3 速度分布測定の為の流れの可視化画像の高速処理法の開発

大阪大学基礎工学部 植村知正^{*}、長谷川泰章

A high speed image analysis for velocity measurement
using correlation technique

by Tomomasa Uemura, Yasuaki Hasegawa

A new method to measure a velocity distribution through the analysis of the visualized image of a flow is developed. The method is characterized by two points. One is the very high speed performance. The other is its very simple and economical analyzing system. Using the system, it takes only 45 sec. to analyze a couple of 256*256*8 bit images and to obtain a set of velocity vectors. And it should be noted that it enables to evaluate the reliability of the measurements quantitatively by using correlation coefficients.

1. 緒言

流体中に混入したトレーサ粒子の運動を追跡して流れの速度を求める方法がある。この方法では、連続した数枚の画像を撮った後、画像中の一つ一つの粒子について、他の画像中の粒子との対応を取らなければならない。この一連のデータ処理を能率よく行うためには、粒子の大きさと位置のデータの抽出、および異なった時刻に撮られた画面間の粒子の対応付けに工夫を必要とする。粒子の対応付けに関してはすでにいくつかの方法が発表されているが、この部分の性能いかんで、結果の信頼性やデータの利用効率、あるいは結果が出るまでの処理時間に著しい差が現れるようである。今のところ、4枚の連続した画面の粒子を追跡する方法^{(1)~(5)}や2画面の粒子分布パターンの相互相関関数を計算する方法⁽⁶⁾などが報告されている。相互相関の方法は比較的簡単なデータ処理システムで処理できるが、正直に相関係数を計算すると計算に長い時間かかる。本報告では相互相関を計算して粒子の対応を求める方法を改良して計算時間を著しく短縮できることを示した。

2. システム構成

本画像解析システムの構成を図1に示す。流れと共に移動する微粒子の運動はCCDカメラを用いて一旦ビデオレコーダに記録される。速度測定の場合はビデオカメラから画像メモリを介して画像データを直接コンピュータに送ることもできるが、ここではソフトウェアの開発に便利のようにVTRを用いた。データの処理にはPC9801VM2に2種類のオプションボードを加えたものを用いた。1つは画像入力ボードで256*256*8bitの画面2面分の容量があり、1/30秒毎の任意の時間間隔でビデオ画面を記録できる。もう1つのボードは1.5メガバイトのRAMディスクボードで、これによって画像データが能率よく

* Faculty of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka, Japan

扱える。

3. データ処理

VTRに記録された流れの可視化画像は図2の流れ図に従って解析される。画像解析プログラムはデータ処理速度向上のためC言語で記述されている。まず、微粒子によって可視化された流れの画像を適当な時間間隔 Δt を置いて、2画面が画像メモリに取り込まれる。

粒子の識別 粒子は明るい画素の集合であるからこれを識別するために、2値化処理によって粒子を背景と区別することにした。2値化に先だって必要ならば基準画像との差を取り、明るさのむらや画面のノイズを減らしておく。2値化処理によって画像は明るい部分(1)と暗い部分(0)だけで表現され、粒子は明るい画素が幾つか集まった部分として認められる。粒子の位置や大きさを調べて整理する為の解析をラベル付けと言う。図3にラベル付けの方法を示す。2値化画像の画素を端から順に明るい画素が否かを調べて行き、 i 番目の行の t から $t+k$ の間に明るい画素を発見したとすると、上の($i-1$ 番の)行の $t-1$ から $t+k+1$ の画素の一つでも明るい画素があれば、その画素が登録されている粒子の一部とする。上の行に明るい画素が無い場合には新しく発見した粒子の一部として登録する。この操作を最後の画素まで続ければ総ての明るい画素は粒子毎に分類される。粒子の重心は構成がその座標の平均値として求められる。

粒子の対応の決定 第一画面の粒子 i が第2画面のどの粒子に対応しているかを決定するために幾つかの方法が提案されて

いる。そのうち相互相関法は種々の利点があるものの、計算量が膨大で処理時間が長くなり、実用上の問題があった。本報で新たに考案した方法は相互相関の計算量を著しく減らし、非常に速く処理を済ませることができる。図4にその概念を示す。まず時間 Δt において2つの画面を画像メモリに取り込み、次に第1画面の1つの粒子 i に着目してその粒子の重心を (x_i, y_i) とする。つぎに Δt 時間後に粒子 i が移動していると想定される領域として第2画面中に (x_i, y_i) を中心とした $m \times m$ の小領域を取り、その中に

Fig.1 Image analysing system.

Fig.2

Procedure of image analysis.

Fig.3 Labeling of pixels.

