選択する手法を提案した。本手法によって流体シミュレーションの条件変更によって生じた差分を明瞭化し、明確な比較が可能になると考えられる。

今後の課題として、以下の点に取り組みたい。

- 各評価地算出手法の検証と再検討
- さまざまな格子構造に対応
- 時系列データに対応

6 謝辞

本研究を進めるにあたり、東北大学流体科学研究所三坂孝志助教、大林茂教授にはデルタ翼の CFD 結果を提供していただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] K. Hattanda, A. Kuwana, T. Itoh, A Comparative Visualization for Flow Simulation of Airport Wind, NICOGRAPH international, 2013.
- [2] O. D. Lampe, C. Correa, K. -L. Ma, H. Hauser, Curve-Centric Volume Reformation for Comparative Visualization, IEEE Transactions of Visualization and Computer Graphics, 15(6), 1235-1242, 2009.
- [3] 古矢, 伊藤, スカラ場・ベクタ場同時可視化のための流線自動生成の手法, 芸術科学会論文誌, 8(3), 120-129, 2009.
- [4] J. Ma, C. Wang, C. Shene, Coherent View-Dependent Streamline Selection for Importance-Driven Flow Visualization, SPIE 8654: Visualization and Data Analysis, 2013.