

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

A NEW METHOD FOR MEASURING RIVER SURFACE FLOW USING VIDEO IMAGES RECORDED FROM SMALL DEPRESSION ANGLE

藤田一郎¹・椿涼太²

Ichiro FUJITA and Ryota TSUBAKI

¹正会員 学博 神戸大学助教授 都市安全研究センター (〒655-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科前期課程 (〒655-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

A new video image analysis method for measuring river surface flow was developed. In this method, some shortcomings of the large-scale-PIV, the previously developed image analysis technique by the author, were improved by using all frames of consecutive video images for obtaining a time-averaged velocity vector field. Namely, resolution of velocity measurements in the far field from a viewing location, with a small depression angle, was significantly improved by utilizing image intensity gradient of striped pattern appeared in spatiotemporal images. Firstly, accuracy for measuring image intensity gradients was examined by using synthetic river flow images. Secondly, actual flood flow images were analyzed and, by comparing the result with that by the LSPIV, superiority of the presented method was verified.

Key Words : river flow measurement, image analysis, video image, small depression angle, gradient method, spatiotemporal image, LSPIV

1. まえがき

著者らは、これまで非接触型の河川表面流の計測手法として画像解析を利用した方法の開発を行ってきた¹⁻¹¹⁾。この手法では、河岸などから撮影された斜めビデオ画像を用い、パターンマッチングによる河川表面の濃淡分布の面的な移動ベクトルの追跡 (PIV: Particle Image Velocimetry) から、表面流速分布を求めている。また、実河川スケールでの流速分布を得ることができることから、我々はこの手法をLSPIV(Large-Scale PIV)と名付けている。LSPIVはすでに実用に供されつつあり、様々な実河川洪水流の計測への応用が行われている。LSPIVは、計測機器を用いず、家庭用ビデオカメラで撮影されたビデオ画像から計測ができるという、他の流速計測手法にはない特徴があるが、このようなビデオカメラの解像度はあまり高くない (DV規格では720x480 pixels) ため、ビデオカメラ設置位置から離れた地点での計測精度は必ずしも十分なものとは言えず、特に撮影俯角が小さい場合にはその傾向が著しくなることが指摘されていた。通常の河川流計測の状況においては、大きな俯角で撮影で

きるような地点 (高い建物や鉄塔など) を河岸近くに見出すことは困難なため、この小俯角の問題に対する解決策を模索していたのが現状であった。本研究では、その解決策の一つとして、撮影俯角が小さい場合でも十分な精度を確保できる新たな画像計測の概念に基づく手法を開発し、従来手法であるLSPIVとの比較検討を行ってその有用性に関する検討を行った。

2. 斜め画像の特性

河岸などから河川表面を斜め撮影している場合の撮影点と撮影対象平面との関係を模式図として図-1に示す。図における θ を撮影画像の1 pixelに相当する角度、 α を俯角とする。撮影は高さHの位置からX軸方向に向けて行われているとする。このとき、角度 θ を頂角とする非常に細長い角錐を考えると、その角錐末端の水平面への投影形状は図中の矩形で近似できる。この矩形のX軸方向 (画像上では上下方向) の長さを L_x 、Y軸方向 (画像上では水平方向) の長さを L_y 、ビデオカメラ中心から矩形中心までの距離を R とすると、 θ は実際には微小量

なので次式が成立する。

$$Lx = \frac{R\theta}{\sin \alpha} = \frac{R^2\theta}{H} \quad (1)$$

$$Ly = R\theta \quad (2)$$

$H \ll L$ となる場合には $R \sim L$ と近似できる。従って、 Lx はビデオカメラからの距離 L の二乗、 Ly は L に比例して増大する。すなわち、ビデオカメラから遠ざかるに従って、1 pixelに対応する水平面上の形は縦長に大きく変形することがわかる。

ちなみに、LSPIVでは利用できる俯角の限度の目安を10度程度としているが、この角度では $Lx : Ly = 6.4 : 1$ 、また、俯角が6度程度となると、 $Lx : Ly = 10.6 : 1$ と縦方向に10倍程度まで画像が伸張される。LSPIVでは、このような幾何補正を行った後にPIVによる画像計測を行っているため、速度計測の精度（分解能）が空間的に変化することになる。変換画像の具体例を図-2に示す。この例は、後述のU川のLSPIV解析に実際に用いた幾何補正を、等間隔のチェック模様の画像に施したものである。図-2(a)が撮影画像に相当し、図-2(b)が幾何補正後の画像に対応する。これより幾何補正後の画像は遠方ほど歪みが大きく、最大で $Lx : Ly = 19 : 1$ 程度（俯角にして3度程度）にもなっていることがわかる。図-2(b)のように変形された画像を用いるLSPIVで、ビデオカメラから遠ざかった対岸ほど計測精度が低下するのはこのような大きな変形のために、パターンマッチングによる追跡が良好に行われなためと考えられる。

