B212 DP マッチング法による画像流速測定について

大阪産大 近江和生[○], 大阪産大院 渡部尚樹, Dao Hai Lam

PIV Measurement Using a DP Matching Algorithm

Kazuo OHMI*, Naoki WATANABE*, Dao Hai Lam*

New PIV measurement using a DP matching cross-correlation method is attempted on the experimental flows showing a 2-D circular cylinder wake. The merit of this matching method is the capability of admitting a certain degree of rotation and/or strain deformation of the correlation templates. In addition, since the concept of DP matching has the idea of checking the image shift parameters at the initial stage of each template matching, the computing time required for whole field measurement is shorter than the conventional cross-correlation method, despite more complicated process of template matching. In all of the present test cases, the resultant vector maps are more or less improved from the usual cross-correlation method.

1. はじめに

粒子画像による流速測定 (PIV, PTV) でよく行われる手法は、画像中の局所的な濃度パターンや粒子分布パターンを時間的に追跡する方法であり、とりわけ相関法はその代表的な手法としてすでに多くの測定例が紹介されている。ただし相関法の主たる問題点は、パターンの追跡処理においてテンプレート画像の平行移動を前提としていることで、実際の流体運動に伴うパターンの回転や歪み変形は通常考慮されない。この点を考慮して、近年では画像相関を用いない粒子画像の追跡手法が提案され⁽¹⁾⁽²⁾、回転や剪断の大きい流れ領域で良好な測定結果が報告されているが、筆者らはあくまで相関法の範疇でこの問題に取り組み、すでにフーリエ位相変換画像の相関を用いる手法⁽³⁾を提案している。しかしこの手法は、FFTの多用による計算処理時間、さらには三次元相関への拡張の困難性という問題点を有しており、さらなる新手法の開発が必要であると思われる。そこで本論文では、DP マッチングの手法を画像相関に組み入れる手法を提案し、それを回転や剪断領域を含む流れ画像 (二次元円柱の後流) に適用した結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置 円柱流れの可視化は、別報⁽⁴⁾で述べた小型回流水槽 (試験部の大きさ $300 \times 250 \times 800$ mm³) を用いて行った。試験円柱は、直径 30 mm、長さ 250 mm のアクリル製であり、水槽試験部での一様流速は 16 cm/s、主流レイノルズ数は約 2500 である。可視化用のトレーサとしてリルサン粒子 (水中にあらかじめ散布) とフルオレセイン水溶液 (円柱上流側から注射針ノズルで注入) を使用し、レーザライトシートによる照明を行った。その他、使用したレーザ光源や画像処理機器、計算機等の詳細は別報に述べたものとはほぼ同一である。

2.2 画像処理 A/D 変換された流れ画像は、1 フレームあたり 512×484 pix かつ 8 bit/pix の分解能を有する。また、各フレームにおいて認識可能なリルサン粒子の数は 2000 個以下の程度である。今回の研

* Osaka Sangyo University, Faculty of Engineering, 3-1-1 Nakagaito, Daito-shi, Osaka 574, JAPAN.

究では、1/60秒間隔の2フレームの画像に対して相関追跡を行い、その結果をベクトルの分布図として表示した。

今回の相関追跡法で用いたDPマッチング法とは、動的計画法（Dynamic Programming）をパターン認識に応用した手法であり、比較する2種の信号系列間で部分的な信号の伸縮を考慮に入れながら最適値を評価するマッチング手法である⁽⁵⁾。もともと音声認識のように一次元の時系列パターンに適した手法として考案されたが、最近ではそれを図形や文字の輪郭形状等の二次元パターンに拡張する手法が提案されている。

DPマッチングの考え方の要点は、一般に N 個の信号要素があって、それをおおの x_i ($i=1,2,\dots,N$)の位置に置いたとき、次のコスト関数

$$F(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N [s(x_i) + \sum_{j<i} d(x_i, x_j)] \quad (1)$$

を最小にする x_i を求める問題である。ここで $s(x_i)$ は要素 i が x_i に位置するコストで、信号値が整合するほど小さい値をとる。また $d(x_i, x_j)$ は要素 i が x_i に位置し、要素 j が x_j に位置するコストで、パターンの変形が小さいほど小さい値をとる。

たとえば、Fig.1のような標準パターン（テンプレート）と入力パターンが与えられ、入力パターンの中で、テンプレートに整合する最適な位置を求めるとする。式(1)において、 $s(x_i)$ はテンプレートにおける要素 E_i の画素値と入力パターンにおける画素値の差とする。また $d(x_i, x_j)$ は次のように定める。

$$d(x_{k+1}, x_k) = \begin{cases} 0 & (x_{k+1} = x_k + (\pm 1, 0) \text{ または } x_{k+1} = x_k + (0, \pm 1) \text{ のとき}) \\ 1 & (x_{k+1} = x_k + (\pm 2, 0) \text{ または } x_{k+1} = x_k + (0, \pm 2) \text{ のとき}) \\ \infty & (\text{その他のとき}) \end{cases} \quad (2)$$

Fig.1 Sample DP matching

Fig.2 Determination of the positions E1 to E4

Fig.3 Resultant minimum cost matchings

(a) Case 1

(b) Case 2

Fig.4 Sample circular cylinder wake images (visualization by nylon 11 particles and fluoresceine solutions).

