

画像解析を用いた河川流速計測における撮影・標定手法の開発と精度管理に関する研究

STUDIES ON PRECISION MANAGEMENT AND DEVELOPMENT FOR
RECORDING AND ORIENTATION MEASUREMENT METHOD TO RIVER FLOW
MEASUREMENT USING IMAGE ANALYSYS

小林範之¹・渡邊明英²・野谷靖浩³・藤田一郎⁴・能登谷祐一⁵

Noriyuki KOBAYASHI, Akihide WATANABE, Yasuhiro NOYA, Ichiro FUJITA and Yuichi NOTOYA

¹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)

²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)

³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)

⁴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)

⁵正会員 工修 (株)建設技術研究所 (〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町 1-6-7)

An orientation measurement method that uses auxiliary recording instruments was developed to enhance applicability and operating efficiency of the image-based non-contact river flow measurement methods such as the Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) and the Spatio-Temporal Image Velocimetry (STIV). 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. However, the influence of the angle measurement error on the accuracy of the converted image and the applicable range were not sufficiently studied in the previous research. Therefore, verification was carried out with the objective of presenting proposals focusing on practical aspects such as precision characteristics of the method, practical application range, concept of accuracy management.

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、河川管理の基本情報として重要であるが、洪水時は観測作業の安全確保や観測機器の破損リスクの増大など、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技術として、LSPIV や STIV, PTV 等の画像解析を応用した非接触流速計測技術¹⁾²⁾が開発されている。これらは洪水時の観測に適した技術であるが、その適用の制限要因として、画像内に複数の既知点を写し込む必要のある標定手法が課題であった。標定とは、写真測量の基本となる共線条件式を成立させるために、内部標定要素である焦点距離、主点位置、レンズ歪みなどカメラ内部の諸要素を定め、さらに外部標定要素である写真撮影時のカメラの位置や傾きなどから空間的位置関係を再現するものである。従来の標定法では、既知点の地上座標と写真座標から最小二乗法により共線条件式を満たす外部標定要素を求めていた。そのため、観測に際し標識の設置や測量作業が必要であった。これに対し、筆者らは標識を用いず外部標定要素を直接計測する標定手法を提案し³⁾⁴⁾、必要な機材の開発と実用

化に向けた試験を実施し、その運用性、適用性の向上を確認してきたが、幾何補正画像の生成効率が低い点や、俯角測定誤差が変換画像の精度に及ぼす影響、適用範囲については十分に検討できていなかった。

そこで、本報告では、幾何補正画像生成の高速化のためにソフトウェアの改良を行うとともに、当該標定手法を用いた幾何補正画像の精度特性を明らかにし、実務面に着目した精度管理の考え方、及び具体的な精度管理手法の提案を提示することを目的にフィールド試験を行い、俯角測定精度の変換画像の精度への影響、レンズ歪みの特性と補正効果等を検討し、外部標定要素であるカメラの位置と傾きを直接測定する当該標定手法の精度特性や実用的な適用範囲等の検証を行った。

なお、流速計測する PIV, STIV, PTV 等の画像解析は、従来の標定手法による場合と同じである。

2. 開発した標定手法の内容

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

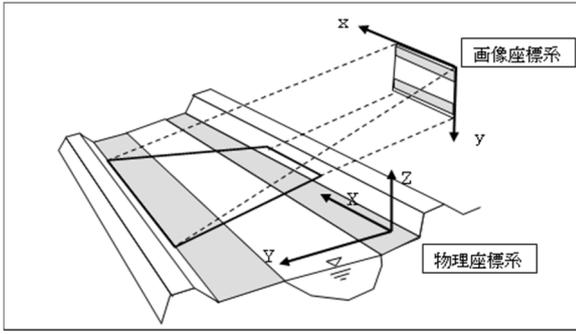


図-1 単写真標定における空間座標系と画像座標系の関係

面対空間の関係式を用いる。

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。

$$x = \frac{A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1} \quad (1)$$

$$y = \frac{B_1 X + B_2 Y + B_3 Z + B_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1} \quad (2)$$

