カラー可視化写真の画像処理方法*

藤原忠男**, 西原秀司***, 広瀬幸治**

Digital Image Processing Techniques for Color Flow-Visualization Photograph

Tadao FUJIWARA, Shuji NISHIHARA and Koji HIROSE

1. まえがき

可視化画像を利用した流れの計測法の利点の一つは、ある時刻の広い領域の情報を一度に得ることができることにある。この利点を生かすべく、可視化画像に含まれる情報を計算機を用いて画像処理し、渦流などのある複雑な流れ場の流速を定量的に測定する方法が一枚の画像を使用する方法^{1),2)}、複数枚の画像を使用する方法^{3),4),5),6),7)}など、種々開発されつつある。

ここでは筆者らが開発を試みている、1枚のフィルムの露光時間内に、照明の色を三色に変えて撮影したトレーサー法によるカラー可視化写真⁸⁾の、流跡の色の違いからトレーサーの流れた方向を区別し速度ベクトルを求める画像処理方法⁹⁾について紹介する。

使用する主な記号

R, G, B : 赤, 緑, 青の画素値
F : 色刺激
R, G, B : 赤, 緑, 青の刺激値
r, g, b : 赤, 緑, 青の原刺激
S : 刺激和
c : 色度座標
N : 流跡の総画素数
N_S : 各 **S** での画素数

添字

i : 色 (=1, 赤 =2, 緑 =3, 青)
α : 流跡の画素番号 (=1, 2, ..., **N**)
β : 各 **S** での画素番号 (=1, 2, ..., **N_S**)

2. 可視化写真の撮影

撮影に使用した流れ場は円筒容器内の軸心下方に吹き出しがあり、底壁近くに循環流を生じる流れ場で¹⁰⁾、実験および可視化写真の撮影条件を表1に、実験装置の概略を図1にそれぞれ示す。

可視化写真は円筒容器②内のトレーサーを、照明箱⑥からスリット⑩を通過した光で照明し、受水槽③の正面に据えたカメラ⑪で撮影される。照明箱内では、パルスモーター⑭の駆動により移動台⑦が移動し始めると、フォトインタラプターからの信号を受け、カメラのシャッターが開き、そ

表1 流れの可視化と撮影条件

流体	水
レイノルズ数	$Re_w = 1400 (= U_{ow} \times D_{wt} / \nu)$
トレーサー	アルミ粉末 E12
カメラ	オリンパス OM-1
フィルム	カラーリバーサル ASA100
露出	F3.5/1S
光源	ハロゲン ランプ (1Kw)
スリット幅	0.3cm
スリット光源の厚さ	0.36~0.50cm
カラーセロファン紙の移動速度	12.9cm/sec

*原稿受付 昭和62年12月16日

**岡山大学工学部

***住友重機械工業株式会社

図1 実験装置概略図

の時刻より T_1 , T_2 秒後に、スリットからの照明色が変わるよう、移動台に固定された異なる色のカラーセロファン紙④、⑤が光源⑧の前方を通るようにしてある。流跡線の状態を記録するための照明光の色は、トレーサーの比較的写りのよかった赤、白、緑を選び、そのため、移動台には、赤、緑のセロファンを白色光の照明の時間分だけ間隔をあけて設置した。なお、 T_1 , T_2 の測定およびパルスモーターの制御はトレーニング・マイコン TK-85 (NEC) で行っている。

口絵写真7にシャッター速度を0.904秒、白の照明の時間を0.543秒としたときの可視化写真の

撮影例を示す。口絵写真7で見られるとおり、異なった色で照明された流跡線では、ある時間内における始点、終点の位置を明瞭に示しており、タブレット等を用いた手動による座標入力の場合でも比較的よい精度が得られると思われる。