ここで重要なのは、左右方向の1 pixelに相当する幅 Ly に関しては手前側と遠方で最大2.5倍程度しか大きさに違いがない点である。従って、左右方向成分に関しては、上下方向よりも高精度の計測が十分に期待できる。斜め画像のまま、PIV解析する方法も考えられるが、この場合、計測精度が1割以上低下することが報告されている¹²⁾。

流量計測を目的とする通常の流速計測（電磁流速計、電波流速計あるいは浮子法など）では、流れの横断方向の成分は無視される。従って、画像を利用する手法においても、予め主流方向を想定して解析を行えば精度の向上が期待できる。

3. 新手法の概念ならびに精度の検討

(1) LSPIVの問題点

LSPIVにおいてもパターンマッチングにおける探査領域を流れ方向に限定すれば、マッチングエラーによるいわゆる異常ベクトルの発生を抑えることができるはずである。そのため、実際には横断方向の探査領域を狭くして解析を行っているが、前述のように俯角の影響でパ

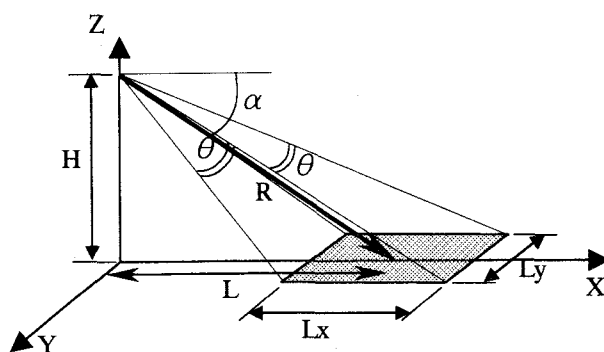
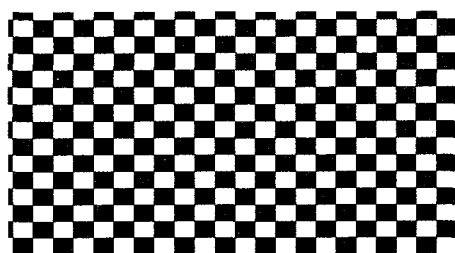
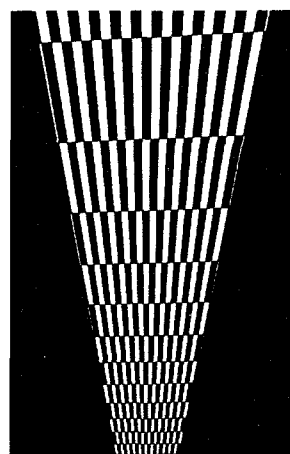


図-1 斜め撮影時の模式図



(a) チェック模様



(b) 幾何補正後の画像

図-2 LSPIVにおける画像変換例

ターンの歪みが大きくなるとやはり十分なマッチング、すなわちテンプレート間での十分な相関を得ることができなくなる。

また、LSPIVではビデオテープに記録されている画像情報を最大限に有効利用していないのも気になる点である。すなわち、一般のビデオ画像は30fps、すなわち一秒間に30枚の情報が記録されているのだが、現地河川流を対象とする場合、LSPIVではおよそ0.1～2秒間隔の二枚の“連続”画像を用いるため、その“連続”画像間の情報は結果的には無視されている。従って、ビデオテープに記録された真の連続画像を有効に利用すれば、画像計測の精度をさらに高めることが可能になるはずである。

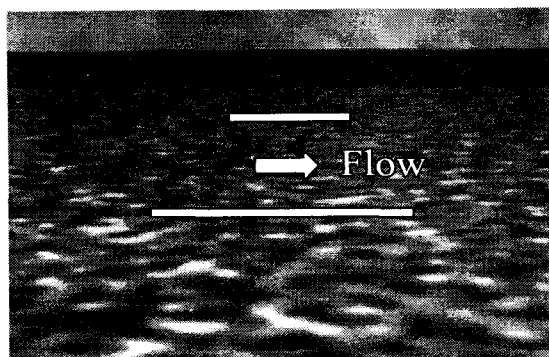


図-3 斜め撮影のシミュレーション画像

(2) 時空間濃度勾配法

本研究では上述のLSPIVの問題点を解消するために、時間軸方向のビデオ情報を最大限利用し、しかも空間分解能を高めて俯角の影響を排除できる新たな計測手法を考案した。この方法では、斜め画像上で流れ方向にある長さの検査線を想定し、その線分上の濃度分布の時間変化を調べる。この検査線上の濃度分布を横軸、時間軸を縦軸にとって濃度分布のダイアグラムを生成すると、検査線上の濃度の時間変化に対応した縞模様のパターンが得られる。この縞模様の勾配が検査線上を通過する表面流の平均流速に対応しているのは明らかであり、何らかの方法でこの時空間平面における濃度勾配が得られれば、空間的な流速分布を求めることが可能となる。