一般的な単写真標定法は、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。

筆者らが提案した標定手法は、精密な傾斜計による俯角測定とカメラの内部標定情報を用いる手法であり、標定に必要なパラメータをカメラ側で取得するため標識等の既知点を設けずに観測でき、画像解析による観測の適用性を拡張するものである。

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。

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

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

$$S_0 = \frac{c}{h} \sin \omega \quad (5)$$

x_1, y_1 : 対象物 p が写っている画像上の写真座標

X_1, Y_1, Z_1 : 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

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

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

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

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

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

S_0 : 主点位置の画像縮尺

本手法において取得するパラメータは、内部標定要素である c (カメラの焦点距離)の他は、外部標定要素として図-2に示す ω (カメラ俯角)、 ϕ (カメラの左右の傾き)、 κ (カメラの方向)、及び h (水面とカメラの比高)である。

なお、 c は事前にカメラキャリブレーションにより計測する。 ϕ は撮影補助具³⁾⁴⁾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、撮影方向を基準とすれば、 κ も0とおくことができる。

なお、写真測量分野では、GNSS(Global Navigation Satellite System: 全地球航法衛星システム)やIMU(Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置)といった測位機器の進歩で近年普及しているPOS(Position and Orientation System: 直接定位システム)やMMS(Mobile Mapping System: モービルマッピングシステム)と共通の考え方に基づくが、これらは航空機や計測車輛などで移動しながらの撮影を対象として時々刻々の位置と姿勢を記録し、かつ撮影と測位の時間的な関係を調整計算で求めるなど撮影や解析には高度なシステムを必要とするのに対し、固定点からの撮影を前提とした当該手法で必要な標定要素は前述のとおり簡略化でき、高精度な俯角測定機能を優先した簡易な撮影補助具を使用して観測する。

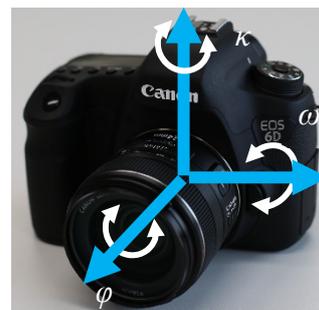
3. 標定要素と誤差要因の検討

画像解析による実河川を対象とした流速計測法を適用する際の誤差要因は、①標定および幾何補正に起因する誤差と、②画像処理による速度解析の誤差に大別することができる。

①は、観測対象の被写体(水面)と撮影された画像との光学系を介した空間的位置関係を再現することであり、流速計測における画像上での距離計測の精度に関係する。

一方、②は画像の輝度パターンの移動量などから流速ベクトルを求める際の誤差であり様々な解析方法があるが、実河川における適用事例としては画像相関法やオプティカルフロー法、STIVが知られている。適用する解析手法により誤差要因や特性は異なる⁵⁾⁶⁾。

ここでは、流速計測法として、何れの解析手法にも共



ω : カメラ俯角

ϕ : カメラの左右の傾き

κ : カメラの方向

h : カメラと水面の比高

図-2 カメラの外部標定要素

通する，①標定および幾何補正に起因する長さや形状の再現性に着目し，以下に当該標定手法を適用する場合の標定要素と主な誤差要因を考察する。

(1) 内部標定要素とレンズ歪み補正の効果

本手法では，内部標定されたカメラを使用することを前提に，内部標定要素と変換画像の精度の関係を検討した。カメラの内部標定要素は，レンズの焦点距離と撮影画像の光学系による歪みの補正係数をもとめる。写真計測で問題となる歪曲収差は，放射方向歪みと接線方向歪みの二つであるが，放射方向歪みが9割以上で接線方向歪みは1割弱とされている⁷⁾。

