A 2 1 3

時空間画像の輝度勾配テンソルを用いた 主流速分布の新計測法

藤田一郎 (神戸大学工学部), 渡辺英樹 (神戸大学大学院) ○

A New Method for Measuring Main Flow Distribution by Using Gradient Tensor on Space-Time Image

Ichiro FUJITA and Hideki WATANABE

ABSTRACT

A novel image analysis method for measuring river surface flow is presented. The method utilizes a space-time image of brightness on a searching line set parallel to the main flow direction. The angle of streaky pattern appeared on the space-time image indicates the mean flow velocity at the searching location. The gradient tensors of brightness are used to measure the streaky angle. The presented method, which we call STIV (the space time image velocimetry), is applied to an open-channel surface flow visualized by tracers and the large-scale actual flow of the Uji River. The results indicate that the method has a reasonable accuracy as compared with the conventional PIV.

Keywords: River flow measurement, Space-time image, STIV, PIV, Gradient tensor

1. まえがき

著者らは、河川表面の流速分布を非接触計測する方法として、テンプレートパターンマッチング法に基づく LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry)¹⁾、および時空間画像を利用した STIV (Space-Time Image Velocimetry) を提案してきている^{2,3)}。前者は二次元流速分布を計測する手法であり、後者は、流量観測法としての実用性をさらに高めるために計測対象を主流方向成分だけに限定して流速の横断分布を計測する方法である。本研究では、STIV における解析手法の改良を行うとともに、その計測精度を LSPIV と比較し、その有用性について検討した。

2. STIV の概要

STIV⁴⁾ は、主として実際河川を対象として一次元（主流方向）の平均速度場を求める新たな画像計測手法である。この方法では、水表面の流れ方向に想定した検査線上の輝度分布の時間変化を時空間プロットし、そこに現われる縞パターンの勾配から平均流速を求める。STIV で用いる時空間画像の一例を Fig.1(a) に示す。これは、縦軸に時間軸、横軸に流れ方向に平行に配置した検査線を取り、画像の濃度分布の時空間変化を示したものであ

る。全体的な傾向として右下に向かう縞模様が確認できる。この縞模様の平均的な傾き ϕ を求めれば検査上を通過している表面流の平均速度が得られることになる。すなわち、検査上の平均的な流速は次式から得られる。

$$U = \frac{S_x}{S_t} \tan \phi \quad (1)$$

ここで、 S_x (m/画素)：検査線軸の単位長さスケール、 S_t (sec/画素)：時間軸の単位時間スケールである。縞パターンの傾きは以下の式から求めることができる⁵⁾。

$$\tan 2\phi = \frac{2J_{12}}{J_{22} - J_{11}} \quad (2)$$

ここに、 J_{12} などは時空間画像上の輝度勾配に関するテンソルで

$$J_{pq} = \int_A \frac{\partial f}{\partial x_p} \frac{\partial f}{\partial x_q} dx dt \quad (3)$$

から計算できる。 f は輝度分布、添え字の p および q は時空間の成分を表す指数で、ここでは $x_1=x$ および $x_2=t$ である。 A は輝度勾配値の積分領域である。また、縞模様のコヒーレンシーが次式で定義される。

$$Cc = \frac{\sqrt{(J_{22} - J_{11})^2 + 4J_{12}^2}}{J_{11} + J_{22}}$$

(4)
この値は縞パターンの強さを示すパラメータであり、理想的な縞模様の場合に 1、全く縞模様がない場合に 0 の値をとる指標である。

3. 実験水路による検討

3.1 実験方法

実験には、長さ 20m、幅 2m、水路床勾配 1/800 の直線開水路を用いた。表面流の可視化には、平均粒径 $20\mu\text{m}$ のナイロン破砕粒子（白色粉末）をトレーサーとして用い、上流側から均等に散布した。画像の撮影は水面の鉛直上方から、デジタルビデオカメラを用いて行った。実験条件は、 $Q=24.47\text{ (l/s)}$ 、 $h=7.6\text{ (cm)}$ 、撮影時間は 30 秒、時間間隔は 1/30 秒である。解析方法として、STIV 法、PIV 法を行い、比較検討した。

3.2 時空間プロットとコヒーレンシー分布

Fig.1(a)は、水路の中央部分での連続可視化画像から得られた時空間画像と式 (2) を用いて得られた勾配ベクトルを重ねて示してある。ここではトレーサーを用いているため非常に明瞭なパターンが得られており、縞パターンに対応した勾配が良好に計算されていることが認められる。Fig.1(b)には、コヒーレンシーの分布と勾配ベクトルを重ねて示した。コヒーレンシーの値の大きい領域で勾配ベクトルが良好に得られている。有意な勾配ベクトルの値はこの特徴を用いることによって、正確に算出可能と考えられる。

3.3 解析結果

有意な方向を示した勾配ベクトルのみの平均を求めるために、あるしきい値以上のコヒーレンシーに対応する勾配ベクトルの勾配 ($\tan 2\phi$) の相対度数分布を示したのが Fig.2 である。ほぼ対称な分布形を示していることがわかる。本研究ではこの度数分布の重み付け平均から $\tan 2\phi$ の平均値を求め、式(1)から流速値を求めた。なお、度数分布の正規化はここでは行っていない。

