1 3 6 画像変形方式 P I V 法の提案

北洞 貴也^o (湘南工科大学)、 笠原 鋼一 (横浜国立大学院生)
黒川 淳一 (横浜国立大学)、 松井 純 (横浜国立大学)

Proposition of PIV Using Transforming Image Method

Takaya Kitahora, Kouiti Kasahara, Junichi Kurokawa and Jun Matsui

ABSTRACT

Conventional PIV method in which cross correlation coefficient is used has problem that erroneous vectors occur considerably if the correlation matrix is reduced to raise the space resolution. In tracer image, small turbulences are generally included in the average flow. In present algorithm, searching for image in correlation matrixes and dividing the matrix are alternated, and after that the second image transforms to approximate to the first image by using these value. Shift vectors at each point are obtained by repeating these operation until satisfying necessary space resolution. It is possible to search directly for a position where a correlation coefficient indicates the maximum value, because the shift distance is always smaller than the correlation matrix size. And decrease in computation time and prevention of erroneous vectors are expected from this method.

Key Word: Flow Measurement, Particle Image Velocimetry, Digital Image Processing, Image Transformation, Cross Correlation, Erroneous Vector

1. 緒 論

流れの可視化画像の濃度変化によるパターン的一致度を相互相関係数から求める一般の P I V 法は、空間分解能を上げるために相関マトリクスを小さくすると過誤ベクトルの発生が増えるという問題がある。多くの研究では、撮影された画像の輝度変化の密度から試行錯誤により相関マトリクスの大きさを決めている^{(1) (2)}。また、相関マトリクスを小さくすると相関係数の極大値を示す点が多数現れるので、ある程度の捜査範囲を設けて全ての点で相関係数を計算し最大値を求める必要があり、計算時間がかかる。

流れをトレーサ法により撮影した画像の多くは、広い領域での平均的な流れによる輝度パターンの移動の中に小さな乱れ等による移動が加わっていると考えられる場合が多い。そこで、2時刻の画像間の移動ベクトル分布を求めるのに、以下の新しい方法を試みた。まず広い領域での相関マトリクスにより平均的な移動ベクトルを求め、これと逆向きに後時刻での画像を移動させることにより前画像のパターンに近づける。以降相関マトリクスを分割して各領域での残りの平均移動ベクトルを求めながら後画像を前画像に近づける。これを繰り返して、十分小さな相関マトリクスの各位置における移動ベクトルを得る。

これにより、常に相関マトリクスの大きさに比べて画像イメージの移動量を小さくできるので、相関係数の増大する方向へ1次元的に追跡してゆけば最大値を示す位置が求められ、誤った追跡の防止や計算時間の短縮が期待できる。

2. 速度計算方法

2. 1 画像撮影方法

Fig. 1 に示す簡単な装置により、流れの可視化画像を得た。超音波式加湿器から吐き出される水ミスト流れをデジタルビデオカメラレコーダにより記録した後、データ入出力ボードを介してパーソナルコンピュータのハードディスクへ動画画像データを記録する。本来は断面速度を求めるためにスリット光を照射すべきであるが、装置の制限により上方から全体へ蛍光灯の光を当てた。取り込まれた動画画像データはソフトウェアによりコントラストを強調する処

Fig.1 Experimental apparatus

理をした後で約1/30秒間隔毎のアスキー形式による画像データへ分解して速度計算用プログラムの入力データとした。画像は $x \times y = 720 \times 480$ 画素の大きさで、1画素は256階調の輝度レベルで表される。撮影した画像の1フレーム目を Fig. 2(a)に示す。ミストの濃淡や影等で生じる輝度パターンの変化密度は少なく、通常のPIV法ではパターンが一致する位置を特定することが困難な画像となっている。

2.2 画像変形法

相関を求める前時刻の画像と後時刻の画像間の輝度パターンの相互相関係数は一般的に用いられている式(1)により求める⁽³⁾。

$$R_{fg}(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{i=1}^{nm} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{nm} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{nm} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad \dots(1)$$

ここで、相関マトリクスは $x \times y$ 方向で $n \times m$ 画素の大きさを持ち、 Δx 、 Δy は後画像の相関マトリクスの位置が前画像からどれだけ動いているかを示す。 f_i 、 g_i はそれぞれ前画像と後画像で相関を比較する画素の輝度レベルを示し、添え字 i は相関マトリクス内の画素を左下から x 方向に番号付けしている。 $\bar{f}_i$ 、 $\bar{g}_i$ は相関マトリクス内の平均値を示す。

画像信号はNTSCによるインターレース方式によるため、1フレーム画像中表示される2つのフィールド画像の時間差を原因とする1画素幅の横縞が生じる。この影響を補正するために、その画素の上下の値も用いた重み付き平均 $(2f_i + f_{i-n} + f_{i+n})/4$ をした値を改めて輝度レベル f_i と置き換え、 g_i についても同様にして式(1)を計算している。

相関マトリクスを小さくすると、その中で輝度パターンの変化が少なくなるので、同様なパターンを示す場所が多くなり相関係数の極大値を示す場所が多数現われる。しかし例えば相関マトリクスを 200×200 画素程度に大きく取ると、Fig. 3に示すように相関係数は輝度パターンの一致する方向へ単調増加して行く。そこで、誤りのない追跡を行うために以下の方法を用いることとした。

