

# 画像解析による河川流速計測の適用性向上と効率化に向けた撮影・標定技術の開発

DEVELOPMENT OF RECORDING AND ORIENTATION MEASUREMENT TECHNIQUES FOR ENHANCE APPLICABILITY AND EFFICIENCY TO CURRENT MEASUREMENT USING IMAGE ANALYSIS

小林範之<sup>1</sup>・渡邊明英<sup>2</sup>・野谷靖浩<sup>3</sup>・藤田一郎<sup>4</sup>

Noriyuki KOBAYASHI, Akihide WATANABE, Yasuhiro NOYA and Ichiro FUJITA

<sup>1</sup>正会員 農修 (株)東京建設コンサルタント (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)

<sup>2</sup>正会員 工博 (株)東京建設コンサルタント (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)

<sup>3</sup>非会員 学士 (株)東京建設コンサルタント (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)

<sup>4</sup>正会員 学博 神戸大学大学院教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

An orientation measurement method which used auxiliary recording instruments was developed to enhance applicability and operating efficiency of the Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) and the Spatio-Temporal Image Velocimetry (STIV), the non-contact current measurement methods which applied image analysis techniques. The method allows a video camera to obtain necessary parameters using the conventional orientation method which requires predetermined control points at an observation site.

With this method, field observations can be carried out without the reference marks at the time of observation, consequently saving the efforts of orientation measurement.

**Key Words:** non-contact current measurement, LSPIV, STIV, river surface flow

## 1. はじめに

洪水時の河川流量や流況の観測は、河川管理における基本的な情報として重要であるが、洪水時には観測作業に伴う安全上の問題や、水中に設置する観測機器による場合ではその破損リスクの増大など観測を実施する上で厳しい作業環境に対応する必要がある。

これらの課題に対応した観測技術として、画像解析を応用した非接触流速計測技術があり、LSPIV や

STIV 等の手法が開発されている。非接触で河川流速を計測するこれらの技術は、洪水時の観測手法に適しているが、その計測原理から観測時にはカメラの標定作業が必要である。そのため、LSPIV や STIV 等の適用性は、標定作業の実施可能性に依存するところが大きく、川幅の大きな河川での観測の制限要因となっていた。

図-1 に示すとおり、観測対象の空間は3次元の物理座標系で表現されるのに対し、撮影された水面の画像は二次元の画像座標系で表現されるため、三次元写真測量における一般的な共線条件式を変形して整理した以下の平面对空間の関係式を用いる。

$$x = \frac{A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \quad (1)$$

$$y = \frac{B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \quad (2)$$

ここで、11個の係数  $A_1 \sim A_4$ 、 $B_1 \sim B_4$ 、 $C_1 \sim C_3$  は  $M$  点 ( $M \geq 6$ ) の標定点座標を用いて最小二乗法により求めることができる。

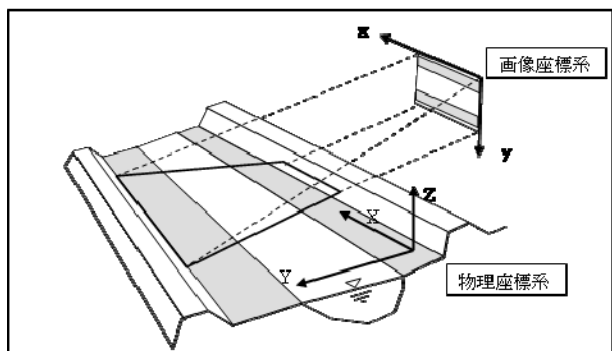


図-1 単写真標定における空間座標系と画像座標系の関係

一般的なカメラの単写真標定法は、撮影画像内に6点以上の既知点（位置座標の確定した点）を全体的に写し込む必要があり、通常は撮影時に現地の両岸に標識を設置するとともに基準点測量によりその位置を計測する。