レンズ歪みは以下の式で表すことができる。

$$\Delta x = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) x_m + P_1 (2x_m^2 + r^2) + 2P_2 x_m y_m \quad (6)$$

$$\Delta y = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) y_m + 2P_1 x_m y_m + P_2 (2y_m^2 + r^2) \quad (7)$$

$$r^2 = x_m^2 + y_m^2$$

$$x_m = x - x_p$$

$$y_m = y - y_p$$

x_p, y_p : 主点位置のずれ

x, y : 画面中心を原点とした写真座標

K_1, K_2, K_3 : 放射方向歪係数

P_1, P_2 : 接線方向歪係数

焦点距離 (c) と，主点位置のずれ (x_p, y_p)，レンズ歪係数 (K_1, K_2, K_3, P_1, P_2) が求める内部標定要素であり，この計測には，コンピュータビジョン向けオープンソースライブラリ OpenCV のカメラキャリブレーション関数を使用した。

一辺 4cm の方眼を撮影し，前述の係数を適用してレンズ歪み補正画像を作成し，元画像と比較して補正効果を確認した。撮影は実河川における撮影にも使用している Canon EOS6D を，レンズは EF24mm を使用した。図-4 は，白黒パターンが未補正の画像を示し，赤白に着色したものがレンズ補正により歪みを除去した画像である。たる型歪みが補正され，補正画像は外周部近くでは元画像より外側に補正され，レンズ歪みで湾曲していた外周部もほぼ直線に修正されている。表-1 は，比較画像上の①～⑨の位置で補正前後の写真座標を計測し，補正量を求めたものである。レンズ歪みは画像中心から離れるに従い大きくなるが，24mm の広角レンズでも画角の中央部分なら歪み量は2%以内であることがわかる。

なお，カメラや光学レンズは工業製品として一定の規格に基づき製造上の精度管理が行われているが，レンズ歪みの特性は個別の機材ごとに僅かに差異があることから，写真測量用カメラでは個別にキャリブレーションが行われている。ここで示したレンズ補正量は，レンズ歪みとその補正についての特性を知る材料とはなるが，実際の観測で厳密に精度評価を行うには，使用するカメラ

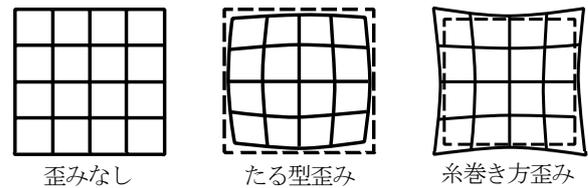


図-3 放射方向歪み

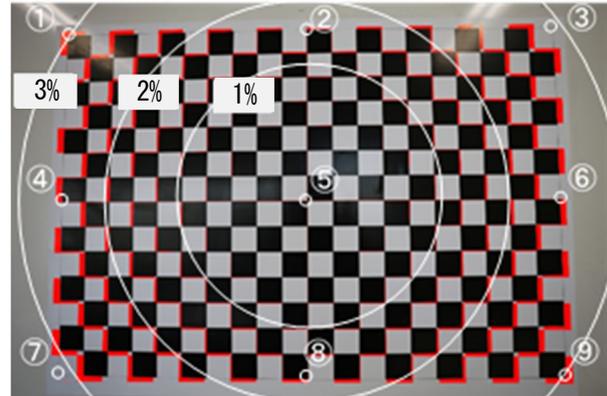


図-4 レンズ歪み補正効果の確認 (円は補正量の分布)

表-1 画像の位置と補正量の計測結果 (単位 : pixel)

