

Problems on Pattern Image Velocimetry

速水, 洋
九州大学機能物質科学研究所

荒巻, 森一郎
九州大学大学院工学府

筒井, 斉
東芝エンジニアリング株式会社

高曾, 徹
九州大学機能物質科学研究所

<https://doi.org/10.15017/6662>

出版情報 : 九州大学機能物質科学研究所報告. 8 (2), pp.245-251, 1995-03-01. Institute of Advanced Material Study Kyushu University

バージョン :

権利関係 :



トレーサ濃度パターン画像流速計における 問題点と対策

速水 洋・荒巻 森一朗*・筒井 齊**・高曾 徹

Problems on Pattern Image Velocimetry

Hiroshi HAYAMI, Shinichiro ARAMAKI, Hitoshi TSUTSUI
and Toru KOSO

The particle image velocimetry based on the pattern correlation method has been successfully applied to the relative fluid flow in a small model of a Francis-type pump turbine by processing the video images pictured using a video camera rotating with the runner. The pattern correlation method has an inherent problem of erroneous velocity vectors due to erroneous correlation. The images of absolutely static fluid removing a runner were taken by a rotating video camera and they were analyzed using the pattern correlation method, where the connect velocity vectors are easily specified. The problems including the cause of erroneous velocity vectors which occur in the pattern correlation method and the countermeasures are discussed.

1. まえがき

ターボ機械の羽根車にビデオカメラを取り付けて羽根車と一緒に回転させて撮影すれば、羽根車内の相対流れの動画が得られる。例えば、フランシス型ポンプ水車模型内流れをトレーサ法を用いて可視化撮影すれば、翼間通路内の死水域や渦の移動さらには翼面境界層内の微弱な流れのビデオ観察が可能である⁽¹⁾⁽²⁾。さらに、可視化ビデオ画像におけるトレーサ粒子の空間的濃度パターンの時間的変化より相対速度ベクトルを求めることにより、羽根車内流れとポンプ水車特性との関係および非定常流れの計測例が示されている⁽³⁾。可視化法は本来定性的なアプローチであったが、最近の計算機・画像処理装置の発達とともに、このような

可視化画像をデジタル処理して定量化する試み、いわゆる画像解析法が盛んである。その一つの方法が濃度パターン相関法⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾である。濃度パターン相関法の特徴の一つは、粒子一個一個の認識が不要なので、トレーサ粒子の選択の幅が広いことである。それでも濃度に関する空間情報を的確に把握できることが成否の鍵であり、可視化技術によるところは大きい。最大の問題点は時間的・空間的濃度パターンの対応であり、いわゆる過誤ベクトルの問題は避けられない。そのため過誤ベクトルを判定する方法も種々提唱されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。本研究では、回転するビデオカメラで静止流体を可視化撮影することにより検定用画像を作成し、その画像を基に濃度パターン相関法の問題点とその対策法について検討した。

受理日 1994年12月15日

*九州大学大学院

**東芝エンジニアリング

2. 濃度パターン相関法

トレーサ法による可視化画像は、使用するトレーサ

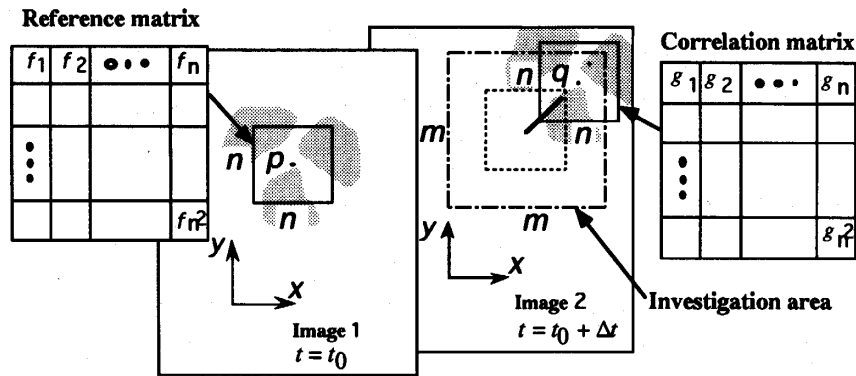


Fig. 1 Pattern correlation method.

