ナビゲーションモードに対応した空中撮影 動画のブレ補正と洪水流計測への適用

IMAGE STABILIZATION OF VIDEO IMAGES SHOOT FROM AIR VEHICLES IN NAVIGATION MODE AND ITS APPLICATION TO FLOOD FLOW MEASUREMENTS

能登谷祐一¹・藤田一郎²・建口沙彩¹

Yuichi NOTOYA, Ichiro FUJITA and Saaya TATEGUCHI

¹学生会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 学術博 神戸大学大学院教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

The advantage of aerial vehicles in observing various geographic features is its wide field of view, which is different from an observation from the ground. Although the field of view depends on the height of the vehicle and the lens aperture, an area with a side length of more than one hundred meter can be observed at one time. As for measurements of a river reach, a manned helicopter or an unmanned air vehicle has been used to shoot river surface flows, from which surface velocity distributions can be measured by an aerial LSPIV or an aerial STIV techniques developed by our research group. In this paper, a new image stabilizing method was developed for video images shot from navigating aerial vehicles such as a manned helicopter or a UAV. Moreover, the relative accuracy between LSPIV and STIV was discussed for the same aerial videos. The developed method was applied to several new and old videos shot from manned helicopter or an UAV.

Key Words : Flood flow measurement, image stabilization, aerial STIV, UAV, helicopter

1. まえがき

河川流の映像による観測法には様々な手法がある。最も簡素な方法は、水面に浮かんだごみ、泡、流木などの表面浮遊物を目視で観察する方法であり、浮遊速度や浮遊軌跡を調べることでおよその流れの様子を把握できる。この場合、観測地点は川岸であったり、橋の上であったりする。このような浮遊物の速度を定量的に求めるのがマクロ的には浮子法であり、ミクロ的には粒子追従法である。浮子法が流量計測のために数十メートルの河川縦断区間の平均流速を手動で求めるのに対し、粒子追従法はPTV(Particle Tracking Velocimetry)とも呼ばれ^{1,2)}、基本的には連続画像の画像解析によって個々の浮遊物の速度ベクトル情報が詳細に得られる。浮子の移動軌跡を追跡するFloat-PTVのシステム³⁾も提案されている。

一方、個々の粒子ではなくパターンを追跡する方法がPIV(Particle Image Velocimetry)^{4,5)}である。この場合のパターンは、水表面に浮かんだ浮遊物群、水面のランダムな凹凸、あるいは河川水の色の違いなどが作り出す河川表面の模様であり、風の影響が小さければ表面流速で移動すると考えられる。河岸から河川表面を斜めに撮影したビデオ画像を用い、同様の原理で横断流速分布などを

求めるLSPIV(Large-Scale PIV)^{6,7)}も国内外での適用例が多数ある。最近では、主流方向の流速計測に特化したSTIV(Space-Time Image Velocimetry)⁸⁾が開発され、流量計測の高度化に寄与している。

ここまでで説明した観測法はいずれも川岸や橋などの固定点から局所的な河川流を対象とするものであり、非常に長い河道区間からみればある一断面を詳しくみているに過ぎない。本来の河川は蛇行や分合流などを繰り返して流下する非常に複雑なシステムであり、表面流だけを対象として考えてみても、その全容を把握することは容易ではない。このような長い河道区間の観測を実現するには、ローカルリモートセンシング⁹⁾の技術が有用である。人工衛星のように時間分解能の低いリモートセンシングで河川の速度場を観測することは不可能であるが、人工衛星ほど高度の高くない地点から河川流を空中ビデオ撮影すれば、広範囲の流況を把握できるようになる。これまでローカルリモートセンシングで使われてきたのは、飛行機やヘリコプターあるいはカイトなどであったが、最近では小型で安定性の高まったいわゆる無人飛行機(UAV)も利用可能となってきた。解析手法としては、空中撮影のブレを補正した画像にPIVやSTIVを適用するAerial LSPIV¹⁰⁻¹¹⁾とAerial STIV¹²⁾が提案されてい