3. 画像処理

3.1 可視化写真と画素値

可視化写真の持つ情報は透過型ドラムスキャナーでフィルムを画素に分割し、走査することにより画素ごとの赤、緑、青の3バンドの256階調の画素値で与えられる。ここでは、記録したフィルムを画素幅0.05mmで走査し、画素数が 300×390 の領域の画像処理を行う。なお、1画素当たりの実長換算長さは0.0376cmである。

図2は縦軸を対数目盛りとした画素値のヒストグラムを示したものである。ヒストグラムには、流跡に比較し画素数の多い背景が光源の影響を受けにくく、画素値が同一レベルにあるため鋭い峰があり、画素数が最大の画素値の画素は背景のもので、流跡の画素の画素値はこれより大きい比較的小さい範囲にある。またスキャナーの較正が任意にできないため、画素値が分解能の比較的小さい範囲にあるのが認められる。

流跡と背景、および画素の色の赤、白、緑はこれらを判別できるある特性値のしきい値により区別できることが望ましく、この画素値のしきい値で区別できればよい。しかし、画素値は明るさと色の二つの情報を持つため、画素値のしきい値でこれらを区別することは困難である。このため画

図2 画素値のヒストグラム

素値を明るさの情報を持つ刺激和と色の情報を持つ色度座標 (c_i , $i=1, 2, 3$)¹²⁾に分けて使用する。画素の色は画素値により

$$\mathbf{F} = \mathbf{R} + \mathbf{G} + \mathbf{B} \quad (1)$$

で表わされ、画素値は単位色ベクトルと成分で

$$\mathbf{R} = R \cdot \mathbf{r}, \mathbf{G} = G \cdot \mathbf{g}, \mathbf{B} = B \cdot \mathbf{b} \quad (2)$$

のように表わされる。ここで刺激和を

$$S = R + G + B \quad (3)$$

とし、式(1)の右辺に式(2)を代入し、両辺を刺激和 S で割れば

$$\mathbf{F}/S = R/S \cdot \mathbf{r} + G/S \cdot \mathbf{g} + B/S \cdot \mathbf{b} \quad (4)$$

となる。 $\mathbf{F}/S$ は $\mathbf{F}$ の三色単位で、色度座標は

$$c_1 = R/S, c_2 = G/S, c_3 = B/S \quad (5)$$

であり、

$$c_1 + c_2 + c_3 = 1 \quad (6)$$

となる。また、式(4)、(5)より

$$\mathbf{F} = S \cdot (c_1 \cdot \mathbf{r} + c_2 \cdot \mathbf{g} + c_3 \cdot \mathbf{b}) \quad (7)$$

であり、 $\mathbf{F}$ は三色単位の S 倍となる。

3.2 流跡と背景

最初に画像から流跡を取り出す。流跡は背景に比較し明るく撮影されているので、背景と流跡を画素の刺激和のちがいで区別する。図3は縦軸を対数目盛りとした刺激和のヒストグラムを示したものである。背景と流跡を区別するしきい値は、流跡の画素が加わればヒストグラムに変曲点を生じるとし、背景の画素の刺激和を示すと考えられる画素数が最大となる刺激和以上で画素数の頻度の最初の変曲点の $S=413$ とした。図4は流跡と

図3 刺激和 S のヒストグラム

図4 流跡の2値化画像

背景の二値化画像を示したもので、座標の原点は円筒水槽底壁の中心で、流跡の画素数は6721個、流跡の個数は270個である。

3.3 画素の色

つぎに流跡の画素の色を区別する。画素の色は色度座標であらわされるが、色度座標は刺激和の関数である。図5は S_a と c_{ai} の関係を示したもので、図5の $\hat{c}_i$ は c_{ai} の回帰式である。刺激和がしきい値に近く、画素数の多い暗く撮影された流跡には、白の照明で撮影されたものがあるにもかかわらず、白の色度座標 $c_i (i=1, 2, 3) = 0.3$ の画素が認められない。また、 c_i は刺激和が大きくなるに従い、 $c_i (i=1, 2, 3) = 0.3$ に近づく。これ

