

ヘリ画像を利用した新川洪水流の画像計測

SURFACE FLOW MEASUREMENT OF SHIN-KAWA FLOOD USING IMAGES VIDEOTAPED FROM A HELICOPTER

藤田一郎¹・日野友尋²

Ichiro FUJITA and Tomohiro HINO

¹正会員 学博 神戸大学助教授 都市安全研究センター (〒655-8501神戸市灘区六甲台町1-1)

²学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒655-8501神戸市灘区六甲台町1-1)

Image analysis technique is one of the most promising non-intrusive methods to measure two- or three-dimensional flows. In the river engineering applications, a stereo-plotter has long been used to obtain surface velocity vectors of flood flows from aerial photographs. Recently, a more sophisticated image analysis method such as the particle image velocimetry (PIV) has been applied to measure surface velocity distributions. Although the spatial resolution of aerial photographs is sufficiently high, image analysis of them can yield only instantaneous information. Utilization of video images taken from a helicopter is an alternative way for achieving continuous velocity information. In this study, the flood surface flow of the Shin River videotaped from a helicopter on September 12th, 2000 was analyzed by a newly developed image analysis method, demonstrating the extended possibility of the usage of a helicopter.

Key Words : flood flow measurement, image analysis, video image, geometric transformation, helicopter image, LSPIV

1. まえがき

河川の流量, 特に洪水時の流量は、河川流域の管理や河道計画の策定において最も重要な要素のひとつである。また、洪水時における平面的な流速分布に関する情報も衝水部を調べたり、あるいは浅水流方程式などによる数値シミュレーションの予測結果を検証したりする上で重要である。現在、洪水流量の算定については、浮子による流量計測が業務化される。この方法で得られる流量・流速資料は水文統計量として非常に重要なものであるが、観測に人手を要するため観測地点の数には限界があり、観測場所も見通しの良い橋のある地点に限定される。したがって、浮子法は空間的な流れ場の細密な情報を得るという目的には利用することができない。

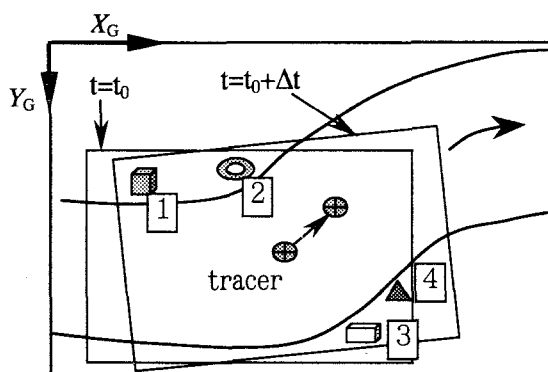
一方、最近、より詳細な河川流の情報を得る方法として、河川洪水流の航空写真を利用する画像計測法が発達し、流速・流量の計測だけでなく、河川流における並列らせん流などの大規模な流れ構造の発見や解明にも成果が上がっている¹⁻⁴⁾。航空写真を利用するこの方法は高い空間解像度を実現できるという点で非常に有用であるが、航空機の移動に伴って撮影された数秒間隔の連続写真の重なった部分しか利用できないために、得られるのは瞬

間的な流速分布に限られてくる。また、航空機が直線的にしか飛行できないのも、効率的な画像データ取得という点で問題である。

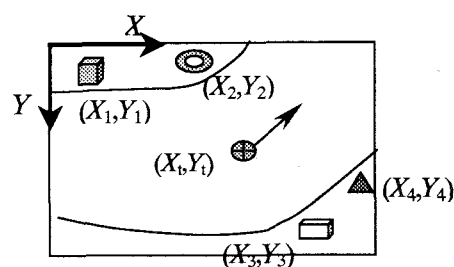
これまで著者らは、非接触の流速計測法として、河岸などから撮影したビデオ画像を利用する方法 (LSPIV : Large-Scale Particle Image Velocimetry) を提案し、実河川における河川流計測法として十分実用性があることを示してきた⁵⁻⁸⁾。ただし、この方法で得られるのはカメラの視野に入る範囲の流速分布であるため、やはり広範囲の流速分布の計測には不向きである。

