42 P I V の機能拡大に関する研究

— 粒子画像取得の新しいビデオテクニク —

東大生研 小林敏雄、佐賀徹雄、瀬川茂樹[○]、古屋七郎

Particle-imaging Velocimetry : a new video technique
to capture particle images

Toshio KOBAYASHI、Tetsuo SAGA、
Shigeki SEGAWA、Shichiro FURUYA

A new video technique to capture particle images has been developed for extension of measurement range of PIV. An image input equipment, which consists of a beam splitter, three prisms, two TV cameras with variable shutters (framing rate 1/30sec) and a camera controller, can produce two types of streak images from a tracer particle by controlling the exposure of each camera and the shutter timing between two TV cameras. Flow visualization images are captured in this technique which allows determination of both velocity magnitude and direction during short time interval up to 1/10000 sec. The technique can be applied to measure high speed visual image.

1. はじめに

トレーサ粒子により可視化した流れ場の画像をデジタル画像処理して流れ場の速度を計測する P I V (Particle-Imaging Velocimetry) は、瞬時の広域流れ場の多点の情報を採取できること、流れの構造に関する情報が得られること、あるいは処理の自動化が比較的容易であることなどから新しい流体計測方法として注目されている^{1), 2), 3)}。しかし、この計測方法においては、オンライン計測を実現するため使用する T V カメラの性能 (通常フレームレートは 1 / 30 秒) により、計測可能な流速がきわめて低速の領域に限定され、これが P I V の実用的な運用に対する 1 つの障害となっている。そこで、本研究では画像入力部に工夫を加え、短時間内の同一粒子の運動を二種類の流跡画像として作成しこれらを自動処理して速度ベクトルを決定する方法を考案した。通常の T V カメラを用いる画像処理システムで P I V における流速計測範囲の拡大を図ったので報告する。

2. 入力画像

2-1. 画像入力機器

本画像処理では、後述の流跡画像と瞬間的な粒子画像の 2 種類の画像を作成しこれを解析する。画像入力部は図 1 に示すような分光器と 2 台のシャッター付き T V カメラ (マイクロテクニカ製 C C D ビデオカメラ T K - 6 6) およびカメラ制御回路から構成されてい

る。流れ場からの入射光はビームスプリッター（透過率／反射率の比が1：1）により2系統に分光され2台のTVカメラへ導かれる。このとき、ビームスプリッターからTVカメラまでの光路長を等しくするよう3個のプリズムを用いて調整する。分光器の内面は無反射用の黒色コーティングを施し乱反射を防いでいる。2台のカメラの露光時刻・露光時間はカメラ制御回路により設定する。図2にTVカメラ制御回路による2台のTVカメラの露光時刻と露光時間の関係を示す。TVカメラ1により露光時間 ΔT_1 でトレーサ粒子の流跡像（流跡画像と呼ぶ）を、TVカメラ2により露光時間 ΔT_2 で瞬間的な粒子像（粒子画像と呼ぶ）を撮影する。図に示すように、TVカメラ1とTVカメラ2の露光開始時刻を制御して撮影することにより流跡の始点側あるいは終点側の判別を行う。露光時間 ΔT_1 、 ΔT_2 あるいはインターバル Δt は流れ場の速度に応じて調整する。また、2台のTVカメラにより撮影した画像は画像処理装置にオンラインで入力し 512×480 画素 $\times$ 256階調の画像として記録する。流跡あるいは粒子画像は流跡幅と粒子径がほぼ同程度の大きさになるようにTVカメラのレンズ絞りを調整する。

2-2. 2画像の位置合わせ

2台のTVカメラによる入力画像の相対位置は、分光器内のプリズムの位置調整、TVカメラの取り付け方法、TVカメラレンズの歪など数多くの要因により2次的に歪みを持つ。そこで、2次元射影変換を行い入力画像の相対的な位置を合わせる。同時に画像内の各点の歪を調べる。基準板は無反射用の黒色の塗装を施し4隅に2画像位置合わせ用の基準点を、その内側の $100\text{mm} \times 90\text{mm}$ の領域に10mm間隔で直径1mmの白色のマーカを110個配置した。2画像の相対位置を合わせる射影変換は次式により行う。 $x' = (a_1x + a_2y + a_3) / (a_7x + a_8y + 1)$ 、 $y' = (a_4x + a_5y + a_6) / (a_7x + a_8y + 1)$ 。ここに x' 、 y' は変換後、 x 、 y は変換前の座標位置である。また、各係数 $a_1 \sim a_8$ は画像内の4隅のマーカの重心位置を用いて決定する。2台のカメラにより撮影した各画像を基準座表系に変換してマーカの重心位置の差を調べると、全ての点で ± 1 画素以内と極めて小さい。