ここでは、まず、実河川の撮影画像を想定した動画画像を、レイトレーシング法により作成した。その一場面を図-3に示す。このシミュレーションでは、河川側岸からの撮影を想定し、流れが横向きとなるように視点を設定した。移動表面である水面は、濃淡のむらと上空の反射を組み合わせて表現し、水面の時間的な変動は省略した。画像の大きさは一般的なビデオ画像にあわせ、720 x 480pixelとしてある。なお、流速分布は一様 (3m/s) とした。

図-3には二本の平行線が検査線の例として示されている。斜め画像のために長さが異なっているが、実際には同一長である。検査線に関する時空間濃度画像の一例を図-4に示す。このように、時空間平面では明瞭な縞模様が得られる。流速が大きいほどこの傾斜角度は大きくなる。

(3) 傾斜角の計測法

図-4に示されるような縞模様は輪郭があいまいで、その傾斜角を単純に測定することはできない。輪郭が明瞭なら画像を二値化し、さらに細線化によって特徴的な線形を抜き出して傾斜角を求めることができるが、図-4の

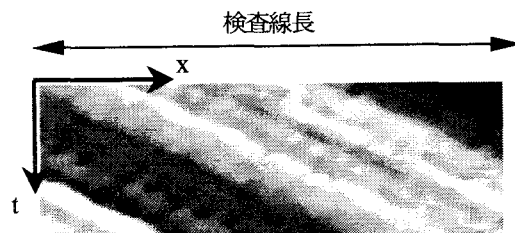


図-4 時空間濃度分布の画像例

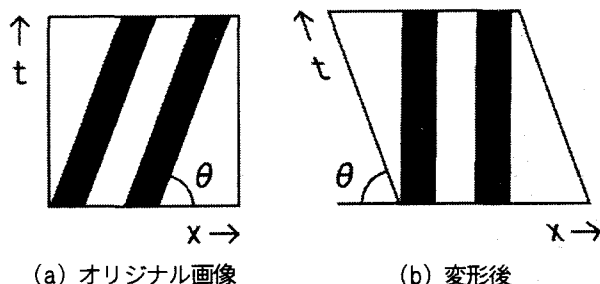


図-5 変形法の説明

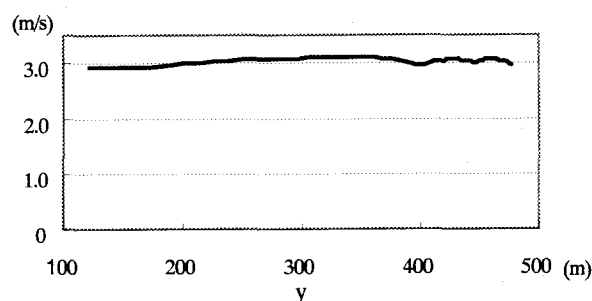


図-6 一様流のシミュレーション動画の解析で得られた横断方向流速分布

ような画像に対しては単純な二値化はかえって大量の情報量の欠落につながる恐れがある。そこで、本研究では、新たな傾斜角の測定法として変形法を考案した。この方法では図-5に示すように、オリジナルの時空間画像の上辺と下辺を順次平行移動させていき、縞模様の傾斜角が下辺に対して垂直になる角度 θ を調べる。実際には検索範囲内の変形角をいくつか試し、上下に隣接する点における輝度差の絶対値の累積値が最小になる変形角を傾斜角度とみなした。

変形法の精度を調べるために、図-3に示した一様流の動画 (10秒分300frames) に対して解析を行った。本解析では、検査線の長さを100 pixels、時間軸方向の長さを2秒 (60 frames) とした。河川幅方向に100本の検査線を設けて求めた平均流速分布の解析結果を図-6示す。多少のばらつきは見られるが、カメラ側 ($y=100\text{m}$, 俯角 9°) から俯角の小さい対岸側 ($y=500\text{m}$, 俯角 1.7°) までの

