

時空間微分に基づく高精度 P I V の開発

DEVELOPMENT OF HIGH-ACCURATE PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY BASED ON IMPROVED OPTICAL FLOW METHOD

藤田一郎¹
Ichiro FUJITA

¹正会員 学博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台 1-1)

A new method of image analysis for measuring visualized two-dimensional flow field was developed. The method is basically based on the optical flow technique which is one of the image analysis techniques for quickly detecting moving objects, e.g. in the field of robotics. Conventionally optical flow technique utilizes an advection equation for image intensity field by assuming that local velocity is kept constant within a short time interval. In the new method, constant velocity components as well as velocity gradients are taken into account to improve the accuracy in measuring shearing flow fields. The performance of the proposed method was evaluated by using synthetic images with various velocity distributions and also actual surface flow images obtained during flood. The presented method has several significant advantages over the conventional PIV (Particle Image Velocimetry).

Key Words: *velocity measurements, particle image velocimetry (PIV), optical flow, gradient method, particle image simulation*

1. はじめに

流れを何らかの方法で可視化してその流況を調べるといふ取り組みは古くから行われてきた観察法であり¹⁾, 近年では乱流境界層の秩序構造の発見²⁾に代表されるように, 可視化映像の定性的な観察から重要な成果が得られている. 一方, 最近の画像計測技術の著しい発展によって, このような従来の定性的な観測結果からさえも定量的な情報の抽出が可能となってきた. その手法の典型的なものとして一般的に普及してきたのが PIV (Particle Image Velocimetry)^{3,4)}といわれる画像計測手法であり, 製品化された PIV 計測システムも多い.

PIV の利用方法は, レーザ光膜などを用いた非常に洗練された計測システムを利用する場合と, 通常のビデオ撮影に基づく計測システムを利用する場合に大別できる. 前者は, 実験室内での高精度な計測に利用されるものであり, 現時点での先端的な計測システムとしては, ダブルパルス YAG レーザと高解像度カメラ(メガピクセルの空間解像度)を組み合わせたものが知られる. このシステムは時間分解能が 15Hz 程度と低いため連続的な流れの観測はできなかったが, 最新の画像計測機器では, メガピクセルの空間解像度でキロヘルツの時間分解能が実現可能となり, 高速流に対しても時空間的な解析が可能となってきた⁵⁾. 後者のシステムでは, 500x500 画素程度の空間解像度で 30fps(frame per second)の時間分解能

しかないが, パーソナルコンピュータの発達により可視化映像のムービーファイルとしての取得が非常に容易になってきたため, 実験室レベルのみならず実河川流の画像計測にも利用されるようになってきた^{6,7)}.

以上のように, 画像計測に関するハードウェアは目を見張るような発展を遂げてきたものの, PIV に関するアルゴリズムに関しては, 近年大きな進展が見られないのが現状である. 本研究では, 最近になって注目されるようになってきた時空間微分法^{8,9)}をベースとした新たな計測アルゴリズムを考案し, シミュレーション画像や実際画像を用いてその計測性能を従来の PIV と比較検討した.

2. 画像計測法の概要

(1) 従来型 P I V

PIV はテンプレートパターンマッチングに基づく画像計測法である. この方法は, 2枚の連続画像上にとった微小な領域(テンプレート, 相関窓あるいは参照フレームなどと呼ばれる)の輝度分布の類似性を相互相関係数や輝度差の累積値などを評価関数として計算し, 微小領域内のパターンの移動距離を求めるものである. 計測精度は, サブピクセルの補正法を用いて改善できるが, 検出できる最小移動量は 0.1~0.2 画素程度と言われている. サブピクセル補正法の代表的なものとしては, パラ