表-1 ローカルリモセン用解析手法の比較

	Aerial LSPIV		Aerial STIV	
撮影モード	ホバモード	ナビモード	ホバモード	ナビモード
計測時間	10秒以上	5～10秒程度	10秒以上	5～10秒程度
対象画像	数フレーム置きのペア画像		すべての連続画像	
空間解像度	数m～十数m四方		数m～十数mの線分	
流速値	平均ベクトル	瞬間ベクトル	平均主流方向成分(検査線方向)	
ブレ補正レベル	要高精度		要高精度	
長所	流向がわかる 長時間平均値	流向がわかる 長い区間の計測可能	ノイズに強い 長時間平均値	長い区間の計測可能
短所	ノイズに弱い		流向が曖昧	計測時間に制約有

る。空中撮影のモードは大別すると、ホバリングモード（略してホバモード）とナビゲーションモード（略してナビモード）に分けることができる。ホバモードはUAVが視野に入る程度の比較的短い河道区間が対象であるが、ナビモードは河道沿いを移動撮影するため、数キロ程度の範囲をカバーできる。ホバモードに対するブレ補正については前報¹²⁾で詳述したので、本研究では主として新たに開発したナビモードに対する解析手法を提示し、有人ヘリとUAVで得られた映像に対する適用事例を紹介する。

2. ナビモードに対するブレ補正

(1) Aerial LSPIVとAerial STIVの特徴

ナビモードに対するブレ補正の詳細を記述する前に、ローカルリモセンで用いる2つの手法を表-1に比較した。LSPIV系は、流速ベクトルが得られる点に利点があるが、既往の研究ではペア画像のブレ補正を画像毎に行う必要があったため、解析作業にかなりの手間がかかっていた。STIV系は流れ方向に設定した検査線上の輝度分布の時間変化をすべての連続画像を用いて時空間画像(STI: Space time image)の形式で表し、STI上に現れる縞パターン勾配を求めるため、ブレ補正はかなりの高精度で効率的に実施する必要がある。また、LSPIV系では、解析の安定化をはかるためにパターンマッチングのテンプレートが大きくとる必要が生じ、そのために河岸付近の流速値が正確には得られない懸念があるが、STIV系では河岸付近まで計測できる可能性が高い。ただし、STIV系では主流方向が両岸に平行と仮定するために、大きな湾曲部などでは本来の主流方向と一致しないことも想定される。この場合は、LSPIV系で求めた流向に沿って検査線を設定し直すなどの工夫が必要となる。

(2) ナビモードのブレ補正アルゴリズム概要

アルゴリズムを開発するうえで、ホバモードにはないナビモードの難しさは、カメラの移動に伴ってリファレンス画像(図-1(a))とフレーム画像(図-1(b))が重なる部分の面積が小さくなっていくところにある。以降、フレーム画像をFI(Frame Image)、リファレンス画像をRI(Reference Image)と略す。ホバモードでは、特徴点抽出の際に必要となる「RIに対するマスク画像」(図-2(a))を作成し、それを変形させることで全ての「FIに対するマスク画像」の作成を内部処理できたが¹²⁾、ナビ

図-1 リファレンス画像(a)とフレーム画像(b)の概念図

図-2 RIに対するマスク画像(a)とRIから得られるFIに対するマスク画像(b)の概念図

モードにこの処理を適用し、図-1(b)に対するマスク画像を自動生成することは不可能である。なぜなら、時間とともに共通の画像域が減少するため、図-1(a)からは図-2(b)に示すようなマスク画像しか生成できないためである。

そこで本研究では、解析対象の動画から一旦パノラマ画像を合成した上で、そこから個々のフレームに対するマスク画像を生成することとした。具体的には、マスク画像を必要としない手法であるRIPOCによって得られる相似変換行列によって低い精度のパノラマ画像(図-3(a))を作成し、それに対応するパノラママスク画像(図-3(b))を作成することで解決を図った。相似変換行列は式(1)に示す。

$$\begin{bmatrix} a \cos \theta & \sin \theta & b \\ \sin \theta & a \cos \theta & c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで a は拡大率、 θ は回転量、 b 、 c はそれぞれ x 軸、 y 軸方向の移動量を表す。 x 、 y はピクセル座標、 x' 、 y' は移動先のピクセル座標である。開発したブレ補正の手順を要約すると以下ようになる。

