相関法を用いた二次元流速分布計測における 過誤のベクトルの補正*

大場光太郎**, 石原 正***, 猪岡 光***

Correction of Erroneous Velocities in Two-Dimensional Flow Estimation Using Correlation Method

Kohtaro OHBA, Tadashi ISHIHARA and Hikaru INOOKA

ABSTRACT

In image processing of two-dimensional flows, correlation method is widely used to estimate the velocities of the flows. However, it has been pointed out that the method often provides erroneous velocities for disturbance flows. In this paper, we discuss the correction of the erroneous velocities. Considering the relation between the sampling time and the erroneous velocities, we propose to correct the error by effective use of additional images sampled between the original ones. In addition, we propose an alternative method which does not require the additional images. This method is based on the fact that the size of the matrix for the computation of the correlation is essential for the correct estimation. The correction of the erroneous velocities is achieved by adjusting the size of the matrix according to flow patterns. Experimental results are presented to confirm the validity of the proposed methods.

1. まえがき

近年、画像処理を用いた二次元流速分布計測は、さまざまな手法を用いて行われている。例えば、流れの中のトレーサを追跡する手法¹⁾、画面間の相互相関関数が最大となる場所を移動量とする手法^{2), 3)}、画面の時間微分、空間微分を用いて移動量を求める手法⁴⁾ などがある。

これらの解析手法の中で、画面間の相互相関関数が最大となる場所を変位とする方法(相関法)は、画面間の動きがほぼ平行移動であるときは、誤差が少なく有用な手法であることが確かめられている^{2), 3)}。しかし一般的な流れに対しては、相関法を用いて得られる速度分布には過誤のベクト

ルを含むことが指摘されている。

そこで本報告では、過誤のベクトルが発生する要因について考察し、ベクトルの補正を行う二つの手法を提案する。第一の手法は、基本とする二枚の画面の間に、画像サンプリング時間を小さくして得た画面を取り込み、逐次相関することで最終的な流速分布を求める手法(時間感度法)である。第二の手法は、相関関数を計算するマトリクスの大きさを、部分的に変化させる手法(部分空間感度調整法)である。この二つの手法をカルマン渦の二次元流速分布計測に適用し、その有効性を検討する。

2. 実験装置

本研究で用いた画像処理装置は、1/1000sec シャッター付きの CCDビデオカメラ(NATIONAL M21), 画像入力装置(フォトロン FDM98-4),

*原稿受付 1988年8月8日

**正会員 東北大学

***東北大学

(a) $t=0$ sec(b) $t=1/15$ secFig. 1 Image data ($Re \approx 3000$).

Fig. 2 Time-varying spatial image.

パソコン (NEC PC9801) である。

実験の測定対象は、一様流れ中にある 40mm の半円柱後流に生じるカルマン渦である。そこでこの流れの液面にアルミ粉末を浮かせ、流れ上面からビデオカメラで撮影した。この連続画像の中から Fig. 1 に示す二枚の画像を取り出し、画像処理を用いて解析を行う。二枚の画像の画像サンプリング時間は $\Delta t = 1/15 \text{ sec}$ である。

3. 相関法を用いた速度ベクトルの計測

相関法のアルゴリズムは、従来用いられている手法と同じものを用いた。すなわち Fig. 2 に示すように、時間差 Δt で取り込んだ二枚の画像 f , g に対して、第一画面 f の観測点 (x_0, y_0) の周りに $n \times n$ のマトリクス f を設ける。このマトリクスに対し、二枚目の画像 g 上の任意の点 (x, y) の周りに、同じ大きさのマトリクス g を設ける。この二つのマトリクスについて(1)式のような相関関数を取り、この値が最大となる点を $f \rightarrow g$ の移動点とする。このマトリクス要素の番号は、

左上から順につける。

$$R(f(x_0, y_0), g(x, y)) = \frac{\sum_{i=0}^{n^2-1} \{(f_i - \bar{f}) \cdot (g_i - \bar{g})\}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n^2-1} (f_i - \bar{f})^2 \cdot \sum_{i=0}^{n^2-1} (g_i - \bar{g})^2}} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{f}$, $\bar{g}$ は、 f_i , g_i の平均値を表す。