今回開発した手法は、現地に既知点を設置することなく、撮影画像をオルソ画像に三次元射影変換するのに必要な標定パラメータを、カメラ側で取得しようとする方法である。これにより現地に標識等の既知点を設けずに観測を行なうことを可能とし、画像解析による観測の適用性を拡張するものである。

## 2. 新規開発した技術の内容

LSPIV や STIV 等の画像解析による流速計測法を適用するには、対象河川を斜め撮影した画像を幾何補正して無歪みオルソ画像を生成するための変換パラメータをもとめる標定作業が必要である。

新たに開発した技術では、事前に内部標定を行ってカメラの光学特性を精密計測したカメラと、高精度の傾斜計を組み込み撮影時のカメラ光軸の角度を精密に計測できる撮影補助具を用いて撮影することにより、現地への標識設置や標定測量を行わず、カメラの外部標定（現地での撮影条件の標定）を可能とする手法を開発した。

前述の式(1)、(2)に対し、以下の共線条件式をもとに三次元射影変換を行う。

$$x_1 = -c \frac{a_{11}(X_1 - X_0) + a_{12}(Y_1 - Y_0) + a_{13}(Z_1 - Z_0)}{a_{31}(X_1 - X_0) + a_{32}(Y_1 - Y_0) + a_{33}(Z_1 - Z_0)} \quad (3)$$

$$y_1 = -c \frac{a_{21}(X_1 - X_0) + a_{22}(Y_1 - Y_0) + a_{23}(Z_1 - Z_0)}{a_{31}(X_1 - X_0) + a_{32}(Y_1 - Y_0) + a_{33}(Z_1 - Z_0)} \quad (4)$$

$x_l, y_l$ : 対象物  $p$  が写っている画像上の写真座標

$X_l, Y_l, Z_l$ : 対象物  $p$  の地上座標

$X_0, Y_0, Z_0$ : 投影中心（レンズ中心）の地上座標

$c$ : 焦点距離

$a_{ij}$ : カメラ角度に関する次式の係数

$$a_{11} = \cos \phi \cos \kappa, a_{12} = -\cos \phi \sin \kappa, a_{13} = \sin \phi$$

$$a_{21} = \sin \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa$$

$$a_{22} = \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa, a_{23} = -\sin \omega \cos \phi$$

$$a_{31} = \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa$$

$$a_{32} = \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa, a_{33} = \cos \omega \cos \phi$$

本手法において取得するパラメータは、 $c$ （カメラの焦点距離）、 $\omega$ （カメラ俯角）、 $\phi$ （カメラの左右の傾き）、 $\kappa$ （カメラの方向）、及び  $h$ （水面とカメラの比高）である。

なお、 $c$  は、事前にカメラの内部標定により計測する。 $\phi$  は今回開発した撮影補助具によりカメラの傾きを無くすことにより 0 とおくことができ、撮影方向を基準にすることにより、 $\kappa$  も 0 とすることができる。

### (1) 内部標定要素の計測（歪み補正方法）

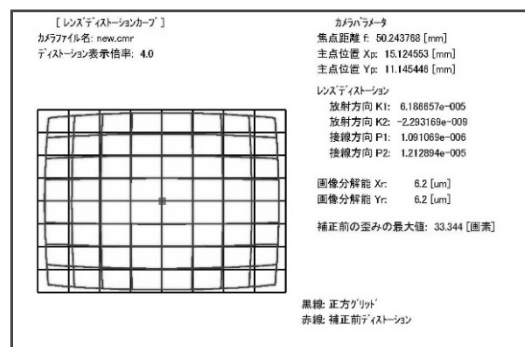


図-2 キャリブレーションソフトによる内部標定要素の計測

複数の標識を設置し最小二乗法により標定諸元を求める方法ではなく、カメラ側で取得したパラメータのみで精度を確保するために、事前にカメラの光学特性を精密計測し内部標定を行った。

カメラの光学特性の精密計測、及び解析は、デジタル写真測量用に市販されているカメラキャリブレーションソフト「Image Master Calib」（株式会社トプコン社製）を使用した。

