

画像処理による流速分布測定法

A Digital Image Analysis Method for Velocity Distribution Measurements

岐阜大学工学部 河村 三郎 Saburo KOMURA
岐阜大学工学部 中谷 剛 Tsuyoshi NAKATANI

A digital image analysis method for velocity measurements was developed. Velocities were estimated by tracking four successive tracer-particle image data. The method was applied to vertical velocity distributions at an abrupt drop and good agreements with those measure by a current meter were obtained. The errors in velocity estimations were discussed and the following results were obtained:

- 1) the error falls within 2% if the length/pixel is as small as 0.5mm/pixel, and an interval time of input image data is 0.03sec.
- 2) the combination of a length/pixel and interval time of input image data is recommended so as to exceed more than 10 pixels for practical accuracy.
- 3) the error for estimating the center of gravity of the tracer is not affected by setting a threshold level and a thickness of slit light.

Keywords: image analysis, digital image, flow visualization, flow measurement, abrupt drop

1. はじめに

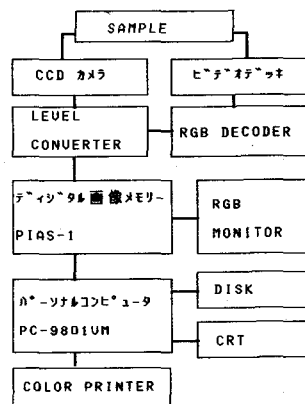
各種の水理量の測定に、画像処理による解析が用いられるようになってきている。これらの解析の特徴の一つは、非接触で多数の測定点の水理量を同時に計測できることである。このことは、ビデオ映像を可視化画像として利用すれば、非定常現象の場合の有効な計測手段となり得るばかりでなく、数値計算などの結果の検証実験にも有効な方法となる。

流速分布などの測定には、レーザードップラー流速計や各種の熱線流速計などが多用され、多様な流れ場の高精度な測定が行われているが、測定点の空間分布の粗さがそれらの欠点となっている。画像処理による流速分布の計測では、それらの測定装置よりも測定精度が落ちるという欠点があるが、比較的安価で高性能なデジタル画像処理装置の開発によって、3次元的な流速分布¹⁾や乱れの成分なども測定可能となってきた²⁾。

本研究の目的は、トレーサ粒子を利用した流れの可視化画像から、流速分布を求める方法を開発し、今後の非定常現象の各種水理量の計測に役立てようとするものである。

2. 画像処理装置の構成

画像処理装置 (PIAS-I) の構成を図1に示した。画像処理装置に入力されたビデオ信号は、256x256x4bit (有効画素数240x240、16階調) の白黒のデジタル信号に変換され、メモリーに記憶される。画像処理装置には4画面分の記憶メモリーがあり、取り込まれた画像データはフロッピーディスクに転送できる。取り込みに必要な時間は1/60秒である。レベルコンバータは、16階調の内の4階調部分をさらに16段階に分割して解像度をあげるためのものである。各種の画像処理は、パーソナルコンピュータ(PC9801-VM)によって行った。



3. トレーサ粒子の追跡法

一定時間内のトレーサ粒子を追跡する方法は、微少時間差の粒子位置を

図1 画像処理装置の構成

示す2枚の瞬間画像における粒子の対応づけから速度ベクトルを求める方法と、トレーサ粒子の流跡輪郭から速度ベクトルを求める方法²⁾に大別できる。前者の方法では、トレーサ粒子の空間分布が密になってくると対応づけが難しくなるので、トレーサ粒子数を増加させても必ずしも情報量を増やせない。後者の方法では、近接するトレーサ粒子の流跡輪郭が重なり合っているような場合、それらを分離、除去し正しい流跡を決めることは容易ではない。また、いずれの方法によっても逆流を含むような流れの場合、その方向を決定することが難しい。これらの欠点を補う方法として、流跡画像中の始点位置をストロブスコープで強調する方法⁴⁾、流跡の始点、終点に色の違いを与える方法⁵⁾などが試みられている。しかし、これらはトレーサ粒子を写真撮影する前提で開発されており、非定常な流れへの拡張性には限界がある。そこで、本研究では、Changら⁶⁾と同様な考え方により、ビデオ撮影された連続する4時刻分のトレーサ粒子を、小林ら⁷⁾の手順により追跡し流速ベクトルを求めることにする。

