

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

ISSUES AND MEASURES RELATED TO IMAGE-BASED FLOOD FLOW MEASUREMENT

椿 涼太¹
Ryota TSUBAKI

¹ 正会員 博(工) 名古屋大学准教授 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Application of image-based method for flood flow measurements has become popular in recent years. There are several issues reducing the accuracy and applicability of the image-based flood measurements, and some of them may have been overlooked. Based on our experience, this paper discusses the issues related to video format and ortho-rectification, and measures to manage the issues are also presented.

Key Words: STIV, LSPIV, ortho-rectification, aspect ratio

1. はじめに

画像を利用した洪水流量観測や水位観測の実務展開が進みつつある¹⁾。画像を用いた洪水流量観測は、まず(1)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。続いて、(2)横断流速分布の補間、水深平均流速への変換を経て、区分した横断面での通過流量の総計を算出してその断面の総通過流量を算定する。本報告では(1)の洪水流の画像を利用した表面流速分布の計測に着目し、実務上の課題と対応策を議論する。

画像を利用して表面流速分布を計測する際には、水面を画像として撮影・記録する必要がある。水文観測だけを目的とした開発・設計された機器ではなく、より大きなマーケットを対象として性能向上とコスト低下が進んだ機器を利用できることは、画像を利用した水文観測の実務展開が進む要因となっている。一方で、特に状況監視を主目的として開発された撮影・記録システムでは、いくつかの特徴的な処理が行われる場合があり、それが画像を利用した水文観測を行う際の誤差要因となったり適用限界を制約する場合がある。本報では、その内のいくつかの課題について対応策も合わせて説明する。

撮影システムの影響が幾何変換にも及ぶ事例と対処法を説明し、併せて、標定点の配置、画角の制約などについても議論する。

2. 画像の記録

(1) インターレース

動画の記録方法にインターレースという方法がある。この方法で記録された動画の一コマを切り出して表示すると、図-1の拡大部分にみられるように、横縞上のパターンがみられしばしば楕状ノイズと呼ばれる。

インターレースという記録方法は、ブラウン管で人が動画を見る際に、動きの少ない場面での解像度と、動きの激しい場面でのスムーズさを両立する方法として設計されている。具体的なインターレースの仕組みについては、別途を確認いただきたいが、ブラウン管で映像をみる機会がほとんどない現在、インターレースのそもそもの狙いが発揮される場面はほぼないが、状況監視システムでインターレースが利用されている場面は現在でも少なくない。画像解析では、プログラムによって映像を分析するため、インターレースを利用する前提である「人が動画を見る」という条件が満たされていない。画像解析を行う上で、フレームレートに対して画像の動きが少ない場面を除くとインターレースはデメリットが大きい。画像の時刻間での位置の差を分析する Particle Image Velocimetry (PIV) や Particle Tracking Velocimetry (PTV) を行う際に、図-1の拡大部分にみられる楕状ノイズが発生すると、この楕状ノイズも模様の一部として扱われて、時刻間での模様の移動を正しく算定できなくなる²⁾。

対応策として、扱っている画像がインターレースかそうでないか(インターレースでないものはプログレッシブとよばれる)を確認し、インターレースであったら、プログレッシブに変更することを検討すべきであ



図-1 インターレースの例

る。一つのデジタルビデオカメラで撮影から動画ファイルまで一貫して作成する場合には、その機器の設定でインターレースとプログレッシブの切り替えが可能であるが、状況監視目的のシステムでは、カメラ、信号転送装置、画質調整装置、データ圧縮/展開装置、アナログ/デジタル変換、記録装置といった機器を組み合わせる構成することが多く、このシステムで一貫してプログレッシブで行うことができれば、本質的な問題解決にはいたらない。インターレースで記録され、櫛状ノイズが発生している画像で画像処理を行う際には、インターレース解除処理を行って対処する必要があるが、インターレース解除は一種のデータ補間であり、本質的な鉛直方向の情報の解像度が復元されるわけではないことを留意する必要がある。

(2) 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少なく、昼間での映像取得を主目的としたカメラでは、夜間では光をう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り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³⁾。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秒より長くとり暗い場面を明るく撮影するわかりに、実質的なフレーム数を減らし動きの滑らかさをあきらめるといものである。