図5 刺激和 S と色度座標の関係

は、同じ白の照明で撮影された流跡にも、明るく鮮明に撮影されたものと暗いものがあり、暗いものの画素はフィルムの特性にも依存すると思われる背景の色度座標の影響を強く受け、これらの画素はそれぞれ異なった色の画素と認識されるためと思われる。

これより画素の色の区別は、色度座標のしきい値では困難であるのが認められる。このため、画素の色の区別に、各 S において色度座標が $\hat{c}_i$ ($i=1, 2, 3$) の画素は白とし、白からのずれの程度を表わすと考えられる残差

$$\varepsilon_{\alpha i} = c_{\alpha i} - \hat{c}_i \quad (\alpha=1, 2, \dots, N; i=1, 2, 3) \quad (8)$$

を用いる。

図6は S_α と $\varepsilon_{\alpha i}$ および $\sum \varepsilon_{\alpha i}$ の関係を示したもので、 $\varepsilon_{\alpha i}$ は

$$\sum_{i=1}^3 \varepsilon_{\alpha i} = 0 \quad (\alpha=1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

図6：刺激和 S_α と残差の関係

図7 残差の散布図

表2 残差の分散, 共分散および相関係数

	ε_1	ε_2	ε_3
ε_1	1.80×10^{-4}	-3.02×10^{-5}	-1.50×10^{-4}
ε_2	-0.335	4.51×10^{-5}	-1.49×10^{-5}
ε_3	-0.870	-0.173	1.65×10^{-4}

をほぼ満足する。

残差は各刺激和に対して一様な幅には分布せず、暗く撮影された画素では分布の幅は比較的小さく色の違いが表われにくい。また、刺激和が650以上の明るい画素では色度座標の違いが小さいため残差の分布の幅も狭く、これらの画素は白と考えられる。図7は式(9)のもとに散布する、 $\varepsilon_{\alpha i}$ の散布図、また表2は対角線上、対角線より上、対角線より下に各残差の分散, 共分散, 相関係数をそれぞれ示したものである。赤, 緑の画素は赤, 緑のバンドでの残差がそれぞれ大きく、赤のバンドの残差は青のバンドの残差と相関が大きい。また、緑のバンドの残差の大きい画素には赤のバンドの残差との比較的大きい相関が認められる。これらより、画素の色は赤と緑のバンドの残差を用いて表わせると考えられるが、緑のバンドの残差の分散が小さく、赤に比較し、緑の画素の特徴が現われにくいため、 $\varepsilon_{\alpha 4} = \varepsilon_{\alpha 1} - \varepsilon_{\alpha 2}$ を作り、刺激和が650以上の画素を白として除き、画素の色の区別には $\varepsilon_{\alpha 2}$ と $\varepsilon_{\alpha 4}$ を用いる。また、 $\varepsilon_{\alpha i}$ ($i=2, 4$) を、各刺激和での残差の分布の幅の大きさに左右されないよう、各刺激和での残差の標準偏差

$$\sigma_{\alpha i} = \sqrt{\sum_{\beta=1}^{N_i} (\varepsilon_{\beta i})^2 / (N_s - 1)} \quad (i=2, 4; N_s > 2) \quad (10)$$

を N_S を重みとし, 最小二乗法により三次近似した $\hat{\sigma}_i$ ($i=2,4$) により基準化する。

図8は S と σ_{si} および $\hat{\sigma}_i$, 図9は S_a と基準化した残差 ($\epsilon'_{ai} = \epsilon_{ai}/\hat{\sigma}_i$) の関係を示したものである。基準化した残差は, 各刺激和に対してほぼ一様に分布している。また, 図10は ϵ'_{ai} の散布図を示したもので, ϵ'_{ai} は図7に比較し画素の色の特徴をよく示している。

