

相関法の精度と洪水流航空写真への適用

Accuracy of the Correlation Method and its Application
to Aerial Photographs of Flood Flow

* * * * * *
藤田一郎・河村三郎・神田徹

By Ichiro FUJITA, Saburo KOMURA and Tohru KANDA

The accuracy of the correlation method is examined by simulating particle movements under uniform parallel flows and uniform shear flows. Particle images are produced by decomposing each pixel into 9x9 sub-pixels and shifting particle patterns in a sub-pixel unit. This method is also applied to the aerial photographs taken during floods. The results show a reasonable velocity distribution reflecting the river-bed configuration and a large scale structure of the flow along the edge of the lower bank.

Keywords : flood flow, image processing, correlation method

1. まえがき

洪水時に撮影された航空写真には、流水の濁度の濃淡、風による河川表面の波、橋脚や水制などの水理構造物によって生じる波、流木・ごみ、あるいは泡のような表面浮遊物など多種多様な河川表面の状況が写されている。洪水流の特性は、このような表面流況を用いて精力的に調べられてきており、並列らせん流や湧昇流の存在あるいは流れの三次元構造などが指摘されている¹⁾²⁾。定量的には、河川表面の浮遊物の移動量をカメロン効果を利用して求め、それから表面流速ベクトルを得る手法が確立されている。実河川における洪水時の内部流れの構造を計測することは、實際上ほとんど不可能に近く、その意味において河川表面に現れた流況は洪水流の解明にとって唯一の手がかりになると言える。しかしながら、その写真解析には熟練者による煩雑な作業と費用がかかるために、大部分の洪水流航空写真は解析されずに埋もれたままになっているものと考えられる。一方、河川の表面流速から洪水時の河床形状を推定することもある程度可能であり³⁾、

* 正会員 学術博 岐阜大学助教授 工業短期大学部土木工学科
(〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

** 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科
(同上)

*** 正会員 工博 神戸大学教授 工学部土木工学科
(〒657 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

精度が高くしかも簡便な画像処理による流速計測手法が確立されれば、洪水時の流れの解析だけでなく、河川計画等の立案にも大きく寄与することが期待できる。

一方、可視化された流れの画像解析から定量的な流れの情報を得る手法は、近年の著しいハードウェアの発達に伴って急速な進展を見せており、二次元計測だけではなく三次元計測もある程度可能になってきている¹⁾。用いられている画像解析の方法は、トレーサ追跡法と相関法に大別できるが、前者は個々のトレーサの重心位置を追跡するものであり、従来の洪水流写真解析はこの手法に属する。一方、相関法は、粒子ではなく、トレーサの分布状態すなわち画像の濃淡分布を追跡していくものであり、コンピュータによる画像処理を前提とした比較的新しい手法である^{2) 3) 4)}。河川表面の浮遊物が個々のトレーサとして認識できる数量には限りがあり、その点で濁度分布のパターンが移動しているような、いわゆるピンボケに近いような画像に対しても適用が可能な相関法は、洪水流写真に対する優れた手法と考えられる。

しかしながら、相関法そのものの精度に関しては、まだ十分な検討が行われていないのが現状である。そこで、本研究では、一様流および一様せん断流中にランダムに粒子を投入した場合に相当する粒子画像をコンピュータによって模擬発生させ、その既知流れに対する相関法の精度について検討を行った。また、実河川の洪水流写真に対してもこの手法を適用し、洪水流の特性に関する考察を行った。

2. 画像解析システム

画像解析には、大型計算機システム (FACOM760) に付帯した画像処理システム (FIVIS) を使用した。システムの概要を図-1に示す。カラーイメージスキャナは、R(red), G(green), B(blue)の色の三要素について 2000x3000の画素密度で写真の濃淡を読みとることが可能であり、

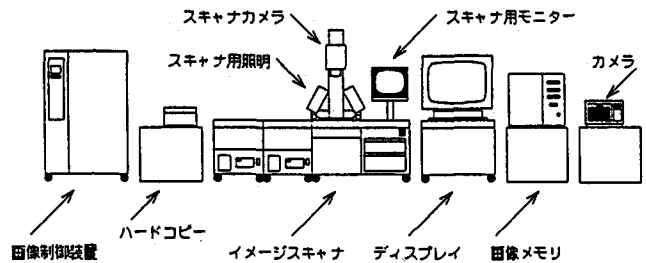


図-1 画像処理システム

8ビット(256階調)の濃度分解能で同時に約1670万色のカラー画像を出力できる性能がある。ただし、本研究ではモノクロ航空写真を対象としたため、モノクロモードでこのシステムを使用することとし、画素数を1024x1024に固定して画像入力を行った。相関法では二枚の連続画像を用いるが、写真の画像入力に際しては、背景となる各画像の地形領域がなるべく一致するように注意を払った。しかし、航空写真そのものに含まれているひずみやイメージスキャナカメラのレンズのひずみ等のために、地形領域を完全に一致させることはできないため、本研究ではある程度の地形のずれが含まれていることは認めた上で相関処理を行い、後述の方法で地形補正をすることとした。

