流れの可視化像の画像解析*

——1枚の流跡画像における流れ方向の判別——

小倉 弘**, 亀岡利行***

Image Analysis of Flow Visualization Pictures

——Determination of Flow Direction in a Pathline Picture——

Hiroshi OGURA and Toshiyuki KAMEOKA

ABSTRACT

A method for determination of flow direction in a pathline picture has been developed. The processing system consists of TV camera and personal computer with an image acquisition board. This algorithm uses on a property of fluids that there is little irregular fluctuation of the flow direction in a small region. Flow directions are determined with inclination of pathlines and velocity vector in addition to information in the region where the velocities are already determined.

The algorithm is applied to two types of two-dimensional pathline pictures, one is the flow past a flat plate normal to itself and the other is the flow in a rectangular cavity. The results show that the present method is useful to analyze such pathline pictures.

1. はじめに

流れの中のトレーサ粒子によって可視化された流れの画像をデジタル画像処理し、流れ場の定量的な情報を得ようとする手法は、非接触で同時刻の空間的な流速分布を求めることができることから、有効な手段として定着しつつあるが、その性能・効率面については、まだ多少の改善の余地が残されている。

現在行われている代表的な手法は、微小時間差の複数枚の瞬時画像においてトレーサ粒子を追跡処理して対応付けを行って流速ベクトルを求める方法¹⁾や画像の濃度パターンの相互相関関数を計算して対応付けを行う方法^{2),3)}と、1枚の有限露光時間のトレーサ粒子の流跡画像から流速ベクトルを求める方法⁴⁾がある。1枚の画像を用いる手法は、流れ場の実体が可視化されるため、処理アルゴリズムが単純であるが、複数の流跡線の交差・重なりを分離、あるいは除去するための処理が必要なこと、また、ベクトルの方向が判別できない等のデメリットがあり、最近では複数枚の画像を用いる手法が主流になりつつある。しかし、相関係数の計算には非常に時間がかかるために、処理を高速化するためにシステムが高価になったり、複数枚の写真を得るための手順が煩雑になったりすることを考えると、1枚の流跡画像で流れの方向が判別できれば、簡単なシステムで処理が可能になり、また、これまでに撮影してあった流跡写真を処理することもできる。

1枚の流跡画像を利用して画像処理する手法における、速度ベクトルの方向の判定法の研究については、村田ら⁵⁾の数値計算による判定と、北條ら⁶⁾の流跡相互の傾斜角度を利用したものがある。

* 原稿受付 1992年3月18日

** 正会員 東京電機大学大学院理工学研究科

*** 正会員 東京電機大学理工学部

村田らの手法は、近接する四つの速度ベクトル（方向は仮定してある）で構成される四角形の平均的位置における渦度を利用するものである。

北條らの手法は、方向が既知のベクトルから方向が未知の流跡線を探索し、相互のベクトルの最も近い部分で傾斜角度を計算し、方向の判定を行うものである。

本研究では、方向が未知の流跡線から探索した方向が既知の流跡線や、複数のベクトルから求めた方向を利用して速度ベクトル方向の判定法を考案し、実際の流れの可視化像に適用して結果を検討することを目的とした。

2. 画像処理システム

画像処理システム構成を図1に示す。

図1に示したシステム構成を簡単な作業手順をもって説明する。

1) 流れの可視化実験等で得た流跡写真を、CCDカメラで撮影する。

2) CCDカメラで撮影した画像を、計算機に装着されている画像処理ボードによりA/D変換して画像データとし、ボード内のメモリICに、縦256画素、横256画素、濃度64階調のモノクロ画像として記憶する。

3) モニタには画像データを再度D/A変換して画像を表示する。

4) 2)でA/D変換して得た画像データを計算

Fig. 1 Image analysing system

機に読み込んで処理を行う。

5) 処理結果をモニタやディスプレイさらにはプリンタに出力する。

3. 画像処理の手順

本画像処理プログラムは、各処理をサブルーチン化したプログラムと、初期設定と各サブルーチンを統括するメインプログラムからなっている。

各処理は図2に示される順序で行われ、最終的には流れ場における流速分布を求めることができる。

3.1 前処理

印画紙に焼き付けられた白黒写真を入力すると、その画像は濃度分布が偏った画像（画像全体が白っぽくなる）が多くなる。照明を工夫することである程度抑えることができるが、これを改善する場合、階調変換処理を行うことで、コントラストのはっきりとした画像が得られる。

この画像を、対話型処理で2値化する。しきい値は、入力画像の濃度分布から判別分析法⁷⁾で計算し、その値を参考にしながら数回処理を行い、最適と思われる値を選択した。

3.2 流跡の抽出

2値画像から、背景と流跡の境界線を検出する

Fig. 2 Flow chart of image analysis

ことで、流跡の輪郭線を抽出する。この処理により、画像中の微小なノイズが除去される。輪郭線を8隣接で追跡処理を行って調べ、不完全なものを除去したあと、輪郭を構成する画素数を調べ、大きすぎるものは複数の流跡線が重なっているものとして、小さすぎるものはノイズとして除去する。除去する際の画素数の基準は、何回か処理を行ってみて最適と思われる数にした。