3.1 トレーサ粒子の追跡手順

step1:まず時間 t_1 (画像1) から t_4 (画像4) までの4時刻のトレーサ粒子の重心座標をすべて求め、記憶しておく。次に、画像1にあるトレーサ粒子を一つ選び (A粒子とする)、その重心を中心に、次の時刻 t_2 までの Δt 秒間にA粒子が移動可能と思われる範囲を探索領域 R_1 として画像2に定める (図2)。

図2 トレーサ粒子の追跡法

step2:次に画像2に設定された領域 R_1 内にあるトレーサ粒子のすべてをA粒子の移動先と仮定する。いまこの中のトレーサ粒子の一つをA粒子の移動先として選ぶと (B粒子とする)、A-B間の重心移動から速度ベクトル V_{AB} が決められる。この速度ベクトルを参考に、B粒子の重心の画像3上の位置を ($V_{AB} \cdot \Delta t$) と推定し、その点を中心に探索領域 R_2 を定める。

step3:step2と同様に、画像3に設定された領域 R_2 内にあるトレーサ粒子のすべてをB粒子の移動先と仮定する。いまこの中のトレーサ粒子の一つをB粒子の移動先として選ぶと (C粒子とする)、B-C間のトレーサ粒子の重心の移動から速度ベクトル V_{BC} が決められる。また、それまでの粒子の移動履歴から加速度 α を求め、C粒子の重心の画像4上の位置を ($\{V_{BC} + \alpha \cdot \Delta t\} \cdot \Delta t$) と推定し、その点を中心に探索領域 R_2 を定め、その領域内の全てのトレーサ粒子をC粒子の移動先と仮定する (D粒子)。

step4:時間 t_1 の画像上の全てのトレーサ粒子の重心について、上述のstep1からstep3の手順を繰り返すことによって、連続する4画面の画像上にすべてのトレーサ粒子の移動可能な経路 (A-B-C-D粒子) を決定する。

以上の手順でただ一つのトレーサ粒子の経路が決定できれば、粒子の対応づけができたことになるが、一般には複数のトレーサ粒子の経路が定まる。そこで妥当なトレーサ粒子の経路をただ一つ決定するために、次の判定条件を定める。

- 1) 各画像間のトレーサ粒子の移動距離 L_1, L_2, L_3 が R_1 を超えない。超えた場合は、そのトレーサ粒子を除外する。
- 2) 全てのトレーサ粒子の推定された経路の内、同一時刻で同一座標を共有するものは除外する。
- 3) 4時刻間の粒子の対応づけのできなかったトレーサ粒子は除外する。
- 4) あるトレーサ粒子の4時刻間の移動距離と移動角度の分散を σ_1, σ_2 とすると、

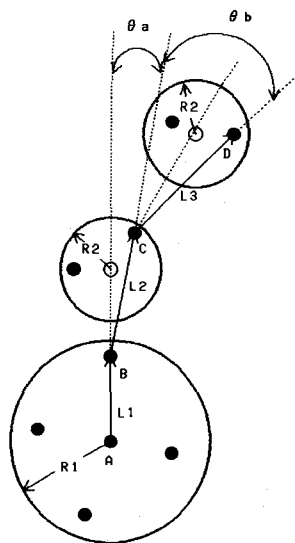
$$\sigma = \sigma_1 + L^2 \sigma_2 \quad (1)$$

を最小とする粒子の経路を同一トレーサ粒子の軌跡として採用する。ただし、

$$\sigma_1 = \{(L_1 - L)^2 + (L_2 - L)^2 + (L_3 - L)^2\} / 3 \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \{(\theta_a - \theta)^2 + (\theta_b - \theta)^2\} / 2 \quad (3)$$

