43 相関法による流場計測に関する二三の検討

大阪府立大学 工学部 奥野武俊、谷口美喜夫

A Note on the Flow Field Image Measurement by Correlation Method

Taketoshi OKUNO* and Mikio TANIGUCHI*

The present paper is a note on the correlation method for flow field measurement using image processing. The inference of image quality which depends on shutter speed, exposure and others, on the velocity analysis is examined using 8-bit image data (256 gray levels). It is found that the use of standard deviation of the correlation coefficient in the analysis is effective to exclude the error vectors. In this case, the relative largeness of the correlation coefficient is very important. In order to use the gray level value of the image data effectively, a new correlation technique is proposed.

1. まえがき

微小時間間隔で撮影された2枚の画像を使って、2次元平面内の流速場を求める手法の中で、両画像間の画像データの相互相関関数が最大となる点を求め、それを画像の変位として流速ベクトルを求める手法は相関法と呼ばれ、最近多くの研究者によって利用され、手法の詳細も研究されている。寛¹⁾は、かなり以前に画像データを使って、相互相関関数や自己相関関数を求め、これらが流場計測に使えることを明らかにし、木村ら²⁾は、高階調の輝度データを持った画像データを使う相関法を流場計測に利用した。データが2値化されていない場合は、相関関数を求めるためのたたみこみ積分に、かなりの解析時間を要する。植村³⁾は画像データを2値化し、積極的にその性質を使う相関法のアルゴリズムを開発し、解析時間の短縮に成功した。また、大場ら⁴⁾や植村ら⁵⁾らは相関法を流場データに適用する際に生じる可能性のある過誤ベクトルの発生原因やその対策法などを詳細に調査している。

本研究では、画像データは、はじめから2値化されていることは少ないとの立場に立って、輝度を有する画像データに対する相関法を使って、相関法そのものが持っているいくつかの問題点について調査したものである。まず、画像の撮影の際にシャッター速度を変化させて粒子の撮影状態を変化させたり、露出を変化させて画像の質を悪くしたりした場合について、それらの影響を調べた。また、相関関数がピーク値になる座標を探索する際に、関数値の標準偏差を求めて、過誤ベクトルを除くことができることを示した。さらに、従来の相関法では輝度データ(階調データ)を有効に使用していないことを指摘し、これを有効に使う手法を示した。

2. 相関法と画像データ

2枚の画像データの変化(移動量)を相互相関関数から計算する方法としては、画像の輝度を2次元平面内の関数値と考えて、たたみこみ積分を実行し、その最大値を求める手法が最も単純で理解しやすい。画像データが2値化されている場合は、輝度値が2値で表現されるので、記憶容量がかなり少なくなるばかりか、相関係数を単なる論理演算で求めることが可能となるので、解析時

* University of Osaka Prefecture

間を短縮することができる。植村は³⁾は、そのための高速アルゴリズムを開発し、ほぼ実時間に近い解析時間で流速分布を求めることに成功しており、実用的には非常にすぐれた手法の一つと思われる。本研究では、相関法そのものが持っている問題点などを調べるためには、高い階調の輝度データを有した画像データを使うのかよとの立場に立って、ほぼ木村ら²⁾の手法にしたがって相関係数を求め、その値が最大値となる座標を求めた。ここで用いた相関関数(係数)の定義はよく知られている、次のようなものである。

$$R_{FG} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f}) \cdot (g_i - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2}} \quad (1) \quad \left(\begin{array}{l} \text{ただし、 } n \text{ は画素数、} \\ f \text{ は第 1 画面} \\ G \text{ は第 2 画面} \end{array} \right)$$

相関法におけるいくつかの問題点を調べるために、トレーサを模擬した粒子パターンを吹き付けてある円板の回転速度を計測した。通常の CCD カメラのフィールド間隔は 1/60sec であり、この間はシャッターが開いたままになっている。したがってこの間に物体が移動すると、いわゆる流れ写真となって正しい物体形状が記録されない。もっとも、この性質を使って速度分布を求めることも可能ではあるが⁶⁾、相関法では、原理的にそれぞれの粒子が鮮明に記録されている必要はなく、ある時間画像が凍結されていればよいはずである。ここでは、まず CCD カメラに標準装備されているシャッターを使うことによって、粒子の鮮明度が解析に影響されないことを確かめた。Fig.1 および Fig.2 にその結果を示している。それぞれシャッター無しの場合と、1/4000 シャッターの場合であるが、当然のことながらシャッター速度を短くすると、粒子は鮮明になっていること、この様な画像の違いは解析結果にまったく影響していないことがわかる。ただし、ここでは入力画像の輝度分布が変化しないように、撮影の際に輝度データの平均と標準偏差が一致するように、絞りを適当に調節している。つぎに、シャッター速度を 1/250 sec に固定し、絞りを変更して撮影し、それが結果に及ぼす影響を調べた。露出不足の場合の一例を Fig.3 に示す。画像データではほとんど粒子を識別することは難しいものの、ほぼ満足できる速度ベクトルが求められている。可視化画像をどのような撮影条件(照明、露出など)で撮影すべきかは、実験をするものにとって現実的な問題ではあるが、研究の対象にはならないことが多いので、いわゆるノウハウに属する問題になる。ここでは、このような問題に対する一つの資料を提供する意味から、露出の設定を誤った場合に、どの程度解析結果に影響するかを調べたものを示している。その

Fig.1 Effect of shutter speed (1/60sec).

Fig.2 Effect of shutter speed (1/4000sec).

Fig.3 Result in case of under exposure.