これらより, 画素の色を ϵ'_{ai} ($i=2,4$) を主成分分析¹³⁾により関連づけて区別する。表3は対角線上, 対角線より上, 対角線より下に ϵ'_i の分散, 共分散, 相関係数をそれぞれ示したもので, これ

図8 刺激和 S と標準偏差の関係

図9 刺激和 S と基準化した残差の関係

表3 基準化した残差の分散, 共分散および相関係数

	ϵ'_2	ϵ'_4
ϵ'_2	1.010	-0.581
ϵ'_4	-0.581	0.995

らから各画素の主成分は

$$Z_a = 0.711\epsilon'_{a4} - 0.704\epsilon'_{a2} \quad (11)$$

により求まる。

図11には $Z'_a = 20 \times Z_a$ として整数化した, Z' のヒストグラムを示した。 Z' は赤の画素で大きく, 緑の画素で小さい。画素の色は Z' のしきい値 Z'_R, Z'_G により, $Z'_a > Z'_R, Z'_R \geq Z'_a \geq Z'_G, Z'_G > Z'_a$ の各画素をそれぞれ赤, 白, 緑とする。ここで, 多値化画像のしきい値が容易に, 自動的

図10 基準化した残差の散布図

図11 主成分 Z' のヒストグラム

に求まる判別分析法¹¹⁾では、 Z' のヒストグラムに画素の色の三元性が現われにくい、適切なしきい値が求まりにくい。また、しきい値を各色の照明の時間割合から求めることも、口絵写真7から認められるように、流跡の終点である緑の部分が細く撮影されるため困難である。このため、 Z' のしきい値は流跡のフィルム上の赤、白、緑の部分の面積比と、画素数の比がほぼ一致する値の $Z'_R=27$ 、 $Z'_G=-30$ とした。

3.4 速度ベクトル

速度ベクトルは1個の流跡の画素群内の赤、白、緑の4方向に連結する画素の群を用いて、図12に示す一連の手続きにより求める。図12(a)は流跡と背景の二値化画像である。図12(b)は色を区別した画素で W 、 R 、 G はそれぞれ白、赤、緑の画素を示し、白の画素に接する緑の画素を○印で、赤の画素に接する白の画素を□印で囲んである。図12(c)は□、○印で囲んだ W 、 G の画素の群の重心および白の照明の時間 $\Delta T = T_2 - T_1$ を用い、作用点の座標を各重心の midpoint として求めた速度ベクトルである。

ここで、白の画素の群に接する赤、緑の画素の群が二個以上ない流跡は始点、終点の定まらない流跡として除去し、いずれかの画素の群が二個以上ある場合、流跡が多重した画素の群として、対応する始点、終点^{5), 9)}を求める。ここでは、始点、終点を結ぶ直線がよぎる画素の S の平均値の組み合わせで、最大となるものを対応する始点、終点とし、交差する流跡を削除した。

図13は、図5の流跡から得られた速度ベクトル

図13 流跡から得た速度ベクトル

を示したもので、図中の速度ベクトルの総数は92個である。

以上に示した例の処理の場合、画像入力から速度ベクトルを求めるまでに必要な、作図を除いたC.P.U.時間は、おもに流跡の画素についてのみ処理するため比較的短かく、ACOS-6で約100秒であった。

3.5 測定誤差

本方法で速度ベクトルを得る場合の精度は(A)可視化写真が持つ流れの情報の精度、(B)可視化写真から流れの情報を抽出する方法の精度の影響を受ける。(A)に影響を与えるものには(1)トレーサの追従性、(2)トレーサ数とその空間分布、(3)白色の照明の時間内の速度変化の大きさ、(4)写真を撮影する際の光の屈折、カメラの設置の仕方、フィルムのたわみ、(5)スリット光源の厚さ、(6)レンズ