ここに、 L, θ はそれぞれトレーサ粒子の4時刻間の平均移動距離及び平均移動角度である。



以上の処理により、トレーサ粒子の連続する4時刻間の経路がただ一つ定まるので、流速ベクトルを決定することができる。

4. 画像処理システムの精度の評価

4-1. ターンテーブルによる検定

流速測定における画像処理上の精度を調べるために、ターンテーブルによる校正実験を行った。半径10cmの円盤に、中心から外周に向かい直径2mmの点を描き、これをスピードコントローラータ（オリエタルモータ、PS540-00）で回転し、その様子をビデオ撮影し粒子の移動速度を求めた。広範囲な速度で検定ができるように、ビデオ撮影にはナック社の高速ビデオ(HSV-400)を利用した。速度測定の誤差 ε は、 $\varepsilon = |\mathbf{v} - \mathbf{v}^*| / |\mathbf{v}^*|$ で評価した。ここに、 $\mathbf{v}$ は画像処理により求めた速度、 $\mathbf{v}^*$ はターンテーブル上の点の移動速度である。図3、図4に、画像分解能が1.24mm/画素の場合と、0.5mm/画素の場合の画像入力時間による速度誤差を示した。図3より、画像分解能が粗い場合には、画像入力時間を0.03秒以下にしないと数%以内の流速測定精度が得られないことがわかる。図4から、画像分解能が0.5mm/画素の場合、画像入力時間が0.03秒程度であれば、速度0から1m/sの広い範囲で誤差2%以内で安定して流速を求められることがわかった。また、1/200秒という高速な画像入力を速度のあまり大きくない場合に行っても精度がばらつき有効でなく、現象に対応した画像入力時間の組合せを決めることが重要である。図5と図6には、画像入力時間内のトレーサ粒子の移動画素数と流速誤差が示してある。これらの図から、高速で画像入力が必要となる場合では、1画素内のトレーサ粒子の移動画素数を約10画素以上となるように画像分解能と画像入力時間を設定すれば、実用的な誤差で速度の計測が可能であることがわかった。

4-2. 二値化しきい値による誤差

トレーサ粒子の重心座標を求めるために、トレーサ粒子を背景の画像から分離する必要がある。この際、しきい値の選択によってその重心位置にずれが生じ、求められる速度に誤差が生じる。その誤差がどの程度となるかを評価するために、しきい値のトレーサ粒子の重心位置の測定に及ぼす影響を調べた。利用した画像は、4-1で使用したターンテーブルの画像の一部である。図7にその画像の各階調のヒストグラムを示した。背景と

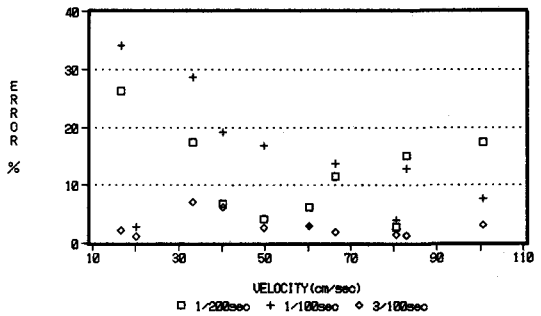


図3 画像入力時間による誤差
(画像分解能1.24mm/画素)

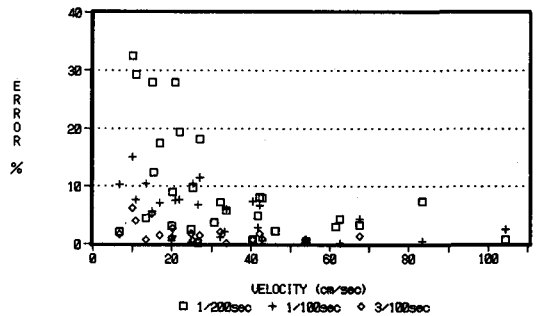


図4 画像入力時間による誤差
(画像分解能0.5mm/画素)