- RIPOCにより低精度パノラマ画像(図-3(a))を生成
- パノラマ画像に対するマスク画像を作成(図-3(b))
- 上の画像からRIやFIに対応するマスク画像を生成
- 特徴点検出アルゴリズムで射影変換行列を算出
- 上の行列を用いて高精度なブレ補正を実施(図-4)

以下では、パノラマ画像の作成手法や特徴点による処理について詳細に説明する。

(3) パノラマ画像の作成手法

ナビゲーションモードで想定しているのは、図-3で示したように、河川部分が中央にあって両側に河岸部が映しこまれており、機体が河道に沿って移動するような撮

図-3 低精度パノラマ合成画像(a)と対応するマスク画像(b)

図-4 高精度パノラマ合成画像:赤枠が初期FI, 青枠が最終FI

影状況である。重要なのは常に両側の河岸が画像内に入っていることである。図-5に処理の概要を示しているが、まず初期フレームFI₁を初期リファレンス画像RI₁に設定する。添字はFIでは各フレーム番号、RIでは中継回数を指す。最初の中継までは、既報¹⁴⁾のホバモードと同様に引き続きFI₂, FI₃, …に対して平行移動量、回転率、拡大率を算出し、相似変換行列により各FIを変形する。そしてIフレーム目に切換え条件に合致したとき、RI₁とFI_iとの間の変換行列H_{RI₁}を保存し、FI_iをRI₂に置き換える。これが中継であり、切換え条件とは移動による画像の相対的なずれが画像サイズのある割合に達する条件である。ここでは、RI₂が中継RIとなる。図-5に示すように、次の切換え条件に達するまで以降は同様の手順を繰り返す。

一般に中継リファレンス画像RIとFIの間の相似変換行列をH、初期RI₁と任意のFIの間の相似変換行列をAとすると次式が成立する。

$$A = H_{RI1} \cdot H_{RI2} \cdots H_{RI_{n-1}} \cdot H_{RI_n} \cdot H \quad (2)$$

このときのAを用いて任意時点のFIを変形し、パノラマ画像を作成する。Aはパノラママスク画像と各FIに対する変換行列成分でもあり、各マスク画像は、図-3(b)で示したパノラママスク画像のデータに対してそのフレームに対するA⁻¹を左からかけることで生成できる。

(4) 特徴点の処理

高精度なブレ補正のための射影変換行列は、2枚の画

図-5 変換行列の算出

図-6 特徴点抽出とオリエンテーションの検出例

像から特徴的なパターンを持つ点を抽出し、それを対応付けすることにより算出できる。この処理は「前処理」、「特徴点抽出」、「特徴量記述」、「対応付け」、「変換行列の作成」の5段階に分けられ、多くの種類のアルゴリズムが開発されている。本研究では前処理はせず、特徴点抽出、特徴量の記述にSIFT、対応付けにはFLANN、変換行列の作成にはRANSACの各アルゴリズムを用いた。図-6には特徴点の抽出状態を示しているが、マッチングの効率を高めるために、式(3)に示すような128次元の特性を有する特徴量間のユークリッド距離を用いている。

$$d(v^{kp_{RI}}, v^{kp_{FI}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{128} (v_i^{kp_{RI}} - v_i^{kp_{FI}})^2} \quad (3)$$

ここでは、リファレンス画像RI中にある特徴点kp_{RI}とフレーム画像FI中にある特徴点kp_{FI}の特徴量ベクトルをそれぞれ $v^{kp_{RI}}, v^{kp_{FI}}$ としている。この距離が最小となる特徴点の組み合わせが適切な対応付けの候補となる。さらにRIにおいて抽出された特徴点のFIにおける対応先はRIPOCによって概算値が算出できる。この概算値は射影変換性が考慮されていない。概算値を中心とし、閾値（探查範囲）を半径とする円内にFLANNによって対応付けされた組み合わせを最も適切な対応付けと判断する。

