色スペクトルを用いた流れ場の3次元速度ベクトル計測[†]

木村 一郎*・河野 吉晴**・小笠原 朝隆***・高森 年*

Measurement of Three Dimensional Velocity Vectors in a Flow Field Using a Color Spectrum

Ichiro KIMURA*, Yoshiharu KOHNO**, Tomotaka OGASAWARA*** and Toshi TAKAMORI*

Development of a simple three-dimensional velocity vector measurement system is expected in order to analyze a highly complex flow field.

This paper presents a new measurement system of three-dimensional velocity vectors in a flow field based on color information. In this system, tracer particles are visualized by a color spectrum slit method which uses a prism spectrum. The color of a tracer particle can determine its position in one direction. In the other two directions, the tracer particle can be tracked on the two-dimensional tracer images by using both a correlation and a particle tracking methods. Consequently, a three-dimensional velocity vector is obtained. The system has been developed and actually applied to a uniform flow and a flow around a sphere in a water channel and the measurement uncertainties were evaluated. The results agree well with a typical pattern of the flows.

In comparison with a conventional stereoscopic measurement method, in which each tracer is tracked in a three-dimensional space, the largest advantage of this method is that a three-dimensional velocity vector distribution in a flow field is easily obtained by adding a color image processing to a simple technique of two-dimensional velocity vector measurement.

Key Words: three-dimensional velocity vector, flow

visualization, image processing, color spectrum

1. はじめに

複雑な流れの現象を解析することは工学に限らず理
学、農学、医学などの分野においても重要な課題であ
る。そのような流れ場の解析には、瞬時の3次元速度
ベクトル分布を知ることが必要であり、最近では画像
処理に基づく3次元速度ベクトル計測の手法が開発さ
れつつある^{1)~4)}。これらのほとんどは、2台以上の
TVカメラを用いてステレオ計測法により個々のトレ
ーサ粒子を追跡していく方法であり、比較的高精度で
実用的な流体計測手法であることが実証されている²⁾。
また、2次元の相関法の原理を3次元に拡張した時空
間相関に基づく方法も開発されている⁴⁾。この方法は
空間的に高密度の計測が可能であり、しかも原理的に
流れ場の既知情報を必要としない特長がある。しかし
いずれも、画像計測システムが大規模になるととも
に、粒子対応付け²⁾、画像再構成⁴⁾などの複雑な処理
が必要である。

本論文では、カラー画像情報を利用した、より簡便
な3次元速度ベクトル計測法を提案する。可視化法と
しては、色が連続的に変化するプリズムによる色スペ
クトルを照射光とするトレーサ注入法⁵⁾を採用する。
TVカメラで得られた2次元トレーサ画像から、個々
のトレーサ粒子を粒子追跡相関法で追跡すると同時
に、粒子の色の変化を捉えることにより、3次元速度
ベクトル分布を求めるものである。この手法を矩形水
路内の定常流と球周りの3次元流れ場に適用した。こ
こにその具体的手法と結果ならびに本システムの計測
精度について述べる。

2. 流れの可視化手法と画像計測システム

2.1 カラースペクトルスリット法

Fig. 1 に色が連続的に変化するプリズムのスペク
トルを利用することによって、トレーサ粒子の混入さ

[†] 第6回流体計測シンポジウム (1989・1) および第18
回流れの可視化シンポジウム (1990・7) で発表

* 神戸大学工学部 神戸市灘区六甲台町 1-1

** NTT データ通信(株) 東京都港区虎ノ門 1-26-5

*** (株)朝日新聞社 東京都中央区築地 5-3-2

* Faculty of Engineering, Kobe University, Kobe

** NTT Data Communications Systems Corp.,
Minato-ku, Tokyo

*** Asahi Shinbun Publishing Co., Chuo-ku, Tokyo
(Received September 25, 1990)
(Revised February 27, 1991)

Fig. 1 Flow visualization using a color spectrum

れた流れ場を可視化するカラースペクトルスリット法の構成を示す。図に示すように、スライドプロジェクタ（ハロゲンランプ）により投影されるスリット光をプリズムにより分光し、シリンドリカルレンズを通して連続的な色スペクトルの幅（18.7 mm）をもつカラー平行光線として試験水路に照射する。鏡はこの光学系をできるだけコンパクトにするためである。