図-2 は、キャリブレーションソフトを用いたカメラパラメータの解析と出力例である。

### (2) 撮影補助具を用いた外部標定要素の計測

外部標定要素のうち  $\omega$ （撮影俯角）は、専用に開発した撮影補助具により計測する。

図-3 に示す撮影補助具は、カメラの傾き（ $\omega$  及び  $\phi$ ）を正確に計測するため、測量機器に用いられる整準台で水平面を確保した上で、2 軸の傾斜センサーを取り付けたカメラ雲台にカメラを取り付けて撮影する方法とした。

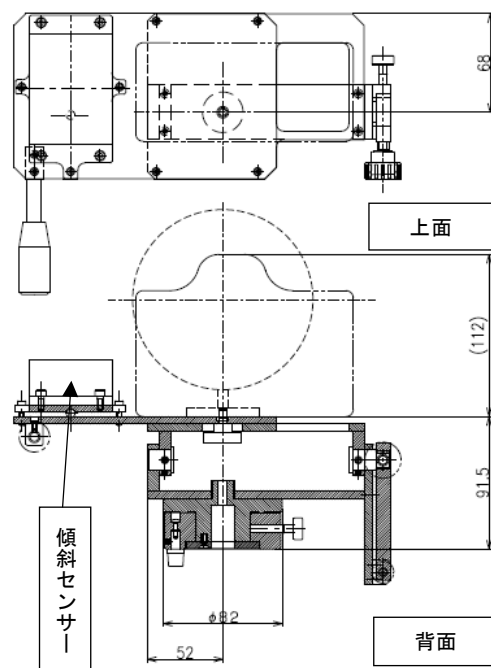


図-3 撮影補助具の基本形状（単位 mm）



図-4 カメラを取り付けた状態の撮影補助具

また、カメラの光軸と傾斜センサーの計測値が一致するように、傾斜センサーの取り付け部分には調整機構を組み込んだ。

傾斜センサーは、PC と接続してリアルタイムで毎秒1データ傾斜データを取得できる。センサーとの通信プログラムにより傾斜角の値は1/100度単位で取得し、時間内の平均を俯角とした。

現地で取得するこの他の外部標定要素に  $h$ （水面とカメラの比高）があるが、これはカメラ設置高と水位から求めることができる。

図-4 は、開発した撮影補助具にカメラを装着した状態の写真である。

### 3. 計測精度の検討

事前に内部標定を行ったカメラと、高精度の傾斜計により撮影時のカメラ光軸の角度を精密に計測できる撮影補助具を用いて撮影することにより、現地への標識設置や標定測量を行わず、カメラの外部標定（現地での撮影条件の標定）を可能とする手法を開発し、室内試験と魚野川における現地試験を実施し、適用性、精度の評価を行った。

画像解析による流速計測において、流速計測誤差の主要な要因は、幾何補正に伴う変換誤差と動画像から単位時間当たりの流体の移動量を検出する追跡誤差に分類することができる。

移動量検出のアルゴリズムは従来手法と同じであるとして、ここでの誤差の評価は、標定方法の違いによる幾何補正の精度として評価する。

#### (1) 室内試験による検討

室内試験により、カメラ側の変換パラメータのみでどの程度の計測精度が期待できるかを検討した。

室内実験は、方眼紙を水平な台の上に置き、撮影補助具を用いて撮影を行ない、得られた変換パラメータを適用して幾何補正画像を作成し、画像上で計測した方眼の大きさと実際の大きさを比較して幾何補正による誤差の評価を行った。

室内試験では、方眼紙とカメラとの比高を 0.4m に

設定して撮影した。図-5 は試験用に室内で撮影した画像である。この画像を、前述のカメラの内部標定で求めたパラメータによりレンズの歪みを補正処理した画像が図-6 である。画像の変換誤差は、画像上に示した①～③の箇所で確認した。