記録された映像をコマ送りに表示して確認すると、フレーム蓄積で記録されているかどうかを確認できる。図-2に示したのは、フレーム蓄積の影響を受けた時空間断面画像(Space-time image, STI)である。全体的に模様がブロック状になっていることが確認できる。より細かく見ていくと、下向きが時間の進行方向であるが、縦方向6ピクセル分、すなわち0.2秒ごとにパターンが切り替わっている。また縦方向に1ピクセル(1/30秒)毎

に輝度が振動している様子が確認できる。後者の振動の発生には、インターレース、フレーム蓄積、動画圧縮によるノイズなどが複合的に作用した結果と考えられるが、詳細は不明である。この1ピクセル毎の振動を除くと、時間方向には0.2秒ごとにしか、パターンが変わらない。図-2に対して直接、縞模様の角度抽出をアルゴリズムで抽出しようとする、0.2秒ごとに模様が切り替わることによる段差が生じているため、水平や垂直の角度を検出することになる。斜めの模様が抽出されたとしても、段差の影響を受け、角度を適切に計算できない可能性がある。

ここで示した例は0.2秒ごとのフレーム蓄積であるが、十分明るい場合では、前節で議論したフレーム蓄積なしのインターレースで記録され、非常に暗い場合には、長時間でのフレーム蓄積となり、その中間的な暗さでは、短時間のフレーム蓄積が適用される。つまり、時刻ごとに、フレーム蓄積の適用状況が変化する。

このようなフレーム蓄積が起きた場合の対処法であるが、PIV/PTVアプローチを取る場合には、名目上の30FPSでなく、中間のフレームのスキップして、実質のフレームレートで解析を行う必要がある。STIVアプローチを取る場合にも、実質のフレームレートで対処することが考えられる。すなわち図-2の場合、縦方向に6ピクセル毎に線を抽出した時空間断面画像を作成することで、フレーム蓄積の影響のない画像を得ることができる。そうすると、縦につぶれた時空間断面画像となり、縞模様が水平に近づく。STIVの角度抽出は、45度に近い角度のほうが速度の分解能がよく、水平や垂直に近い模様を精度よく抽出することはむずかしい。フレームをスキップしても、縞模様が斜めとなる時空間断面画像が作成出来る場合には、フレームをスキップした時空間断面画像を用いた解析がよいと考えられる。一方で、画像解析の画角は、昼間の状況などさまざまな条件を考慮して設定され、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。このような場合、実質のフレームレートに相当するスケールの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うことで対処できる。図-3に示したのは図-2に直径6ピクセルのガウスぼかしを適用したものであり、フレーム蓄積による段差が解消されている。

その他のフレーム蓄積に起因する課題として、図-4に示すように、それぞれのフレームを確認すると、偶数列と奇数列の模様が同じになる現象が確認できる。もう少し詳しく説明すると、図の拡大部分の右下に1ピクセルの大きさを示している。模様が縦2ピクセルの幅で表現されている。すなわち縦方向の空間解像度が半分になっている。模様が真横に動いている場合には影響は少ないが、主流方向が縦方向である場合には、空

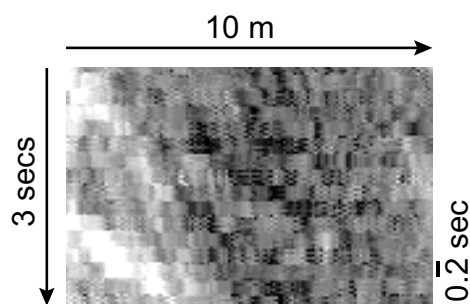


図-2 フレーム蓄積の影響を受けた時空間断面画像 (STI)

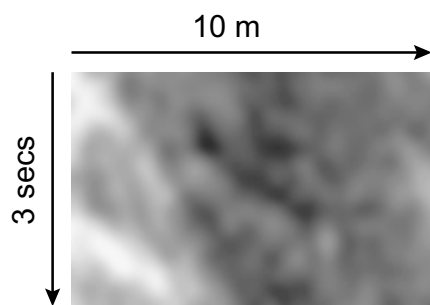


図-3 ガウスぼかしを適用した時空間断面画像 (STI)