そこで、上述の既存手法の欠点を補う方法としてヘリコプターからのビデオ撮影を考えてみた⁹⁻¹⁰⁾。この撮影で得られるのは基本的には航空写真と同様、1フレーム毎に背景が変化する画像だが、機動性がきわめて高いため、例えば、空中の一点でホバリングすれば定点観測に近い計測が可能となる。さらには、河道に沿ってゆっくり移動すれば長い河道区間を対象とする流速分布の計測も可能となる。

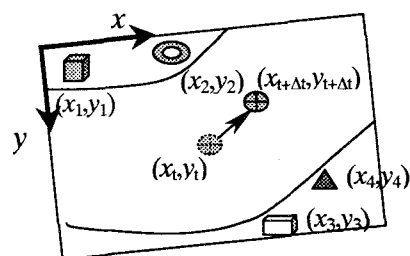
大洪水などの災害時に自衛隊や報道機関などのヘリコプターが出動した際には、過去に数多くのビデオが撮影されているはずである。このようなビデオには単なる視覚情報だけでなく、定量的な画像解析に利用できる情報が記録されている場合がある。そこで、ここではこのよ



(1) 全体座標系(X_G, Y_G)



(2) $t=t_0$ のCRT座標系(X, Y)



(3) $t=t_0+Δt$ のCRT座標系(x, y)

図-1 ヘリコプターによる撮影状況

うないいわゆるヘリ画像から定量的な情報を引き出し、有効利用するための新たな画像計測システムの構築を行った。本研究では、東海豪雨の際に新川上空のヘリコプターから撮影されたビデオ画像を入手し、表面流の解析を試み、開発した計測システムの有用性について検討した。

2. 画像計測手法

(1) 地形移動ベクトル算出の概念

ヘリコプターから撮影された画像は、撮影アングルや撮影地点が時々刻々変化するため、背景が常時変化する。したがって、河川表面流の計測においてはまず背景移動の影響を除外する必要がある。ここでは、その方法について説明する。

まず、基準となる座標系として図-1(1)に示すような全体座標系(X_G, Y_G)を想定する。この図の中央に流れているのが対象とする河川であり、ヘリコプターから撮影される画像のCRT座標は、全体座標系に対して相対的に移動や回転あるいは歪み変形をしながら時々刻々その場所が移動する。このとき、注意しなければならないのは、常に両河岸付近に点在する地物が画面内に含まれるように意識してビデオ撮影を行う必要がある点である。図-1には、模式的に表現した地物とともに、2枚の連続フレームを示している。1枚目の画像(第1画像)の撮影時刻を t_0 、2枚目(第2画像)の撮影時刻を $t_0+Δt$ とし、各々のCRT座標系をそれぞれ(X, Y)、(x, y)とすると、各時刻の画像は図-1(2)および図-1(3)のようになる。ここで、各座標系における地物1~4の座標を($X_1,$

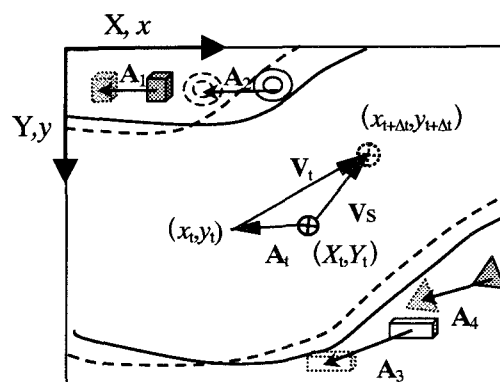


図-2 地形移動ベクトルの除去法

$Y_1) \dots (X_4, Y_4)$, および $(x_1, y_1) \dots (x_4, y_4)$ とおく。前述のように、撮影アングルは常時変化するためにこれらの座標は通常は一致しない。逆に、本来これらの地物は静止したものであるため、各々の地物の相対的な移動ベクトルを求めれば、 $Δt$ 間の撮影アングルの移動、回転、歪変形の量を間接的に知ることができる。本研究では、これらの関係を次式に示す二次射影変換で表せると仮定した。

$$x = \frac{a_1 X + a_2 Y + a_3}{a_4 X + a_5 Y + 1}, \quad y = \frac{a_6 X + a_7 Y + a_8}{a_4 X + a_5 Y + 1} \quad (1)$$