図-6 のレンズ歪みを補正画像に対し、 $\omega$ （撮影俯角）と  $h$ （カメラと被写体の比高）をもとに射影変換を行って作成したオルソ画像が図-7 である。

この画像上で、方眼の大きさをピクセル数のカウントにより画像上で計測した画像計測値と、実際の方眼の大きさ（1cm×1cm）との比較により変換誤差の発生状況を評価した。

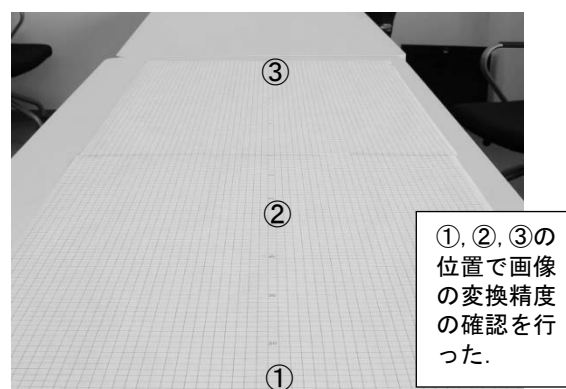


図-5 室内試験用に撮影した方眼紙の画像

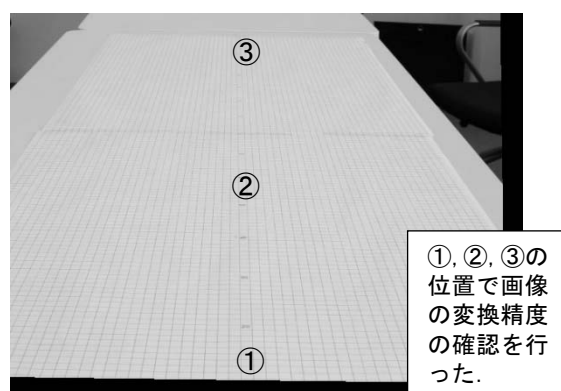


図-6 レンズ歪み補正後の画像

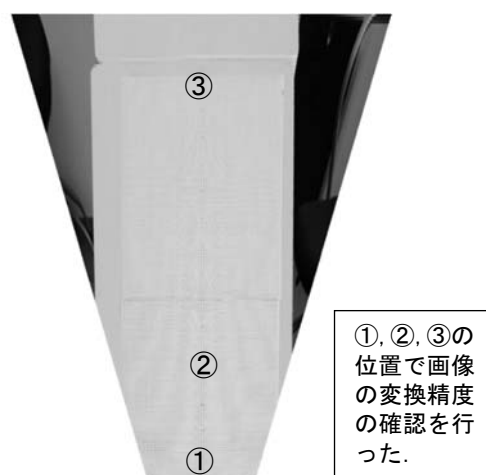


図-7 幾何補正（オルソ）画像

表-1 変換画像の画像計測値の誤差

| 箇所 | カメラからの距離 | 比較値 (mm) |       | 誤差 (%) | 備考   |
|----|----------|----------|-------|--------|------|
|    |          | 実距離      | 画像計測値 |        |      |
| ①  | 70cm     | 100.0    | 98.3  | -1.7   |      |
| ②  | 115cm    | 100.0    | 101.7 | 1.7    | 画像中央 |
| ③  | 228cm    | 100.0    | 114.3 | 14.3   |      |

注 1) 計測は 10 メッシュ単位で実施した

注 2) 計測時の画素寸法は、0.5744856 mm/ピクセル

なお、レンズ歪み補正の効果は、歪み補正なしで射影変換のみで作成したオルソ画像と比較して、画像全体に精度が均一化する効果が確認できた。

画像中央付近のひずみの少ない領域が最も変換精度が高く、カメラから離れた③の精度が悪い。

しかしながら、標識を使用して最小二乗法を適用する従来方式の標定を行わなくても、①、②の箇所では十分な精度が確保されている。

室内実験は、小さい空間スケールで誤差の発生特性を検討することを目的とした。カメラ解像度や傾斜センサーの計測精度など、機器の精度条件は屋外観測の場合と同じであり、対応する空間スケールに対し、計測機器やカメラの計測精度が相対的に悪くなっている。また、生成された変換画像の縮尺に関わる比高の値も、実河川の空間スケールと比べて僅かの違いが大きな縮尺のずれにつながることから、室内実験での精度評価をそのまま実河川スケールでの観測精度に置き換えて評価することはできない。