粒子の種類や粒子密度にもよるが、通常、空間的濃度（輝度）パターンを形成する。図1に濃度パターン相関法の原理を示す。時刻 $t=t_0$ と $t=t_0+\Delta t$ における画像1および2の二つの画像を考える。画像1の例えば点Pを中心とする $n \times n$ (基準) 相関マトリックスの濃度レベル $f(f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_n)$ と、画像2上のわずかに離れた点Qを中心とする $n \times n$ の相関マトリックスの濃度レベル $g(g_1, g_2, \dots, g_i, \dots, g_n)$ についての相関係数は次式となる。

$$\rho_{fg}(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\left[\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2 \right]^{1/2}}$$

ここで、 \bar{f}_i, \bar{g}_i は f_i, g_i それぞれの相関マトリックス内の平均値である。点Pを中心とする $m \times m$ の捜査マトリックス内のセルに相関マトリックスを平行に移動しながら相関係数を求め、そのピークの位置までの距離 ($\Delta x_m, \Delta y_m$) から点Pにおける画像面内の二次元速度ベクトル $V(V_x = \Delta x_m / \Delta t, V_y = \Delta y_m / \Delta t)$ が求まる。なお、 $-1 \leq \rho_{fg} \leq 1$ である。

相関法の原理は極めて簡単であるが、相関係数が最大となる位置が必ずしも対応する正しいデータとは限らず、対応が誤った過誤ベクトルの可能性もある。流れの状態や画像の質などが原因として挙げられる。基本的に相関法は、流れの変化が大きくなく、着目する点の近傍で流れが平行に移動することを前提としており、流れにせん断ひずみや回転あるいは乱れなどがある場合には濃度パターンが変形して類似性が崩れ、相関係数は低下する。その結果、過誤ベクトル出現の可能性が高くなる。

3. 実験方法および画像解析

実験は、図2に示すように立型のポンプ水車模型装置⁽²⁾⁻⁽⁴⁾の羽根車を取り除き、自由表面をもつ完全に静止した流体(水)に重量比3ppmのアルミ粉末をトレーサとして混入し、トレーサ画像を軸と共に回転するビデオカメラで撮影した。回転数は15rpmで、上部より全面を照射して、通常の30コマ/秒で撮影した。撮影にはビデオカメラ (SONY CCD-V800) を用い、カメラ内蔵のVCRに記録した。記録された画像データは画像処理ボード (マイクロテクニカ MT-98-CVFM01) でデジタル化して、パソコン (EPSON386S) に取り込み、フロッピディスクに記録した。画像処理ボードは一画像512×512の画素 (ピクセル) 数で、256階調の輝度分解能を有する。なお、パ

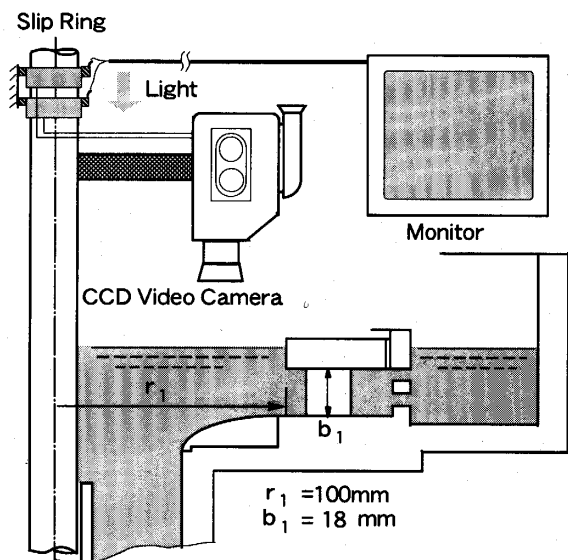


Fig. 2 Experimental apparatus.