ボリック法やガウシアン法がある。PIV で得られる流速ベクトル (u,v) は、画素単位で求めた移動距離を (D_{PX}, D_{PY}) 、サブピクセル補正で得られた微小移動距離を (D_{SX}, D_{SY}) 、そして画像時間間隔を DT とすると、次式で与えられる。

$$(u,v) = (D_{PX} + D_{SX}, D_{PY} + D_{SY}) / DT \quad (1)$$

(2) 従来型時空間微分法

時空間微分法はオプティカルフロー法とも呼ばれるが、パターンマッチングではなく画像の輝度分布が流体とともに移流すると仮定して、輝度の時空間的な変化量から速度ベクトルを推定する逆問題の解法である。いま、輝度分布を $f(x, y, t)$ とすると輝度分布に関する移流方程式は次式で与えられる。

$$f_t + uf_x + vf_y = e \quad (2)$$

ここに、 (u,v) は局所的な輝度分布の平均移流速度ベクトル、 e は背景画像の輝度分布の変化などを含むソース項である。添え字は偏微分を表す。式(2)中の f_t, f_x, f_y は輝度分布から算出できるので、背景の変化がないもの ($e=0$) とすると速度成分 (u, v) は、ある小領域 (A) 内で次の目的関数

$$G(u,v) = \sum_A (f_t + uf_x + vf_y)^2 \quad (3)$$

が最小となるように最小二乗法による求まる。ここで、小領域内での速度変化がないと仮定すれば速度成分 (u, v) は次式から算出できる。

$$\begin{pmatrix} \sum_A f_x^2 & \sum_A f_x f_y \\ \sum_A f_x f_y & \sum_A f_y^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \sum_A f_x f_t \\ \sum_A f_y f_t \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここでの小領域は PIV におけるテンプレートとは意味合いが違うが、サイズのには同程度のものと考えておけばよい。式(4)から明らかなようにこの方法で高精度に計測を行うためには各偏微分項に対する差分近似が十分なものでなければならない。式(4)の中で空間方向の微分値 (f_x, f_y) は容易に高次精度化できるが、時間方向の微分値 f_t については、単位時間あたりの輝度パターンの移動量が大きくなるにつれて誤差が増大する。したがって、この

手法を有効に利用するためには、輝度分布変位量がわずかとなる非常に短い時間間隔の連続画像が必要となる。この条件が満たされない場合、計測結果は異常ベクトルが多数含まれる非常に NOISY なものになる。

ところが、最近になって式(4)をそのまま使うのではなく、サブピクセル補正にのみこの式を用いるアイデアが提案され⁸⁾、その精度の高さが注目されるようになってきた。この方法では、輝度分布の平均的な移動量 (D_{PX}, D_{PY}) については従来型の PIV で求め、平均流速で移動する移動座標系からみた高々 1 画素程度の相対的なサブピクセル移動量の算出にだけ式(4)を用いている。この方法により、1/100 画素程度の移動量の計測が可能となったとの報告がなされ注目された⁹⁾。しかしながら、この方法では局所的な流速を一定と仮定しているため、せん断変形量が多い場合には精度の低下が懸念される。

一方、従来のように 2 枚の連続画像を利用する限り、式(4)中の時間微分項の高精度化は困難である。ダブルパルス YAG レーザを用いるシステムでは利用できないが、高速高解像度ビデオカメラのシステムでは多連続画像を活用できるため、大幅な精度の向上が期待できる。そこで、以下の 2 点に対して従来法の改善を行うこととした。すなわち、

- a) 時空間微分法における一定速度の仮定の解除
 - b) 多時刻画像の導入
- である。

(3) 改良型時空間微分法

前節における改善点 a) を実現するために、ここでは局所的な流速を一定とはしないで、一次の高次項までを含んだ次式のようにおく。

$$\begin{aligned} u &= u_0 + u_x \Delta x + u_y \Delta y + u_t \Delta t \\ v &= v_0 + v_x \Delta x + v_y \Delta y + v_t \Delta t \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 u_0, v_0 は小領域中心における速度成分、 $\Delta x = x - x_0, \Delta y = y - y_0, \Delta t = t - t_0$ 、 (x_0, y_0) は小領域の中心座標、 t_0 は連続撮影の中心時刻である。これらを式(3)に代入して最小二乗法を適用すれば以下に示す式(6)が得られる。ただし、式(6)における積分は時空間のボリュームに対して行う必要がある。式(6)を解けば、速度成分だけでなく時空間方向の速度勾配テンソルも同時に得られることがわ

