流れ場の画像計測における高速相関法*

川末 紀功仁*¹, 石 松 隆 和*², Chiang SHIH*³

Fast Correlation Technique of Particle Image Velocimetry

Kikuhito KAWASUE, Takakazu ISHIMATSU and Chiang SHIH

Particle image velocimetry (PIV) is a useful tool in the study of transient fluid flow phenomena. The light of a laser sheet scattered by seeding particles generates a moving particle-image pattern. This pattern is recorded using a multiple-exposure photographic technique, where the distance between corresponding particle images in the interrogation region is proportional to the local displacement. To determine the direction of the velocity vector from the multiple-exposure photograph, a velocity bias technique is used. The processing techniques for PIV data have traditionally been tedious and time-consuming. In this paper, a new approach to PIV data processing is presented. The 2-D intensity distribution array in the interrogation region is replaced by two orthogonal 1-D distribution arrays using integration. Each velocity component is extracted by autocorrelation of the 1-D array. This system has been applied to a quantitative measurement of the vortical structure behind a circular cylinder.

Key Words: Measurement, Correlation, Flow Visualization, Particle Image Velocimetry, Velocity Bias, Digital Image Processing

1. 緒言

画像処理による流れ場の計測は、流れ場の瞬間の状態を定量的に把握できることから、広く理工学の分野で利用されはじめている。画像処理による速度ベクトルの抽出方法は、大きく2つに分けられる。一つは、TVカメラによって2枚以上の連続画像を取り込み、各々のトレーサ粒子、または、粒子群を画像間で追跡する方法^{(1)・(2)}で、もう一つは、1枚の画像に露光された流跡線の長さや、多重露光された粒子対の間隔より速度ベクトルを求める方法^{(3)・(4)}である。前者は、画像の時間的前後関係から、速度ベクトルの向きを簡単に決定できるため、最も多く利用されている方法であるが、画像間の時間間隔がTVカメラのフレーム周期に依存しているので、計測できる流速に限界がある。後者は、光源の照射時間や照射間隔を変更する事により、低速流から高速流まで幅広く計測でき、汎用性の高い計測法であると言えるが、そのままでは粒子対の時間的前後関係が区別できないため、速度ベクトルの

向きを決定できない問題点がある。

この問題に対処する方法として、速度バイアス法⁽⁵⁾が提案され、米国を中心に研究がなされている。本方法では、カメラと計測対象の間に回転振動する鏡を設置し、流体の流れによる粒子の移動に、鏡の回転振動による変位を加えることで、一定のバイアスを加え、得られる粒子の変位が常に正方向となるようにしている。粒子の速度ベクトルは画像処理で得られた変位からバイアス速度を引くことにより求まる。しかしながら、速度バイアス法においても粒子像の写真を光学的処理し、速度ベクトルの抽出を行う際に長時間を要するという問題点が残されている。

本論文では、速度バイアス法を用いて得られた映像から、速度ベクトルを短時間で抽出することができる新しい画像相関法を提案する。相関を利用して速度ベクトルを求める方法は、個々のトレーサ粒子を追跡するのではなく、微小区間の濃淡パターンの移動量を計測する⁽⁶⁾ために、流れへの追従性が良い微小なトレーサ粒子を用いることができ、画像全域を利用した空間

* 原稿受付 平成5年10月12日。

*¹ 正員, 佐世保工業高等専門学校 (〒857-11 佐世保市沖新町1-1)。*² 正員, 長崎大学工学部 (〒852 長崎市文教町1-14)。*³ Florida State University (Tallahassee, Florida, U. S. A.)。

密度の高い速度ベクトルを求めることが可能である。しかし、高分解能の画像の場合、相関計算に膨大な時間を要する問題点がある。そこで、本研究では、速度バイアス法が正方向の粒子変位のみを与える特徴を活かして、微小領域の2次元濃淡パターンを積分計算により、直交する2つの1次元濃淡パターンに置き換えた。これにより、2次元相関を1次元相関に置き換えることが可能となり、速度ベクトルの抽出が短時間でおこなえるようになった。速度バイアス法と本方法を組み合わせることで、画像の濃淡情報や分解能を失うことなく、短時間で精度よく、信頼性の高い計測が可能となった。