結果は、露出不足よりもむしろ露出オーバーの場合、即ち輝度の平均値が小さい場合には、正しい速度ベクトルの求まらない領域が拡大していることがわかった。しかながら、かなり広い露出範囲の画像に対して、円盤の回転速度は正しく求められていることを考えると、露出の設定値もまた解析結果に大きな影響を及ぼさないと考えてよいと思われる。

3. 過誤ベクトルの判断

相関法においては、画像の変位量を相関関数の最大値のみで判断するため、しばしば合理的でないベクトルが求められることがあり、これを過誤ベクトルと呼んでいる。その原因については、大場ら⁴⁾が述べているように、基本的には2枚の画像を撮影する時間間隔に画像が凍結されないことにある。したがってこの影響を速度ベクトルの解析に考慮するためには、画像データをなんらかの方法で修正するか、あるいは凍結されていない画像と判断される場合は、最終結果として採用しないアルゴリズムを考えるか、どちらかの方法を考えなければならない。

ここでは、後者の方法を考えることとして、相関関数の最大値の標準偏差を求め、これがある値より大きくない場合は結果から排除することを考えた。すなわち、相関関数の最大値そのものよりも、その値が他の値に比較して卓越しているかどうかを調べたことになっており、(1)式で定義した相関係数を、標準偏差で正規化したような偏差値 σ を求め、これを解析に使った。

$$\sigma(K, L) = \frac{R_{FO}(K, L) - \overline{R_{FO}}}{\sqrt{R_{FO}^2 - (\overline{R_{FO}})^2}} \quad (2)$$

その結果をFig.4に示す。図から、円盤部分のベクトルのみが最終結果となっており、この判断基準は有効に働いていることがわかる。

Fig.4 Excluding error vectors using standard deviation.

4. 相関法における輝度データ

いま、Fig.5aに示すようにある輝度を持った一つの粒子が撮影されたものとする（図の x, y は空間座標を、高さは輝度を表している）。次に微小時間後にFig.5bの図が得られたものとする。すなわち、なんらかの原因で画面右上方に輝度の高い粒子が新しく現れたと考える。2次元平面内の速度分布計測においては、シート光などを使って可視化することが多いと思われるので、流場に少しでも3次元性があればこの様なことは起こり得るはずである。この2枚の画像から直感的に判断すれば、輝度の低い粒子同士の移動量を速度ベクトルと判断して、2画面目に突然現れた粒子を無視するのがよいと思われるが、通常の相互相関関数の大小で判断すれば、当然のことながら後で現れた輝度の高い粒子との相関が強くなり、この位置を変位として求める。すなわち、2値化されてい

Fig.5a Digital tracer image 1.

Fig.5b Digital tracer image 2.

Fig.6 Coincide ratio of gray level.

ない従来の相関法では、輝度データは有効に使われていないと考えられる。

そこで、画素ごとの輝度データを、値の大きな方のデータで小さな方のデータを徐し、その画素における画像の重なる割合を求めれば、輝度データがより有効に使えるものと思われる。この場合は、輝度まで含めて完全に一致すればその割合が1になり、それ以外の場合は0~1の値になる。Fig.5a,bに示す画像データにこの方法を適用すれば、その輝度の割合を示す一種の相関関数はFig.6に示すようになり、輝度の低い粒子がx軸に沿って移動したという結果が得られる。また、この方法を船体模型の前方に出来る船首渦の計測に適用した結果をFig.7に、および解析条件などは若干異なるが、従来の方法による解析結果をFig.8に示す。図からわかるように、輝度の重なりを使う本方法でも過誤ベクトルは生じている。ここから得られる結論は、必ずしも解析方法をより厳密にすることのみが、よい結果をもたらすわけではなく、画像データと、それに適した解析法などを選ぶことが重要であるということである。また、この方法の欠点は従来の相関法に比較して倍程度の解析時間を要するために、実用的でないことであろう。

Fig.7 Necklace vortex analyzed by present method.

Fig.8 Necklace vortex analyzed by normal correlation method.

5. フーリエ変換 (FFT) の利用

輝度データを持った画像の相関法では、前述したようにたたみこみ積分をする必要があるので解析にはかなりの時間を要する。これを短縮する方法としては、データを2値化して計算のアルゴリズムを変える他に、相関関数の計算にFFTを使う手法も考えられる。奥野⁷⁾は以前から2次元FFTを使うフーリエ変換法による流場計測を提案しているが、そのアルゴリズムとよく似た解析手法で、従来の相関法の約1/10程度に解析時間を短縮できる。

6. あとがき

相関法は原理や、計算のアルゴリズムが簡単で、手軽に利用できる手法であり、解析すべき流場に適した工夫も可能と思われ、実用的な流場の画像計測法としてはかなり有効なものと考えられる。

参考文献

- 1) 箕 源亮: トレーサー画像の相関処理による流速計測, 流れの可視化, Vol.3, No.10, 1983
- 2) 木村 一郎, 外: 相関を利用した流れの画像計測, 流れの可視化, Vol.6, No.22, 1986
- 3) 植村 知正, 外: 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, Vol.7, Supp., 1987
- 4) 大場 光太郎, 外: 相関法を用いた二次元流速分布計測における過誤ベクトルの補正, 流れの可視化, Vol.9, No.33, 1989
- 5) 植村 知正, 外: 相関法によるデジタル画像処理システムにおける過誤ベクトルと標準化誤差に及ぼす要因の検討, 流れの可視化, Vol.9, No.34, 1989
- 6) Okuno, T. et al: Flow Field Measurement by Pathline Method, Bulletin of Osaka Pref., Series A, Vol.39, No.1, to be appeared.
- 7) 奥野 武俊: フーリエ変換を利用した画像解析による流場の画像計測, 関西造船協会誌, 第208号, 1988