ところで、二枚目の画像のすべての点周りのマトリクス g について、 f との相関関数を計算するのは時間がかかる。そこで、二枚目の画像において観測点 (x_0, y_0) に対応する点の周りに小領域を設け、その中でのみ相関関数 $R(f, g)$ を求めた。

以上のアルゴリズムを用いて実際に流れの測定を行う前に、簡単な回転円盤の速度分布を測定し、この手法の妥当性および正確さを確かめた。その上で、半円柱後流に生じた二次元流れを解析すると、Fig. 3 のような結果が得られた。この時のマトリクスの大きさ $n=15(\text{pixel})$ 、相関関数を求める小領域の大きさは $35(\text{pixel}) \times 35(\text{pixel})$ である。

Fig. 3 Optical flow with the correlation technique.

この結果を見ると、流れの中で平行流は正確に検出されているが、流れが合流している点など二、三か所の観測点では、過誤のベクトルを生じている様子が分かる。

4. 相関法における過誤のベクトルの要因

マトリクスで相関をとる時の過誤のベクトルを生じる要因としては、流れがマトリクス内において平行移動以外の変形を起こしていることが挙げられる。例えば Fig. 4 に示すような、回転、ゆがみ、ひずみ、拡張、縮小といったものが考えられる。そこで実際の流れの測定では、マトリクス内の変形を考慮した相関関数を考える必要がある。

Fig. 4 Causes of erroneous velocity.

これらの変形を考えたとき、マトリクスが同じ物体を含むとマトリクス内の濃淡値ヒストグラムが同じになる。そこでこの濃淡値ヒストグラムの相関関数を取り、それからの移動量を出す方法が考えられる。この方法は、固体物体の動きの推定など、濃淡値ヒストグラムに特徴のある画像に対しては良好な結果を示すと思われる。しかし今回用いた画像データは、アルミ粉末が一様に混じっているため、各点における濃淡値ヒストグラムの相関関数には大きな特徴が見られず、この方法を用いても良好な結果は得られなかった。

そこで相関法によって得られた過誤のベクトルの補正方法として、次のような時間感度、および空間感度を变化させる方法を提案する。

5. 相関法の時間感度

まず、物体の移動と画面のサンプリング時間との関係について考える。サンプリング時間が物体の移動速度に比べて大きいときは、物体の移動およびマトリクス内の変形が大きくなるため、過誤の速度ベクトルを生じやすい。反対にサンプリング時間を小さくして計測を行うと、過誤のベクトルは生じにくくなるが、各観測点における動き量(速度ベクトル)が小さくなるため、流速分布は見にくいものとなる。

そこで画面 f と画面 g についての流速分布を求めるとき、この f, g 画面間に何枚かの画像を取り込むことが可能であるなら、この k 枚の画面 $f^i (i=1, \dots, k)$ を使って次の方法で速度ベクトル

Fig. 5 Optical flow with the first method.

を求める。すなわち f の観測点 (x_0, y_0) について、相関関数 $R(f(x_0, y_0), f^1(x, y))$ を計算し、この値が最大となる f^1 への移動点 (x_1, y_1) を求める。次に $f^1 \rightarrow f^2, f^2 \rightarrow f^3, \dots, f^{k-1} \rightarrow f^k$ について逐次行い、相関関数 $R(f^k(x_k, y_k), g(x, y))$ が最大となる最終点 (x, y) を求める。以上のアルゴリズムを行うことで、 f から g への画面サンプリング時間当たりの移動量を大きくしたまま、時間感度を上げることができる。

ここで、サンプリング時間 $1/15\text{sec}$ のカルマン渦の画面 f, g の間に、サンプリング時間 $1/30\text{sec}$ で取り込んだ一枚の画面 f^1 を用いて、流速分布計測を行ったときの結果を Fig. 5 に示す。この結果から、過誤のベクトルが補正されていることが分かる。

6. 相関法の部分空間感度調整

前章では、サンプリング時間を小さくして得た画面を用いて、過誤のベクトルの補正を行った。しかしこのような画面が得られない場合も少なくない。そこで次に、元の二枚の画面を用い、マトリクスの大きさを最適にして相関関数を計算する手法を提案する、以下にこの手法について述べる。

まず二つのマトリクスについて相互相関関数を計算するとき、マトリクスの大きさ n を大きくすると、画像の濃淡値情報が多くなる。つまり相関関数を計算するとき、空間感度が上がることになる。しかしマトリクスが大きくなると、マトリ