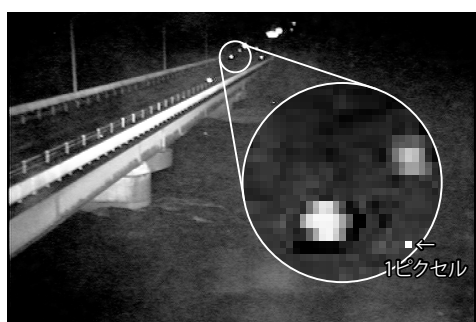


図-4 フレーム蓄積された画像の例

間分解能が半分になる点に留意する必要がある。

(3) ピクセルのアスペクト比

現在の一般的なディスプレイのピクセルは正方形であり、多くの画像がこの一般的なディスプレイで表示される。そのため、ピクセルが正方形でない画像の存在を意識する場面は少ないかもしれない。また、ピクセルが正方形でない画像もソフトウェア上で調整されてディスプレイで表示される場合も少なくない。ピクセルが正方形でない映像規格は、時間当たりの情報量（ビットレート）の制約があるなかで、人の目できれいと感じられる映像を表示できるように設計されている。代表的なものとして、横:縦比が 16:9 の画像を 1440 × 1080 ピクセルで表現する場合や、横:縦比が 4:3 の画像を 720 × 480 ピクセルで表現するものがある。これはそれぞれピクセルの横:縦比を 4:3 あるいは 10:11 とし

ている。先程言及したように、状況監視目的のシステムは、データ圧縮/展開装置、アナログ/デジタル変換、記録装置といった機器を組み合わせで構成されており、それぞれのプロセスにおいて、ピクセル数やピクセルのアスペクト比が変化する可能性がある。ピクセル数やピクセルのアスペクト比が変わるたびに、データ（ピクセル）補間が行われ、実質的な情報の解像度が下がっていくため、ピクセル数やピクセルのアスペクト比はシステム内で一貫していることが望ましい。

どこで、どのような変換がなされたかは最終的に記録された画像のみから確認することは困難であるが、縦横比が分かっているものを、そのシステムで撮影して、得られた画像を調べることで、最終的に記録された画像のピクセルのアスペクト比を確認することができる。画像解析を行う際には、確認されたピクセルのアスペクト比を考慮して行う必要がある。

3. 幾何変換

(1) 標定点の整合性

標定点の測量した位置（実座標）と画像上の位置の整合性に問題を抱える場合がある（図-5 に参考例を示す）。1 点だけ大きくずれているような場合には、測量や記録などでのエラーがあった可能性があり、その標定点を除いて幾何変換を行って、改善するか確認すればよい。その他の要因として、幾何変換に利用するカメラモデル⁴⁾と実際のカメラの光学系が一致していないことが考えられる。図-5 に示す事例では、全体的に標定点の整合性に問題がある（赤い+印と青い+印のずれがみられる）。図-6 には、ピクセルのアスペクト比を考慮して幾何補正係数（カメラパラメータ⁵⁾）を求め、標定点の整合性を確認したものである。図-5 に比べ、赤い+印と青い+印のずれが大幅に解消されて、ほぼ全体的に一致していることが確認できる¹⁾。つまり、標定点やカメラの位置そのものは十分正確であったが、ピクセルのアスペクト比が当初考慮されていなかったことが、標定点の整合性や幾何変換の誤差の主要因となっていた。

(2) 標定点の配置と仮想標定点

撮影位置の測量を行い、その情報を利用してカメラモデルを用いて幾何変換係数を算定する場合には、カメラパラメータ（幾何補正係数）の算出は、図-5 に示す画像座標上での青い+印に赤い+印を最小二乗的に近づけていくという計算に帰着する⁴⁾。その場合には、標定点の配置は、かならずしも平面的配置や高さが分散している必要はなく、撮影する画角上で配置が分散していることが、幾何変換の精度確保に有効である。

