

デジタル画像処理による流れ場の計測に関する研究

—第 1 報 流跡の撮影とシステムの構成—

Study on Flow Measurement by Digital Image Processing

1st Report : Photographing of Pathlines and Composition of System

小 林 敏 雄*・吉 武 康 裕*

Toshio KOBAYASHI and Yasuhiro YOSHITAKE

1. は じ め に

従来、流れの可視化は流れの構造を定性的に把握するための手段であったが、最近の画像処理技術の進歩により、処理速度と精度の向上が計られ、流れの定量的情報を得るための手段としても見直されつつある。流れの可視化画像の処理による流れ場の解析は、非接触で瞬時に空間的流速分布を求めることができ、可視化技術の精度が確保されれば、熱線風速計やレーザ流速計と対比される計測方法となる可能性をもっている。

トレーサ粒子による流れの可視化画像から流速を求める方法には大きく分けて二通りある。微小時間差の粒子位置を示す 2 枚の瞬時画像から粒子同士を対応づけることにより速度を求める方法^{1),2)}とトレーサ粒子の流跡輪郭から速度を求める方法³⁾である。前者における粒子の対応づけは、粒子の分布がまばらで、粒子の移動距離が粒子間距離に比べて短い場合は容易であるが、情報量を増すため粒子数を増加させると困難になる。後者ではこのような対応づけは不要であるが、逆流を含むような流れ場では速度方向の決定が困難であり、また、重なった流跡の除去や分離が必要となる。後者のこれらの問題を解決する方法として、流跡写真に粒子の始点、終点を示す写真を加えた合計 3 枚の写真から速度ベクトルを求める方法が提案されている。⁴⁾この方法は重なり合う流跡を分離することができ、三次元流れ場の解析には大きな利点をもっているが、一つは速度場を得るために 3 枚の画面を処理する必要があり、大きな記憶容量を必要とする。そこで、露光開始時にストロボスコープを閃光させることにより流跡中の始点が明るく、広く撮影されることを利用し、1 枚の流跡写真から速度ベクトルを得る独自のシステムを構成した。本報ではシステムの概略と処理結果を報告する。

2. 実験装置と画像処理装置

可視化実験装置の概略を図 1 に示す。対象とする流れ

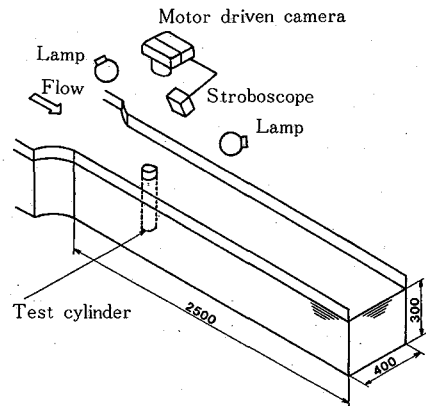


図 1 流跡写真撮影法

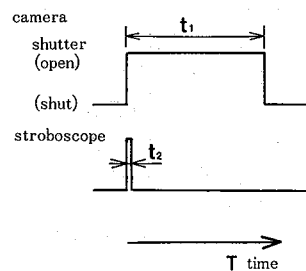
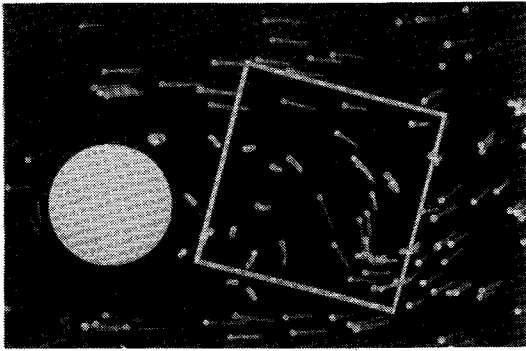


図 2 露光時間とストロボスコープ閃光時間の関係

場としては円柱まわりの二次元流を選んでる。回流水槽中に直径 50 mm の円柱を垂直に立て、この後方の流れを直径 2~3 mm のポリスチレン球で可視化する。主流の速度は約 100 mm/s に保たれており、撮影は水面上方に据えつけられたモータドライブ機構付きの 35 mm カメラで行う。シャッターはストロボスコープと同期されており、露光開始時にストロボスコープも閃光する。露光時間とストロボスコープ閃光時間の関係を図 2 に示す。ここでは $t_1=0.125$ s, $t_2=0.001$ s とする。この装置で撮影された可視化写真の 1 例、および、処理領域の拡大写真を図 3 に示す。流跡中の始点は露光開始時のストロ