ソコンへの取込みは1フィールドのみであり、垂直方向の分解能はこの半分となる。本ボードはカラー対応であり、輝度データとしてR成分を使用した。コントラスト強調および平滑化など前処理を行った後にワークステーション(HP-9000M320)にデータを転送し、相関法を用いて速度ベクトルの計算を行った。容量の制限により350×350ピクセルの正方形領域(一辺68.4mm)のデータを使用した。空間分解能は約0.20mm/ピクセルである。原画像および前処理後(白枠内)の画像例を図3に示す。なお、計算時間短縮のために、相関係数の計算を $m \times m$ 捜査マトリックスの1行1列おきの m^2 の1/4の点でまず行い⁽¹⁰⁾、最大値の候補点近傍について詳細な計算を行った。

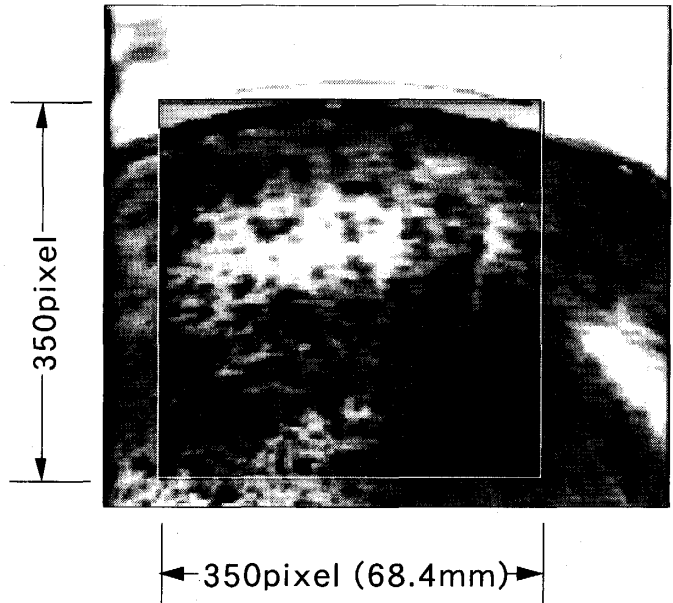


Fig. 3 Example images.

4. 結果および考察

6個の半径位置毎に6点の計36点について本計算法で得られた相対速度ベクトルを図4に矢印で示す。1/30秒間隔の2画面を用いており、図中のベクトルの長さは1/30秒間の移動距離を表す。相関マトリックスの大きさは(a) $n=21$ および(b) $n=9$ で、捜査マトリックスの大きさ m はそれぞれ61である。各々の図の左上に描かれている同心正方形は、外枠が捜査マトリックスの大きさを、内枠が相関マトリックスの大きさをそれぞれ表している。本相対流れはカメラの回転速度と一致しており、過誤ベクトルの識別は容易である。

4. 1 相関マトリックスの大きさ

図5は相関マトリックスの大きさ n を横軸にとり、過誤ベクトル率 ϵ を縦軸に示している。ここで ϵ は計算点数に対する過誤ベクトルの割合であり、真のベクトルと2ピクセル以上異なるベクトルを過誤ベクトルとした。ここでは今回の検討において基準とした計測法の結果を○印で示す。なお、他の記号については後述する。相関法を適用する場合、相関マトリックスの大きさの選定が問題となる。相関法で得られる速度ベクトルは相関マトリックス内の平均値であるから、空間分解能を向上するためには相関マトリックスが小さ

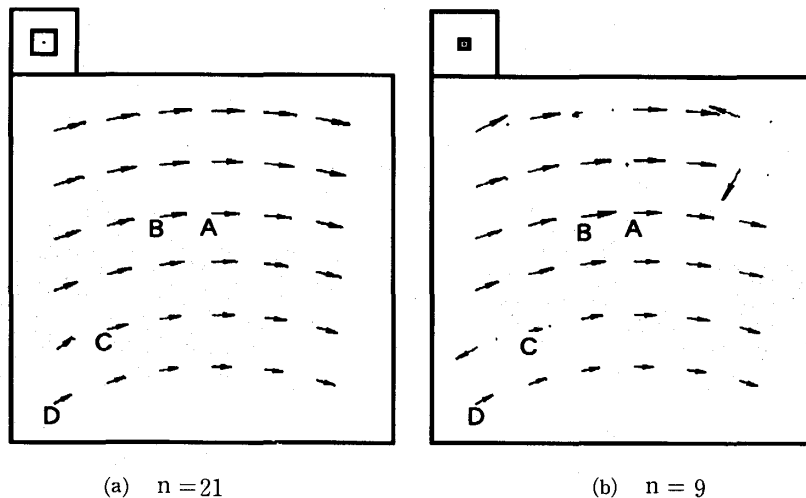


Fig. 4 Velocity vectors.