3. 画像解析

fig.1 Image separator
and TV cameras

fig.2 Exposure time and
time interval

3-1. 画像処理法

TVカメラ1、2から入力した流跡と粒子の画像に前述の2次元の射影変換を施し基準座表系へ変換する。まず、供試体あるいは4隅の基準点などを背景処理により消去し、この画像に近傍点を用いるスムージング処理を施す。次に、対話的に求めたしきい値で画像を2値化し、画面端に接した粒子の除去および縮小・拡大処理によるノイズ除去を行い、流跡と粒子にラベリング処理を施す。この後、流跡画像では細線化処理により細線の両端点座標位置を検出しこれを記録する。一方、粒子画像では粒子の重心座標位置を求めこれを記録する。本画像解析ではまず流跡の細線端点と粒子とを対応づけ、つぎに同一トレーサ粒子の流跡の濃淡画像と粒子の濃淡画像とのマッチング処理より速度ベクトルを決定する。以下に詳細を示す。

3-2. 速度ベクトルの決定

図3に流跡と粒子の対応づけを示す。図中流跡をS1, S2, S3、粒子をP1, P2, P3で示す。対応づけは粒子重心まわりに探査領域を設定しそこに存在する流跡の細線両端点(図中S1s, S1e, S2s, S2e, S3s, S3e)を検出する。つぎに粒子重心(図中P1g, P2g, P3g)に最も近い点を選び粒子と流跡とを対応づける(図においてはP1とS1s, P2とS2s, P3とS3s)。対応づけられた端点は、カメラ1と2の露光時刻の関係より始点側あるいは終点側を判別するが図2の関係では始点側の端点を対応づけたことになる(図中P1とS1s・S1e, P2とS2s・S2e, P3とS3s・S3e)。つぎに階調画像を用いたマッチング処理により速度ベクトルを求める。流跡階調画像の始点側端点を中心に平均粒子径の3倍の領域Aを設定する。一方対応する粒子階調画像においても粒子重心位置のまわりに平均粒子径の1.5倍の領域Bを設定する。次に、設定した粒子階調画像の領域Bをテンプレートにして流跡階調画像の領域A内の各位置で流跡端部と粒子のマッチング度を調べる。本報告でのマッチングは以下で定義する類似度 S_R を用いた。 $S_R = ((1/N^2) \sum (|a-b|) / ((\bar{a} + \bar{b}) / 2))$ (但し a 、 $\bar{a}$ は領域Aの画素の濃度値と平均値で、 b 、 $\bar{b}$ は領域Bの画素の濃度値とその平均値、 N はマッチング領域の1辺である)。 S_R が低いほど相互の関係が類

fig.3 Identification of S and P

fig.4 Matching between particle and pathline and its similarity

似であることを示す。図4に粒子画像、流跡画像の等濃度線図とそれらの中心線上の1次元濃度分布図を模式的に示し、相互の画像の濃度値の差の領域を斜線で示す。流跡端に粒子が位置する場合(Case 2)とその前後に位置する場合(Case 1, Case 3)での類似度の違いを調べるとCase 2で示す流跡、粒子の端点が一一致した場合が類似度が最小になることが解る。領域A内で領域Bとの $S_{R\min}$ を与える粒子像の重心位置を粒子の始点あるいは終点とする。模式図5においてSを流跡、Pを粒子とすると、流跡と粒子のマッチングにより流跡始点部における粒子重心位置 P_{sg} と終端部での粒子重心位置 P_{eg} (終点)が決定される。いま流跡像は ΔT_1 、粒子像は、 ΔT_2 で撮影されているので P_{sg} と P_{eg} 間の距離は時間 $\Delta t = \Delta T_1 - \Delta T_2$ 間の粒子の移動量となる。速度ベクトルは ΔT と P_{sg} 、 P_{eg} から決定する。

4. 水中自由噴流への適用例

図6に自由噴流で攪拌される容器内での速度計測例を示す。流れ場に直径0.5mmのトレーサ粒子(ナイロン12、比重0.98)を混入し、レーザーライトシートで照射しながら画像を入力した。撮影の露光時間と露光時刻は $\Delta T_1 = 1/1000$ s、 $\Delta T_2 = 1/8000$ s、 $\Delta t = 1/8000$ sで、レンズ絞りはカメラ1が $f = 1.8$ 、カメラ2が $f = 2.4$ である。拡大例の粒子速度は2.3m/sである。

5. まとめ

PIVにおける新しいTVカメラ画像入力方法を考案し、計測範囲の拡大を試みた。本研究の主な結果は

- (1) 画像入力部を分光器と2台のCCD TVカメラ(NTSC方式)およびカメラ制御回路より構成し、同一粒子の流跡と粒子を2画像上で作成する方法を開発した。
- (2) 流跡画像と粒子画像を自動的に解析して速度ベクトルを求めるアルゴリズムを開発した。

参考文献)

- 1) Hesselink, L., Ann. Rev. Fluid Mech. 20, 1988, p. 421.
- 2) 小林ら、機論B 55-509, 1989, p. 107.
- 3) 西野ら、機論B 55-510, 1989, p. 404.

fig. 5 Determination of the velocity vector

fig. 6 Velocity vectors