3.3 重心計算・直線のあてはめ

写真を撮影する際の露光時間が十分に短ければ、画像中の流跡は直線で近似できるものとして、流跡の輪郭を構成する画素に対し、最小二乗法を用いて直線をあてはめて、流跡線の x 方向および y 方向の長さを求める。露光時間やトレーサ粒子の直径を考慮することで速度が求められる。また、流跡の重心を輪郭構成画素の座標の相加平均で求め、速度ベクトルの始点とする。

3.4 流速分布の計算

流れ場に正方格子を想定し、その格子点上での速度データから補間し、流速分布を求める。ただし、想定した格子点上、あるいはすぐ近く（たとえば格子点から半径2画素の円内）に速度ベクトルが存在した場合、格子点上の速度をその速度ベクトルで置き換えた。

4. 流れ方向の判定

4.1 1枚の流跡写真の画像処理

1枚の流跡写真を画像処理する場合、問題となるのは、流れの方向が判別できない領域が存在する、物体後流などの逆流の領域を含む写真を解析しようとする場合である。

1枚の流跡写真から手作業で（デジタイザ等を用いて）解析を行う場合、流れの方向は作業者が写真を撮影したときの記録や記憶によって判断されていた。それによれば、逆流領域などの細かな部分を除けば、これから解析しようとする流れ場の主流方向程度はすでにわかっている場合が多い。

そこで、微小な領域内では、流れの大きさ・方向に大きな変動はないという流れの性質を利用して、すでに方向がわかっている領域の情報や速度ベクトル・流跡線の傾きから、方向が判別できて

いない速度ベクトルの方向を自動的に判別し、処理する画像処理のソフトウェアを作成した。判定の方法については次に詳しく述べる。

4.2 速度ベクトルの方向判定

方向が未知の流跡線の判定を行う場合、それに最も近い位置に存在する速度ベクトルを利用して判定を行う。ただし、最も近くに存在しても、大きさが著しく異なっている場合、基準ベクトルとしての信頼性に欠ける。そこで、流跡線の $1/2$ 以上で、最も近くに存在する、方向付けが済んでいる流跡線（つまり、方向が確定している速度ベクトル）を方向判定の基準とする（図3）。

長さの基準であるが、これから処理を行おうとしている画像が、速度変動が大きい流れ場の画像、あるいは画像中のトレーサ粒子の数が少ないような場合は、流跡線の長さにばらつきがあり、キャピティ内の流れの画像などでは流跡線長さにそれほど違いが見られない。以上のことから、処理を行う画像によって多少変更する必要がある。

このような条件を設定した場合、条件を満たす流跡線が存在せず、方向付けができなくなる二つのケースが考えられる。一つは、処理方向の関係で、周りに基準と成り得る流跡線があるにも関わらず、流跡線の位置の関係で判定の段階では基準ベクトルとして検出できなかった場合である。

図4において、最初に判定を行うのは流跡線cである。方向が既知のベクトルaと流跡線cとの距離が大きい場合、cの判定が不可能になる（流

Fig. 3 A criterion of determination

Fig. 4 Search for pathline

Fig. 5 Determination of flow direction
(determination angle=70°)

跡線 b の方向が既知だったら c の方向の判定は可能である)。このような場合、判定を保留しておき、一度その他のすべての流跡線に対し方向付けの処理を行った後、再度基準ベクトルを検出し直すことで方向付けが可能となる。もう一つは、周りに流跡線がまったく存在しない場合である。この場合、最も近くに存在するベクトルを基準としても、その距離が大きすぎれば基準としての信頼性に欠ける。基準ベクトルの探査領域として、方向付けを行おうとしている流跡の重心から半径32画素程度を始めに設定するが、その領域内に速度ベクトルが存在しない時は、探査領域を広げ、速度ベクトルを複数個検出し、その平均速度の方向を基準として用いることにした。

方向の判定は、まず図5に示すように、二つのベクトルのなす角を計算する。これがある角度以下の場合、方向付けを行おうとしている流速ベクトルの方向は、初めの仮定のままで良いとして方

向を確定させ、大きい場合、最初の仮定に矛盾があったとして、流速ベクトルの方向を反転させる。方向判定の際の基準の角度が処理結果を大きく左右する。実際に流れの画像で、角度の基準を変えながら処理を行ってみて、ほとんどの場合、基準角度70°で判定が可能だったので、70°程度が目安となる。ただし、特に速度の変動が大きい画像を処理する場合や、画像中のトレーサ粒子の数が少ない場合には基準を85°~90°程度にして処理を行った方が良い結果が得られる場合があるので、処理を行う画像によって基準角度を設定した。

