実体視と相関解析の併用による 洪水航空写真解析の効率化

EFFICIENT ANALYSIS OF RIVER FLOW FIELD ON AERIAL PHOTOGRAPHS
BY CORRELATION METHOD WITH SUPPORT OF STEREO VISUALIZATION

箕浦靖久¹・石川忠晴²・吉田圭介³

Yasuhisa MINOURA, Tadaharu ISHIKAWA and Keisuke YOSHIDA

¹学生会員 東京工業大学 総理工環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

²フェロー会員 工博 東京工業大学 総理工環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

³正会員 博(工) 東京工業大学 総理工環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

Stereo images obtained from sequential aerial photographs of river freshets contain a lot of useful information for river hydraulics as well as river engineering works. The image correlation analysis is a standard technique for analyzing the images, but it sometimes produces anomalous results for the area where color fluctuation of the water surface is small. On the other hand, a classical manual analysis through stereo eyeglasses usually works well even in such unclear parts of the images, but the manual analysis costs much labor and time.

In this study, a new technique to analyze stereo images of river flows is developed by combining the above mentioned two methods: A small amount of suggestions are made by using the results from the manual analysis for the image correlation analysis on a computer, and then the results of the second trial of the latter is much improved without any significant time consumption.

Key Words : *Stereo image analysis, Aerial photographs of river freshet, Image correlation analysis
Stereo eyeglasses, Hybrid analysis*

1. はじめに

洪水時に撮影された河川の航空写真には、河川工学および河道改修計画に有用な情報が多数含まれている。近年は河川の二次元および三次元数値計算モデル等も開発されているが、その精度を検証する上でも洪水航空写真は有用であると考えられる。筆者らは特に後者の観点から洪水航空写真の活用を考えている。

我が国における洪水航空写真解析は、木下による一連の研究が先駆となっている¹⁾。すなわち、撮影方法、流速計測および図化方法に関する長期間の検討を経て、河川乱流の時空間分布、砂州とボイル現象および浮遊土砂分布の関係など河川流の実態に関する種々の発見を行なうとともに、河道計画に関する実務情報も提供してきた。

当時の解析手法は、いわゆるカメロン効果²⁾に基づく実体視によっており、ステレオ画像判読の専門家をして、河川乱流の面的解析にはかなりの時間を要していた。しかし、その後の画像解析技術の発達により、計算機による自動解析が可能となってきた。宇民・上野³⁾は、相互相関法を用いたステレオ写真の自動解析技術⁴⁾を、洪

水航空写真と実験水路流の写真の解析に適用し、河川乱流に関する種々の知見を得ている。

航空写真による洪水流解析に関する研究は上記により一段落し、その後はトレーサー注入によるActiveな流況可視化⁵⁾、地上斜め写真またはビデオ画像の解析^{6), 7)}など、多用な洪水画像解析へと研究内容が移ってきている。また近年は、費用等の関係で河川管理者が洪水時の航空写真撮影をあまり行なわなくなっており、撮影された場合でも解析を行わず流況を観察するに留まっている場合が多いようである。

今後の河道計画において詳細な流況把握を必要とする場合には、数値シミュレーション等が用いられると考えられるが、その場合には計算結果の妥当性の検証方法が問題となる。そこで筆者らは、まだ解析の行なわれていない多数の洪水航空写真を上記の目的に使用しようとしている。その際に問題となるのは、相関法のみでは、濃淡の少ない部分でデータの“抜け”が生じることである。

抜けが少ない場合には、周囲から幾何学的に内挿することも可能だが³⁾、多数になると問題が生じる。しかし、そのような場所もカメロン効果を利用して実体視すると、

図1 探査領域（単位はpixel）内の相関係数の分布
探査領域が過大の場合の判断ミス
(a:過大、b:適正)

図3 探査領域（単位はpixel）内の相関係数の分布
相関窓が過大の場合の判断ミス
(a:過大、b:適正)

図2 探査領域（単位はpixel）内の相関係数の分布
探査領域が過小の場合の判断ミス
(a:過小、b:適正)

図4 探査領域（単位はpixel）内の相関係数の分布
相関窓が過小の場合の判断ミス
(a:過小、b:適正)

表1 解析対象画像

対象洪水	1998年9月17日 利根川出水	
撮影高度	1530m	
縮尺	1/10,000	
撮影時間間隔	7.57sec	
1pixelの距離	0.85m	
対象画像	撮影時刻	撮影場所
A	8:11	利根川60K付近
B	8:06	利根川65K付近