計測点	未補正画像			補正画像		補正量			
	x	y	r	x	y	dx	dy	dr	dr/r(%)
1	162	91	969	186	106	24	15	28	2.9%
2	950	79	561	950	85	0	6	6	1.1%
3	1760	66	985	1739	81	-21	15	26	2.6%
4	146	642	814	167	642	21	0	21	2.6%
5	953	637	8	953	637	0	0	0	0.0%
6	1781	632	821	1762	632	-19	0	19	2.3%
7	131	1220	1012	157	1201	26	-19	32	3.2%
8	956	1223	583	956	1213	0	-10	10	1.7%
9	1805	1228	1029	1781	1210	-24	-18	30	2.9%
画像中心	960	640	0	-	-	-	-	-	-

を個別にキャリブレーションする必要がある。

(2) 外部標定要素と幾何補正における誤差

外部標定要素による幾何補正の誤差について，実河川スケールの試験地で試験撮影を行い，外部標定要素である俯角測定精度と補正画像との関係について確認を行った。なお，本手法では幾何補正する対象を水平面と仮定して補正計算していることから，実河川スケールの水平面を有する場所として，戸田公園内の漕艇場を試験地とした。

a) 試験方法

幾何補正画像の精度を正確に評価するため，試験地を 3D 地上レーザースキャナにより計測し，3D モデルを作成した。3D 計測した区域を対象として，高精度傾斜計を用いた外部標定要素の計測と撮影を行い，取得した画像と外部標定要素から幾何補正画像を作成し，幾何補正の精度を確認した。3D モデルと補正画像との比較は，漕艇コースの水面に配置された浮きの位置や対岸までの距離に着目し，3D モデルと重ねて位置のずれ量を測定した。なお，使用したスキャナは機械精度±2mm であり，カメラ画像の 100m 先の地上解像度約 50cm と比較すると，3D モデルは画像精度を評価するのに十分な精度を有しているといえる。

当該標定手法で取得する外部標定要素は，前述のとおり

りカメラの位置 (X_0, Y_0, Z_0) およびカメラの傾き (ω, φ, κ), およびカメラから水面までの比高 h である. このとき水面までの比高 h と内部標定要素である焦点距離 c は, 補正画像の縮尺を決めるパラメータであり, ω (俯角) と φ (左右の傾き) は生成する補正画像の歪み補正に関するパラメータである. 撮影は2軸の傾斜センサーで計測し, φ を0とするようカメラの姿勢を調整して撮影画角を決め, そのときの ω を測定した.

b) 補正画像の距離精度の評価

精度試験用に撮影した画像を幾何補正し, 3Dモデルと重ねて補正画像の距離精度の確認を行った.

図-5は, 撮影画像を幾何補正し, 3D-CADを用いて3Dモデルと重ね, 河岸や浮きを指標に位置(長さ)精度の評価を行ったもので, 3Dモデル上に合成した補正画像を3D-CADの機能を用いて再変換しカメラビューを再現したもので, 撮影画像→補正画像→再現撮影画像の変換で相互に精度よく変換されている. 同じ試験地において, 俯角や比高, 焦点距離を変えた複数のケースで試験を行った結果, 何れも補正画像と3Dモデルの比較では位置や距離が数%以内で再現されていることが確認できた.