クス内に変形を持つ流れの解析を行うときには、大きな誤差を生じやすい。

逆にマトリクスの大きさ n が小さいときは、画像濃淡値情報が少なくなるため空間感度が小さくなり、過誤のベクトルを生じやすい。しかしマトリクスの大きさが小さいため、変形を伴うような流れに対しては、良好な結果を示す。

以上のことを、流れの場がマトリクス中央を中心として回転している場合を例にとりて説明する。まずマトリクスの大きさが大きいと、マトリクスの周辺部で誤差が大きく検出される。この動きを小さなマトリクスで相関関数を計算すると、周辺部の誤差は小さく抑えられる。しかし小さ過ぎると、過誤のベクトルが発生しやすくなる。つまり相関をとるマトリクスの大きさは、部分的な流れの種類によって、最適な大きさがあるはずである。

したがって流れの解析を行うときに、相関法の空間感度を部分的に使い分ける必要がある。つまり、マトリクス内の変形が小さい平行流のような流れにおいては、空間感度を上げて計測し、逆にマトリクス内の変形が無視できないような場合には、空間感度を下げて計測しなければならない。

実際、部分的に空間感度を変化させる方法として、次のようなアルゴリズムを提案する。

- ステップ1： 空間感度を上げて、すべての観測点における流速分布を計測する。
- ステップ2： 過誤の速度ベクトルを検出する。
- ステップ3： ステップ2で検出した過誤の速度ベクトルについて、空間感度を下げて速度ベクトルを算出し直す。

このステップ2, 3を過誤の速度ベクトルがなくなるまで繰り返す。

ここで、ステップ2の過誤の速度ベクトルを判断する手法として、観測点の速度ベクトルと、近隣4接点における速度ベクトルの平均値との差が、あるしきい値に入っているかどうかで判断するものとする。

$$\left| \frac{V(i, j) - (V(i-1, j) + V(i+1, j) + V(i, j-1) + V(i, j+1))}{4} \right| \leq K \quad (2)$$

Fig. 6 Optical flow with the second method.

これは、流れの中に不連続点がなく観測点の間隔が十分小さいものとする、近隣の観測点において速度ベクトルに連続性があるためである。このしきい値 K が大きいときには、過誤の速度ベクトルの判定が緩く、 K が小さいほど、判定は厳しいと言える。そこでこの K の値は、過誤の速度ベクトルの補正状況を見て、試行錯誤で適当な値を探すものとする。また速度ベクトル V が、画像サンプリング時間あたりの画面内移動量を示しているため、 K の単位は $[\text{pixel}/\Delta t]$ とする。ここで画面サンプリング時間 $\Delta t = 1/15\text{sec}$ である。

この方法を用いて、Fig. 2 に示した速度ベクトルを、 $K=4[\text{pixel}/\Delta t]$ として補正した結果を Fig. 6 に示す。またこの過誤のベクトルの個数が減っていく様子を Fig. 7 で示し、比較のため、すべての観測点について同じ空間感度で計測した時の過誤のベクトルの個数もあわせて示す。これを見ると、部分空間感度調整法を用い、部分的に空間感度を下げることによって、同じ空間感度で計測するよりも過誤のベクトルが減少することが分かる。またこの流速分布は、前章で得られた流速分

Fig. 7 Number of erroneous velocities of correlation technique and the first method.

布とほぼ一致している。

7. まとめ

本報告では、相関法による二次元流速分布計測において発生する過誤のベクトルを補正する二つの手法を提案した。第一の手法は、時間感度を変化させて補正する手法であり、第二の手法は、空間感度を部分的に変化させて補正する手法である。これらの手法の妥当性を確かめるため、カルマン渦を撮影した画像を用い、相関法で発生した過誤の速度ベクトルの補正を行った。どちらの手法を用いても、結果は良好である。

参考文献

- 1) 小林・佐賀・瀬川：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, 289/292 (昭62-7)
- 2) 木村・高森・井上：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, 101/107 (昭62-2)
- 3) 木村・木村・高森：相関を利用した流れの画像処理——過誤の速度ベクトルの補正処理——、流れの可視化、7-26, 297/300 (昭62-7)
- 4) 安藤：画像の時空間微分算法を用いた速度ベクトル分布計測システム、計測自動制御学会論文集、22-12, 1330/1336 (昭61-12)