3. 信濃川洪水流への適用

(1) 概要

ここでは、新潟県小千谷市を流れる信濃川の融雪出水を対象とした解析結果を示す。撮影は、2015年4月24日

(a) displacement in x axis (b) displacement in y axis

図-7 RIPOCによる平行移動の結果

(a) A_{23} (b) A_{33}

図-8 射影変換行列項の時間変化

に旭橋付近にてカメラを搭載したUAVを飛行させて行った。使用したUAVの性能は前報¹²⁾と同様である。実際の撮影は様々なアングルで行ったが、本研究ではほぼ真下を撮影した映像を対象とする。画像サイズは1920×1080pixel、フレームレートは60fpsである。撮影は河道区間の様々な地点で行ったが、ここでは旭橋の上下流を対象としたケースの約30秒間の動画に対する解析結果を示す。ナビモードにおける切換え条件は、フレーム画像の縦サイズの8%を超えて移動したときとした。FLANNにおける探索範囲は15Pixelとした。

(2) RIPOCによる概算値の算出

ナビモードの解析状態を示すために、RIPOCによって得られるパラメータのうちx軸、y軸方向の移動量を図-7に示した。撮影時間約30秒間にy軸方向にフレームが800Pixel程度移動していることがわかる。この結果を用いて生成した低精度パノラマ画像が図3(a)であるが、この段階では右岸のつなぎ目が若干不連続になっていることがわかる。

(3) 特徴点処理による高精度な射影変換行列の算出

射影変換行列Aの成分のうち A_{23} と A_{33} の推移を図-8に示す。 A_{33} の値は本来常に1となるパラメータであるが、時間経過とともに若干1からずれてきている。これは実像の3次元性が一因である。すなわち図1の橋梁のように、カメラの移動に従って像の写り方が変化することで、厳密に正確な変換行列を作成することが困難になるのである。RIを中継するほどこの誤差が蓄積される恐れも高くなるが、信濃川のこの例では誤差は最大0.008と小さく解析結果への影響は無視できる。 A_{23} の値は射影変換性が小さいという仮定の下ではy軸方向移動量に大きく寄与する。図-7(b)のRIPOCの結果と比べて滑らかな推

(a)特徴点数 (b)FLANNによる組合せ数

図-9 特徴点の抽出結果

図-10 最終的な組み合わせ数

移であり、精度が改善されていることがわかる。

図-9(a)は各フレームにおいて抽出されたSIFT特徴点数で、およそ8500個の特徴点を安定して抽出している。図-9(b)はFLANNによって対応付けされた組み合わせ数であるが、RIが中継によって切り替わるので階段状になっている。本ケースでは17回の中継が行われている。図-10はRIPOCによる概算値を用いて除外し、RANSACによって最終的に使われた組み合わせである。中継時前は射影変換性が弱く、多くの組み合わせが残るが、平均的には200～300個の有意なペアが検出されている。

(4) 結果と考察

以上に詳述したナビゲーションモードによる河川映像のブレ補正動画を用いて、河川表面流の解析を行った。得られた動画における1画素サイズは0.155mであったが、この値は地図との比較あるいは堤防上に設置したいくつかの標定点座標間距離から求めた。図-11に示したのはAerial STIVによる結果である。検査線は長さ25.7m、間隔は3.0mとし、河岸に平行に設定した。解析に使用した画像枚数は600枚である。融雪出水のため接近流速が大きかったこともあり、旭橋の各橋脚間で流れが加速し、橋下流では図-11中の写真に示すように水面が大きく変動すると同時に大量の気泡が流れに混入した複雑な流れ場が形成されていた。本観測では各タイプのADCPによる計測も行われていたが、小型のボートは頻繁に転覆し計測は困難であった。これに対し、高度約200mから撮影した映像を用いた画像解析では水面変動の影響は見られず、橋脚間で加速され、橋脚背後の後流域で減速する特徴的な流速分布が得られた。ただし、橋上流の右岸近くでは徐々に水深が浅くなっており、主流部の水面変動で生じた波が河岸に向かって伝播していたために、主流方向に検査線を設定したSTIはあまり鮮明ではなく、得られた流速値には若干の誤差が含まれると思われる。