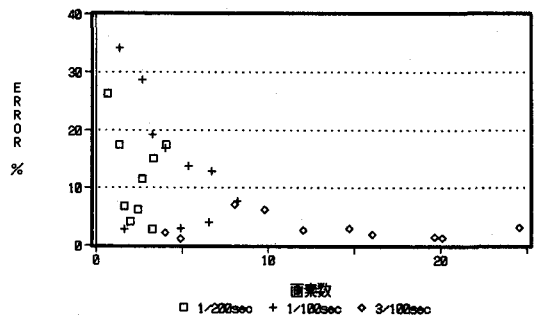


図5 1画素内のトレーサ粒子の移動画素数と流速誤差
(画像分解能1.24mm/画素)

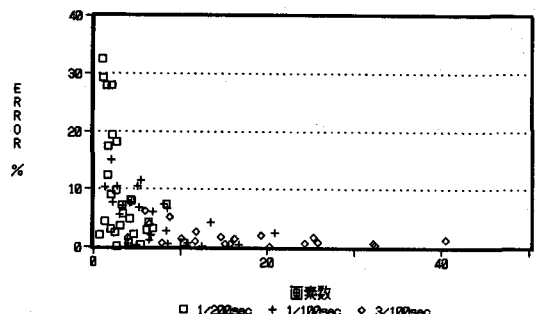


図6 1画素内のトレーサ粒子の移動画素数と流速誤差
(画像分解能0.5mm/画素)

なっている部分は、階調Cで示された画像であり、トレーサ粒子の中心部は階調0で示されている。そこで、しきい値4とした場合のトレーサ粒子の重心位置から、しきい値の選択によってどの程度粒子の重心位置が変化するかを調べたのが図8である。図中の点線は1画素の大きさをあらわしている。この図から、しきい値の選択によるトレーサ粒子の重心位置の計測に及ぼす誤差は1画素以内であり、それほど大きくないことが判明した。

5. 段落ち部の流速分布測定への適用

画像処理システムを段落ち部直下流部の鉛直流速分布測定に適用し、その有効性について検討した。実験に使用した水路は、長さ4m、幅5cm、高さ40cmの亚克力製水路で、水路床は平行とした。上流から2.2mの位置に高さ4cmの段落ちを設けた。計測対象領域を段落ち部から約12cm下流までとした。したがって、画像分解能は0.65mm/画素となった。入力画像のビデオ撮影には、CCD8mmビデオカメラ(ソニー、CCD-V90)を使用した。画像入力時間間隔は $\Delta t = 1/30$ 秒である。平均流速に対して、1画素内のトレーサ粒子の移動画素数は6.5画素となり、この実験条件では2%以内の誤差で流速測定が期待できる。トレーサ粒子にはポリスチレン粒子(直径0.6~0.85mm、比重1.03)を使用した。トレーサ粒子の可視化のためにスリット光線を水路上方から当てた。スリット光線の幅は水路床で10mmであった。段落ち部上流の平均流速は12.5cm/sec、水深は6.45cm、段落ち後の水深は10.5cmであった。

5-1. スリット光線の厚みによる誤差

水路中央部の鉛直流速分布を求めるためには、中央部付近を通過するトレーサ粒子のみを考慮する必要がある。

そのため、外部からの光を極力抑えるために実験は夜間に行い、スリット光線内のトレーサ粒子の画像のみをビデオ録画した。このときの光線の厚みによる流速誤差を評価するために、光線の厚みがどの程度トレーサ粒子の重心位置の計測に影響があるかを、次のような方法で調べた。まず水路に静水をはり、水路中央に直径2mmの点を2cm間隔で格子上に描いた初イボートを垂直に立てビデオ撮影し、それぞれの点の重心の位置を計算する。次にビデオカメラの焦点は固定しておき、初イボートを前後に1cm平行移動してビデオ撮影を繰り返し、同様に重心位置を計算する。図9に、水路中央部での格子点の重心位置を基準として、前後1cm初イボートを平行移動した画像から得られた重心位置の変化量を示した。図中の点線は1画素の大きさを表している。今回の実験条件では光源の幅が2cm程度であってもトレーサ粒子の重心座標の誤差は1画素以内程度となるので、光源の厚みが ± 0.5 cmであればその誤差は小さいことが知られる。