ただし、この式は平面对平面的変換式なので、この仮定が成立するには各地物の高さがほぼ同程度である必要がある。

図-1(2)と図-1(3)を合成したのが図-2である。図に示すように、各地物1~4は相対的な移動を示す。この場合の地形移動ベクトルは、

$$A_i = (\delta x_i, \delta y_i) = (x_i - X_i, y_i - Y_i) \quad (2)$$

$$A_2 = (\delta x_2, \delta y_2) = (x_2 - X_2, y_2 - Y_2) \quad (3)$$

等となる。したがって、例えば、地物1の移動後の座標は、 $x_1 = X_1 + \delta x_1$, $y_1 = Y_1 + \delta y_1$ で与えられる。4点以上の地物の対応座標がわかれば、式(1)を利用して最小二乗法により変換係数 $a_1 \sim a_8$ を決定できる。この場合の見かけの移動量(δx_1 , δy_1)は、画面を見ながらマニュアル操作で求めることもできるが、人的な誤差が入るので現実的ではない。そこで、本研究では各地物の移動量をPIVによって求めることとした。すなわち、適当なサイズのテンプレートを $t = t_0$ 画像の地物上に配置し、輝度分布の相互相関係数に基づくパターンマッチングにより地形移動ベクトルを求めた。マッチングにはサブピクセル補間（ここではパラボリック補間）を用いた。この場合、座標値の誤差は0.1pixel程度であり、マニュアル操作よりは10倍程度、高精度のマッチングが期待できる。

(2) 流速ベクトルの算出

河川流の流速は、洪水時の河川表面に現れる濃度変化や波紋、泡、ごみ、あるいは流木等の移動ベクトルを追うことによって求められる。PIVで実際に追跡するのは点ではなくテンプレート内の輝度パターンだが、ここではそのテンプレートを一つのトレーサとみなす。あるトレーサの第1, 第2画像上の重心座標をそれぞれ (X_t, Y_t) , $(x_{t+\Delta t}, y_{t+\Delta t})$ とすると、PIV解析で得られるベクトルは

$$V_s = (x_{t+\Delta t} - X_t, y_{t+\Delta t} - Y_t) \quad (4)$$

だが、これには地形移動の影響が含まれているので、式(1)を用いて座標 (X_t, Y_t) の地形補正值 (x_t, y_t) を求めれば、実際の流速ベクトルが

$$V_t = (x_{t+\Delta t} - x_t, y_{t+\Delta t} - y_t) \quad (5)$$

より得られる。

3. 新川洪水ビデオへの適用

(1) ヘリコプターによる撮影状況

2000年9月の東海豪雨災害時には、国土交通省庄内川工事事務所により、広い範囲の洪水災害現場がヘリコプターによって撮影された。撮影されたビデオを調べたところ、庄内川を撮影したビデオに関しては、川幅が広くビデオによる空間解像度も十分でないため、水面の様子は不鮮明であった。一方、新川破堤地点を撮影したビデオには、特に水面に明瞭な波紋が現れていたため、PIVによる解析が可能と判断した。ただし、このビデオは本

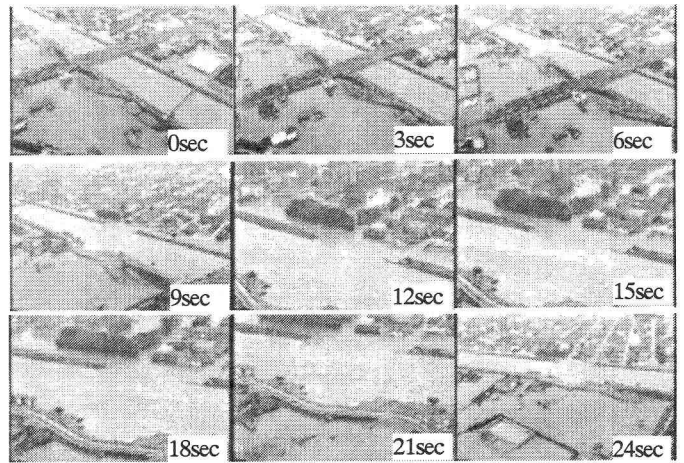


図-3 利用したビデオ画像の一例



図-4 開発したアプリケーションのユーザーインターフェイス画面
(図中の矢印は地形移動ベクトル)