$$\begin{bmatrix} \sum f_x^2 & \sum f_x f_y & \sum x f_x^2 & \sum y f_x^2 & \sum t f_x^2 & \sum x f_x f_y & \sum y f_x f_y & \sum t f_x f_y \\ \sum f_x f_y & \sum f_y^2 & \sum x f_x f_y & \sum y f_x f_y & \sum t f_x f_y & \sum x f_y^2 & \sum y f_y^2 & \sum t f_y^2 \\ \sum x f_x^2 & \sum x f_x f_y & \sum x^2 f_x^2 & \sum x y f_x^2 & \sum x t f_x^2 & \sum x^2 f_x f_y & \sum x y f_x f_y & \sum x t f_x f_y \\ \sum y f_x^2 & \sum y f_x f_y & \sum x y f_x^2 & \sum y^2 f_x^2 & \sum y t f_x^2 & \sum x y f_x f_y & \sum y^2 f_x f_y & \sum y t f_x f_y \\ \sum t f_x^2 & \sum t f_x f_y & \sum x t f_x^2 & \sum y t f_x^2 & \sum t^2 f_x^2 & \sum x t f_x f_y & \sum y t f_x f_y & \sum t^2 f_x f_y \\ \sum x f_x f_y & \sum x f_y^2 & \sum x^2 f_x f_y & \sum x y f_x f_y & \sum x t f_x f_y & \sum x^2 f_y^2 & \sum x y f_y^2 & \sum x t f_y^2 \\ \sum y f_x f_y & \sum y f_y^2 & \sum x y f_x f_y & \sum y^2 f_x f_y & \sum y t f_x f_y & \sum x y f_y^2 & \sum y^2 f_y^2 & \sum y t f_y^2 \\ \sum t f_x f_y & \sum t f_y^2 & \sum x t f_x f_y & \sum y t f_x f_y & \sum t^2 f_x f_y & \sum x t f_y^2 & \sum y t f_y^2 & \sum t^2 f_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ u_x \\ u_y \\ u_t \\ v_x \\ v_y \\ v_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum f_x f_t \\ -\sum f_y f_t \\ -\sum x f_x f_t \\ -\sum y f_x f_t \\ -\sum t f_x f_t \\ -\sum x f_y f_t \\ -\sum y f_y f_t \\ -\sum t f_y f_t \end{bmatrix} \quad (6)$$

表-1 画像生成条件

画像サイズ (pixel)	粒径範囲 (pixel)	輝度範囲	粒子个数
300x300	10~15	150~250	4000

かる。すなわち、離散的な速度ベクトルを算出した後に差分によって間接的に勾配項を求めるのではなく、画像変化の情報から直接的に速度勾配項、あるいは渦度や発散値なども得られることになる。離散的な値から高精度の勾配値を得るためには、高密度に流速ベクトルを求めておく必要があるが、本手法では任意の点においても高精度の勾配値が得られる。

次に、改善点 b) に関しては式(6)の時間方向の濃度勾配の算出において以下のような高次差分を用いればよい。すなわち、連続3画像用いる場合は

$$f_t \cong \frac{f^{n+1}_{i,j} - f^{n-1}_{i,j}}{2\Delta t} \quad (7)$$

また、連続5画像用いる場合には

$$f_t \cong \frac{f^{n-2}_{i,j} - 8f^{n-1}_{i,j} + 8f^{n+1}_{i,j} - f^{n+2}_{i,j}}{12\Delta t} \quad (8)$$

などとする。ここに、 ij は空間軸、 n は時間軸のインデックスである。空間方向の濃度勾配の計算には、式(8)の差分を空間方向に展開して用いる。

3. シミュレーション画像による精度の検証

(1) 画像の生成法

開発した画像計測手法の精度を検証するためにシミュレーション画像を生成した。画像の生成条件を表-1に示す。粒子の輝度分布は二次元ガウス分布とし、粒径と輝度を表-1に示した範囲内で乱数で与えた。画像生成においては、サブピクセルレベルの粒子移動量を実現するために局所的に1画素を N 分割した空間を想定し、発生させた粒子の輝度分布をその空間内に配置させた後、1画素毎に輝度分布を平均して元画像とした。ここでは、 $N=10$ とした。 N がこれより大きな値の場合についても調べたが、結果的に得られる画像の輝度の値にはほとんど差はなかった。実際の解析では、パターンの画像を取り扱うために元画像に二次元ガウシアンフィルター（標準偏差が1.6画素）をかけ、平滑化した画像を用いた。得られた生成画像の一例を図-1に示す。連続画像は、各粒子を任意の流速分布にしたがって移動させて求めた。連続画像の数は5とした。