* 東京大学生産技術研究所 第 2 部



↓ Flow



図 3 流跡写真と処理領域の拡大写真

ボスコープによる閃光のため、流跡の他の部分より明るく、また広く写る。この写真をミニコンピュータでコントロールされた TV カメラで入力し、256×256 画素、各画素 256 階調のデータとして磁気テープに記録する。また、このデータの数値処理は大型計算機センターの HITAC M280H で行っている。

3. 画像の処理方法

画像の処理手順の概略を図 4 に示す。まず、流跡輪郭画素を決定し、それぞれの輪郭画素に曲率コードを与える。この曲率コードを平滑化し、大きな平滑化曲率コードをもつ画素を流跡端部の画素とみなし、これらの端部画素列を円近似し、近似円の中心を流跡の始点、終点とみなすことにより、速度ベクトルを導出する。

3.1 流跡輪郭の追跡と曲率コード

可視化写真上では速い流跡や照明の不十分な部分の流跡は暗くなる。これらの暗い流跡をできるだけ正確に測定するため、流跡が背景から判別できる範囲内のなるべく低いしきい値で流跡輪郭を求める必要がある。本研究では図 5 に示す画像データの濃度ヒストグラムを参考に、しきい値を 53 とする。3×3 のマスクで画面上を走査

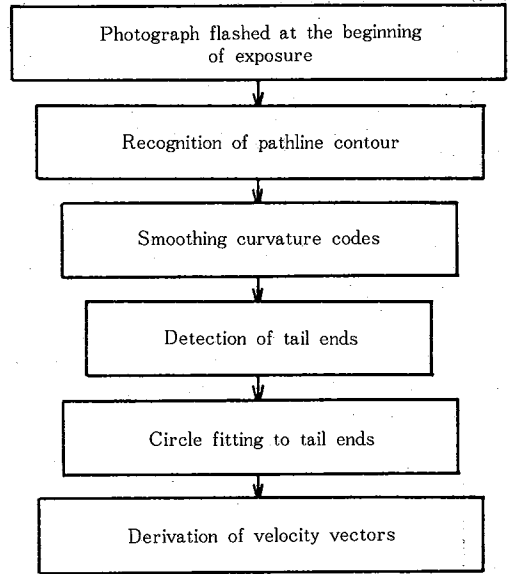


図 4 処理の手順

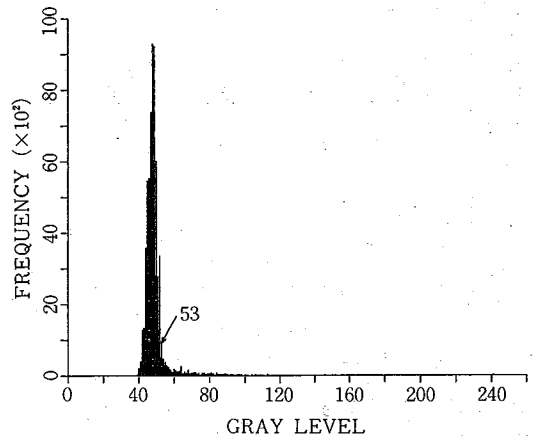


図 5 濃度ヒストグラム (図 3 に対応)

し、このしきい値以上の濃度をもつ画素を追跡する。このようにして得られた流跡輪郭を図 6 に示す。これらの輪郭にはひげのような雑音や余分な輪郭画素が含まれているが、これらは後に述べる流跡端部の検出や円近似の適用に際して支障をきたすので、除去する必要がある。ここでは流跡の各輪郭画素の曲率コードを求め、これを利用してこれらの雑音を除去する。曲率コードは M. J. Eccles⁹⁾らが筋肉繊維の断面図の処理に適用しているが、本報でもこの考え方を利用することにする。本報で用いている曲率コードと隣接する 3 輪郭画素の関係を図 7 に示す。隣接する輪郭画素の関係はすべて、-3~4 の曲率コードで示され、流跡輪郭の形状はこの曲率コードの列で表現できる。ひげのような雑音や余分な輪郭画素は