図12 速度ベクトルの求め方

による色収差, などがある。また, (B)には(7)ドラムスキャナーによる画素値および位置の分解能, (8)時間の測定方法, (9)画像処理方法による背景と流跡および画素の色の区別, 距離の求め方などがある。ここで, 図13から無作為に抽出した20個の速度ベクトルのフィルム上の流跡の白の部分の両端の中心を基準とした直線の距離と画像処理結果の距離の最大の誤差は0.184cmで, 誤差の平均は0.0496cmであり, 直線のなす角度のそれらはそれぞれ 31.2° , 6.82° である。また時間の測定誤差は測定単位が0.1msec, スリット幅が3mm, 移動台の速度が12.9cm/secであることなどにより50msec以下である。

3.6 本方法の特徴と限界

本画像処理方法の精度は, 画素幅およびしきい値の影響を強く受けるが, これらは照明の質の向上, 画素幅を小さくすることにより, また時間の精度は移動台の速度を上げることなどにより向上でき, 本方法の特徴としては, (1)一枚のフィルムを処理するため, 画像間の画像および位置のデータの誤差が入らない, (2)渦流などのある複雑な流れ場においても流れの方向がわかる, (3)トレーサーにアルミ粉末を使用するため流れ場に与える影響が小さい, (4)時間の計測単位, 画素幅があるいは写真の倍率を変えることなどにより比較的広い範囲の流速の計測が可能である, などがあげられる。また, 本方法の限界は(1)照明の色を変えることのできる速度, (2)各照明の色の時間の測定方法, (3)流跡の大きさと画素幅, (4)照明の質, (5)要求される測定精度などによると思われる。

4. おわりに

以上, カラー可視化写真の画像処理方法について述べたが, 本方法にはスキャナーの画素値の分解能, しきい値の求めかた, 多重した流跡の画素群から正しい始点, 終点の組み合わせの流跡を求める方法など未解決の問題点もあり, 得られた流速ベクトルには誤差の大きいものもある。

もとより, 本方法は開発過程の一方法であり, 拙文が今後の画像処理方法の開発の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) Imaichi, K. and Ohmi, K.: Numerical Processing of Flow-visualization Pictures-measurement of Two-dimensional Vortex Flow, J. Fluid Mech., 129(1983) 283.
- 2) 小林・吉武: 流跡写真自動処理システムの開発, 機論, 51-466, B (昭60) 1966
- 3) 筧源亮: トレーサー画像の相関処理による流速計測, 流れの可視化, 3-10 (昭58) 189.
- 4) 黒田・飯田: 連続画面における点群の移動の追跡, 京都大学大型計算機センター広報, 16-2 (昭60) 69.
- 5) 小林, 他3名: 逆流を含む二次元流れ場の画像処理システムの開発, 流れの可視化, 5-17 (昭60) 129.
- 6) 木村, 他2名: 相関を利用した流れ場の速度ベクトル分布の画像計測, 計測自動制御学会論文集, 23-2 (昭62) 101.
- 7) Miike, H. et al.: Velocity-field Measurement by Pixel-based Temporal Mutual-Correlation Analysis of Dynamic Image, Trans. IECE Jpn., E69-8 (1986) 877.
- 8) 小林, 他4名: 画像処理に適した流れの可視化方法, 流れの可視化, 3-10 (昭58) 193.
- 9) 藤原・西原・広瀬: 流れのカラー可視化写真と画像処理方法, 機論, 53-493, B(昭62) 2762.
- 10) 藤原・広瀬: 円形沈降槽内の流れ場に関する研究 (球形粒子の自由沈降運動), 機論, 50-450 B(昭59) 381.
- 11) 大津展之: 判別および最小2乗基準に基づく自動しきい値選定法, 信学論, J63D-4 (昭55) 349.
- 12) 日本色彩学会(編): 色彩科学ハンドブック (昭58) 83, 東京大学出版会.
- 13) 奥野, 他3名: 多変量解析法 (昭52) 159, 日科技連.