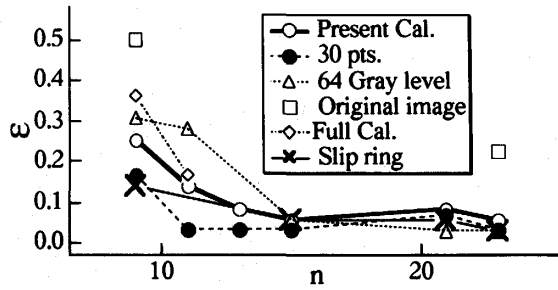


Fig. 5 Erroneous vector ratio.

いことが望ましい。しかし、小さすぎる場合には濃度パターン情報が不足し、過誤ベクトルが生じやすく、図5で示すように、特に $n < 13$ で過誤ベクトル率が増大する。一方、相関マトリックスが大きすぎる場合には流れの変化の様子をうまく捉えられなくなる。実際には流れの状態および濃度パターンに応じてマトリックスの大きさを選定する必要があるが、過誤ベクトルと判断される場合には相関マトリックスを一旦大きく取り直し、その後、小さなマトリックスで詳細に計算するなどの方法が考えられる。

4. 2 空間情報

図4に示す点A~Dについて以下検討する。A, Dは相関マトリックスが小さくなくても過誤ベクトルが生じなかった例で、B, Cは過誤ベクトルが生じた例である。図6は、 $n=21$ の場合の(a)点Aおよび(b)点Dにおける捜査マトリックス内の相関係数の2次元分布を3次元表示したものである。ここで底面の中心が各計算点(始点)に対応し、縦軸に相関係数、横軸左方向が半径方向、右方向が円周方向に対応する。いずれにも明確なピークが確認でき、容易に速度ベクトルの先

端位置を求めることができるが、山の形状はかなり異なる。画像上でのトレーサの流跡の長さは流速(ここでは半径)に比例するので、小半径位置の点Dのトレーサが点Aに比べ撮影露光時間当たりの移動量が小さく鮮明な画像が得られ、鋭いピークとして現れる。

次に、 $n=9$ の場合に過誤ベクトルが現れた点Bと点Cにおける相関係数分布を図7および図8にそれぞれ示す。点Bの図7 a ($n=21$) においては、相関係数の最大値は0.52とかなり小さいが明確なピークが認められる。一方、図7 bの $n=9$ の分布には山が幾つもありピークは明確でなく、図に示す位置(Peak of 1/4 cal.) に過誤ベクトルが現れた。このように相関係数の山が幾つも現れるのは、 n の値が小さくなることにより空間情報が減少し、類似の濃度パターンが増大することを示している。図3において点Bは照明のために白く反射している部分に対応しており、この点近傍の輝度変化が小さいためである。また、このような状態は空間波長に比べて粒子移動量が大きい場合に生じやすい。その対策としては、細かい時間間隔で順次処理する逐次追跡法を濃度パターン相関法と組み合わせる方法がある。なお、図7 bの分布にも正しいデータに対応したピークがあり、一旦大きな相関マトリックスを取り直し、その後、小さなマトリックスで詳細に計算する方法などが考えられる。

図8は点Cにおける相関係数の等高線を描いたものである。図の筋状の黒い部分は相関係数が大きい領域を示しており、山の稜線が長く伸びている状態を示している。図8 aの $n=21$ の場合にはそれでもピークが見いだせるが、図8 bの $n=9$ の場合には黒い部分が広くかつ長く伸びており、そのために過誤ベクトルが現れる。図3の画像では、輝度パターンが帯状に延び