5-2. 格子点での速度ベクトル

図10に、流速ベクトルの測定例を示した。トレーサ粒子の探索領域R1,R2は、

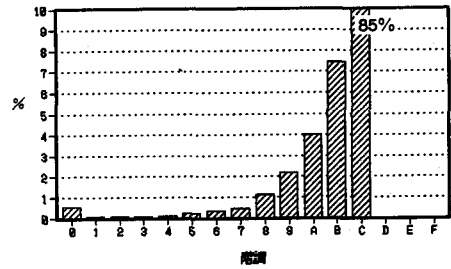


図7 入力画像の階調分布

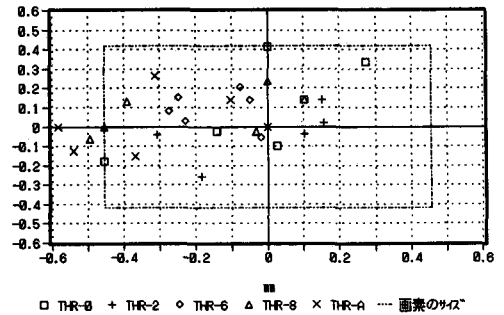


図8 しきい値とトレーサ粒子の重心座標の誤差(基準しきい値: 4)

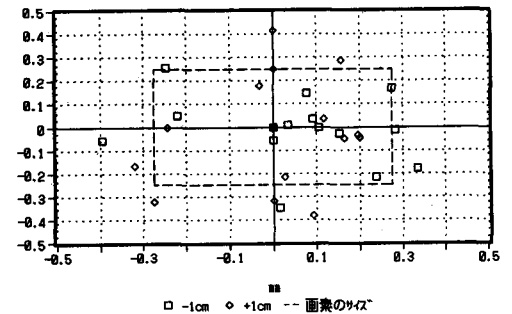


図9 スリット光源の厚みによる誤差

$$R1=a_1*V_0*\Delta t \quad (4)$$

$$R2=a_2*V_0*\Delta t \quad (5)$$

で表せる。ここに、 a_1, a_2 は係数 ($a_1 > a_2$)、 V_0 は平均流速である。何回かの試行錯誤から、 $a_1=1.5, a_2=0.5$ とした。異常な流速ベクトルの補正などは行っていないが、逆流域を含めトレーサ粒子の追跡が精度よく行われている様子がわかる。

得られた流速ベクトルデータを有効に使うには、適当な格子点での流速ベクトルに変換しておくことが必要となる。そこで、流れ場全体に格子点を想定し、それぞれの格子点における流速ベクトルを近傍の流速ベクトルから線形補間によって求めた。すなわち、格子点における流速(U, V)とその近傍のトレーサ粒子の位置(ξ_k, η_k)における流速(U_k, V_k)との間に次の線形関係

$$U_k = U + (\partial U / \partial x) \xi_k + (\partial U / \partial y) \eta_k \quad (6)$$

$$V_k = V + (\partial V / \partial x) \xi_k + (\partial V / \partial y) \eta_k \quad (7)$$

を仮定し、各格子点の近傍の(U_k, V_k)から最小二乗法により(U, V)を決定した。図11に格子点上に変換した流速ベクトルを示した。この図の作成には、4連続する38セットの入力画像から得られた流速ベクトルのデータを使用した。また、図12には主流方向の流速ベクトルと、超小型プロペラ流速計(篠塚製作所、SV-33W型)によって得られた流速(図中の○印)との比較を示した。プロペラ流速計による流速は、10Hzで10秒間測定した平均値である。水面に近いところで画像処理による流速ベクトルがいくぶん大きいが、これは対象領域内の主流方向の流速がかなり変動しており、水面近くを通過するトレーサ粒子の総数が少なかったことの影響があると考えられる。