判読が可能であることから、人間が少量の情報を計算機に与えることにより相関解析の精度を向上できる可能性があると考えられる。そこで本研究では、実体視と相関解析を併用する洪水航空写真解析について検討した。なお、本論文に示す解析対象画像は表1の2組であり、撮影諸元は同じである。このうちAは濃淡の比較的明瞭な画像で、解析手法の基礎的検討に使用した。一方Bは濃淡が不鮮明な画像で、本解析法の適用性をチェックするために使用した。またBには河道内に樹木が多数存在していることから、標定点の設置法を検討する際にも用いた。

2. 解析方針

洪水航空写真解析は、水面の泡や濃淡というPassiveなトレーサーを利用するので、時差のある2枚の画像間では濃淡形状が同じでなかったり、別の場所にたまたま類

図5 解析対象画像

図6 相関解析結果

似のパターンが発生したりしている。相関解析における“計算機の迷い”はこの点に起因する。相関解析には「相関窓」と「探査領域」という2つのスケールパラメータがあるが、これらの適正值は、流速や濃淡パターンの持続性によって異なると言える。

図1(a)は探査領域が広すぎる場合の相関係数の空間分布で、探査領域内に2箇所のピークが存在する。この場合は図1(b)のように探査領域を小さくすることによって真値に到達できる。図2(a)は探査領域が狭すぎる場合で、図2(b)のようにして真値を得られる。一方、図3(a)と図4(a)は、相関窓が大きすぎる場合と小さすぎる場合を示しており、それぞれを図3(b)、図4(b)のように適正な大きさにすれば真値に到達できる。なお、上記のデータは、

(a)

(b)

図7 相関解析と実体視の比較
(a: 測線A、b: 測線B)

図9 沖積低地の堤内地と堤外地

次に図5に示す画像のa～dの位置から採取した。

さて、本研究では、前者すなわち探索領域の問題について以下のように対応することを考えている。図5は解析手法検討に用いた画像(表1-A)である。なお以下では航空写真をスキャナーで計算機に取りこんで解析しているが、1ピクセルは地上スケールで0.85mとなっている。さて、同図内に示す矩形領域内に相関解析を行なうと図6を得る。図中の黒線は求められた流速ベクトル、色は相関係数の分布を示している。流速ベクトルがあらちちで乱れている様子が見える。またその場所は相関係数が比較的低い場合が多いが、そうでないところもある。前者は濃

写真1 モニター上での実体視

図8 色調変化による実体視の容易さの例

- 誤差を求める点(計算点)
- 最初に目視で設置する標定点
- 相関法によって自動的に設置する標定点

図10 標定点の置き方

淡が希薄な領域、後者は類似の濃淡パターンが複数存在する領域である。

一方、図7(a)(b)は、図5の測線A、Bにおける相関解析(赤線)と実体視の結果(緑矢印)との比較である。また青線は相関係数の横断分布である。なお実体視は第一著者(実体視に関して初心者)が行なった。相関解析の結果では、図7(a)では右端で、図7(b)では左端から1/3付近で相関係数(青線)が小さく、解析結果(赤線)が波打っている。一方、実体視の結果は比較的滑らかである。

これから、初心者の実体視であっても、相関解析より安定した判読ができる可能性がある。この理由は、計算

機は目が見えない(その場所の数値データしか認識できない)のに対し、人間の目は前後のつながりを“総観”するからである。ただし、図5の画像の解析を実体視によって面的に行なうには大変な労力と時間がかかる。そこで、要所において人間が実体視の結果を計算機に情報として与えて解析精度を高めることを考える。

写真1に示すように、広画面モニター上に実体鏡を置き、スキャンしたステレオ画像をモニター上で実体視できるようにした。その上で、相関解析から得られる両画像の対応点を書き込むことにより、後に図12で示すように、相関解析結果の問題箇所を実体視で確認できる。モニター上で実体視するもう一つのメリットは、画像の色調やコントラストをその場で自分の眼に合うように変化させて実体視することにより(図8)、初心者でも比較的容易に解析できる点にある。なお、図8はステレオ画像で、紙面上で実体視できるようになっている。後に示す図12も同様である。

3. 解析手順

(1) 解析準備

航空写真画像をスキャナーで計算機に取りこんだ後、両画像の位置関係の対応をとる。ここでは次のような半自動的方法で行なった。

解析対象の利根川河道は沖積地の区間にあるので、図9に示すように、堤内地の地盤はある程度平坦で且つ縦断勾配は河道内の勾配と概ね等しい。そこで、地盤の凹凸を無視して平面座標の対応関係を求めても、標定点の数を多数にして最小二乗法で平均的關係を求めれば誤差を小さくできるはずである。そこで、以下の手順による標定点設置の自動化を検討した。なお、ここでは河道内に多数の樹木が見られる画像(表1-B)を使用した。