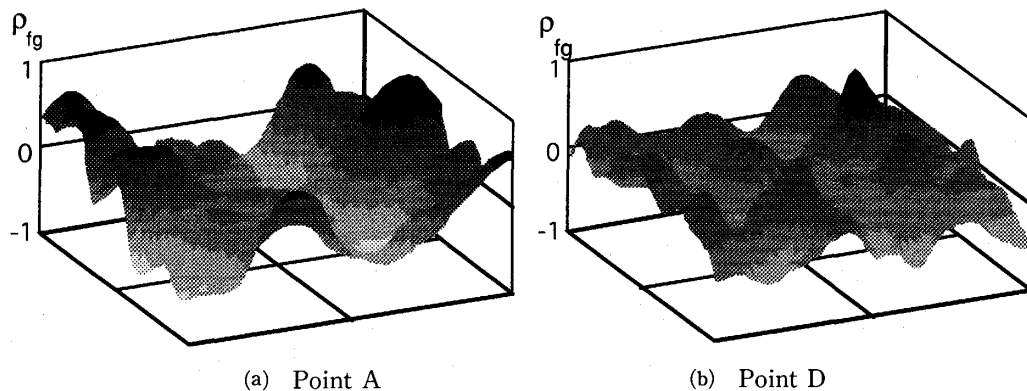


Fig. 6 2D distribution of correlation coefficient, $n=21$.

ている領域であり、その方向に沿ってパターンが類似しているためである。したがって、過誤ベクトル低減のためにはよりランダムなパターンが必要である。

本計算例で画像の前処理としてコントラスト強調および平滑化を行っている。点Aにおけるx、y方向の輝度分布を0-1に無次元化して図9に示す。図中、破線は未処理の原画像、太線は画像処理を施した計算画像(256階調)、および細線は64階調画像のデータである。原画像のy方向の分布がステップ状になるのは、ビデオ画像のパソコンへの取り込みが1フィールドのためであり、垂直方向の空間分解能は水平方向の半分となる。原画像における相関マトリックス内の輝度変化は小さく、6サイクル/21ピクセルの高周波成分が認められる。一方、処理画像では1~2サイクル/21ピクセルであり、高周波成分は除去されている。いずれの場合もn=21では問題ないが、n=9では、原画像、64階調画像ともに過誤ベクトルが現れており、波数情報とともに輝度パターンの特徴が要求される。

4.3 境界

羽根車の翼など固定境界がある場合、相関法の取扱いには注意を要する。本例でも同様のリング状固定境界が外周部に

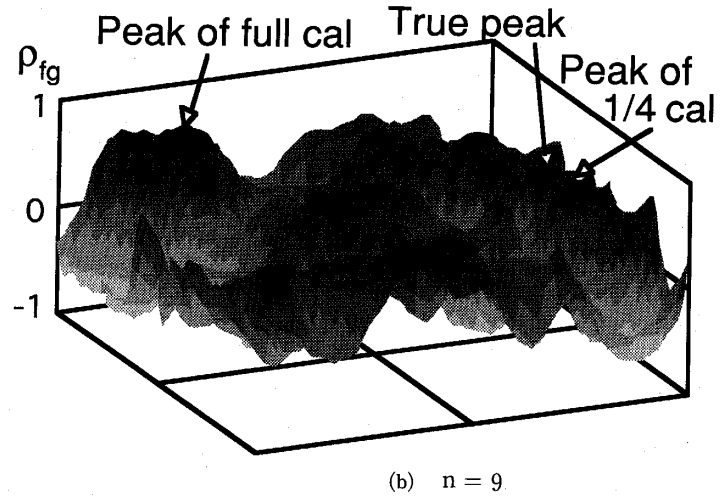
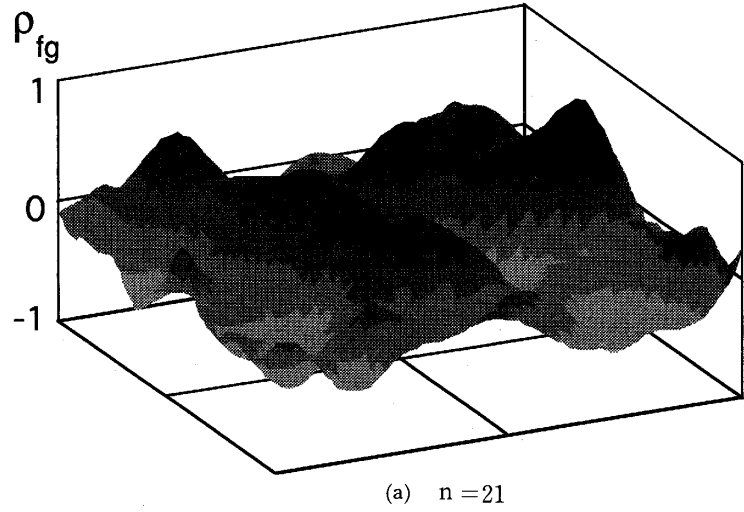