本計測システムの有用性を評価するために、矩形水路内の定常一様流と球周りの 3 次元流れの 2 種類の流れ場を測定対象とした。実験には水路幅 10.0 cm のガラス壁面をもつ矩形水路の回流型流水槽を用い、トレーサには粉碎器によって細かくしたポリスチレン粒子（平均粒子径 2.4 mm, 比重約 1.0）を懸濁混入した。ただし、粒子追跡相関法による対応付けを容易にするためにトレーサ粒子の形状はランダムとした。なお、水路の流れの平均流速は両流れ場ともにほぼ 80 mm/s である。

2.2 カラー画像処理システム

Fig. 2 に画像処理システムの構成を示す。画像は

Fig. 2 Schematic diagram of image processing

1/30 秒間隔で撮影され光ディスクに記録される。さらに、光ディスクに記録された画像は、カラーデコーダ（色復調回路）で RGB（赤緑青）の 3 原色信号に色分解される。色分解された R, G, B, それぞれの画像は 256 階調（8 ビット）にデジタル化され、1 フレームにつき RGB 3 画面（画素数 580×480 ）の数値データがイメージプロセッサに記憶される。この画像はコンピュータに送られ、次章で述べる色情報を用いた 3 次元速度ベクトル測定がなされ、その結果はグラフィックディスプレイ、プリンタ、X-Y プロッタなどの画像出力装置に表示される。

2.3 色の計測

カラー画像処理を行うためには、色の識別あるいは計測が必要となる。Fig. 2 に示したような画像処理システムを用いると、一つのカラー画像は R, G, B の三つの画面に色分解されてイメージフレームメモリーに記憶される。それゆえ 1 画素につき R, G, B の三つの濃度値の情報がある。これは Fig. 3 に示す色空間内の一つのベクトル $Q(R, G, B)$ として表わされ、ベクトルの大きさは明度に関係する。すなわち明るさの度合である。この色ベクトル空間の $(1, 1, 1)$ 面は色三角形と呼ばれ、ベクトル Q との交点 $q(r, g, b)$ は色度座標を示す。Fig. 4 は色三角形を示し、重心 $w(1/3, 1/3, 1/3)$ と点 q との距離 c は彩度、 wR と wq の

Fig. 3 A color vector in color space

Fig. 4 Chromaticity coordinates on color triangle

なす方位角 h は色相に関係する．ここでいう彩度は無彩色 w からの距離で，マンセル表色系⁶⁾ではクロマ(chroma)と呼ばれ，色みの量を表わすと考えられる．また，色相は赤，緑，青というような色そのもの(色の種類)を表わす．

RGB 色空間から色知覚の3属性である明度 v ，彩度 c ，色相 h への変換式はつぎのように表わされる⁶⁾．

$$v = R + G + B \quad (1)$$

$$c = \sqrt{\left(r - \frac{1}{3}\right)^2 + \left(g - \frac{1}{3}\right)^2 + \left(b - \frac{1}{3}\right)^2} \quad (2)$$

$$h = \begin{cases} \theta & , g \geq b \\ 2\pi - \theta & , g < b \end{cases} \quad (3)$$

ただし，

$$r = R/(R+G+B), \quad g = G/(R+G+B),$$

$$b = B/(R+G+B)$$

$$\theta = \cos^{-1}(2r - g - b)/\sqrt{6} \quad c$$

である．

上の変換式を用いれば，人間の色知覚に基づいた形で色情報の計測，識別が可能となる．

3. 3次元速度ベクトルの測定

3.1 粒子追跡相関法

Fig. 5, 6 にここで提案する粒子追跡相関法の原理を示す．ここでは，TV カメラで得られた2次元トレーサ画像上での2次元速度ベクトルを求める．いま，Fig. 5 に示すように，ある時間 ($t = t_0$) でのトレーサ

Fig. 5 Particle matching by correlation method

Fig. 6 Particle image tracking in three consecutive frames

画像中での一つのトレーサ粒子 P_{01} に注目する．その粒子像の重心座標，構成画素数はあらかじめラベリング処理⁸⁾などにより求めておき，これを囲む $n \times n$ 画素の小領域を定め，基準マトリクスとする．基準マトリクスの大きさ n は，トレーサ粒子をほぼ円形とみなし，次式のように粒子より少し大きめに設定する．

$$n = 2 \left(\sqrt{\frac{m}{\pi}} + 2 \right) \quad (4)$$

ただし， m はトレーサ粒子像の構成画素数である．つぎに τ 秒後のトレーサ画像 ($t = t_1 = t_0 + \tau$) 中に探査領域 S_1 (破線で囲まれた領域) を設定する．ただし，時間間隔 τ 秒ではトレーサ粒子は回転変形しないものと仮定し，探査領域の大きさは予想される最大移動距離を考慮して決める．ここでは，流れの主方向には平均流速の2倍，その他の方向は1倍の速度でトレーサ粒子が到達しうる領域とした．つぎに， S_1 内に存在するすべての粒子について，重心画素を中心とする $n \times n$ 画素の対応マトリクスを設定し，基準マトリクスとの輝度値 Y の規準化した相互相関関数を計算する．ただし，これは色度と関係のない値で， $Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B$ で RGB 値から変換される．相関の計算には画素マトリクスでの平均値 $\bar{Y}$ からの変動分 $Y - \bar{Y}$ を用いる(注1)．相関値が最大値を取る対応マトリクスのトレーサ粒子がトレーサ粒子 P_{01} の τ 秒後の移動先と推定される．