(2) 平行流を用いた検討

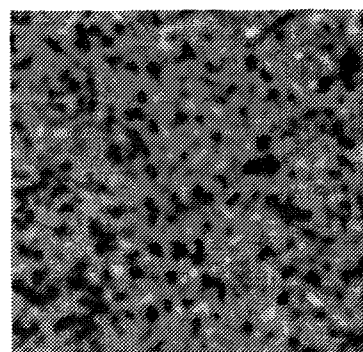


図-1 生成画像の例 (300x300 pixel)

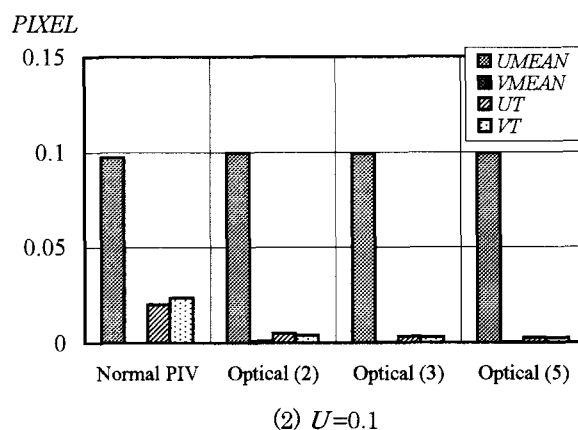
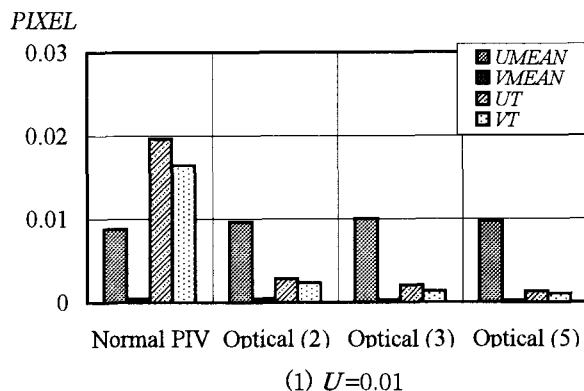
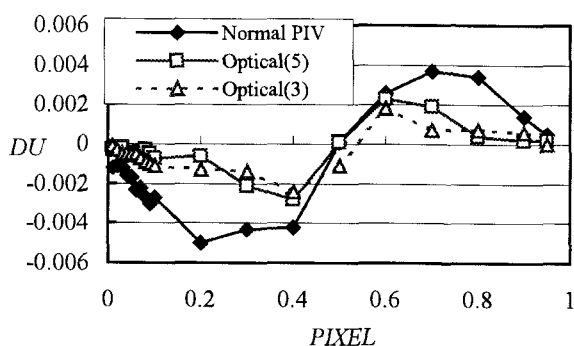


図-2 一様平行流に対する各手法の比較

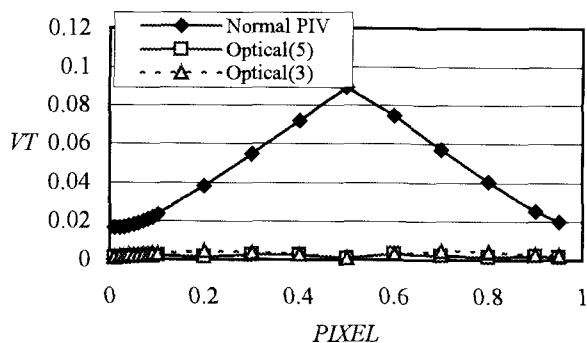
ここでは、最も単純な一様平行流を用いて従来法との比較検討を行う。平行流の場合の移動量はサブピクセルレベルの精度を調べるために、0.01~0.95画素の範囲で与えた。

a) 従来型の手法との比較

時間軸方向の輝度勾配の精度を高めるために3枚以上の連続画像を用いた場合の精度を従来法と比較した。図-2に検討結果の例を示す。ここで U は与えた移動量(画素)、 $UMEAN$ は流れ方向、 $VMEAN$ は横断方向の平均移動量、 UT は流れ方向、 VT は横断方向の移動量の偏差に対するRMS値である。また、Normal PIVは従来型の相関法に基づく方法（サブピクセル補間にはパラボリックを利用）、Optical(2)は式(4)を用いた従来型の時空間微分法、Optical(3)は3連続画像を利用し式(6)と式(7)を用いた