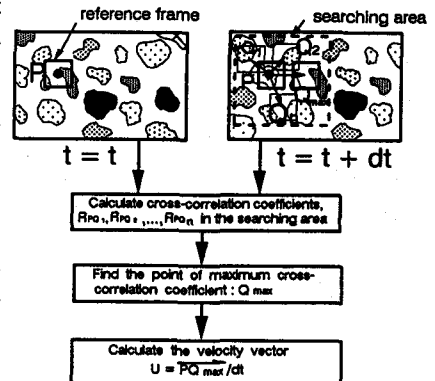


図-2 相関法の模式図

3. 相関法の概要

図-2に相関法の模式図を示す。第一画像で任意の点PのまわりにNxN画素(Pixel)の領域(参照フレーム)をとり、その内部の濃度分布に最も近い領域を第二画像上で探査するのが相関法の基本原理である。探査は探査領域内で各参照フレーム内の濃度分布に関する相互相関係数を比較しながら行う。その相関係数が最大値となる点をQ_maxとすれば、ベクトル (PQ_{max}/dt) が求まる

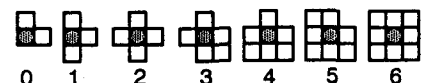


図-3 発生粒子パターン

べき流速ベクトルとなる。dtは画像間の時間差である。このような単純なアルゴリズムを第一画像上で任意に設定したメッシュに適用すれば、二次元的な流速分布が得られる。一画素毎に点Pをずらせば、ほぼ構成画素数に相当する膨大な数の流速ベクトルを得ることは可能である。ただし、参照フレームは点ではなく有限の大きさを有するため、得られたベクトルはその点ではなく、その点のまわりの平均的な流れの移動量を表している点に注意しなければならない。

4. 相関法における精度の検討

4. 1 粒子画像の模擬発生

画像解析では一画素を最小構成単位として解析を行うが、一画素の一辺の長さをL、画像間の時間差をdtとした場合、トレーサが一画素だけ移動するのに要する速度 $\Delta u = L / dt$ が相関法で有効に識別できる最小流速である。解析精度を向上させるためには、この最小流速をできる限り小さくすればよいが、画素のサイズを小さくすることには限界があり、またdtを大きくとりすぎるとその間に濃度パターンが著しく変形して相関がとれなくなる危険性がある。特に、航空写真のように一画素の面積が大きい場合には、解析精度の低下は避けることができない。精度の向上のためには、画素と画素の中間点に移動したトレーサの位置を的確に得ることが要求される。

そこで、与えた単純な流速分布に追従するようなトレーサ粒子画像を以下のような方法で模擬発生させ、相関法の精度の検討を行った。トレーサには図-3に示すような粒子を考えた。丸印の画素が粒子の中心であり、各粒子の中心間隔が平均的に3画素となるように粒子の配置を行った。

また、一画素以下の微小な粒子の移動を得るために、個々の画素は図-4に示すようなさらに微小な9x9のsub-pixelで構成されているものとし、sub-pixel単位で粒子移動を行った。sub-pixelの濃度は一様乱数で与えた。そして、図-5に示すようにsub-pixel画像を平均化して各粒子画像を得た。流れとしては一様な平行流とせん断流を考え、それらに乗った粒子群の移動を本手法によりシミュレートした。前者の場合には、1/9~8/9画素に相当する平行移動、後者の場合には、

