

実務における画像解析手法の適用の課題と対応策

ひのほら りょう おおもり よしろう
日野原 遼¹・大森 嘉郎¹

¹中電技術コンサルタント（株）（〒734-8510 広島県広島市南区出汐二丁目3番30号）

洪水時の流量観測は、浮子観測を基本とされてきたが、データの欠測や観測員の安全性の確保から観測手法の高度化や無人化が急務である。近年、様々な流量観測の高度化手法の適用が全国的に展開されているが、その中でも、画像解析手法はCCTV等の既設設備を活用でき、安価かつ、早期に導入が可能である。

本検討では、実洪水を対象として画像解析を行い、浮子観測結果等との比較検証から得られた知見、課題について議論する。

Key Words : 画像解析, STIV法, 更正係数, 流量観測, 浮子観測, 物理座標, 仮想標定点, 幾何補正

1. 背景、目的

近年、河川における画像を利用した洪水流量観測（以下、画像解析手法）の実務への展開が進んでいる。画像解析手法は、洪水流の水面を、それより高い位置から撮影し、河床などで生じる乱流に起因する水表面の乱れを撮影画像の模様としてとらえたり、流木等の物体のパターンを追跡し、撮影した画像上の位置を、物理座標に変換する幾何変換というプロセスを経て、洪水流の表面流速の横断分布を算定する。

画像解析手法は、既設CCTV を活用できるなど経済性の観点から利点がある。一方、既設CCTV は状況監視を主目的として開発された撮影・記録システムのため、画像解析手法の適用の誤差要因となったり適用限界を制約する場合がある。本報告では、数年に亘り画像解析手法と浮子観測手法の比較検証結果から明らかとなった課題について対応策を議論する。なお、本検討で扱う画像解析手法は、現在、我が国で最も適用事例が多いSTIV（Space Time Image Velocimetry）を用いる。

STIVは、河川水面を撮影した動画画像から連続した画像を取得し、画像上に設置した検査線の輝度値を時間経過毎に積み重ねて時空間画像（STI：Space-time image 図-1）を作成し、STI上の縞模様の角度から流速を算出する手法である¹⁾。また、STIVにより、流速を算定するためには、カメラで撮影された斜め画像を真上から見た画像に修正する必要がある

これを幾何補正という。幾何補正は、カメラのレンズ位置と撮影画角により決まる。状況監視を目的とした既設CCTV は、出水時に撮影画角が変更される場合があり、画角ごとの幾何補正を行うことは、現実的でない。そのため、本検討では、画角内に映るビルなどの固定点を用いて仮想標定点として設定し、幾何補正を行う方法を検討した。さらに、既設CCTV は、夜間でも視認できるようにフレーム蓄積機能が搭載されているが、フレーム蓄積を行うと、STI に縦方向の縞パターンが形成され、結果としての流速値が異常となる。そこで、各種フィルターを用いることで妥当な流速の算出が可能となった事例を報告する。

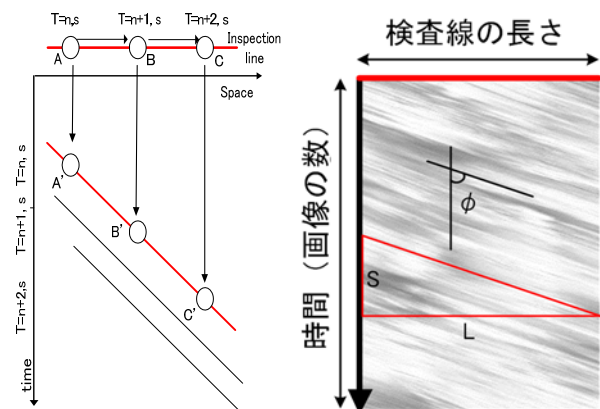


図-1 STI概念図・STI²⁾・³⁾

2. 仮想標定点を用いた幾何変換

(1) 幾何補正

STIV では、斜めから撮影された画像を用いるため、画面上の座標と物理座標(測量座標)の関係づける標定点(GCP: Ground Control Point)が必要となる。これらのデータを用いると斜め画像の幾何補正(image rectification)を行うことができる。両座標間の関係は、次式で示す二次射影変換式で表せる。

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

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

ここに、 A_1 から C_3 までの11の係数で、これを決定するために標定点座標が必要である。一般的な撮影の状況は、**図-2**に示す通り、基本的には河岸からの撮影を想定している。あるいは、式(3, 4)に示すように、写真撮影における共線方程式、すなわち

$$x = -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad (3)$$

$$y = -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad (4)$$

ここに

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \phi \cos \kappa, a_{12} = -\cos \phi \sin \kappa, a_{13} = \sin \phi \\ a_{21} &= \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa \\ a_{22} &= \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa \\ a_{23} &= -\sin \omega \cos \phi \\ a_{31} &= \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa \\ a_{32} &= \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa \\ a_{33} &= \cos \omega \cos \phi \end{aligned}$$