来、画像計測が目的で撮影されたものではなかったため、必ずしも図-1に示したように河川の両サイドの地物がうまく入ってはいなかった。入手したビデオのうち、解析に利用できたフレームと、その前後の3秒間隔の連続フレームを図-3に示す。この図から容易にわかるように、撮影は破堤部の全景から始まり、一旦、ズームアップした後、再び全景の撮影に戻っている。この中で、解析に利用できたのは、河川の兩岸の地形・地物が写っている図-3の15秒からの4~5秒間のみであった。実際には他のアングルからの撮影ビデオもあったが、類似の撮影パターンだったので上述の画像を用いた。

(2) アプリケーションの適用例

本研究では、上述の画像計測原理に基づいてユーザー



図-5 表面流速ベクトルの解析結果 ($\Delta t = 1.0 \text{ sec}$)

インターフェイスを配慮したウィンドウズアプリケーションを作成した。プログラミング言語にはDelphi5.0を用いた。図-4にユーザーインターフェイス画面の一例を示す。この場面では2枚の連続画像を表示した後、地物（不動点）の両画像における対応座標をマウス操作およびPIV解析によって求め、地形移動ベクトルとして画面表示している。図-4では撮影アングルが右上方向にシフトしていることがわかる。なお、地形移動ベクトルを求める際の相関係数はすべて0.9以上だった。

本システムで得られた表面流速分布を図-5に示す。PIV解析ではテンプレートサイズは31pixelとし、計測精度をチェックするために、時間間隔を数通り変化させた画像を比較したところ、 $\Delta t=1.0$ 秒の場合に全体的になめらかな分布が得られた。PIV解析は斜め画像のまま行ったが、そのままでは流速ベクトル長に空間歪みの影響が入るため、破堤直後の航空写真からこの撮影アングルに入っている地物（不動点）の平面座標値を取得し、流速ベクトルの幾何補正を行った。図より破堤部前面の流速は2m/s程度であることや、破堤部へ向かう流れの状況がわかる。ただし、ビデオ画像の場合、縦方向の情報量が横方向の半分程度しかないため、正確な流向の把握に関してはさらに詳細な検討が必要である。今後の撮影では縦横にアングルを変化させるなどの工夫が肝要である。

4. あとがき

本研究では、洪水時にヘリコプターから撮影されたビデオ画像を有効利用するための画像計測システムの開発を行った。撮影が計測目的ではなかったために、利用できたのは全体のビデオテープの内わずかな部分だったが、一つの方法論としてヘリコプターからの画像も十分に活用できることを示すことができた。特に、今回のように破堤を伴うような災害時には、流速観測を行うことは非

常な危険を伴うことでもあり現実的ではない。これに対し、ここで示したような非接触型の手法は迅速かつ安全な計測が行えるという点で有効な現地計測手法と言える。

謝辞：国土交通省庄内川工事事務所の松原充幸氏にはビデオ利用等に関していろいろと便宜を図って頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 木下良作：航空写真による洪水流の解析，写真測量，Vol.6, No.1, pp.1-17, 1967.
- 2) 木下良作，宇民正，上野鉄男：洪水流航空写真の画像解析，写真測量とリモートセンシング，Vol.29, No.6, pp.4-17, 1990.
- 3) 藤田一郎，河村三郎，神田徹：相関法の精度と洪水流航空写真への適用，水工学論文集，Vol.35, pp.293-298, 1991.
- 4) 澤田学，宇民正，木下良作：洪水流航空写真解析法による洪水流量測定に関する研究，水工学論文集，Vol.45, pp.481-486, 2001.
- 5) 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.
- 6) Fujita, I., Aya, S. and Deguchi, T.: Surface velocity measurement of river flow using video images of an oblique angle, *Proceedings of the 27th Congress of IAHR, Environmental and Coastal Hydraulics*, pp.227-232, 1997.
- 7) Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A.: Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol.36, No.3, pp.397-414, 1998.
- 8) 藤田一郎，綾史郎，小澤純：河川表面流のモニタリング手法LSPIVの改良，神戸大学都市安全研究センター研究報告，第4号，pp.97-105, 2000.
- 9) 藤田一郎，原基樹，森本貴生，大西勉：PIV技術の実河川表面流計測への応用，第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集，pp.41-46, 1998.
- 10) 藤田一郎，日野友尋：ヘリコプター画像を対象とした河川流PIVシステムの開発，可視化情報，Vol.20, Suppl. No.1, pp.231-234, 2000.

(2001. 4. 16 受付)