(1) 平均値からの偏差



(2) 横断方向成分のRMS値

図-3 サブピクセルレベルの精度比較（一様流）

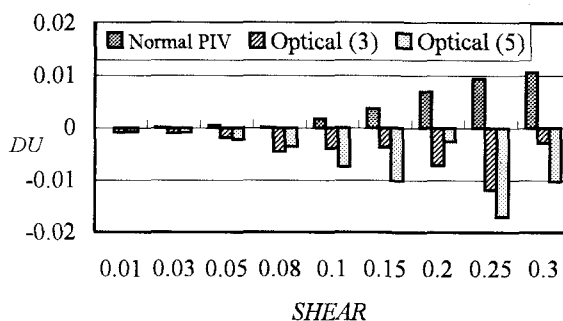
新手法、そして **Optical(5)** は 5 連続画像を利用し式(6)と式(8)を用いた新手法をさしている。PIV におけるテンプレートならびに時空間微分法における空間積分領域は一辺が 25 画素の正方形とした。図-2 より、平均値だけを比較すると手法間の差は大きくないが、変動成分をみると従来型の PIV と比べて時空間微分に基づく方法の方が全体的に高精度となっている。また、連続画像枚数を増すことにより精度がさらに改善されることもわかる。

b) サブピクセルレベルでの精度比較

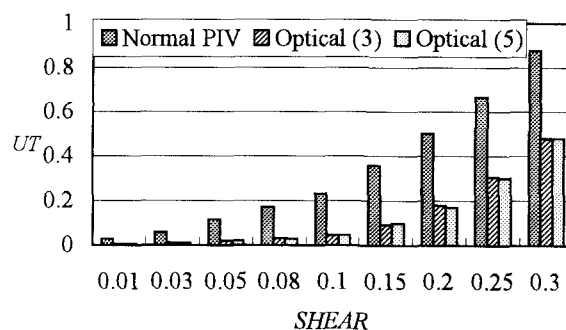
輝度分布の移動量を 1 画素内で連続的に変化させたときの精度を比較したのが図-3 である。DU は与えた変位量からのずれの平均値を示す。DU の値は非常に小さいが精度は一樣ではないことがわかる。これはピークロッキング現象³⁾によるものである。VT の値にはこの傾向がさらに強く表われており、従来の PIV では流速ベクトルが左右にぶれる傾向が強い。連続画像の枚数で比較すると、3 枚と 5 枚で顕著な違いは見られない。

(3) 一様せん断変形流を用いた検討

より実的な流れに対する検討を行うために、一様なせん断変形流に対して行った結果を図-4 に示す。ここに、*SHEAR* は単位時間当たりのせん断変形量である。例えば、*SHEAR*=0 は一様流、*SHEAR*=1 は 45 度のせん断変形に相当する。DU の値を比較すると従来法と新手法との間に大きな差は見られないが、その値はかなり大きなせん断変形量(*SHEAR*=0.3)に対しても 0.01 程度であり、誤差のレベルとしては無視できるオーダーである。



(1) 平均値からの偏差



(2) 流れ方向成分のRMS値

図-4 サブピクセルレベルの精度比較（せん断流）

これは、平均流を対象としている限り従来の PIV でも十分な精度が期待できることを示唆している。ところが、見かけ上発生する乱れに対応する *UT* に関しては、せん断変形量の増大につれて誤差が増加する傾向は同じだが、新手法では従来法の数分の一程度の誤差しか生じていない。さらに、*SHEAR*=0.15 までは *UT*<0.1 であり誤差が小さいレベルに保たれている。利用する連続画像枚数に関してはほとんど差はなく、実的には 3 枚の連続画像を利用すればよいことがわかる。

(4) ランキン渦の速度場を用いた検討

渦を含んだ瞬間的な流れ場と新手法による速度勾配値の精度を検討するために、コアの渦半径が 50 画素のランキン渦に対して各手法を適用した。中心の強制渦の渦度としては 0.1、0.2 および 0.4 を与えた。図-5 に各手法で得られた速度ベクトルを比較した。図中の円は強制渦の範囲を示す。コア渦度が小さい場合の流速ベクトルは、ここでは示していないコア渦度が 0.1 の場合も含め、一見すると図-5(1)に示した従来型 PIV と同様の流速分布が得られた。これに対し、せん断変形量がさらに大きくなるコア渦度が 0.4 のケースになると、従来法の結果に異常値が生じた(図-5(2))。新手法の結果には異常値は全く表われていない。また、ここでも連続枚数による違いはあまり見られない。