を用いることもできる。 ϕ, κ, ω は、カメラアングル、 X_0, Y_0, Z_0 はカメラの中心座標、 c は焦点距離である。式(1, 2)と式(3, 4)における変換係数の数は、写真測量において外部変数とよばれる3つのカメラアングル、カメラ座標、および焦点距離の7つとなる。

カメラパラメーター(カメラアングル、焦点距離)の算出は、標定点として設定した物理座標と画面上のCRT座標の点を近づける計算となる。このため、現地に標定点を設置または既設の構造物位置を標定点として測量する必要があり、マニュアルでは画角内に6点以上設置することが精度確保上必要とされている。しかし、使用するCCTVは、先述したように状況監視が目的であり、画角によっては、水面が画角の大部分を占め、画角内に標定点を配置することが難しい場合がある。また、洪水時に流量観測用に設定したプリセット画角から変更された画角で録画されることもある。

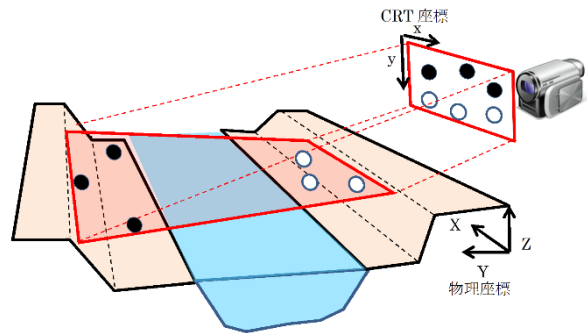


図-2 画像変換イメージ

(2) 仮想標定点による幾何補正モデルの作成

本検討では、画角の中に写っている背景の山や建物の形状で特徴的な点を標定点として追加することで、標定点の配置を改善でき、幾何変換の精度確保ができる手法⁴⁾を検討した。具体的には、遠方のビルの屋上と山の頂上を、GISの標高分布およびWEBの地形情報サイトより算定して、標定点として利用して幾何変換を行った。

図-3は、カメラ変更前に洪水時の動画が取得できたが、標定点測量を実施する洪水後にはカメラが変更されていた事例である。本検討では、画角内の固定点となる橋脚に設定した標定点を使用するとともに、対岸のビルに仮想標定点を設定し、幾何補正を行った。



カメラ変更前 カメラ変更後
図-3 CCTV画角変更前後の画像

表-1 幾何補正モデル上のAB間距離と物理座標との誤差

	仮想標定点モデル
AB間の距離 (物理距離170m)	174m
誤差率	2.6%



図-4 物理座標とCRT座標のAB間の距離

画角内に映っている橋脚AB間の距離について、物理座標とCRT座標の誤差は、**表-1**に示すとおり2.6%であった。**図-4**に幾何補正後の座標を平面図上で確認しても概ね一致しており、通常の標定点測量から

幾何補正を行った場合と同様に誤差率は5%以下となる幾何補正精度を確保した。

(3) 仮想標定点を用いた幾何補正による流量算定

仮想標定点を用いた幾何補正モデルを基に流速を算定し、図-5のように浮子観測の横断上の流速と比較を行った結果、浮子観測の値に概ね一致した。また、仮想標定点を用いた幾何補正モデルにより算出した流量を浮子観測から作成したH-√Q図にプロットした結果を図-6に示す。幾何補正モデルの流量は、H-√Q式と概ね一致しており、算出した流量は妥当と判断できる。