Fig. 4(c)に示すように相関マトリクスを、後節で述べられる周囲に設けたスペースを除いた画像全体に取り、後画像の平均移動ベクトルを求める。この際に相関係数は単調増加するので、 x 方向と y 方向を1次的に繰り返しながら値が増加する方向へ追跡することで最大値を示す位置を求めることができる。また捜査領域を設けて計算する必要が無いので計算時間の短縮になる。その後 Fig. 4(d)の実線に示すように、後画像全体を求められた平均移動ベクトルと逆の方向へ平行移動する。次に前画像の相関マトリクスを点線のように x と y 方向にそれぞれ2分割した4領域について同様に追跡を行う。初期の状態よりも後画像

(a) $t=0(s)$

(b) Transformed image ($t=1/30(s)$)

Fig.2 Tracer image

Fig. 3 Cross correlation coefficients contour in case of large matrix

は前画像に近づいている場合が多いので相関マトリクスが小さくなくても1次的な追跡が行える。求められた4点の移動ベクトルは前画像の各分割領域の中心での値であるとして、その他のすべての画素についても4点の内側領域については双1次補間により、外側については補外により移動ベクトルを求める。先に画像を平行移動したのと同様に、求められた移動ベクトルの終点にある後画像の画素の輝度を始点に移動して Fig. 4(e)の実線に示すように画像を変形する操作を行う。以降同図の点線に示すようにさらに各領域を4分割しながら十分な空間分解能が得られる相関マトリクスのサイズまで同様の操作を繰り返す。本計算では相関マトリクスの大きさは領域を分割する事による大

Fig. 4 Method to transform image

Fig. 5 Shift vectors distribution

Fig.6 Time averaged vectors distribution for 1 second

きさと一致させているが、これは異なってもかまわない。

2. 3 計算時間短縮の方法

本方法は、初めに行われる広い領域での相関係数の計算に時間がかかる。相関マトリクスは相関係数が画像パターンの一致する方向へ単調増加する大きさであれば良いので、初めの全領域での追跡を省略して、4分割から始めた方法も試みた。これを高速化手法1とする。また、本方法では

Fig.7 Calculation time to obtain one vectors distribution

x 方向への追跡と、y 方向への追跡を交互に繰り返して最大値位置に近づけて行くと、マトリクスが大きければ x 方向への追跡を行う際には y 方向の画素の比較はまばらでも問題ない。そこで各分割数での相関マトリクスの y 軸方向長さを 10 当分した位置にある x 方向画素ラインについてのみ相関を比較した。y 方向の追跡時についても同様に x 方向には比較する画素をまばらにして計算時間の短縮をした。これを高速化手法 2 とする。

3. 計算結果

3. 1 ベクトルの算出

2. 1節で撮影した画像の初めから0秒時と1/30秒時の画像を用いて上記手法により縦と横の分割数がそれぞれ32になるまで行い、後画像を前画像に近づけた結果をFig. 2(b)に示す。周囲の一部が黒くなっているのは画素が領域外から移動してきたためである。Fig. 2に示すように周囲に相関を比較しないスペースを設けたのは、このようなデータの無い領域が現れるからであり、本処理では70画素の幅をとっている。この手法から求めた移動ベクトル分布をFig. 5に示す。32×32の分割点で求められた移動ベクトルを双1次補間して示している。空間的に細かな変化が現れているが、過誤ベクトルは見られない。細かな乱れやわき出しのように見えているのは、流れの乱れによる影響以外にもミスト全体に光を当てているために、ミスト塊表面の動きや奥行き方向の速度の違いによる影響が現れたものと思われる。

0 秒から 1 秒までの 30 時刻の速度データを平均した結果を Fig. 6 に示す。乱れは平均化したことにより無くなり、ビデオにより目視観察した平均の結果と同様な方向に流れていることを確認した。

3. 2 計算時間

Fig. 7 には横軸に相関マトリクスの 1 辺をいくつまで分割したのかを 2 の指数により表わし、1 時刻当たりのベクトル分布を求めるのにかかる時間を●印に示している。これは、データをハードディスクから入出力するのにかかる

時間である1.5秒を含んでいる。高速化を全く行わない場合（▲印）と、高速化手法1のみ行った場合（■印）の所用時間も示しており、初めに行う全領域での相関を省略したことによる効果と、相関をまばらに取ったはことによる効果は同程度に大きく、分割数が粗いうちほど高速化の効果の割合が大きいことが分かる。なお、それぞれの手法でのベクトル分布結果はほぼ一致することを確認している。

4. 結論

広い領域で平均的な速度を求めた後、後画像を移動するということを、領域を小さくしながら繰り返し、画像を変形して前画像に近づけながらイメージの移動速度を求める方法を試みて、以下の結果を得た。

（1）水ミストの流れを撮影した輝度変化密度の少ない画像でも、過誤ベクトルは生じないことを確認している。時間平均したベクトルは空間的に滑らかに変化する結果が得られた。

（2）全領域での相関係数の計算を省略することや、 x と y 方向の追跡を交互に行う際に相関を取る画素を追跡方向と垂直にはまばらに取ることにより、計算時間を短縮することができた。

参考文献

- （1） 池上詢、ほか3名：粒子画像の相互相関を用いた噴流内ガス流動計測、機械学会論文集B編、Vol. 62, No. 593(1996), PP. 297-303
- （2） 速水洋、ほか3名：画像処理法によるポンプ水車羽根車内流れ計測、機械学会論文集B編、Vol. 59, No. 567(1993), PP. 3524-3528
- （3） 木村一郎、高森年、井上隆：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、Vol. 23, No. 2(1987), PP. 101-107