本方法を、円柱後方流の計測に適用した結果、短時間で良好な結果が得られた。

2. 計測方法

2.1 計測装置 図1に本研究で用いた計測装置の構成を示す。

流れ場の中にガラスビーズ粉末（径 $10\mu\text{m}$ 、比重1.4）を混入し、24相ポリゴンミラーによってスリット化されたレーザ光（アルゴンレーザ：15W）を用いて可視化する。計測対象とカメラの間に、揺動する鏡（Scanning Mirror）を設置し、トレーサ粒子像にバイアスを加える。カメラと鏡は同期されており、鏡がカメラに対し、約45度になった所で、シャッタが切れる仕組みになっている。これにより、ポリゴンミラーの回転数とシャッタの露出時間に応じた回数だけ粒子が多重露光されることになる。また、カメラ部及び、ポリゴンミラーは、計測対象と連結してあり、リニアモータによって、任意の速度で駆動される。

図1 計測装置

2.2 速度バイアス法 多重露光した写真から速度ベクトルを求める場合、粒子対の時間的前後関係がわからないので、そのままでは、速度ベクトルの方向が決定できないが、速度バイアス法を用いることで、方向を決定できる。1組の粒子対から、速度ベクトルを求める場合、その大きさは、粒子間の距離から容易にわかるが、その方向は正方向と180度回転した負方向との2通りが考えられる。図2のように、速度バイアス法は、流れによる粒子の移動量に、バイアス速度 v' を加えることによって、粒子像の変位を人為的に正の方向へ移動させるものである。

図2 速度バイアス

このようにして捉えられたバイアスを含む画像から粒子の移動量を求めたのちに、バイアスによる変位分を引くことにより、真の方向を持った速度ベクトルを計算することができる。また、バイアスは、後に述べる相関処理との関係から、流れの主流方向に加えられる。

3. 1次元相関による速度ベクトルの抽出

速度バイアス法によって撮影された映像から速度ベクトルを相関法を用いて求める。

相関法では、画像内の個々の粒子に着目せず、微小区間（ $M \times N$ ）の濃淡パターンの移動に着目して、速度ベクトルを求める。微小面内の粒子群の変位量を求めるための自己相関関数は以下の式で表すことができる⁽⁷⁾。

$$\phi f f(m, n) =$$

$$\sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N (f(k, l) - f(k+m, l+n))^2 \dots (1)$$

ここで、 $f(k, l)$ は第 (k, l) 画素の輝度である。

速度バイアス法で得られた $\phi f f$ は周期的な谷を有し、その谷の間隔が、本微小領域の変位量と考えられる。この変位量からバイアス分を引くことにより、速度ベクトルを求めることができる。

このようにして、速度ベクトルを求めるには、かなりのデータ処理を要し、特に高分解能の画像の場合、膨大な時間が必要となる。そこで、以下に示すように、

速度バイアス法の特徴を活かして、2次元相関を互いに垂直な2つの1次元相関に置き換える。すなわち、微小面の座標軸 u, v をバイアス方向に対して図3のように取ると、バイアス速度が十分速い場合には、トレーサ粒子の変位量 $\Delta u, \Delta v$ は必ず正になる。この点に着目し、2次元濃淡パターンを、座標軸 u, v とそれぞれ垂直方向に積分して得られる2つの1次元濃淡パターンに変換する。その例を図4に示している。これらの1次元濃淡パターンは周期性をもっており、この周期は微小面内での平均粒子変位（平均粒子間隔）に等しい。そこで、それぞれの1次元濃淡パターンの自己相関を求めることにより平均粒子変位が求まる。

図3 微小面の座標軸と速度バイアス

図4 濃淡パターン

図5に、 v 方向1次元濃淡パターン $f(v)$ を示す。ここで、 $f'(v)$ は次式で自己相関関数を計算するために、 $f(v)$ を特定の幅で切り出した関数である。

$$\phi ff'(\Delta v) = \sum_{k=1}^N (f(k) - f'(k + \Delta v))^2 \dots\dots\dots(2)$$

図6に自己相関を求めた結果を示す。

この自己相関を用いて、粒子変位の決定を次のようにする。濃淡パターン f' を濃淡パターン f 上でスライドさせながら相関をとると、座標の原点($\Delta v = 0$)で極小値0を取り、その両側に複数の谷ができる。 v 方向の濃淡パターンの周期、つまり、 v 方向平均粒子変位は、これらの谷の位置($D_1 \sim D_4$)で定まる。そこで、これらの谷の位置を微小領域内の候補変位とする。同様に、 u 方向濃淡パターンについても処理を行う。