## (2) 現地試験による検討

開発した手法の実河川スケールでの特性や適用性を評価するため、現地試験を行った。現地試験は、土木学会流量観測小委員会合同観測の一環として 2014 年 4 月 24 日～25 日に信濃川水系魚野川根小屋橋で行った。図-8 は試験撮影状況である。比較のため従来の標定手法に使用する標識も設置した。

取得した画像データと傾斜センサーによる俯角計測値を使い、市販の STIV 解析ソフト KU-STIV により解析し、横断方向の流速分布を計測した。解析パラメータの  $h$  は水位からの比高を、 $\kappa$  は 0 とした。この観測とほぼ同時刻に ADCP 観測が行なわれている。



図-8 現地試験の実施状況

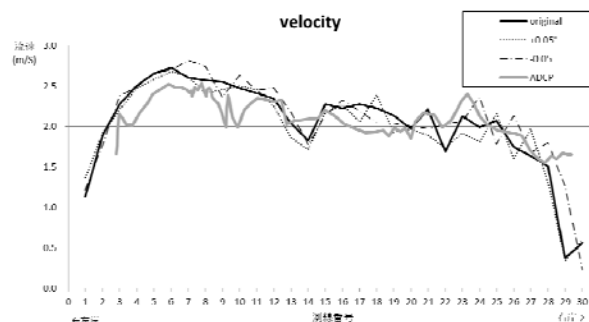


図-9 KU-STIV による横断流速分布計測結果  
(2014 年 4 月 25 日 10 : 00 観測)

図-9 に観測結果を示す。ADCP が鉛直平均流速であるのに対し STIV は表面流速であり単純な比較はできないが、流速の分布形は ADCP と STIV で概ね整合している。

室内実験では、カメラから離れるに従い精度の低下が見られたが、川幅 160m 程度の当該箇所における観測への適用においては、概ね妥当な結果が得られる結果となった。

なお、図-9 には傾斜センサーにより得られた俯角に対し、 $\pm 0.05$  度ずらした条件で解析を行った結果も示している。

これから、0.05 度程度の角度計測値の変動なら解析した流速値にほとんど影響がないことがわかる。

## 4. 検討結果

上述の手法による実用性、精度について、幾何補正画像の変換精度、STIV 法による流速解析結果について、流速計測法として実用上求められる観測精度を確保するために、傾斜計に求められる角度測定精度、観測値への影響等を評価した。

前述の角度に関する感度検討の結果から、川幅約 160m の魚野川の現地試験では、試験に使用した撮影補助具の角度計測精度で河川流速計測として実用レベルの成果が期待できることが確認できた。今後も、実証データの蓄積と検証を行い実用性と精度向上を図る予定である。

**謝辞：**本論文に引用した ADCP 観測結果、及び現地に設置した標識の座標データ等は、土木学会流量観測小委員会合同観測で取得されたデータであり、貴重なデータをご提供いただいた研究会事務局および委員各位に対し、ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 藤田一郎・原浩気・萬矢敦啓：河川モニタリング動画を用いた非接触型流量計測法の精度検証と準リアルタイム計測システムの構築，水工学論文集，第 55 巻，s\_1177-1182，2011。
- 2) 可視化情報学会編，PIV ハンドブック，森北出版，2002。
- 3) 津留宏輔介・村井俊治：デジタル写真測量の基礎～デジカメで三次元測定をするには～，社団法人日本測量協会，2011。

(2015. 4. 3 受付)