図-11 Aerial STIVによる表面流速分布：右上写真は旭橋下流の状態：小型ボートは転覆，水面の波高は1m以上（点線の枠は1画素サイズ）

図-12 橋下流の縦断測線上のSTIVによる流速分布：

①は左岸から55m，②は86m，③は100mの縦断測線

図-14 橋下流約10mの横断測線上の流速分布の比較

図-12には、左岸寄りの2つの橋脚間に設定した縦断測線（橋から5～85m間）における表面流速の縦断変化を片対数プロットした。加速域のデータ（①と②）は片対数紙上で直線的に減衰し、下流でほぼ同じ流速に収束している。一方、③の減速域下流では、逆にわずかに流速値の回復が見られるが、①や②の測線とは差があり、橋脚による流れの影響がかなりの下流域にまで及んでいることがわかる。

図-13は同じ範囲をAerial LSPIVによって解析した結果である。テンプレートサイズは14×14m，画像間隔は0.08秒とした。流速値は若干ばらついているが、橋脚通過流の加速の様子や橋脚後流で流れが集中している様子がよくわかる。流速ベクトルの集中はSTIVでは簡単には得られない特徴である。図-14は橋の直下流約10mの横断測線における流速分布を3手法で比較したものであ

図-13 Aerial LSPIVによる表面流速分布（点線の枠は1画素サイズ）

る。ここでSTIVは、河岸設置のビデオカメラで撮影した斜め画像から求めた結果である。3手法とも、同様の分布を与えているが、STIVは水面の起伏が激しい地点での値に若干のずれが見られる。現地ではADCPによる計測も行われているが、最大流速はほぼ一致することを確認している。

4. 揖保川洪水流への適用

(1) 概要

ここでの対象は兵庫県を流れる揖保川で2009年に発生した洪水である。このときの撮影は有人ヘリコプターで行われたが、水面に多数の定在波が生じていたため解析を断念していた古い動画が解析の対象である。動画はサイズが1920×1080pixel，フレームレートが30fpsである。解析画像枚数は300枚であるが、ヘリの速度は速く、約10秒間で対象とする長さ約300mの湾曲部を通過した。機体の振動も大きく、ナビモードで扱える動画としてはクオリティの低いものであった。加えて、対象域は河岸に植生が繁茂し、樹林で覆われた山が近接している。このような植物に起因する画像上のパターンはどの点を見ても、類似な模様が多く、信濃川で適用できたアルゴリズムだけでは有意な特徴点マッチングが困難であった。

そこで、本ケースの場合はリファレンス画像を中継するタイミングを5,10,20フレーム毎と分類し、補正の難易度に応じてタイミングを変えた。信濃川においての議論から、リファレンス画像に近いフレームは対応付けできる組み合わせ数が多いことから頑健性が増す分、中継回数分の誤差が蓄積される懸念も増える。したがって、5フレーム毎とする解析範囲においては左岸の高い樹木部分について特徴点数を少なくするよう強くマスク画像で制限し、10,20フレームごとの部分は弱く制限した（図-15）。強く制限するほど似たパターンが散在している影響による誤った対応付けのリスクは減るが、適切な対応付けがなされる組み合わせ数も減少させてしまう恐れがあり、トレードオフの関係となる。なお、FLANNにおける探索範囲は15pixelとした。

(2) 結果と考察

図-15 マスク画像による強い制限(左)と弱い制限(右)