Fig. 7 2D distribution of correlation coefficient, point B.

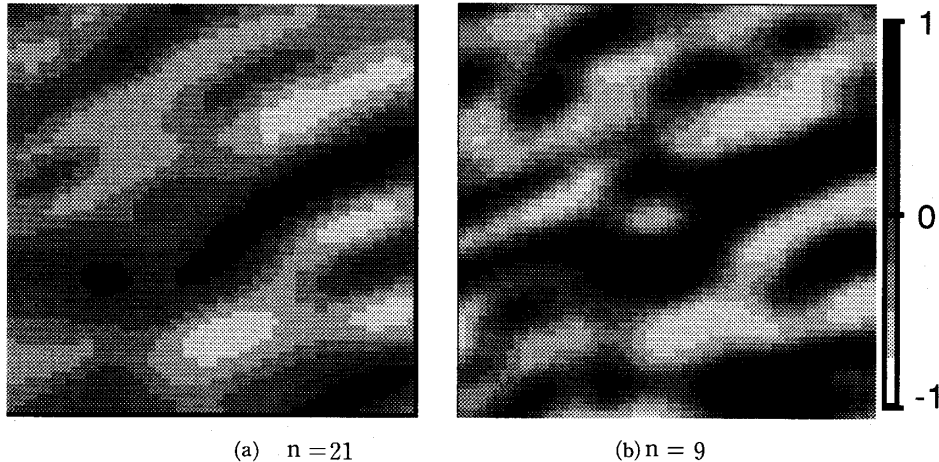


Fig. 8 2D distribution of correlation coefficient, point C.

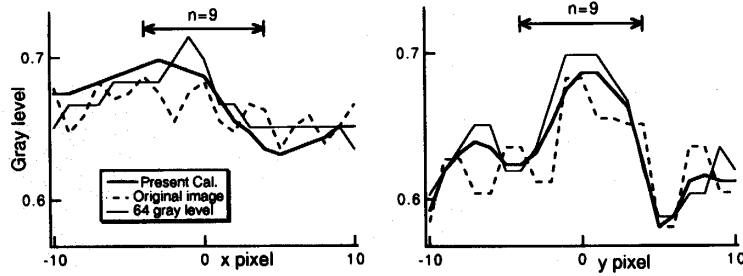


Fig. 9 Gray level distributions, point A.

あり (図3参照), 上方6点にこの影響が及んでいる。そのため, n の値が小さくなれば過誤ベクトルが外周部で増大する。この領域を除けば過誤ベクトル率は図5の●印 (30pts) で示すように, $n < 13$ の場合でも大きく減少する。逆に, このような固定境界である場合でも相関マトリックスが適当に大きければ, 比較的正しいベクトルが求まることも一方では示している。

4.4 画質

本計算例では画像の前処理としてコントラスト強調および平滑化を行ったが, 原画像および64階調画像を用いた場合の過誤ベクトル率を図5にそれぞれ□印および△印で示す。原画像での過誤ベクトル率が大きくなっているが, それは輝度分布における高周波成分のためと思われ, 画像の前処理の効果が現れている。一方, 64階調に変換した場合に過誤ベクトル率の上昇はあるが, それ程顕著ではない。この場合, 平滑化を行った場合と同様の効果が現れている。濃度パターン解析法はパターン認識を前提としているので, 相関マトリックス内の濃度情報にはなんらかの特徴があることが必要となる。すなわち, 濃度に関して空間波数が高いこと (濃度パターンの緻密さとランダム性) が重要である。はじめから相関マトリックス内にトレーサが存在しない場合は別にして, トレーサがあっても輝度が十分でない場合, コントラスト強調および平滑化などによる画質改善は過誤ベクトルの減少に効果的である。