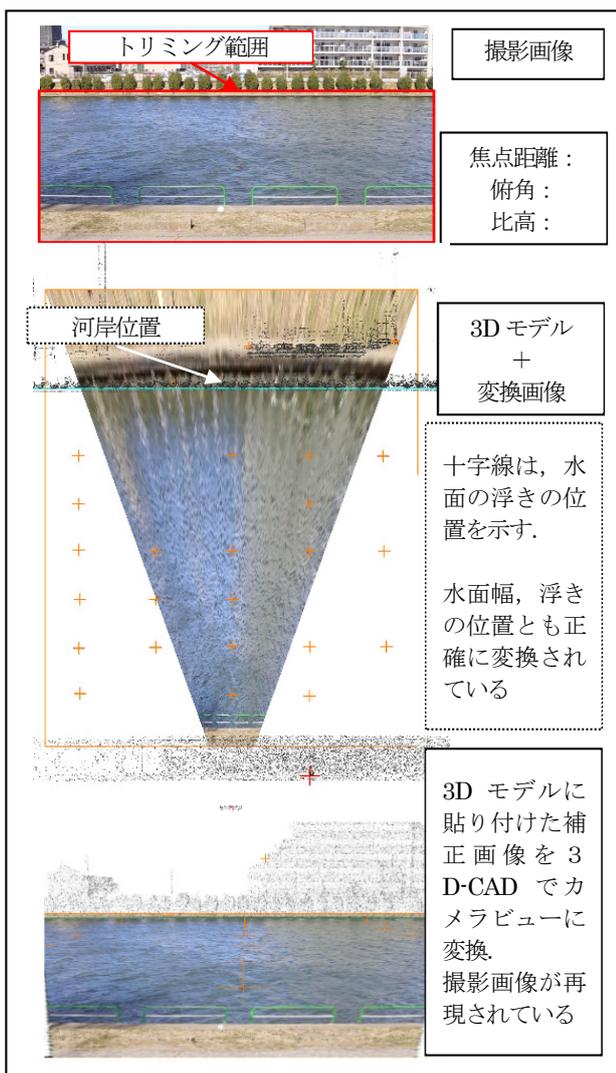


図-5 3Dモデルによる変換画像の距離精度の確認

c) 俯角測定精度と幾何補正の精度

本標定手法による幾何補正の精度は, 前述の検討により3Dモデル上での再現性が確保されており, 正しく俯角測定が行われていれば, 十分に実用可能なレベルで精度が確保されている.

一方, 今回使用した傾斜計は測定精度 $\pm 0.05^\circ$ (角度解像度 0.01°) であるが, この機械精度に相当する角度がどの程度補正画像の精度に影響するかを比較したものが図-6である. 図には, 元画像と補正画像を比較しやすいように, 元画像には写真中心からの同心円(赤線)と方眼(緑線)を入れた.

補正画像には, カメラ位置を原点として平面上の距離を示している. 変換画像で対岸の河岸が湾曲して見えるのは, レンズ歪みによる影響である.

また, 使用した傾斜計の測定精度 $\pm 0.05^\circ$ に相当する角度だけ変化した場合の補正画像のずれも, 青の破線 (-0.05°) と赤の一点鎖線 ($+0.05^\circ$) で示した. なお, 補正画像の生成に際し, 縦方向の画像サイズの設定は2000pixelとした.