研究速報

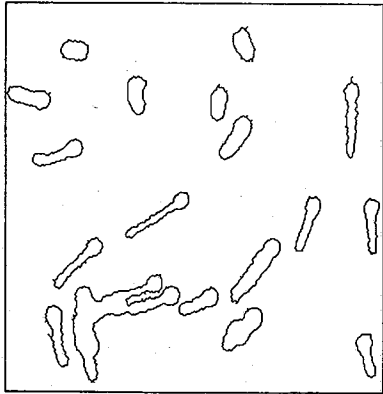


図6 流跡輪郭

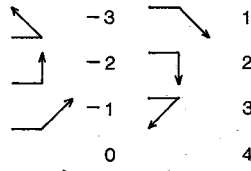


図7 曲率コードと隣接する3輪郭面素の関係

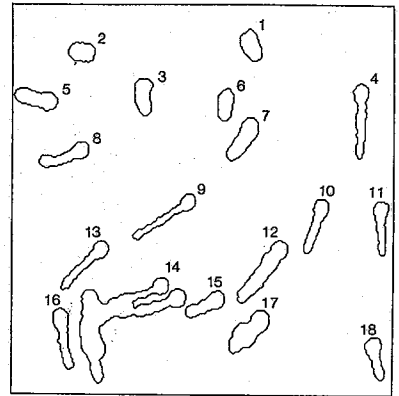


図8 修正後の流跡輪郭 (図6より)

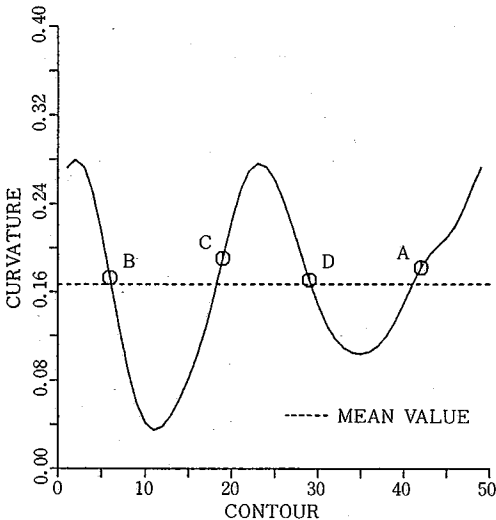


図9 No. 1流跡の平滑化後の曲率コード

2~4の曲率コードをもつので、これらの輪郭面素を消去すればなめらかな輪郭が得られる。こうして得られた流跡輪郭を図8に示す。ただし、図中の番号は各流跡に画面左上方から走査順に割り当ててある。なお図中の重なっている流跡 (No. 12, 14, 17) は同一流跡中に含まれる始点の数と始点輪郭の形状から判別し、除去する。この手法に関しては次報で詳しく報告する。

3.2 曲率コードの平滑化と流跡端部の探査

前節で得られる曲率コードは離散的な値をとるため、雑音を含んでいる。輪郭形状の特徴を判断するためには、曲率コードを平滑化し、この雑音を消去しなければならない。ここでは連続する3輪郭面素の曲率コード $C_{i-1}^?$, $C_i^?$, $C_{i+1}^?$ の平均値を新たに中央の面素の曲率コード $C_i^?$ として与え直す操作、すなわち

$$C_i^? = (C_{i-1}^? + C_i^? + C_{i+1}^?) / 3 \dots\dots\dots (1)$$

で表される操作を全輪郭面素について15回繰り返すこ

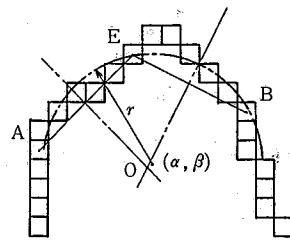


図10 流跡端部のモデル図

とにより、曲率コードを平滑化する。ただし、 n は操作回数である。この操作で得られる図8の流跡、No. 1の輪郭面素の番号と平滑化後の曲率コードの関係を図9に示す。

次に流跡端部では平滑化曲率コードが大きな値を示すことを利用して流跡端部を判別する。ここでは全輪郭面素の曲率コードの平均値をしきい値とし、この値以上の平滑化曲率コードをもつ面素を流跡端部を構成する輪郭面素 (図9のAB間、CD間の面素) として抽出する。

