27 時空間相関法を用いた流れの三次元画像計測

神戸大学 木村一郎^{*}、河野吉晴、高森 年

Three-Dimensional Flow Velocity Vector Measurement
Based on Spatio-Temporal Correlation

Ichiro KIMURA^{*}, Yoshiharu KOHNO^{*}, and Toshi TAKAMORI^{*}

A new measurement system of three-dimensional flow velocity vector was developed using a spatio-temporal correlation method. This method needs simultaneously two images observed at a short distance in the flow direction. Each of the two images consists of time series of the frames. A three-dimensional velocity vector is obtained by calculating spatio-temporal correlation between the two images.

1. はじめに

本研究では、画像内の個々のトレーサを追跡せず、トレーサを含む画像を空間的濃度パターンとして捉え、二次元速度ベクトル分布を求める相関法の原理を三次元に拡張した、時空間相関法による三次元速度ベクトル分布計測システムを開発した。この方法は空間相関に基づく二次元速度情報に加え、空間的に異なる場の二つのトレーサ画像の時間相関に基づく1次元速度情報を得て、三次元速度ベクトルを求める方法である。この方法は原理的に空間密度の高い速度ベクトル計測が可能であり、またトレーサ粒子追跡法¹⁾ほど流れ場の既知情報を必要としない特長がある。この方法を矩形水路の流れに適用し、その有用性を確かめたので、ここにその具体的方法と結果を述べる。

2. 画像計測システム

Fig. 1 に流れ場の三次元速度ベクトル計測システムの構成を示す。時空間相関に基づき三次元速度ベクトルを求めるためには、流れ場の主方向に垂直な二つの断面での時系列なトレーサ画像を必要とする。そこで図に示すように、赤と青の2色のスリット光を流れの断面に照射し、得られる2枚のトレーサ画像を6枚の鏡を組合せた光学装置²⁾を用いて一台のカラーCCDカメラで撮影する。この方法では、2枚のトレーサ画像を1枚のTV画像に上下もしくは左右に分割し同時撮影することが可能となり、二枚の画像の時間的同期をとる必要がなくなる。

画像は1/30sec間隔で撮影され、ビデオタイマを通してVTRに記録される。VTRに記

^{*} Faculty of Engineering, Kobe University, Rokkodai Nada Kobe 657 Japan

録された画像は、カラーデコーダ（色復調回路）でRGB（赤緑青）の三原色信号に色分解される。色分解されたR、G、B、それぞれの画像は256階調（8ビット）にデジタル化され、1フレームに付きRGB3画面（画素数580×480）の画像データがイメージプロセッサに記憶される。この画像データはコンピュータに送られ、次章で述べる時空間相関に基づく三次元速度ベクトル測定に基づく処理がなされた後、その結果がグラフィックディスプレイ、プリンタ、X-Yプロッタなどの画像出力装置に表示される。

Fig. 1 Three-dimensional velocity vector measurement system

3. 計測の原理

Fig. 2 に時空間相関法による三次元速度ベクトル測定の原理を示す。矢印は流れの主方向で、これに垂直な実線の四角形は、時刻 t における流れの主方向に垂直な二つのスリット位置での断面トレーサ画像を示している。トレーサ画像 $f(x, y, t)$ 、 $g(x, y, t)$ はそれぞれ上流側と下流側の断面画像である。破線の四角形はそれぞれの断面画像の時系列画像を示す。

いま、画像 $f(x, y, t)$ に点 (x_0, y_0, t) を中心画素とする大きさ $m \times m$ の基準画素マトリクスの小領域を設け、同様に画像 $g(x, y, t)$ 上で時間と空間位置をずらした点 $(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, t + \tau)$ を中心画素とする大きさ $m \times m$ の画素マトリクス的小領域を設定する。この二つの画素マトリクスの濃度レベルをそれぞれ f_1 、

Fig. 2 Principle of spatio-temporal correlation method

$f_2, f_3, \dots, f_{m^2-1}$ ならびに $g_1, g_2, g_3, \dots, g_{m^2-1}$ とすると、両画素マトリクス間の規格化した相互相関関数 $R_{f,g}(\Delta x, \Delta y, \tau)$ は次式で表わされる。

$$R_{f,g}(\Delta x, \Delta y, \tau) = \frac{\sum_{i=0}^{m^2-1} (f_i - \bar{f})^* (g_i - \bar{g})}{\left[\sum_{i=0}^{m^2-1} (f_i - \bar{f})^2 \sum_{i=0}^{m^2-1} (g_i - \bar{g})^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