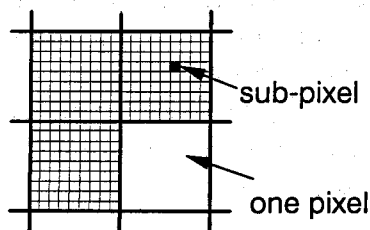


図-4 sub-pixelの説明図

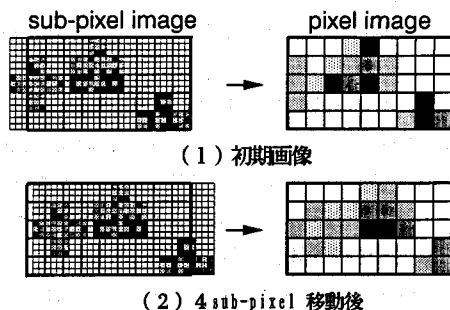


図-5 sub-pixel画像の平均化

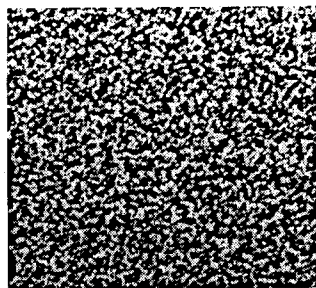


図-6 模擬発生画像の例

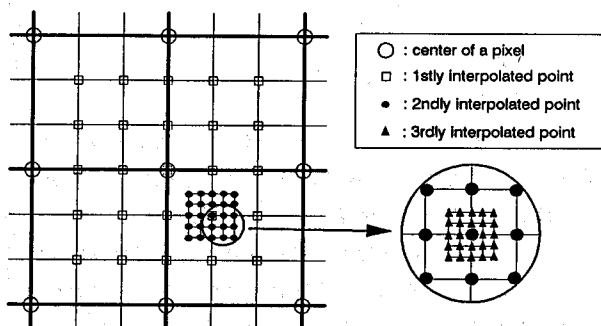


図-7 最大相関点の探索方法 (method A, B)

流れに垂直方向に1:9, 2:9 および3:9の緩やかな一様せん断勾配を考え、流れに沿った各粒子パターンの移動を与えた。粒子の回転は考慮していない。発生粒子画像の例を図-6に示す。この粒子画像は200x200画素で構成されている。内部的には1800x3600のsub-pixelを用いて各種の粒子移動を実現させている。

4. 2 補間方法

相関法の適用においては、画素単位で画素最大相関点を探した後、その近傍でさらに相関の大きな位置の推定を行った。その推定方法としては、次の三通りの方法を考え、それぞれを上述の粒子画像に適用した。

- (a) Method A : 図-7に示すように画素最大相関点の周りで濃度値を補間し、参照フレームを画素間で段階的にずらすことによって最大相関位置を求める。補間方法には線形補間を用いる。
- (b) Method B : 基本的には Method A と同じだが、補間方法として距離の二乗に逆比例する重みを用いて補間を行う点が異なる。
- (c) Method C : 画素最大相関点を含めた周囲の9点の相関係数の値に対して、二次曲面をあてはめ、極大値の座標から最大相関点を推定する。二次曲面には次式を仮定した。

$$R(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (1)$$

ここに、 $R(x, y)$ は座標 (x, y) における相関係数、 $a \sim f$ は未定係数である。未定係数は9点における既知の $R(x, y)$ を用いて最小自乗法によって求める。極大値の座標は次式で与えられる。

$$x = (2db - ce) / (c^2 - 4ab) \quad (2)$$

$$y = (-2ax - d) / c \quad (3)$$

4. 3 考察

(a) 一様平行流の場合

模擬発生画像上の81のメッシュで求めた平均流速の比較結果を図-8に示す。計算は11x11画素の参照フレームを用いて行い、一画素の移動量に相当する流速を1.0とした。Method Aは、1/2画素程度の粒子移動に対しては良好な推定値を与えるが、それよりも小さい移動に対しては過小、それよりも大きな移動に対しては過大な値を与えている。他の方法も類似した傾向を示すが、Method Cが最も良好な値を与えている。この方法では、1/10画素程度の粒子群の

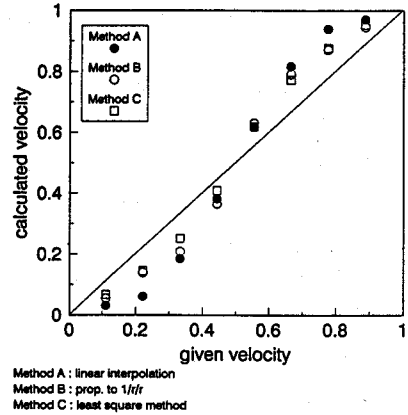
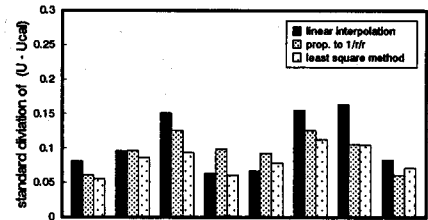
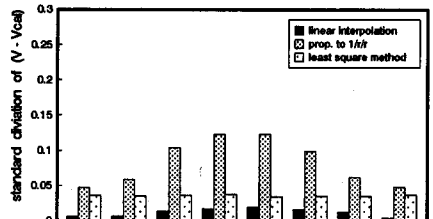