5. 実際の可視化像への適用

本研究で作成したプログラムで実際に画像処理を行った例をいくつかあげる。

5.1 平板後流の双子渦

流れに対し、垂直に置かれた平板の後流の様子をアルミ紛で可視化した画像を処理したものについて検討する。流れの方向は、画像左側が上流である。平板の下流側に、一対の対称の渦が発生しているものである。図6(a)が、入力画像を前処理した後の流跡輪郭の画像である。輪郭追跡処理の際に、輪郭構成画素数が最小値8、最大値80と設定し、この範囲外にあるものは除去した。図6(b)が輪郭に対し、最小二乗法で直線をあてはめた後の流跡線の画像である。このような、物体後流の流れの画像に対し、上または下側の一方から処理を進めていくと、画像の中央付近で流速ベクトルが互いに向き合うような結果になるので、上下の二方向から判定の処理を進めた(図6(c))。処理結果を見ると、ベクトルが互いに向き合っ

Fig. 6(a) Contours of pathline
(Flat plate)

Fig. 6(b) Pathline

Fig. 6(c) Velocity vector

Fig. 7(a) Binary image (cavity)

Fig. 7(b) Pathline

Fig. 7(c) Velocity vector

いるような箇所は見られず、渦の回転の向きが観察結果と一致し、流れの向きが正しく判定されているといえる。

処理時間は、画像の入力から流速分布の表示までで約15分、対話形式で方向が既知の領域を入力する時間を含め、方向判定処理では3分程度である。

5.2 キャビティ内の流れ

流れの中に置かれた正方形のキャビティ内の流れの可視化像の2値画像を図7(a)に、前処理後の画像を図7(b)に示す。輪郭構成画素数は、最大で78であり、検出できた流跡線はすべて処理の対象とした。トレーサはアルミ紛である。すでにわかっているのは、キャビティの外側の流れの方向が画像で左から右側に流れていることである。この情報をもとに方向付けの処理を行うが、二方向から処理をすすめることはできないので、片側から処理を進めていった。方向付け処理の結果を図7(c)に示す。ベクトルの向きが向き合っているような箇所は見あたらず、正しい向きを示していると考えられる。

処理時間は、画像の入力から流速分布の出力まで約10分、判定処理だけでは約2分であった。

6. まとめ

1枚の流跡写真を利用して、複雑な数値計算を行わずに流れの向きを判定し、流速分布を求める方法を考え、実際の可視化像に対し本方法を適用し、その結果から次のことがわかった。

(1)物体の後流の場合、レイノルズ数が低く双子渦が存在しているような流れ場に対しては、本方

法で流れの方向の判定が可能である。レイノルズ数が大きくなり、カルマン渦が発生しているような流れの場合、渦が交わるような領域において誤判定が見られた。このような領域では、トレーサ粒子が多い場合(狭い領域に密集している場合)、入力する可視化写真が小さい場合、隣り合うベクトルが向き合わなければならないことがある。本プログラムでは、微小な領域内では大きな速度の変動はない、つまり隣り合うベクトルが向き合うことはないとしているので、このような領域で誤判定が発生してしまう。トレーサ粒子の選択や注入量などに十分注意し、写真をなるべく大きく引き延ばすことで処理し易い画像を得ることである程度改善できると考えられる。

判定法については、流跡輪郭の近似法を工夫し、二つの流跡線の角度の取り方を変えることで、なるべく小さな基準角度で方向判定が行えるようにし、複数方向から処理ができるようになれば処理結果の向上が望めるであろう。

(2)キャビティ内の流れの場合、抽出された流跡線の数処理に適切な範囲であれば、誤判定することなく、正しい速度ベクトルが得られた。これと似たような流れで、流れに直角なフィンまわりの流れ、狭い環状空間内の自然対流の可視化像などにも本方法を適用し、良い結果が得られることがわかった。

ただし、このような可視化像においても、渦の中心部に、周辺よりも小さい流跡線が存在した場合、誤判定が見られた。本プログラムでは、1枚の画像中では、方向判定の基準角度は一定であったが、同一画像中で、基準角度を変えながら処理

が行えるようになれば, どのような画像でも良好な結果が得られるであろう。

(3)対話形式でベクトルの方向付けを行うのとは比べ, 処理時間を短縮することができ, 作業の手間も大幅に省けた。処理時間に関しては, トレーサ粒子の数の大小や画像の違い(物体まわりか, あるいはキャビティ内か)によるが, 半分から 1/3 程度に短縮することができた。

参考文献

- 1) 小林・ほか 3 名: 二次元流れ場の実時間デジタル画像計測システムの開発, 機論 B, 55-509 (1989) 107.
- 2) 木村・ほか 2 名: 相関を利用した流れ場の速度ベクトル分布の画像計測, 計測自動制御学会論文集, 23-2 (1987) 101.
- 3) 植村ほか: 速度分布測定のための流れの可視化画像の高速処理法の開発, 流れの可視化, 7, Suppl. (1987) 11.
- 4) 近江: 二次元速度場の流跡写真の画像処理, 流れの可視化, 6-20 (1986) 19.
- 5) 村田・ほか 3 名: 1 枚の流跡線画像における流れ方向自動判定法, 機論 B, 56-524 (1990) 157.
- 6) 北條・ほか 2 名: 流跡相互の傾斜角度を用いた流れの向き of 自動解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No.46 (1991) 51.
- 7) 大津: 判別および最小 2 乗基準に基づく自動しきい値選定法, 電子通信学会論文誌, Vol. J63-D, No.4 (1980) 349.