含まれる総ての粒子 (p 個) をリストアップする。こうすると第一画面の粒子 i は第2画面ではリストアップした p 個の粒子のいずれかに対応するはずである。急な速度勾配や回転運動が無いとすれば、近傍の粒子もまた i と同様の動きかたをしているから、 i 近傍の粒子の分布パターンは急には

Fig.4 Concept of identification method of particles. (Pattern matching method)

面の候補粒子に重ねた場合に近傍の粒子群

の重なりが最も多いときの候補粒子が第2画面での粒子 i であると考えられる。そこで、第1画面に粒子 i を中心とする小領域 ($n * n$) を設定し、第2画面中の小領域 ($m * m$) に含まれる p 個の候補粒子のそれぞれについて、粒子 i と対応候補粒子 j の重心のある画素を一致させるように小領域 $n * n$ を第2画面と重ね合わせて小領域 $n * n$ の中で画素同志の論理積をとる。 $n * n$ 個の論理積のうち true の数を L とすればこの重ね合わせの相互相関係数 C_{ij} はつぎの式で表わされる。

$$C_{ij} = L / \sqrt{(q * r)} \dots (1)$$

ただし、 q, r はそれぞれ第1画面と第2画面における $n * n$ 領域内の明るい画素の数。この方法では $n * n$ 個の論理積をただ p 回計算するだけで機械的に粒子間の対応を決めることができる。さらにその得られた対応関係を数値的に評価できる点が優れている。

粒子の対応を決定すると、速度ベクトルは両方の粒子の重心間距離から計算される。第1画面上で重心が (x_i, y_i) にあった粒子 i が、 Δt 時間後の第2画面では (X_i, Y_i) に移動しているとすれば、この粒子の速度 V_i は近似的につぎの式で表わされる。

$$V_i = ((X_i - x_i) / \Delta t, (Y_i - y_i) / \Delta t) \dots (2)$$

4. 測定例

最初に水路の急拡大部分の流れの測定例を示す。この流れの中心部は噴流が形成され、噴流と壁の間の部分は低速の回転流れがあり、二つの流れの境界に速度勾配の大きい部分がある。

Fig.5 Velocity vectors in a sudden expansion flow. (Before and after elimination of inadequate data.)

Δt 時間だけ離れて取り込まれた2枚の画像について、小領域の大きさを $m = n = 35$ に設定した場合、小領域内の候補粒子の数 p は1~5個であった。 $p < 2$ の場合は相関の意味が無いので除いて、相互相関係数の評価によって粒子の対応を取って得られた速度ベクトルを図5 a に示す。噴流部分では速度ベクトルは一応得られているが、噴流脇の

循環流れの部分では得られたベクトル数も少なく、一見して明らかに間違っただベクトルが見られる。循環流れ部分では粒子の移動距離が短く、測定精度は極めて悪い。この画像の粒子密度、時間間隔は速度の速い噴流部分には適当であったが、速度の遅い循環流れの部分の測定には粒子密度、時間間隔共にもう少し大きく取るべきであろう。

次に粒子群が回転している場合に、回

転を含まない平行移動だけでパターンの対応が取れるか否かを調べるために回転円板上に粒子を均一に散布して、円板の回転速度を測定した。この場合には相関係数の値は前の場合と比べて低下しているが、回転の中心付近以外ではまえと同じ方法で粒子の対応を取ることができた。図6aはこの場合に得られた速度ベクトルである。

Fig.6 Velocity vectors on a rotating disc.
(Before and after elimination of inadequate data.)

過誤ベクトルの除去

過誤ベクトルの発生する場合を調べて見ると、a) 最大の相関係数と次の相関係数の値が近い場合、b) 相関係数の値が著しく小さい場合、c) 粒子移動量が数画素以下の場合、d) 小領域内の粒子数が少ない場合、e) 第2画面の小領域の画素数が第1画面のそれよりかなり多い場合、などの原因がひとつ又はいくつか重なっていることが分かった。そこで最大の相関係数 C_m と2番目に大きい相関係数 C_2 の比が一定値以下になる場合のデータを除去した結果が図5bと図6bである。

処理時間 粒子画像の2値化から速度ベクトルを求めるまでに要した時間は画面の粒子数50個の場合で約45秒であった。この値はもっと粒子数が多い時や画素密度が高くなると長くなる。

5. 結論

本報告ではパーソナルコンピュータによる比較的簡単な画像解析システムを用いて、運動する粒子画像を解析して、実時間的に速度分布を求める方法を示した。この方法の特徴は解析システムが容易に構築できること、解析時間が短いことである。

6. 参考文献

- (1) 植村知正ほか：“粒子追跡による速度測定法のコンピュータシミュレーション”、流れの可視化、6-22(1986)、225、
- (2) 笠木伸英ほか：“画像処理による流れ場の三次元計測”、流れの可視化、7-26(1987)、283
- (3) 小林敏雄ほか：“二次元流れ場の実時間画像計測の一例”、流れの可視化、7-26(1987)、289
- (4) 渡辺義明ほか：“VTRを用いたトレーサ追跡による流れ場の計測——二次元計測——”、流れの可視化、7-26(1987)、301
- (5) 渡辺義明ほか：“VTRを用いたトレーサ追跡による流れ場の計測——三次元計測——”、流れの可視化、7-26(1987)、305
- (6) 木村一郎ほか：“相関を利用した流れの画像計測”、流れの可視化、6-22(1986)、105