画角によっては、撮影する範囲に満遍なく配置することが難しい場合がある。例えば水面を広く取ろうとすると、手前側と遠方の両方に固定した標定点を移し

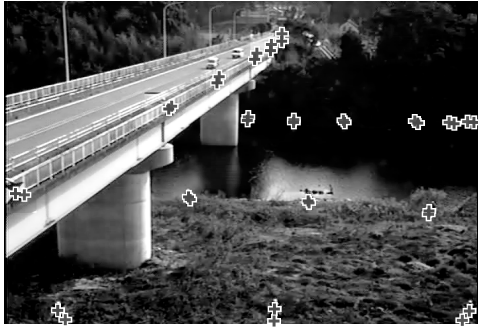


図-5 標定点の整合性に問題がある事例（青い+印は画像上の標定点をマニュアルで設定したもので、赤い+印は標定点の実座標を計算された幾何変換係数により画像座標に変換して示している．赤い+印が青い+印と近いほど幾何変換の整合性が良いことを表す）

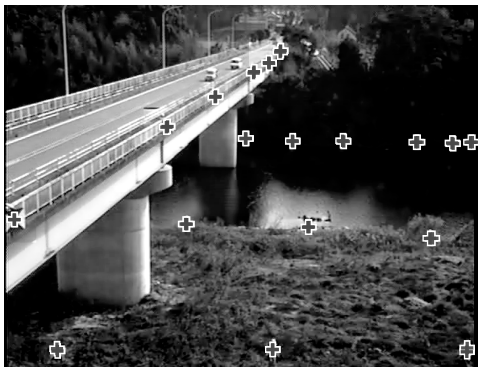


図-6 ピクセルのアスペクト比を考慮して標定点の整合性が改善した事例（赤い+印と青い+印が全体的によく一致している）

込むことが難しい場合がある。図-7 に示すのは、もともとは、画像の右手側に二点、標定点を配置したものであるが、それだけでは画角の中で、標定点の配置が偏っており、幾何変換が不安定であった。そこで、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物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た。図-7 では、遠方のビルの上と山の頂上を、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いる。このような標定点を仮想標定点と呼ぶこととする。

仮想標定点の位置は、測量して求めているわけではなく、既存の GIS データを利用して算定している。そのため、標高の基準（測地系やジオイドの取り扱いなど）についても注意する必要がある、また標高などは数メートルの誤差があることを前提とする必要がある。

一方で、幾何変換係数の同定は、先ほど解説したように、図-7 に示す赤い+印を青い+印に画像座標上で近づけていくという計算であり、遠方にある標定点の実座標上の誤差は、ほとんど幾何変換係数の算定結果に影響しない。例えば図-7 の山頂の位置が数メートル



図-7 仮想標定点（左上の遠方の2点）を含む標定点の配置と整合性

ずれていたとしても、撮影画角上のピクセルではほとんど違いがない。図-7 では、図-6 と同様に、赤い+印と青い+印が良く一致しており、幾何変換の整合性が良いことが分かる。また幾何変換した画像の水際位置が、地形図や標高分布と良く一致していることも別途確認している。

4. おわりに

本報では、標準的な方法で、画像を用いた洪水流量観測を試みて、課題があったケースを対象とし、その課題の指摘と、対応策を議論した。本件で報告した課題は、画像を利用した水文観測の実務展開のさまざまな場面で生じている可能性があり、場合によっては課題の存在が認識されないまま処理が進められている可能性がある。本報が、画像を用いた洪水流量観測をより適切に実施していく一助になればと考える。また、ここでは取り上げなかった課題や、対応策が定まっていない課題もいくつかあり、情報交換と対応策の検討を継続して進めていく必要がある。

謝辞：本研究の遂行にあたりご協力をいただきました国土交通省中部地方整備局、その他関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 水工研究グループ水文チーム：流量観測の高度化マニュアル（高水流量観測編） Ver. 1.2. 土木研究所, 2016.
- 2) 平川, 諏訪, 福田, 小林: 土石流の表面流速計測における PIV 適用の試み. 砂防学会誌, Vol. 59, No. 2, pp. 49-54, 2006.
- 3) 椿, 藤田, 眞間, 竹村, 金原: 既設ビデオカメラを用いた画像解析法による中小河川の流量観測のためのカメラ設定方法および解析方法に関する研究. 河川技術論文集, Vol. 15, pp. 501-506, 2009.
- 4) 日本写真測量学会編：写真による三次元測定 -応用写真測量編-. 共立出版株式会社, 1983.
- 5) 椿, 藤田: ステレオ画像を利用した自由水面の水位分布計測法の開発. 水工学論文集, Vol. 48, pp. 523-528, 2004.

(2019.4.2 受付)