図-8 一様平行流に対する流速平均値の比較

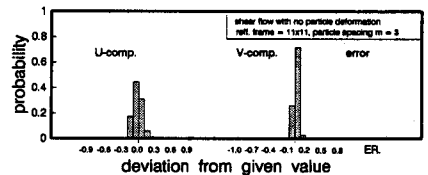


(a) 流下方向成分

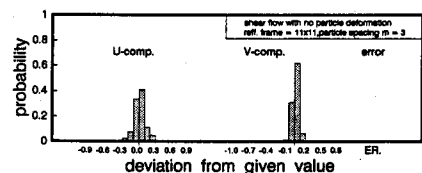


(b) 横断方向成分

図-9 一様平行流に対する変動量の比較



(a) Method A



(b) Method C

図-10 一様せん断流に対する結果の比較 (せん断勾配=1:9)

移動変化量に対して追跡が可能である。

x, y 方向の流速 (U, V) の計算値のばらつきを標準偏差で示したのが図-9である。流下方向成分 (U) の誤差はMethod Cが最も小さいが、横断方向の成分 (V) に対してはMethod Aが良好で、ほとんどばらつきがないことがわかる。Method Bでは横断方向のベクトルの誤差が最も大きくなっている。

(b) 一様せん断流の場合

一様平行流の検討結果から、Method Bでは正確な流向が得られない可能性が高いので、せん断流については残りの二つの方法について検討した。結果を図-10, 11, 12に示すが、せん断勾配が大きくなるにつれて誤差が増大し、異常ベクトルも発生するようになることがわかる。異常ベクトルは便宜的に 150パーセント以上の誤差をもつベクトルと定義した。全体的な分布傾向や異常ベクトルの発生率からみると、この場合はMethod Aが若干良好な結果を与えているようである。

5. 洪水流航空写真への適用

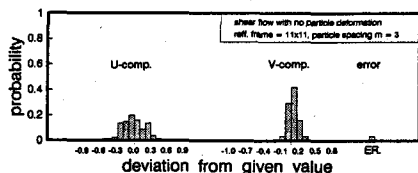
5. 1 異常ベクトルの補正

洪水流写真は、模擬発生画像とは異なり、粒子だけではなく連続的な濃度の変化や地上の部分を含んだ複雑な可視化画像であり、場合によっては水面に何も写っていないこともある。従って、画素単位での探索段階においてすでに誤りが生じ、異常ベクトルが発生する可能性が高い。本研究では、次のような方法で異常ベクトルの補正を行った。すなわち、周囲8点の速度ベクトルから内挿したベクトルと実際に計算されたベクトルの絶対値の差が、あるしきい値よりも大きければ異常と認め、内挿ベクトルと置き換える。この操作をすべての流速ベクトルに対して繰り返し行い、異常ベクトルの補正を行った。

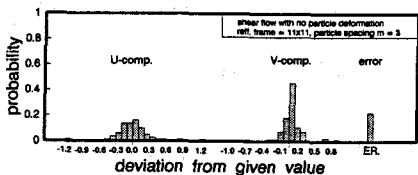
5. 2 淀川の洪水流写真に対する適用

昭和57年8月の淀川の洪水流航空写真に対して相関法を適用した例を以下に示す。解析には、河口から19Kmの断面を含む二枚の写真を用いた。写真間の時間間隔は $dt = 3.6$ 秒である。入力画像における一画素の大きさは、実際には一辺が約0.74mの正方形に相当している。よって、画素単位で識別可能な最小流速は約0.21m/sとなる。

前述のように、解析の対象とした二つの画像は地形が完全には一致していないため、地上部分でも有限な流速ベ

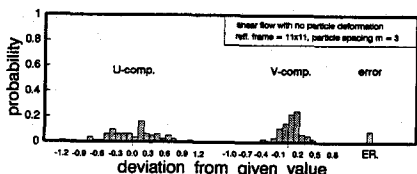


(a) Method A

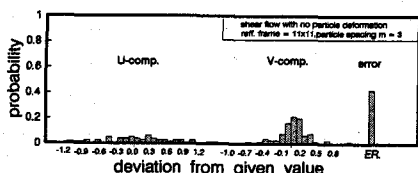


(b) Method C

図-11 一様せん断流に対する結果の比較 (せん断勾配=2:9)



(a) Method A



(b) Method C

図-12 一様せん断流に対する結果の比較 (せん断勾配=3:9)