図-16 Aerial STIVによる解析結果とSTI例

対象地点の揖保川の特徴は大きく湾曲した流路にある。図-16にAerial STIVによる表面流速分布の解析結果を示すが、湾曲部前の直線部では流速が5m/s程度と大きいのにに対し、湾曲後は流速が低下している。この地点は、湾曲頂部付近に高低差が2m程度の自然の段落ちが発生しており、上下流で流況が異なるためにこのような変化が表れている。Aerial STIVによる結果はこの様子をよく捉えている。図-16からもわかるように湾曲部上流では水面に定在波が生じていたため、Aerial LSPIVでは解析が困難であった。ただし、図中に示すように時空間画像(STI)上には、定在波を示す縦のパターンに加えて斜め方向の波紋の移流を示すパターンが現れており、このパターン勾配を検出できることから定在波がある場合でも表面流速の計測が可能となった。ただし、検査線は河岸に平行にとったため、流向に関しては不明な点もある。

5. あとがき

本研究では河川に沿って移動飛行する機体から効率的に空間的な表面流速分布の算出を行うアルゴリズムを開発し、実河川への適用と既往の手法との比較からその検証を行った。移動飛行して撮影し、動体が画像中の大きな面積を占める映像に対して、標定点を設置せず効率的にフレーム画像の位置合わせを行った例はほとんどなく、洪水災害時の流れの解析やシミュレーションの検証に大変有用であると考えられる。一方で斜め方向の角度を持って移動した映像への適用には未だ課題がある。さらに日射方向、天候条件によって水面のパターンが見えづ

らい状況や撮影困難な状況となる懸念がある。今後は本手法の適用を多様な条件へ拡大していくと共に、最適な撮影状況の検討や頑健性の向上をはかりたい。

謝辞

本研究は、土木学会水工学委員会の流量観測技術高度化小委員会と土木研究所の合同観測の成果であるが、観測は参加していただいた数多くの方々の協力によって実現できた。特にルーチェサーチ社にはUAVの提供と撮影をして頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Lloyd, P.M., Stansby, P.K. and Ball, D.J.: Unsteady surface-velocity field measurement using particle tracking velocimetry, *Journal of Hydraulic Research*, 33 (4), pp.519-534, 1995.
- 2) Admiraal, D., Stansbury, J., and Haberman, C.: Case study: particle velocimetry in a model of Lake Ogallala, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130 (7), 599-607, 2004.
- 3) http://www.be-system.co.jp/navi_soft/soft_kustiv/kustiv.htm
- 4) Raffel, M., Willert, C., Wereley, S. and Kompenhans, J.: *Particle Image Velocimetry - A Practical Guide*, Springer, 2007.
- 5) Adrian, R.J. and Westerweel, J.: *Particle Image Velocimetry*, Cambridge, 2011.
- 6) 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.
- 7) Muste, M., Fujita, I., and Hauet, A.: Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, *Water Resources Research* 44, W00D19, doi:10.1029/2008WR006950, 2008.
- 8) Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space time image velocimetry (STIV), *International Journal of River Basin Management*, 5 (2), pp.105-114, 2007.
- 9) 江藤剛治・竹原幸生・高野保英・奥野訓史・藤田一郎・酒井信行：ローカルリモートセンシングによる河川表面流のPTV計測の試み，*土木学会論文集*，No.796/II-72, pp.39-52, 2005.
- 10) Fujita, I. and Kunita, Y.: Application of aerial LSPIV to the 2002 flood of the Yodo River using a helicopter mounted high density video camera, *Journal of Hydro-environment Research*, 5(4), pp.323-331, 2011.
- 11) Detert, M. and Weitbrecht, V.: A low-cost airborne velocimetry system: proof of concept, *Journal of Hydraulic Research*, DOI: 10.1080/00221686.2015.1054322, 2015.
- 12) 藤田一郎・能登谷祐一・霜野 充: マルチコプターから撮影されたブレ動画の高精度補正に基づくAerial STIVの開発, *土木学会論文集B1(水工学)*, Vol.71, No.4, I_829-I_834, 2015.

(2015.9.30受付)