(a) Case 1

(b) Case 2

Fig.5 Vector maps obtained from a conventional cross-correlation PIV method.

(a) Case 1

(b) Case 2

Fig.6 Vector maps obtained from a DP matching cross-correlation PIV method.

このとき、まず E_1 の配置について考えると最も小さいコストは 1 となり、その位置は Fig.2 (a) で 1 と記した所になる。次におのおの場合について、 E_2 の配置は同図 (b) の数値 (コスト) を示した位置に選ぶことができる。ここに記したコストは、 E_1 と E_2 の配置によるトータルのコストである。おのおの場合で E_2 の最終配置は、最小コストを選択して同図 (c) のように決定される。同様に E_3 , E_4 の配置についても、コストの値とその位置を示すと同図 (c) (d) のようになり、結局最小コスト = 6 となって、 $E_1 \sim E_4$ の配置は Fig.3 に示す 4 種類となる。

上記の手法をそのまま、流体画像計測における濃度相関法のテンプレートマッチングに適用し、最小のコスト値を与えるテンプレートのシフト量から、その位置での二次元速度を求めることを試みた。今回の実験での相関テンプレートの大きさは $11 \times 11 \sim 25 \times 25$ pix であるので、上例の 2×2 pix のテンプレートでの考え方を拡張して、最小コストの画素探索を渦巻き状に行うことを考えた。この渦巻き状の探索は渦巻きの外側から開始し、中心に至るまでの総コストが最小となるテンプレートのシフト位置から速度量を見積もった。なお、DP マッチングではマッチングされた側の画像領域がテンプレートと同一形状とは限らないので、マッチングの対象となった全画素の重心をテンプレート中心の移動位置と見なした。また、同一の最小コストとなる結果が複数個生じた場合、すでに求められた隣接点での速度ベクトルの値を考慮して、その平均値からの偏差が最も少ないシフト方向をテンプレートの移動方向と見なした。

3. 実験結果

Fig.4 は本実験で使用した 2 種類の円柱後流の画像であり、代表径 $100 \mu\text{m}$ 程度の白色リルサン粒子とフルオレセイン水溶液をトレーサとして可視化したものである。両者の相違は、フルオレセイン水溶液を注入する注射針ノズルの本数のみである。それぞれの場合について、 $1/60$ 間隔の 2 面のフレーム画像を処理して得られた速度分布の結果を Figs.5~6 に示す。ここで Fig.5 は従来の濃度相関法による測定結果 (ただし画像相関は相関係数でなく輝度差の累積和で評価) であり、Fig.6 が今回の DP マッチング相関法による結果である。いずれの相関法においても、相関テンプレートの大きさは 19×19 pix であり、テンプレートのシフト範囲は縦横両方向とも ± 9 pix である。2 種類の可視化画像のうち (a) の場合は、通常の濃度相関法でもほぼ問題のない程度に良好な速度分布が得られるが、DP マッチング相関法を適用することにより、わずかに認められた 4~5 個の明確な過誤ベクトルが発生しなくなる。また (b) の画像の場合には、通常の濃度相関法による明確な過誤ベクトルの発生数が無視できないものの、DP マッチング相関法による結果では、その数の激減が認められる。

4. 結 言

DP マッチングを適用した画像相関法により、回転や剪断変形を伴う流れにおいても、過誤の速度ベクトルが生じにくい測定結果を得ることに成功した。また、DP マッチングの手法自体にテンプレートマッチングのいわゆる逐次棄却的な考え方が含まれるため、従来の相関法に比してマッチング手法は複雑であるにも関わらず、計算処理に要する時間は、逐次棄却を行わない通常の相関法よりもむしろ短くすることができた。今後は、この手法を粒子追跡相関法にも適用して、いわゆる PTV における精度向上を目指したいと考える。

参考文献

- (1) 岡本, 可視化情報 15-Suppl. No.2 (1995), 193
- (2) 石川ほか, 可視化情報 16-Suppl. No.2 (1996), 23
- (3) 近江, 可視化情報 16-Suppl. No.2 (1996), 47
- (4) 近江, 可視化情報 16-Suppl. No.1 (1996), 219
- (5) 谷口, 画像処理工学, 共立出版 (1996), 143