広い範囲で良好な流速分布が得られている。この場合の誤差の最大値（一様流からのずれ）は4%程度であり、本手法（以降、時空間濃度勾配法と呼ぶ）は表面流の画像計測手法として十分な計測精度を有していることを確認できた。

4. 実河川流計測への適用例

実河川流の計測例として、ここではU川における融雪洪水を取り上げる。図-7に表面流の画像例を示す。図中のパネルは標定用のパネルで、両岸に4箇所ずつ設置してある。図-8に時空間濃度勾配法で得られた結果をLSPIVによる結果と比較した。時空間濃度勾配法では検査線を50本設定し、シミュレーション動画の場合と同様な解析処理を行って流速分布を得ている。ともに左岸から撮影されたビデオ画像を用いて解析しているが、LSPIVでは、川幅の3分の2までしか十分な計測ができていないのに対し、本手法では川幅全体に渡って流速分布を得ることができ、またその分布形は河床形状（水深分布）に良好に対応していることがわかった。

5. あとがき

非接触の流速計測手法として時空間濃度勾配法を開発し、従来法との比較検討を行った結果、いくつかの点で本手法の優位性を示すことができた。今後はさらに解析例を追加することによって本手法の有用性を示していく考えである。

謝辞：U川の洪水流についてはアジア航測(株)の川村嘉義氏を中心に現地観測を行って頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 綾史郎，藤田一郎，柳生光彦：画像解析を用いた河川の洪水時の流れの観測，水工学論文集，Vol.39，pp.447-452，1995.
- 3) Fujita, I., Aya, S. and Deguchi, T.: Surface velocity measurement of river flow using video images of an oblique angle, *Proceedings of the 27th Congress of IAHR, Environmental and Coastal Hydraulics*, pp.227-232, 1997.
- 4) 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, pp.397-414, 1998.
- 5) Fujita, I., Hara, M., Morimoto, T. and Nakashima, T.: Visualization and PIV measurement of river surface flow, *Summary of the*

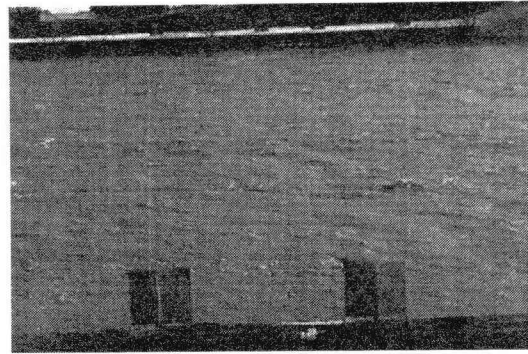


図-7 U川の融雪洪水の画像

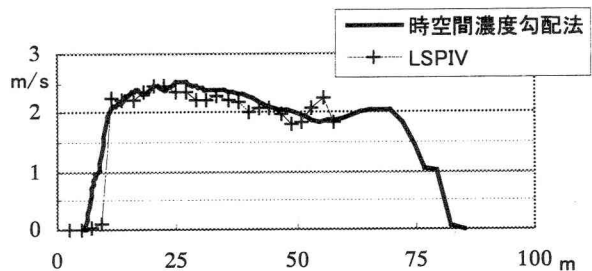


図-8 LSPIVとの比較

- International Conference on Optical Technology and Image Processing in Fluid, Thermal and Combustion Flow*, S3-8-1, pp.252-253, 1998.
- 6) Fujita, I. and Nakashima, T.: Image-based technique for river monitoring, *Proceedings of the 28th Congress of IAHR, Fluvial Systems-Processes, Functions and Management*, p.425, 1999.
 - 7) 藤田一郎，原基樹，森本貴生：多重合成法による現地河川流の可視化画像解析，応用力学論文集，Vol.1, pp.729-736, 1998.
 - 8) 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.
 - 9) Fujita, I. and Aya, S.: Refinement of LSPIV technique for monitoring river surface flow, *Proceedings of 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management*, ASCE, on CDROM, 2000.
 - 10) Kruger, A., Bradley, A., Muste, M. and Fujita, I.: Real-time measurements of free-surface velocity using imaging techniques, *Proceedings of the 4th International Conference Hydro Informatics*, on CDROM, 2000.
 - 11) 藤田一郎，綾史郎，小澤純：河川表面流のモニタリング手法LSPIVの改良，神戸大学都市安全研究センター研究報告，第4号，pp.97-105，2000.
 - 12) Muste, M., Xiong, Z., Kruger, A. and Fujita, I.: Error estimation in PIV applied to large-scale flows, *Proceedings of the Third International Workshop on PIV'99 -Santa Barbara*, pp.619-624, 1999.

(2001. 4. 16 受付)