6. おわりに

画像処理により、連続する4時刻間のトレーサ粒子を追跡し流速測定を行う方法を示し、その誤差と精度について考察した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 画像分解能が0.5mm/画素程度であり、画像の入力時間が0.03秒ならば、流速の0から1m/secの広範囲な領域で、誤差2%以内で流速測定が可能である。
- 2) 高速で画像入力を行う場合は、1画像内のトレーサ粒子の移動距離が10画素以上になるように画像分解能を調節すれば、実用的に十分な精度で流速測定ができる。
- 3) しきい値の選択がトレーサ粒子の重心座標に及ぼす影響は、1画素以内である。
- 4) スリット光源の厚さによるトレーサ粒子の重心座標に及ぼす影響は、1画素以内であり、1cm程度の厚さでは影響がほとんどない。

この方法を段落ち部下流の鉛直流速分布の測定へ適

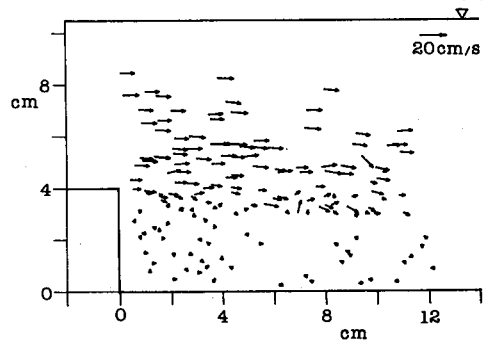


図10 流速ベクトルの測定例

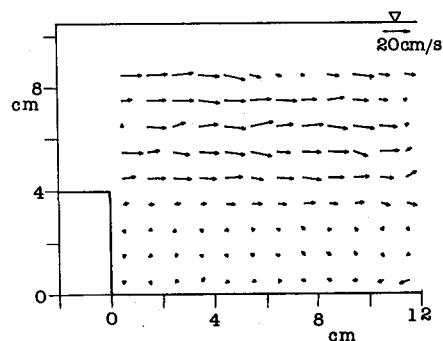


図11 格子点上に変換された流速ベクトル図

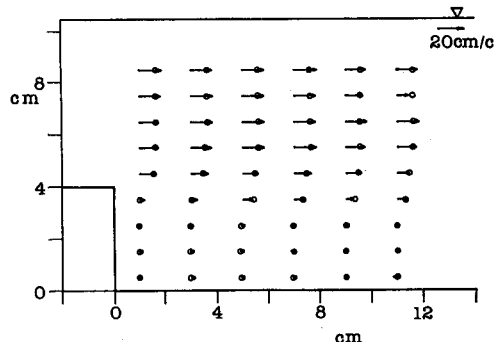


図12 画像処理による流速と実験値の比較

用したところ、逆流域でもトレーサ粒子を追跡でき、特別な異常流速ベクトルの補正をすることなく流速分布が求められた。今後は、さらにシステムの完成度を高め、非定常現象の水理量の計測に応用して行きたい。

参考文献

- 1) 西野耕一・笠木伸英・平田賢・佐田豊:画像処理に基づく流れの三次元計測に関する研究,日本機械学会論文集(B編),1989, pp.404-412
- 2) 伊東信明・笠木伸英:三次元画像処理流速計によるステップ後方剥離再付着乱流の計測,流れの可視化,Vol.9, No.34,1988,pp.245-248
- 3) 流れの可視化学会編:流れの可視化ハンドブック,(1986),pp.419-425
- 4) 小林敏雄・吉武康裕:流跡写真自動処理システムの開発,日本機械学会論文集(B編),1985,pp.1966-1970
- 5) 藤原忠男・西原秀司:流れのカラー可視化写真と画像処理方法,日本機械学会論文集(B編),1987,pp.2762-2770
- 6) Thomas P.Chang and Gary B.Tatterson:An Automated Analysis Method for Complex Three Dimensional Mean Flow Fields,Proc.ISVF III,1983,pp.236-243
- 7) 小林敏雄・佐賀徹雄・瀬川茂樹・神田宏:二次元流れ場の実時間デジタル画像計測システムの開発,日本機械学会論文集(B編),1989, pp.107-115