図-6 にはコア渦度が 0.2 のケースに対する渦度分布の等値線を示した。渦度の計算には二次中央差分を用いた。これより従来法では渦度分布が変形し、良好な分布形が

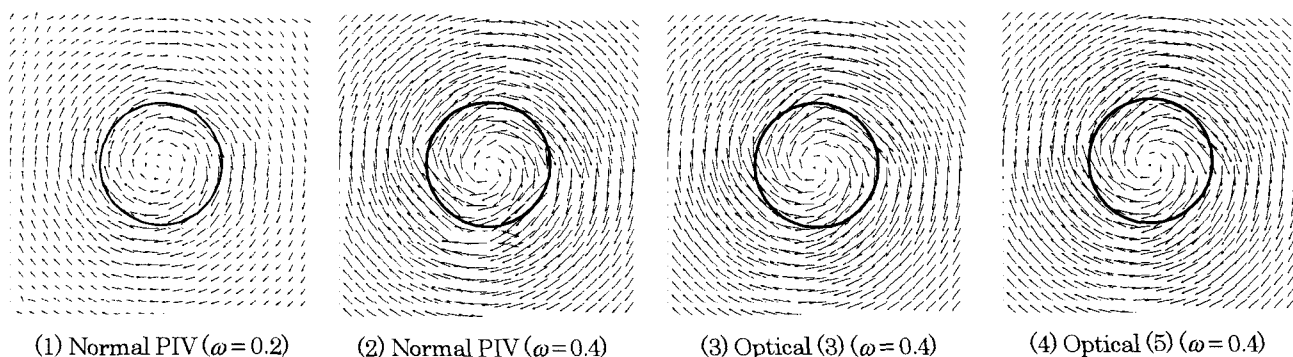


図-5 流速ベクトルの比較（ランキン渦）

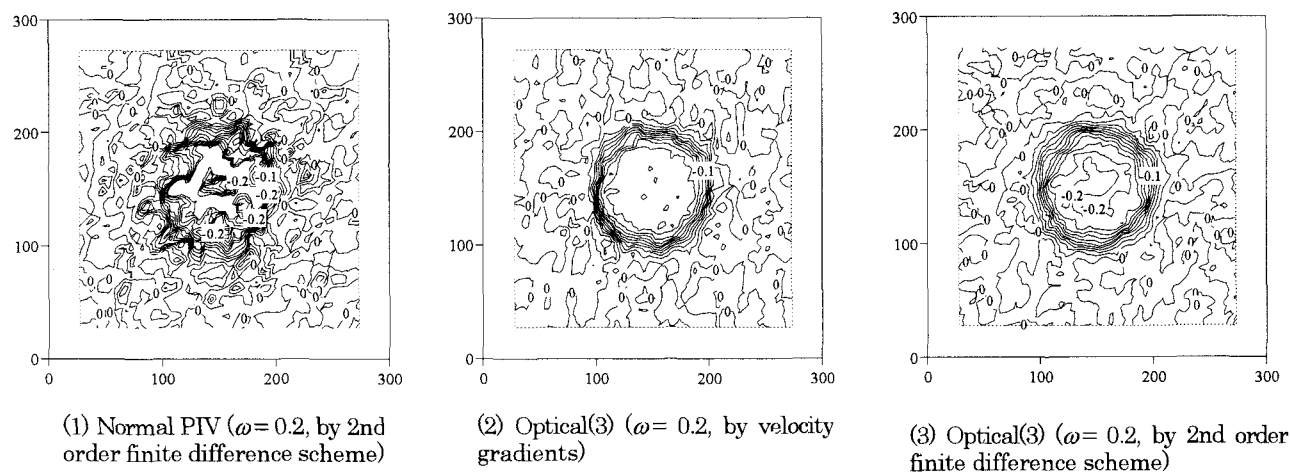


図-6 渦度分布の比較（ランキン渦）

得られていないことがわかる。これはこれまでも指摘してきたように、従来法は平均値の計測には向くが、瞬間値には無視できない誤差が含まれることを明示している。図-6(2)には式(6)から得られる速度勾配から直接求めた渦度分布、図-6(3)には同じく式(6)から得られる流速ベクトルを用い、間接的に差分によって求めた渦度分布を比較した。どちらの分布形も従来法に比べて大幅な精度の改善が見られる。式(6)の速度勾配項を用いる方法では、コア領域の渦度が与えた値よりも若干過小評価されているものの、分布の均一性は差分から求めたものよりも良好に保たれている。渦度分布がコア領域から周辺にかけて急変している様子もうまく得られている。