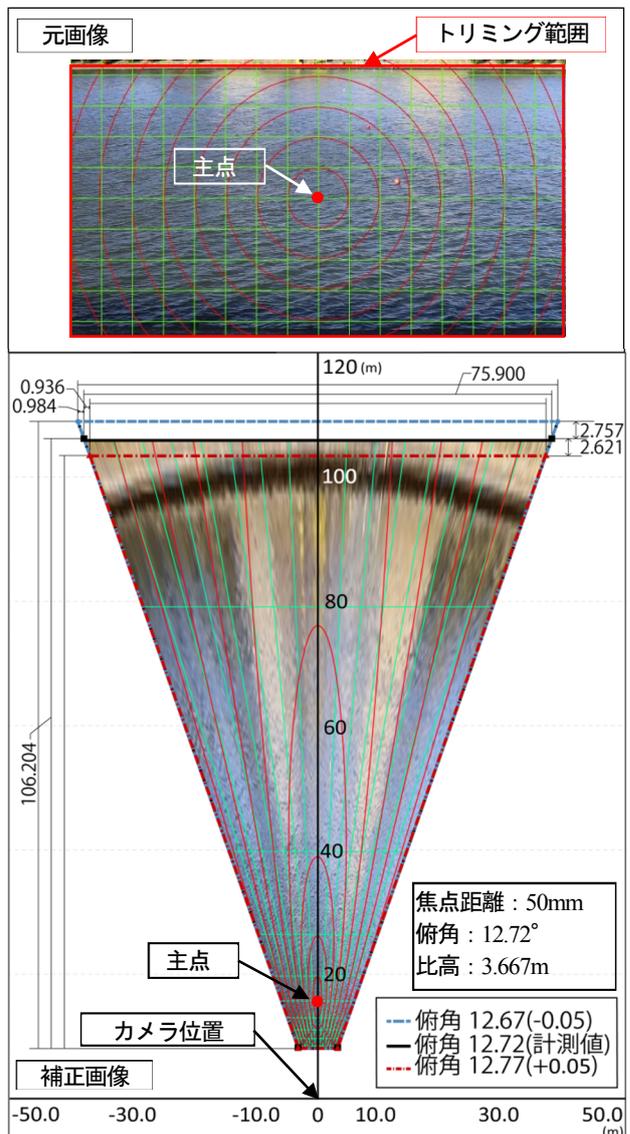


図-6 幾何補正試験画像と変換結果

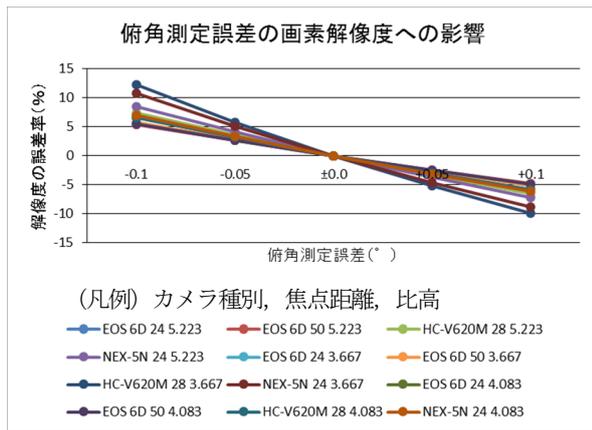


図-7 俯角測定誤差と画素解像度

補正画像の最遠点までの距離で比較すると、実際の撮影俯角 12.72°に対し-0.05°変化させた場合の補正画像の大きさは実際の距離 106.2mに対し+2.76m (約2.6%) の差となった。これを、画像上で距離を計測する際に基準となる解像度で比較すると、実際の俯角で補正した画像の地上解像度が 49.0 mm/pixel に対し、俯角を-0.05°変更したときは 50.3 mm/pixel で+2.7%となった。

カメラ種別、俯角、及び比高を変えて同様の試験を実施した結果を図-7に示す。俯角測定誤差は、撮影俯角が小さくなるほど変換画像の距離精度への影響は大きくなることから、俯角が小さい撮影の場合には、角度の測定精度に注意する必要がある。

(3) 補正画像生成プログラムの改良による高速化

これまで、標定諸元と補正画像の精度について整理した。ここでは画像の幾何補正プログラムの改良と精度について検討する。

従来、ハイビジョン画質 (1920×1080) の 1000 枚の画像を、縦方向の画像サイズ 1000 の補正画像に変換する場合、PC (CPU 3.4GHz メモリ 8GB) による試験では 30 分以上の時間を要していた。

そこで、幾何補正処理高速化のために、コンピュータビジョン用のオープンソースライブラリである OpenCV の関数を利用して処理速度を向上するとともに、補正結果の妥当性を検証した。同一条件の幾何補正処理が、改良プログラムでは約 3 分で処理が完了し、従来比で約 10 倍の効率化を実現できた。

また、幾何補正された画像は、従来プログラムと精度、画質ともに同等であり、処理高速化による改善効果を確認できた。

4. 信濃川旭橋地点における試験観測の実施

本手法を適用した実河川での試験観測を実施した。

試験観測は、図-8に示す信濃川水系信濃川の旭橋地点で、土木学会流量観測高度化小委員会合同観測の一環として 2016 年 4 月 27 日～28 日に実施したものである。