輝度レベルはデジタル化で整数化されており, コントラスト強調だけでは輝度レベルの値が別の整数値に置き換えられるだけで, そのまま相関計算を行っても結果は何ら変わらないはずである。輝度レベルの平滑化を行うことにより, 輝度レベルの連続性と高周波ノイズの除去が実現でき, 良好な画質が得られる。ただし, コントラスト強調に際しての輝度レベルの上限,

下限の選定には注意を要する。ここでは上限下限の輝度レベルとしては, それぞれ210および64を用いた。

4.5 計算法

相関マトリックス法のアルゴリズムは簡単でプログラミングもそれほど難しくないが, 計算処理時間が膨大である。ここでは, 計算時間短縮のために, 相関係数の計算を捜査マトリックスの1行1列毎すなわち1/4の点でまず行い, 最大値の候補点近くのみについて再度詳細な計算を行った。相関マトリックス全セルでの相関計算 (Full計算) で求まる過誤ベクトル率を図5に◇印で示すが, 1/4計算の場合 (○印) よりやや大きい。これは, 図7bの例 (Peak of full cal.) に示すように, 1/4計算の際, 相関係数が最大の点を計算せずに別の候補点を計算したためであり, n が小さい場合には注意を要する。なお, Full計算の過誤ベクトル率 ϵ がむしろ大きいのは, 多少ファジーな捜査がむしろ好ましい場合もあることを示唆している。1/4計算法では, 相関マトリックスが小さくなれば, 最初の捜査でうまく特定できない場合も生じ, 過誤ベクトルは増大する可能性がある。このような場合には, 千鳥格子 (計算点は1/2) で初めに捜査する方法などが有効であろう。

4.6 スリッピング

本装置では, 回転軸に固定されているビデオカメラから画像信号を取り出す方法として, 内蔵のビデオテープに記録し実験終了後テープを取り出す方法と, スリッピング (図2参照) を介して相対流れの様子をCRT上での実時間観察や外部VCRで記録する方法が可能である。スリッピングを経由したビデオ信号にはノイズの心配があるが, 結果的には, 図5に×印で示すように, ビデオカメラの画像よりもむしろ過誤ベクトルは少なかった。これは, ビデオ専用デッキ

の録画機構の高品質さによるものであろう。したがって、より小形の CCD カメラに置換えることによって、高速回転流れ場への適用が考えられる。

5. ま と め

相関法の原理はきわめて簡単であるが、相関係数が最大となる位置が必ずしも正しいデータとは限らない。速度ベクトルが既知の検定用画像を用いて、過誤ベクトルの発生原因およびその対策について議論した。

(1) 相関マトリックスが小さくなれば、空間情報が減少し、過誤ベクトルは急激に増大する。一方、適当に大きければ過誤ベクトルの発生は希である。

(2) コントラスト強調および平滑化画像処理は過誤ベクトルの低減に有効な手段である。

(3) 相関係数の2次元分布は過誤ベクトルの対策に有用である。

文 献

- (1) 山口・速水, 可視化情報, 10-Suppl.1 (1990), 143.
- (2) 速水・山口, 可視化情報, 10-Suppl.1 (1990), 147.
- (3) 速水・陳・高曾・王, 日本機械学会論文集 (B編), 59-567 (1993), 3524.
- (4) 篁, 流れの可視化, 3-10 (1983), 189.
- (5) 木村・高森・井上, 流れの可視化, 6-22 (1986), 269.
- (6) 速水, 日本機械学会講習会, 930-19 (1993), 7.
- (7) 速水・陳・高曾, 九大機能研報告, 8-1 (1994), 175.
- (8) 木村・木村・高森, 流れの可視化, 7-26 (1987), 297.
- (9) 木村・山下・黒江, 日本機械学会講演論文集, 920-68 (1992), 310.
- (10) 榊原・高田・小林・菱田・前田, 可視化情報, 11-Suppl.1 (1991), 157.