差分による方法では、ベクトル密度が低くなるにつれて差分近似の誤差が増大するため、正確な渦度分布が得られなくなる可能性が高い。これに対して、式(6)の速度勾配項による方法は輝度分布の変化を利用して渦度を算出しているため、局所的に高精度の値が得られるメリットがある。

4. 実河川の画像を用いた検討

(1) 従来の洪水流画像解析の問題点

洪水時に撮影された画像にはある種のパターンが現わ

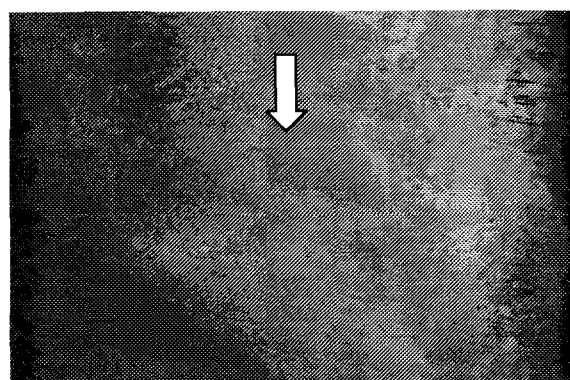
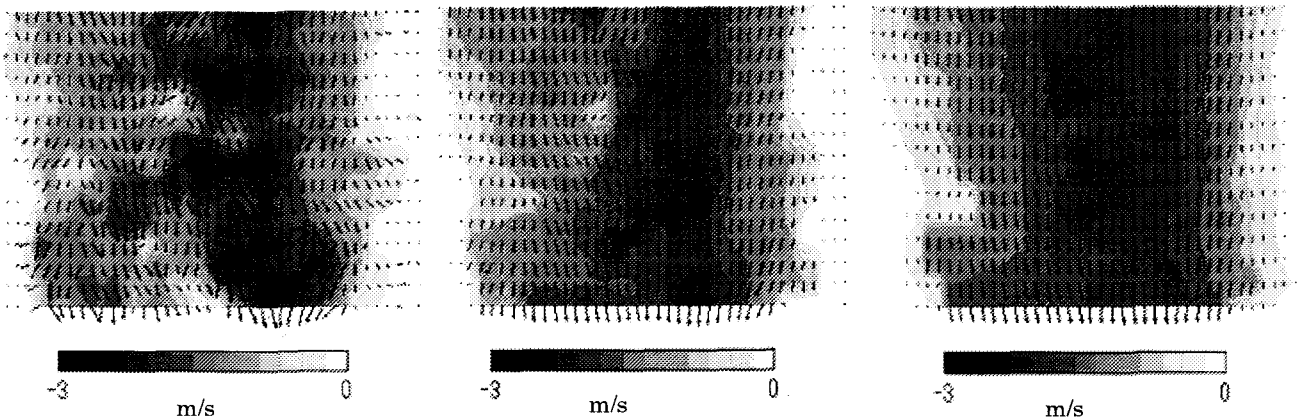


図-7 実河川洪水流の無ひずみ画像（宇治川、画像サイズ=82x56m）

れていることが多く、これを表面トレーサとして利用できる¹⁰⁾。図-7に示したのは洪水時の宇治川を撮影した斜め画像を幾何補正したものである。この画像にもスケールの大きなパターンが見られる。

河川を対象としたPIV解析では、通常のビデオカメラで撮影した画像を取り扱うため、画像のサンプリングは30fpsで行われるが、対象となるスケールが大きいいため、1画素サイズは10cmのオーダーにならざるを得ない。従ってこの状況で精度よく画像計測を行うには画像時間間隔(Δt)を慎重に与える必要があった。すなわち、1画