図-9は、LSPIVにより解析した横断流速ベクトル図で

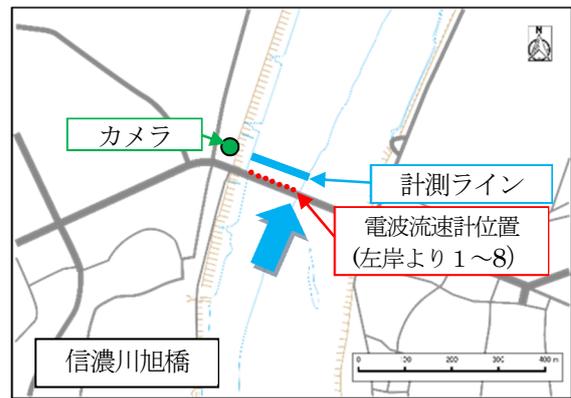


図-8 現地試験箇所と位置図 (信濃川)

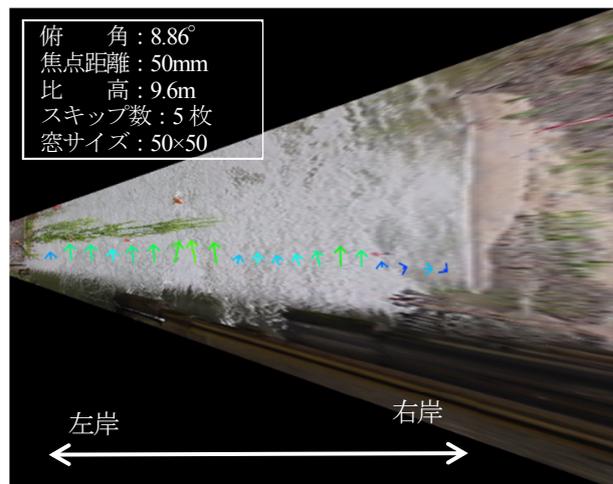


図-9 LSPIVによる流速ベクトル図

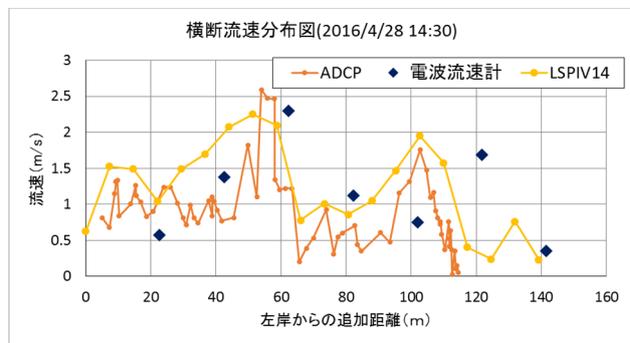


図-10 試験観測による横断流速分布の比較 [ADCPは表層流速, LSPIV及び電波流速計は表面流速]

ある。図-10に4月28日14:30前後にLSPIV、電波流速計、ADCPの異なる3種類の手法により観測された流速データを示す。LSPIVは、旭橋下流左岸堤防に設置したカメラから横断方向に撮影した画像を解析した。撮影時刻は4月28日14:20である。電波流速計は、水面幅に対し7測線を設けて可搬式電波流速計を用いて同日の14:20~15:00にかけ移動観測したものである。また、ADCPは、同日14:34~14:38に横断観測で取得されたデータである。観測結果は各手法とも流速は0.5m/s~2.5m/sの範囲であり、横断流速分布の形状も概ね整合している。

厳密に同じ位置での流速観測ではなく、また、観測時

刻が異なっていることを考慮すると、妥当な観測結果と考えられる。

なお、当該箇所空間スケールは、カメラから対岸まで約 200m であった。傾斜計の測定精度 $\pm 0.05^\circ$ の影響をこの観測ケースと比較するため俯角を実際の値 -0.05° として変換すると、補正画像の長さ誤差は 200m に対し約 5m (2.5%) となる。幾何補正精度の目安である 5% 以内⁹⁾ となることから、観測に使用した傾斜計の精度は当該箇所の観測に対し基準を満たすものと考えられる。