ただし、 $\bar{f}$, $\bar{g}$ は平均値である。

ここで、 $R_{f,g}(\Delta x_m, \Delta y_m, \tau_m)$ が最大値をとるならば、 $\Delta x_m, \Delta y_m, \tau_m$ はそれぞれ基準マトリクスの小領域のトレーサ粒子群の x 、 y 方向への空間移動量、およびスリット間隔 d をそのトレーサ粒子群が移動するに要する時間であると考えられる。したがって、点 (x_0, y_0, t) における三次元速度ベクトルは、

$$V = \left(\frac{\Delta x_m}{\tau_m}, \frac{\Delta y_m}{\tau_m}, \frac{d}{\tau_m} \right) \quad (2)$$

となる。

以上の原理に基づいた三次元速度ベクトル分布を求める手順をつぎに述べる。1) 各々のスリットの画像中に現れる、本来必要のない断面側のトレーサ粒子像を色相の値により除去する。2) 光学系により歪ならびに変形を受けたトレーサ画像の再構成³⁾を行う。3) 以上の前処理によって得られたトレーサ画像に対し、上述の原理に基づく時空間相関法を適用し三次元速度ベクトル分布を算出する。

4. 矩形水路流れへの適用

4.1 可視化実験

水槽は回流式開水路型を用い、可視化手法としてはトレーサ注入法を採用した。トレーサ粒子として比重がほぼ1.0で平均粒子径0.5mmのポリスチレン粒子を用いた。カラースリット光はスライドプロジェクタよりシリンドリカルレンズを通し平行光線に絞られ、流水槽側面より照射される。各スリットの幅は3mm、上流側と下流側のスリットの間隔は14mmとした。二枚の断面トレーサ画像は、Fig. 1 に示すように水槽下方に設置された鏡を用いた光学装置とカラーTVカメラにより撮影される。ここでは本計測システムの有用性を評価し易くするために、流れの状態が明白な矩形水路内の定常流れを測定対象とした。流れの平均速度はほぼ50mm/secである。

4.2 計測結果

Fig. 3 に三次元速度ベクトル分布の計測結果の一例を示す。求められたのは矩形水路のほぼ中央部の 5×5 の格子点での三次元速度ベクトルである。相関計算を実行する画

素マトリクスの大きさは 17×17 である。また、相関計算の探查領域は、対象流れが一様定常流であることを考え、空間領域はX-Y方向に基準マトリクスの原点に対し ± 8 画素、時間領域は流れの平均速度で移動するトレーサ粒子が二枚の断面スリット間を移動するのに要する時間を中心とし $\pm 1/5 \text{ sec}$ (± 6 画面) とした。測定領域での三次元速度ベクトルは、多少のバラツキはあるが流れ方向に一致し、その大きさもほぼ一定である。この傾向は矩形水路内の一様流の特徴を表しており、本計測システムの有用性を示している。

Fig. 3 Three-dimensional velocity vector distribution

5. おわりに

時空間相関法に基づく流れ場の三次元速度ベクトル計測システムを開発し、その有用性を実証した。従来のトレーサ粒子追跡法と比較して、この方法の利点は原理的に、1) 個々のトレーサ粒子を追跡するのではなく、画像パターンとして捉えるため、より広範囲の可視化法に適用できる。2) スリット断面上では任意の位置での速度ベクトルが得られるので、空間的に高密度な計測が可能である。3) 既知情報がより少ない流れ場への適用が可能である。などである。しかしながら、スリット断面上での速度ベクトル分布しか得られないという問題点があり、三次元空間で多くの三次元ベクトルを得るにはスリットを含む光学系の工夫が必要となるであろう。また、本システムの測定精度は基本的に、画像のフレーム周期と画素分解能に強く依存するので、将来画像計測システムのハードの発展にともない高精度な計測が可能であると思われる。

参考文献

- 1) 西野 笠置 平田 佐田: 画像処理に基づく流れの三次元画像計測に関する研究, 日本機械学会論文集, B編, 55-510, 404/412 (1989)
- 2) R.G.Racca J.M.Dewey :A method for automatic particle tracking in a three dimensional flow field:Experiments in Fluids, 6, 25/32 (1988)
- 3) Earnest, L, Hall: Computer Image Processing and Recognition, 76/88 (1979)