まず図10に示すように、人間が実体視しながら堤内地にいくつか対応点(白丸)を適当にとる。それらは多少の誤差を含んでいる。そこで次に相関解析により対応関係を正確に定める。続いて、それらの幾何学的内分点を両画像で求める。これらも多少の誤差を含むから、相関解析で対応関係を正確に求める。この手順を繰り返すことにより、標定点をいくらかでも増やすことができる。

以上の結果に、最小二乗法を適用して両画像の座標の変換式を作成する。ここでは次の式を用いた。

$$X = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6xy \quad (1)$$

$$Y = b_1 + b_2x + b_3y + b_4x^2 + b_5y^2 + b_6xy \quad (2)$$

ここに(x, y)と(X, Y)は両画像のピクセル座標、 a_j と b_j は最小二乗法で決められる係数である。

この方法の妥当性と標定点の必要数を調べるために、図10の画像中にある河道内樹木の位置を同定し、上式の算定誤差を評価した。用いた樹木は5本で、その位置を青丸で示す。誤差評価結果を図11に示す。縦軸はピクセル単位での算定位置の誤差の平均で、次式によって表さ

図11 誤差評価結果

図12 原画像と相関解析結果の同時立体視

れる。

$$Err = \sqrt{\sum_{j=1}^5 (\Delta x_j^2 + \Delta y_j^2) / 5} \quad (3)$$

ここに、 Δx_j 、 Δy_j は流下方向および横断方向でのピクセル単位での推定誤差である。

図11より、標定点の数が20程度になると、誤差は1ピクセルに近くなり、十分の精度と言える。

(2) 流速解析

まず機械的に相関解析を行ない、図6のような結果を得る。続いて、その結果から得られる対応点を両画像にマークすると、図12に示すように、相関解析結果と原画像を同時に実体視することができる。そこで不一致の大きな領域を抽出できるので、原画像の実体視によりその部分を人間が補正する。すなわち、片方の画面のマーカーを順次移動し、背景にある原画像の実体画面と同じ高さに見えるように調節する。ただし、実体視の結果も当然誤差を持っているので、次に述べるように、この修正結果をreference dataとして相関解析を再度行なう。なお問題の箇所が多い場合、全てを人間が修正するのはかなりの負担である。そこで、特に不一致の大きな箇所のみを修正した後、その他の箇所については以下の手順で省力化を行なう。

比較的正しく解析できている横断測線の各点について、両側の点の相関解析結果を内分し、それをreference dataとして、その対応点の回りだけに探查領域を限定し

図13 解析結果(a:原画像、b:一次解析結果、c:修正解析結果(1)、d:修正解析結果(2))

て相関解析を再度実施する。その結果として、計算機は(人間が行なうのと同様に)前後のつながりを考慮した“総観的解析”を行なうことになる。さらに隣り合う横断面に対して、波形の類似性を利用してreference dataを作成し、同様に相関解析をやり直す。この手順を繰り返すことにより、縦断方向のつながりも考慮した総観的解析が実施される。

4. 解析結果と考察

図13は、原画像(a)、相関解析のみの場合(b)と、前節の方法で修正を加えた結果(c)(d)を示している。後に述べるように、(c)と(d)は人間が計算機に与えた情報の内容(初期の相関解析結果の修正箇所)が異なっている。用いた航空写真の諸元は表1に示した。スキャナーで計算機に取りこんだ画像の1ピクセルは0.85mである。

相関解析における相関窓は流下方向と横断方向ともに35ピクセルで、どの解析でも共通である。探査領域は、初期の解析では流下方向と横断方向共に62ピクセルである。一方、実体視による情報を与えた後の相関解析では、流下方向に14ピクセル、横断方向に6ピクセルとしている。すなわち前者ではステレオ画像の対応点が未知であるので、探査領域を広く取る必要があるが、修正解析の場合にはreference dataがあるので、探査領域を狭くできるからである。このため修正解析の時間は少なく済む。同時に、類似の水面濃淡パターンが存在による“計算機の判断ミス”が取り除かれるわけである。この部分の考