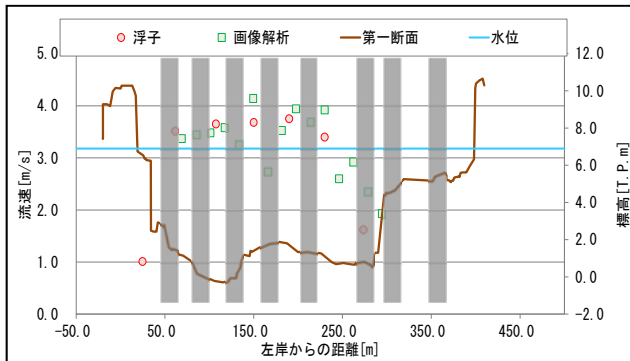


図-5 浮子観測と画像解析手法の流速分布

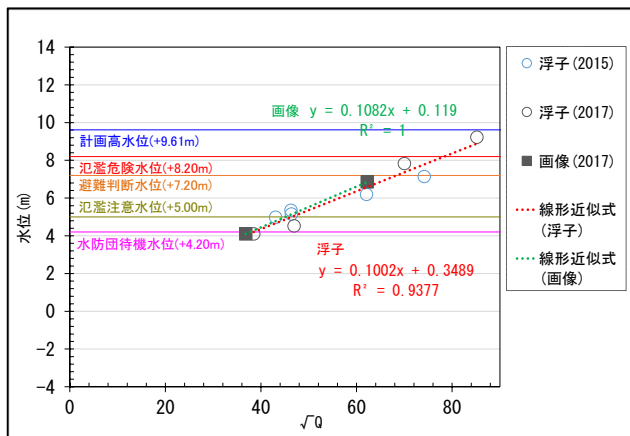


図-6 H-√Q図と近年観測値のプロット

3. フレーム蓄積の影響を受けた動画像の処理

(1) フレーム蓄積

動画は1秒あたり30フレーム(30 frame per second, 30FPS)の画像で構成される。撮影対象が明るくても暗くてもこの間隔は一定である。夜間は昼間に比べカメラに入る光量が格段に小さく、昼間での映像取得を主目的としたカメラでは、夜間では光を受ける素子の性能が不十分となり、適切な画像が取得できない場合がある。このような条件下でも画像を取得する方法として、光を受ける時間を長くとするフレーム蓄積という手法があり、しばしば状況監視システムに実装されている。すなわち信号上は30FPSであるが、それぞれの画像の受光時間を1/30秒より長くにとって暗い場面を明るく撮影する替わり

に、実質的なフレーム数を減らし動きの滑らかさを鈍化させるものである。画像解析手法の画角は、昼間の状況などさまざまな条件を加味して設定され、フレーム蓄積を前提としない条件で縞模様が斜めになるように設定されることが多く、その場合、フレームをスキップすると縞模様の角度はほぼ水平になってしまうことから、流速を算定することが出来ない。

(2) ガウスフィルター及び標準化フィルター

昼間は、縞パターンが明瞭なSTIが取得できるが、フレーム蓄積の影響を受けた場合には、図-7の夜間画像のようなSTIとなる。

ガウスフィルターは、画像の平滑化に使われるフィルターの1つで、「注目画素からの距離に応じて近傍の画素値に重みをかける」ガウス分布を利用して行う(式(5)参照)。これにより、元画像の情報を残したまま、画像の平滑化ができ、ノイズの除去が可能となる。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

σ は標準偏差(σ^2 は分散)を表す。

標準化フィルターは、夜間照明などによりSTI上の時間軸方向(縦軸)に伸びた一定のパターンを解消することが出来る。STI上の流下物は、斜め下に向かった角度を持った縞模様となるが、水面に映る照明などの動かない映像は、縦方向の縞模様となる。そのため、STIの時間軸方向の輝度分布の分散を求めて正規化し、これを画素幅すべての縦軸に対して行う。

フィルター適用前後のSTIの縦軸の輝度分布をそれぞれ $I(x, y)$ および $I^S(x, y)$ すると以下のとおりとなる。

$$I^S(x, t) = (I(x, t) - \mu_t(x)) / \sigma_t(x) \quad (6)$$

ここに

$$\mu_t(x) = \frac{1}{T} \int_0^T I(x, t) dt \quad (7)$$

$$\sigma_t^2(x) = \frac{1}{T} \int_0^T \{I(x, t) - \mu_t(x)\}^2 dt \quad (8)$$

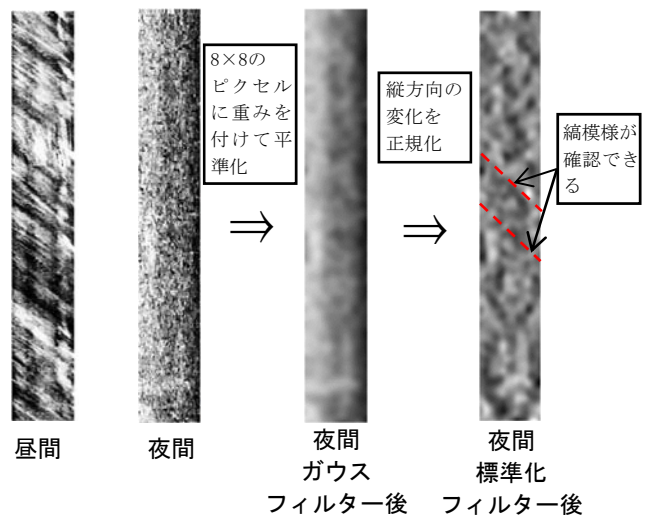


図-7 フィルターによるSTIの変化

本検討では、実質のフレームレートに相当するスケールのガウスフィルターを適用することにより、段差状の模様を取り除くという前処理を行い、標準化フィルターを適用することにより、フレーム蓄積による段差が解消され、自動で流速算定が可能となった。