図5 1次元濃淡パターン

図6 相関結果

候補変位の中から、最も相関値 $\phi ff'$ が小さいものを第1候補として選択するが、隣接する領域の変位と大きな変化はないことを考慮し、これまでに決定されている近傍の変位の状態によって確認する。すなわち、図7の太線の矢印の方向に沿って決定ずみの変位から、次式を利用して、 (i, j) 領域の予想変位 $\overline{\delta_{i,j}}$ を求め、利用する。

$$\overline{\delta_{i,j}} = \frac{\delta_{i-1,j-1} + \delta_{i,j-1} + \delta_{i+1,j-1} + \delta_{i-1,j}}{4} \dots\dots\dots(3)$$

第1候補の変位と $\overline{\delta_{i,j}}$ を比較し、大きな差が無ければ、そのまま、第1候補の変位を選択するが、差がある場合は $\overline{\delta_{i,j}}$ に最も近いものを候補変位から選択し、第1候補と入れ換える。ただし、近傍変位の中で、一つでも、特異な変位がある場合や、画像の端の方であるため $\overline{\delta_{i,j}}$ が計算できない場合は、そのまま第1候補の変位を選択する。

同様な処理を画像全域について行い、全体の変位ベクトルが算出される。その後、各々の変位ベクトルについて、再度、8近傍の変位と比較し、特異なベクトルがある場合は、候補変位と入れ換える。

図7 ベクトルの抽出

以上のようにして、変位ベクトルが決定される。このベクトルから、あらかじめ計測されているバイアス速度を引くことにより、真の方向を持った速度ベクトルが算出される。

4. 実験

図1に示したような、長さ3.4m、断面0.6×0.5mの水槽内で、直径4.45cm、長さ45.75cmの円柱をリニアモータで動かすことによって生じる、後方流を計測した。ただし、レーザ光は、24相ポリゴンミラーを28.0Hzで回転させることにより、約1.5ms間隔で照射した。

図8は円柱を静止させ、流れのない状態で撮影した写真であり、バイアスを算出するのに利用した。粒子像は多重露光され、露光時間内にそれぞれの粒子が3度づつ露光されているのが分かる。円柱の輪郭線が3重に見えるが、これは、バイアスによるものである。

図9はRe=3,000で円柱を駆動させた場合の後方流の写真を示す。この写真をイメージスキャナにより、デジタルデータ(2,200×1,600)に変換し、提案する方法で処理した。画像上の68×48の箇所に30×30[画素]の微小領域を取り、相関処理による速度ベクトルの抽出を行った。結果を図10に示す。

本処理に要した時間はパーソナルコンピュータ(PC9801DS)を利用して約15分であった。これに対し、通常の2次元相関を用いた場合には、約10時間要した。

図8 速度バイアスのPIV写真

図9 円柱後方流のPIV写真

図10 速度ベクトル

5. 結言

文献

本論文では、一枚の画像に速度バイアス法を用いて多重露光された粒子群から、効率良く速度ベクトルを抽出する方法を紹介した。また、実験結果より、手法の有効性を示した。

微小領域の2次元濃淡パターンを積分計算により、直行する2つの1次元濃淡パターンに置き換え、計算量を大幅に軽減した。また、微小領域の座標をバイアス方向を考慮して取ることにより、常に変位を正とし、速度ベクトルの向きが決定できるようにした。その結果、通常の2次元相関に比べ、大幅な高速化がなされた。本手法は速度バイアス法で得られた画像の処理として、非常に効果的な方法だと考えらる。

- (1) 小林・ほか3名, 機論, 55-509, B (1989), 107.
- (2) 山本・ほか3名, 機論, 57-543, B (1991), 3832.
- (3) 鶴崎・浦田, 機論, 56-523, B (1990), 724.
- (4) 村田・ほか3名, 機論, 56-524, B (1990), 1043.
- (5) Lourenco, L. and Krothapalli, A., Lecture Notes in Engineering: Advances in Fluid Mechanics Measurements, Springer-Verlag, (1989), 128.
- (6) 木村・ほか2名, 計測自動制御学会論文集, 23-2 (1987), 101.
- (7) Barnea, D. and Silverman, F., IEEE Transactions on Computers, Vol. c-21, No. 2, (1972), 179.