: 1m/s



(1) Normal PIV (DT=3/30sec)

(2) Normal PIV (DT=14/30sec)

(3) Optical (3) (DT=3/30sec)

図-8 瞬間流速ベクトルの従来法との比較 (宇治川洪水画像: 82x56m 範囲)

素移動量に対する速度が実際の流速の $1/10 \sim 1/20$ 程度となるように DT を調整する必要があった。しかしながら、微小なパターン移動量の検出に効果的な新手法を用いれば、以上のような制約条件を緩和できる可能性がある。

(2) 時空間微分法による解析

図-7 に示した洪水流の無歪み画像は 1 画素=20cm として生成したものである。この瞬間画像を第 1 画像とした一連の連続画像を用いて瞬間流速ベクトルの比較を行った。比較結果の一例を図-8 に示す。コンターは流れ方向の流速成分を示す。解析におけるテンプレートサイズは 45×45 画素とした。同じ時間間隔 $DT=1/10\text{sec}$ を用いた図-8(1) と図-8(3) から明らかなように、従来法の瞬間流速ベクトルにはばらつきや異常値が多く見られるのに対し、3 連続画像を用いた時空間微分法では、画像時間間隔が短いにもかかわらず滑らかに分布した良好な流速分布が得られている。これと同等程度の結果を従来法で得るには、図-8(2) に示したように約 5 倍の時間間隔 ($DT=14/30\text{sec}$) が必要だったが、流速分布形にはまだ異常な部分 (河道中央上側の低速な部分など) が残っている。ただ、当初は最小時間間隔 ($DT=1/30\text{sec}$) でも良好な結果を期待していたが、今回用いた実際画像では十分良好な結果は得られなかった。

5. おわりに

本研究では時空間微分法をサブピクセル補間に用い、さらに輝度分布の変形も考慮した新しい画像計測手法を開発した。シミュレーション画像と実河川画像に適用した結果、従来の PIV 法よりも多くの点で新手法の優位性を示すことができた。すなわち、(1) 平均流の計測に関しては従来法でも問題ないが、瞬間場や乱流場の計測を含めると時空間微分法の方が優位になること、(2) 2 連続画像を用いる従来の時空間微分法より多連続画像を用いる

方が高精度であること、(3) 3 枚以上の連続画像を用いることにより速度勾配テンソルが直接得られること、(4) 3 連続画像と 5 連続画像による結果の差はあまりないこと、などが明らかとなった。今後は、高速度ビデオカメラを用いた場合あるいは実河川流計測への適用性についてさらに検討を進める予定である。

謝辞

宇治川の洪水流画像の撮影に関しては京都大学防災研究所武藤助手の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Prandtl L. and Tietjens, O. G.: Applied Hydro- and Aeromechanics, Dover, 1934.
- 2) Kline, S. J. et al.: The Structure of Turbulent Boundary Layers, J. Fluid Mech., Vol. 30, pp. 741-773, 1967.
- 3) 小林敏雄監修: PIV の基礎と応用, Springer, 1998.
- 4) 可視化情報学会編: PIV ハンドブック, 森北出版, 2002.
- 5) 佐々木裕康: 高速度ビデオカメラ/超高速度カメラの最新動向, 可視化情報, Vol. 23, No. 89, pp. 2-6, 2003.
- 6) 藤田一郎, 河村三郎: ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み, 水工学論文集, Vol. 38, pp. 733-738, 1994.
- 7) 藤田一郎: トレーサを利用した実河川水制周辺流れのビデオ画像解析, 水工学論文集, Vol. 42, pp. 505-510, 1998.
- 8) 西尾茂他: 画像の時空間微分を利用した流場の計測手法—サブピクセル解析としての応用と高次近似項の評価, 可視化情報, Vol. 22, Suppl. 1, pp. 201-204, 2002.
- 9) Sugii, Y., et al.: A Highly Accurate Iterative PIV Technique Using a Gradient Method, Measurement Science and Technology, Vol. 11, pp. 1666-1673, 2000.
- 10) 藤田一郎: 実河川を対象とした画像計測技術, 水工学に関する夏期研修会講義集, pp. A-2-1~A-2-20, 2003.

(2003. 9. 30 受付)