このような手順で求めたある横断測線上の平均流速分布を示したのが Fig.3 である。図には、比較のために PIV による結果も示した。STIV では 1 画素ピッチで検査線を移動させて求めた

Fig. 1 Space-time Plot and Coherency Distribution

Fig. 2 Frequency Distribution

Fig. 3 Comparison of Mean Velocity Distribution

Fig. 4 Surface Flow Image (the Uji River)

結果が示されている。データには多少のばらつきはあるものの、両者の一致は良好であり、STIV においても十分流速計測が可能であることを確認できた。

4. 実河川流への適用

4.1 観測概要

実河川を対象とした観測は淀川水系宇治川 42.8kp 付近(京都府京都市伏見区)において行われた。Fig.4 に表面流の画像例を示す。表面には大スケールのまだら模様が現われており、目視観測ではそれが主流に乗って下流に移流しているのが確認できる。

撮影は観測用鉄塔の高さ 40m の地点から行った。手前に見えているのは不透過型の水制(長さ 20m)である。図中の R4~5, L4~8 は標定点であり、Table.1 に測量座標を示した。これより、対象となる空間スケールが数 10 メートルのオーダーであることがわかる。LSPIV による解析は $\Delta t = 1/3$ (sec), STIV による解析は $\Delta t = 1/30$ (sec)、濃度勾配テンソルの積分サイズ 12×12 (pixel) とした。LSPIV、STIV とも 30 秒間の画像データを用いて解析した。

4.2 時空間プロットとコヒーレンシー分布

実河川流が対象の場合には、トレーサーの散布が困難なため、前述のように表面に現われた水面の微小擾乱(波紋)を一種のトレーサーと見たててその移流状況を追跡する。幸い、観測地点では活発なボイルが発生しており、

Table 1 Mark Point Coordinates

標定点	X座標 (m)	Y座標 (m)	Z座標 (m)
R4	85.252	-683.791	13.532
R5	88.241	-702.566	13.525
L4	193.682	-678.523	13.188
L5	191.929	-695.338	13.009
L6	195.205	-710.546	12.929
L7	193.947	-730.249	13.053
L8	195.168	-744.949	13.098

Fig. 5 Space-time Plot and Coherency Distribution

その痕跡を波紋として利用することができた。ある検査線上の時空間プロットと STIV で得られた勾配ベクトルならびにコヒーレンシーの分布を Fig.5 に示す。得られた縞パターンは、トレーサーを用いた水路実験の時空間プロットほど明瞭なものではないが、パターンが部分的に得られているのは明らかであり、Fig.1 の場合と同様、

やはりコヒーレンシーの高い部分における
勾配ベクトルに一様性が見られる。

4.3 解析結果

Fig. 6にSTIVとLSPIVによって得られた平均流速分布の比較図を示す。両者はほぼ一致しており、実河川を対象とした場合でもSTIVが十分に有効なことがわかる。ただし、手前の水制群の近くや水制間では大規模な剥離渦が発生しており、流速の横断方向成分の変動が大きくなるため、今回のSTIV解析では計測の対象外とした。

5. おわりに

一般に、河川流の撮影は、堤防や橋の上からの撮影が大半であり、今回のケースのように十分な俯角が確保できるケースはまれである。LSPIVでは斜め画像の幾何補正を行うため、遠方ほど、補正後の画像の引き伸ばしが極端になってしまい、計測精度が低下する。従って、撮影地点から離れた対岸付近でも横断方向の空間解像度を1画素レベルで計測できるSTIVは精度の点でLSPIVよりも有利と思われる。また、画像にノイズがある場合でも、最も強いパターンを示す模様に対して高いコヒーレンシーが得られるので、この点でも優位性がある。さらに、STIVでは、LSPIVよりも短い演算時間で結果が得られる点も魅力であり、準リアルタイムの河川流計測システムの構築も可能と考えられる。ただし、勾配ベクトルの勾配値の度数分布から平均流速を求める際の、コヒーレンシーのしきい値に関しては、その与え方に任意性があるため、合理的なしきい値の決定法に関しては今後の検討が必要である。

謝 辞

本研究は土木学会関西支部共同研究（研究代表：大阪大学 出口一郎教授，メンバー：京都大学防災研究所武

Fig. 6 Comparison of Mean Velocity Distribution

藤裕則助手，近畿大学竹原幸生助教授，高野保英助手，明石高専神田佳一助教授）からの補助を得た。また，実験に際しては各大学の学生諸君からの協力があった。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A.: Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.36, No.3, (1998) pp. 397-414.
- 2) 藤田一郎，椿涼太：小俯角のビデオ画像に対応した河川表面流計測手法の開発，*河川技術論文集*，Vol.7, (2001)，pp. 475-478.
- 3) 藤田一郎，椿涼太：時空間濃度勾配法による主流方向表面流速分布の現地計測，*水工学論文集*，46 巻，(2002) pp. 821-826.
- 4) 藤田一郎，椿涼太：時空間画像を利用した河川表面波紋の移流速度計測，*河川技術論文集*，Vol.9, (2003) pp. 55-60.
- 5) Jahne, B.: *Spatio-Temporal Image Processing*, Springer, (1993) pp. 150-152.