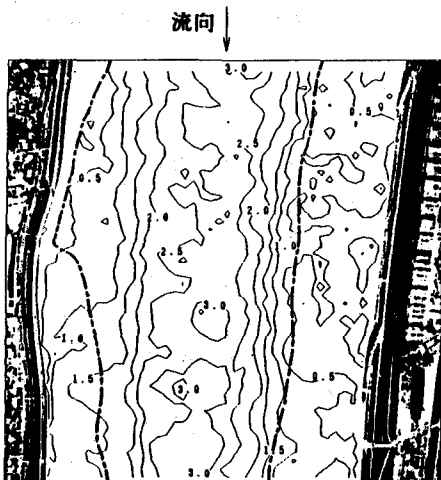


図-13 等流速線図 (単位:m/s)

トルが計算される。本研究では、河岸付近の画像の移動量が全体的に一画素程度におさまるように線形補間から地形補正ベクトルを求め、それを各ベクトルに加算して最初の補正を行い、次に異常ベクトルの補正を加えて最終的な流速ベクトルを求めた。流速の絶対値および流線の分布を図-13, 14に示す。参照フレームは19x19画素としたので、得られた流速は河川表面の約14m四方の部分の平均的な流れを表している。画素間の流速の補間には平均的に良好な結果が得られ、計算時間が他の方法より数割程度短かったMethod Cを用いた。

図に示された一点鎖線は低水路と高水敷の境界を示す。この境界を境として、低水路における高流速の領域と高水敷における低流速の領域が概ね良好に対応していることがわかる。興味深いのは、それらの境界に沿って流線が波状の形を呈している点である。特に右岸下流側の境界線近傍においては、波長が100m程度の明確な波状の流線（流線）が得られている。これらは、高水敷と低水路の間で生じた大規模な渦運動の影響と解釈できる。なお、右岸上流側で低流速域が現れているのは、その上流側に幅の広い高水敷が続いているため、そこでの減速効果がこの領域にまで及んでいるためと考えられる。

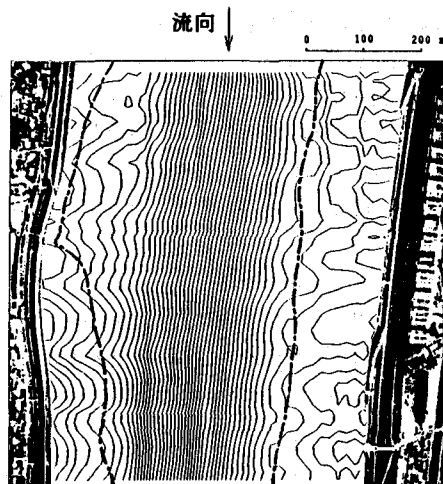


図-14 流線図

6. 結語

一画素以内の微小な粒子移動を模擬的に実現させた粒子画像を用い、一様な平行流とせん断流に対して相関法における補間法の精度について調べた。その結果、平行流では、1/10画素程度の粒子移動に追従できるが、せん断流では誤差がせん断変形に伴って増大することが明らかとなった。したがって、せん断流の卓越する流れ場に対しては、二画像間でのトレーサ群のせん断変形が大きくならないように、画像の撮影間隔を短くとる必要があることがわかった。相関法の実河川航空写真への適用においては、高水敷と低水路の間で生じる大規模な流れの変動をとらえることができた。今後は、粒子密度と最適な参照フレームサイズとの関係あるいは最大相関点を高速に求めるアルゴリズム等について検討し、さらに多くの洪水流写真への適用から実河川における様々な洪水流の特性を明らかにしていきたいと考えている。最後に、本研究において貴重な航空写真を使用させていただいた建設省淀川工事事務所の関係者に謝意を表します。

参考文献

- 1) 木下：洪水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) 宇民・上野：複断面蛇行流の可視化観測，京都大学防災研究所年報，第32号，B-2, pp. 963-983, 1989.
- 3) Komura, S. : Method for Computing Bed Profiles during Floods, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 112, No. 9, pp. 833-846, 1985.
- 4) 西野・笠木・平田・佐田：画像処理に基づく乱流三次元計測システムの開発，流れの可視化，Vol. 8, No. 30, pp. 277-282, 1988.
- 5) 箕：トレーサ画像の相関処理による流速計測，流れの可視化，Vol. 3, No. 10, pp. 189-192, 1983.
- 6) 木村・高森・井上：相関を利用した流れの画像計測—非定常流れへの適用—，流れの可視化，Vol. 6, No. 22, pp. 105-108, 1986.
- 7) 藤田・河村・和田：画像計測による開水路直角合流部の表面流況解析，水工学論文集，Vol. 34, pp. 713-718, 1990.