え方は、ある意味では多段的相互相関法⁸⁾に類似している。

図13(c)(d)の修正解析における情報の与え方は以下のとおりである。(c)においては、主要な修正(2点)を加えた後、原画像中にcと付した○の地点から左側および上下に向かって、3節の最後に述べた手順で計算機自身が順次reference dataを作成している。一方(d)においては、原画像でdと付した場所を始発点として同様の手順で順次reference dataを与えている。両図の比較からわかるように、reference dataの作成手順が異なっても、修正解析の最終結果はほとんど同じである。ちなみに、式(4)で定義される画像間の差を求めたところ、(b)と(c)の差は0.471m/sec、(b)と(d)は0.470 m/secであり、(c)と(d)の差は0.045 m/secであった。

$$\text{Err} = \sqrt{\sum_{j=1}^N (\Delta u_j^2 + \Delta v_j^2) / N} \quad (4)$$

ここに Δu_j 、 Δv_j は、対応する点での流速ベクトル成分の残差、 N はデータ数である。

以上のように、相関解析結果を実体視によってチェックし、問題のある箇所に対して少量のreference dataを与えて再解析することにより、解析精度を向上させられる可能性が示された。そこで次に、水表面の濃淡が判別しにくい画像に対して本手法を適用した。解析対象画像(諸元は表1-B)は図14(a)で、左岸側高水敷(図では右側)が広く、濃淡がかなり希薄である。このため、単純に相関解析を行った場合、同図(b)に示すように、流速ベク

図14 解析結果(a:原画像、b:一次解析結果、c:修正解析結果(1)、d:修正解析結果(2))

トルが乱れ、また相関係数が低くなる。このような場合には、周囲から単に内挿するという従来の手法での修正はかなり困難である。なお、この解析の総点数は1310である。

本解析では、まず粗い点密度の一次相関解析で得られた183点のベクトルのうち、実体視により概ね適正と見られる80点の相関解析結果をそのままreference dataとした。次に、実体視に基づくreference dataを合計10点与え、図13で行なったと同様の方法で、下流側C点と上流側D点から修正解析を詳細密度（1310点）で行なった。その結果を同図(c)と(d)に示す。下流側からの解析と上流側からの解析がほとんど同じであることから、概ね妥当な結果が得られていると考えられる。ただし式(4)による相対誤差評価では、(b)と(c)の差が1.987m/sec、(b)と(d)の差が1.992m/secであるのに対し、(c)と(d)の差は0.341m/secであり、改善されているものの、図13のケースに比べると差は大きくなっている。

5. おわりに

画像解析技術の発達により、写真やビデオ画像から多くの有用な情報を取り出せるようになってきた。従来はアナログ情報でしかなかったものが、数値データに変換できるということは、環境解析において大きなメリットである。しかし一方で、人間であれば“一目”で判断できることでも、計算機では何万回もの演算を要したり、判断できなかったりすることがある。例えば、お見合いの相手の写真を計算機で解析して、二枚目ないし美人であるかどうかを判断するのは難しいが、人間であれば一目でわかるであろう。本文中にも述べたように、人間の目は画像の全体的状況を総観するからである。

そこで本研究では、人間が実体視した結果をreference dataとして計算機に与えることにより、洪水のステレオ

航空写真の相関解析の精度向上を試みた。まだ解析例も少なく、また手作業の部分を含むので、実用化への道程は短くないが、その将来性は確認できたと考えている。今回はreference dataにより探査領域を限定する手法を検討したが、次のステップでは相関窓の設定方法も検討し、一連の作業を合理的に設計したいと考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり、国土交通省関東地方整備局利根川下流河川事務所から洪水航空写真を提供していただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 木下良作：航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題，土木学会論文集，No.345/II-1，pp.1-19，1984.
- 2) Cameron, H.L.: The measurement of water current velocity by parallax method, Photogrammetric engineering, No.1, 1952.
- 3) 宇民正，上野鉄男：写真画像処理による洪水流解析，土木学会論文集，No.503/II-29，pp.1-17，1994.
- 4) 例えば，森忠次ほか：画像相関を使った空中写真からの等高線自動図化の一方法—処理方法と自動評定，写真測量とリモートセンシング，Vol. 20，No. 4，pp. 4-13，1981
- 5) 竹原幸生ほか：ヘリコプターを用いた実河川表面流の画像計測の試み，水工学論文集，46，pp. 809-814，2002.
- 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，44，1227-1231，2000.
- 7) 綾史郎ほか：淀川下流部におけるPIVを用いた洪水時の流速観測，水工学論文集，44，pp. 455-460，2000.
- 8) 例えば，服部進ほか：空中写真のステレオマッチングのための多段的相関法の改良(I)，写真測量とリモートセンシング，Vol. 25，No. 1，pp. 4-16，1986.

(2006. 9. 30受付)