3.3 流跡端部の円近似と速度ベクトルの導出

トレーサ粒子はすべて球形であると仮定することによって、流跡端部を円弧で近似することができる。図10は流跡端部のモデル図である。図においてA, Bは端部輪郭面素列の始端および終端、Eはその中央の面素である。前節で得られる端部輪郭面素の座標と近似円弧の累積自乗誤差は次式で表すことができる。

$$\epsilon = \sum_{i=1}^N \{ \sqrt{(x_i - \alpha)^2 + (y_i - \beta)^2} - r \}^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 (x_i, y_i) は端部輪郭面素 i の座標、 (α, β) は近似円の中心、 r は近似円半径、 N は端部輪郭面素数である。近似円は(2)式を最小にすることによって求まるから、 ϵ の r, α, β に関する偏微分を0とおくことにより、次の連立方程式が得られる。すなわち、

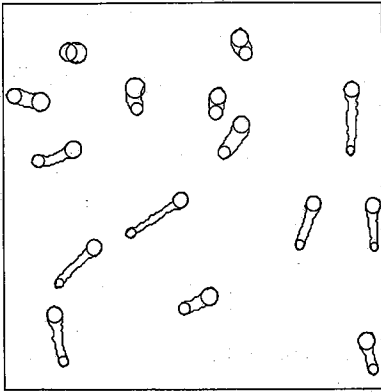


図 11 端部近似円

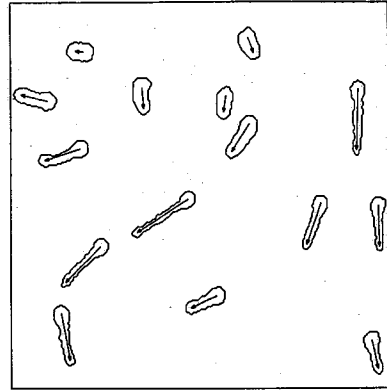


図 12 速度ベクトル

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial r} = 2 \sum_{i=1}^N \{r - \sqrt{(x_i - \alpha)^2 + (y_i - \beta)^2}\} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \alpha} = -2 \sum_{i=1}^N \{(x_i - \alpha)(1 - r / \sqrt{(x_i - \alpha)^2 + (y_i - \beta)^2})\} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \beta} = -2 \sum_{i=1}^N \{(y_i - \beta)(1 - r / \sqrt{(x_i - \alpha)^2 + (y_i - \beta)^2})\} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

(3)より(4), (5)の r が消去でき、けっきょく α, β に関する連立非線形方程式が得られる。ここでは、これらの方程式をニュートン・ラフソン法によって解いている。円中心 (α, β) の第 1 近似としては、図 10 の線分 AE, BE の垂直二等分線の交点 O の座標を与える。この操作によって求められる各流跡の端部近似円を図 11 に示す。

流跡の速度ベクトルの始点、終点の座標はこの近似円の中心座標と一致するものとみなす。また可視化写真上で始点が広く写ることを利用し、半径が相対的に大きい方の近似円の中心を始点とする。このようにして得られる速度ベクトルを図 12 に示す。

4. ま と め

1 枚の流跡写真を用いて逆流を含む流れ場の速度ベク

トルを決定する 1 方法を示した。画像データから速度ベクトルを得るまでに要する時間は HITAC M280H で約 10 秒である。本報では処理方法の報告のみにとどめたが、次報においてさらに詳しい検討を行う。

(1984 年 10 月 25 日受理)

参 考 文 献

- 1) P. R. Jonas, P. M. Kent, Two-dimensional velocity measurement by automatic analysis of trace particle motion, J. Phys. E:Sci. Instrum., Vol. 12, 1979,604-609
- 2) T. P. Chang, G. B. Tatterson, An automated analysis method for complex three dimensional mean flow fields, Proc. Intern. Symp. on Flow Visualization 3, 1983, 266-273
- 3) 小林ほか 4 名, 可視化技術と画像処理技術の円柱まわりの流れへの適用, 流れの可視化, Vol. 2, Suppl., 1982, 41-46
- 4) 小林ほか 4 名, 画像処理に適した流れの可視化方法, 流れの可視化, Vol. 3, No. 10, 1983, 193-198
- 5) M. J. Eccles et al, Analysis of the digitized boundaries of planar objects, Pattern Recognition, Vol. 9, 1977, 31-41