4. 更正係数について

画像解析手法は、表面流速を算定するため、流量を算出するには、更正係数を乗じて水深方向の平均流速を算定する必要がある。一般的に、更正係数は、表面浮子の0.85を使用する事例が多いが、本検討では、ADCP（Acoustic Doppler Current Profiler）を用いて表面流速に対する更正係数の妥当性を確認した。

本検討では、ADCPを定点で固定し、鉛直方向の流速分布を算定した。河川の中央と河岸から4m付近で観測した場合の流速分布を図-8に示す。

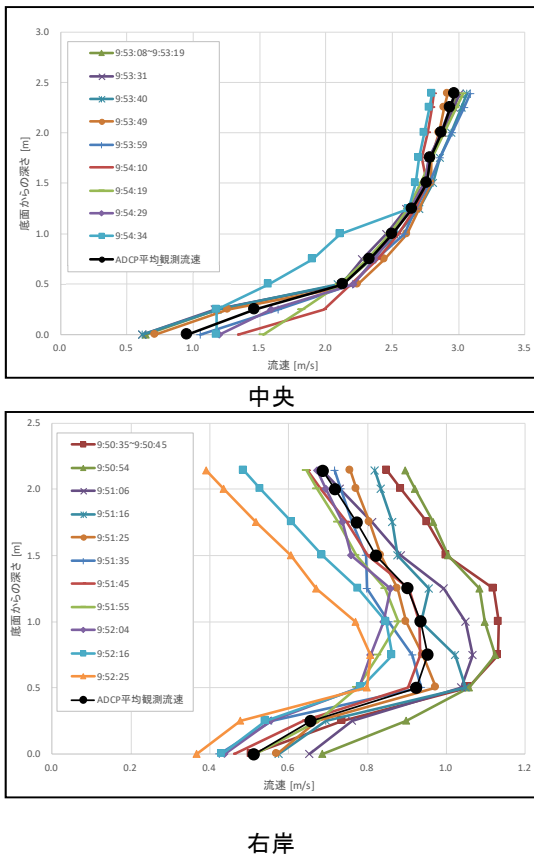


図-8 ADCPによる定点固定観測（鉛直流速分布）

中央については、浮子観測の表面流速に対する更正係数0.85に近い数値となった。右岸側については河岸の乱れの影響を受け、更正係数が1.0を超過

していた。流速の横断コンター図を図-9に示すが、中央の表面流速が卓越し、河岸部の表面流速が遅くなり、3次元的な流れが生じていることが確認された。

今後、橋脚、河岸の乱れの影響などによる鉛直方向の流速分布や結果として得られる流量値について、洪水規模も含めて確認していく必要がある。

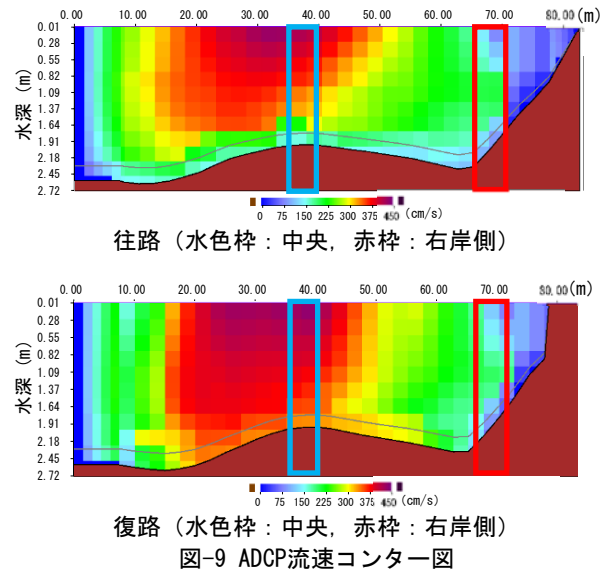


図-9 ADCP流速コンター図

5. 結論、今後の課題

本検討では、実洪水を対象として様々な条件下における画像解析を行い、浮子観測結果等との比較検証を行い多くの知見を得た。基本的に洪水後の解析により、様々な課題について検証、解決を行ったが、今後、さらなる省力化、省人化を図るため、本検討で得られた知見を別途運用中の自動解析プログラムに組み込み、リアルタイムの流速（流量）算定について取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 原浩気・藤田一郎：次空間画像を用いた河川表面流解析における二次元高速フーリエ変換の適用，水工学論文集，第54巻，pp.1105-1110，2010。
- 2) 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，第38巻，pp.733-738，1994。
- 3) 藤田一郎・北田真規・霜野充・橋田隆史・萬矢敦啓・本永良樹：複数アングルの画像計測とラジコンボート搭載型ADCPによる融雪洪水流の空間計測，土木学会論文集B1（水工学），Vol.70，No.4，pp.613-618，2014。
- 4) 椿涼太：画像を利用した水文観測を実施する際の実務上の課題と対応策，河川技術論文集，第25巻，2019。