5. 精度管理の考え方と精度管理手法の提案

画像解析を応用した流速計測を普及する上で必要な精度管理の考え方は、以下のとおりである。

当該手法は、内部標定されたカメラを使用し、高精度の傾斜計を用いて外部標定要素を直接計測するものであるが、カメラの内部標定には専用の機材と技術が必要である。一方、レンズ歪みの特性から画面中央部ではレンズ歪みは僅かであることが確認できた。また、 ω と φ については幾何補正で重要な外部標定要素であることから、高精度に計測する必要があるが、 c と h は生成される補正画像の縮尺を決める要素であり、画像の形状には影響しない。

現場における機動性のため、標定点を使用しない方式を考案したが、対岸までの距離など画像内に尺度を検証できる要素が 1 点だけでもあれば、 c と h はどちらかがわかれば計算で求められる。これは、焦点距離が固定されないズームレンズの使用にもつながるものである。また、画像の周辺部を使用せず歪みの少ない中央の領域を使用して観測するならば、事前のカメラキャリブレーションを厳密に行わなくても実用範囲での計測が可能と考えられる。以下に当該標定手法を適用する場合の精度確保の要点を整理する。

- 1) 空間スケール 200m 程度までの観測には、傾斜計の精度は $\pm 0.05^\circ$ を確保する。
- 2) それ以上の距離や俯角の小さな条件での観測の場合には、最低 1 点の尺度検証点を設け、誤差を補正することにより、精度確保が可能である。
- 3) 事前にカメラキャリブレーションを行うことが望ましいが、歪みの少ない画像中央部を用い、検証点を設置できる場合にはキャリブレーションを省略することも可能である。
- 4) 検証点は、標識等によらなくても画像上で視認可能な構造物、図面上での計測や、レーザー測距儀で川幅を測定するなど、現場で適用可能な方法を採用すればよい。

6. おわりに

本研究は、画像解析を用いた河川流速計測の適用や普及における課題であった撮影時の標定を、高精度傾斜計を用いて外部標定要素を直接計測することで作業の簡略化や機動性の向上を図ったものである。また、そうした手法を適用した場合の誤差要因を分析して精度確保に重要な管理ポイントを整理し、作業基準の骨子を提示した。

従来手法と比較して作業の簡便さと機動性は開発の目標を満たすものとする。

今後は、当該手法がより広く活用されるよう、撮影機器や解析ソフトの開発・改良を進め、実証データの蓄積と検証を行う予定である。

謝辞：本論文に引用した ADCP 観測結果、電波流速計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。

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，pp. 1177-1182, 2011.
- 2) 藤田一郎・中島丈晴：実河川流計測における LSPIV の汎用化と水制間流れへの適用，水工学論文集，Vol.44, pp. 443-448, 2000.
- 3) 小林範之・渡邊明英・野谷靖浩・藤田一郎：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，河川技術論文集，第 21 巻 pp.67-70, 2015.
- 4) 小林範之・渡邊明英・野谷靖浩・藤田一郎：画像解析による河川流速計測における撮影・標定技術の開発と適用性試験，応用測量論文集 27(JAST Vol.27), pp.99-110, 2016.
- 5) 可視化情報学会編，PIV ハンドブック，森北出版，2002.
- 6) 可視化情報学会編：可視化情報ライブラリー4 PIV と画像解析技術，朝倉書店，2004.
- 7) 津留宏介・峰島貞治・古本秀明・馬河絢子編著：CAD/CG/GIS ユーザーのための航空・衛星写真画像ハンドブック，財団法人日本写真測量調査技術協会，2008.
- 8) 津留宏介・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.
- 9) 国立研究開発法人土木研究所編：流量観測の高度化マニュアル（高水流量観測編）Ver1.2, 2016.

(2017. 4. 3 受付)