ここではさらに，対応の誤りを少なくするため，Fig. 6 に示すように3時刻を追いかけるトレーサ粒子追跡法を併用する．上述の相関法によって推定された，時刻 $t = t_1 = t_0 + \tau$ での P_{01} の対応粒子を P_{11} とする．ここで対象流れの速度の時間的変化が画像のサンプリング時間内で無視できるほど小さいものであると仮定し， $P_{01} \rightarrow P_{11}$ から時刻 t_2 での予想される粒子移動位置 Q_2 を中心とした探査領域 S_2 (一点鎖線で囲まれた領域) を設定し，領域内の粒子との相関値を計算する．なお， S_2 の大きさはいずれの方向にも流れ場の平均流速 V で到達可能な正方領域とした．ここで，対応付けられた $P_{11} \rightarrow P_{21}$ の相関値が高ければ，3時刻間でのトレーサ粒子の移動経路 $P_{01} \rightarrow P_{11} \rightarrow P_{21}$ が決定される．しかし， S_2 内に粒子が存在しなかったり，対象とする粒子がつぎの時刻で色スペクトルの幅の範囲外に移動したような場合とか最初の対応付けに誤りがあった場合などのように相関値がきわめて低いときには，この移動経路を誤りと判断し，つぎに相関値が高いものを正しい対応付けと判断し，同様の手

(注1) 輝度値の変動分を用いているため， z 方向の輝度値の変化の影響は小さい．

順を行う。こうして相関値が3番目の対応付けまで調べ、対応が付けられないときはその粒子については速度ベクトルを求めないことにした。さらに、求められた速度ベクトルの中で相関値が他と比べて異常値と判断されるものを修正トンプソン法⁹⁾を用いて排除した。

Fig. 7 に矩形水路内の一様流れの2次元速度ベクトル分布を示す。ただし、これは上述の粒子追跡相関法を用いて得られた2次元情報で、深さ方向の情報は含まれていない。図(a)は相関法による2時刻対応付けのみによる結果であり、過誤のベクトル¹⁰⁾が見られる。一方、図(b)はここで提案した粒子追跡相関法による3時刻対応付けによる結果であり、過誤のベクトルがなくなっている。

3.2 色による粒子の深度測定

可視化実験に用いられたカラー平行光線は深さ方向に連続的な色スペクトルをもつので、トレーサ粒子の色から深度を測定できる。まず、深度と色の関係を調べるために、水路の測定域にトレーサ粒子を細かく

(a) By correlation method

(b) By particle tracking correlation method

Fig. 7 Two-dimensional velocity vector distributions of uniform flow in an open channel

粉碎したものを塗布した校正板を **Fig. 8** に示すように斜めに設定し、色スペクトル光を照射して得られた虹色の画像から色と深度の校正曲線を求めた。ここでは、RGB 値から色そのものを表わす色相に変換した。

Fig. 9 に色相 h と深度 z の関係とその標準偏差の範囲とともに示す。ただし、 z は水路の底からの距離で表わし、色相 h は(3)式から求められる。図から色相/深度校正曲線を求めれば、色相からトレーサ粒子の深度が推定される。そこで色相/深度校正曲線として、色相値が 60° 以下では5次の多項式、 60° 以上では7次の多項式に近似した。その近似式をつぎに示す。

$$z = \sum_{i=0}^5 C_i h^i, \quad h \leq 60^\circ \quad (5)$$

ただし、最小2乗法により $C_0=16.8$, $C_1=4.63$, $C_2=2.16$, $C_3=-0.712$, $C_4=-10.8$, $C_5=10.8$ となる。

Fig. 8 Experimental setup for color/depth calibration

Fig. 9 Relationship between color and depth of tracers

$$z = \sum_{i=0}^7 C_i h^i, \quad h > 60^\circ \quad (6)$$

ただし, $C_0=22.4$, $C_1=2.61$, $C_2=-0.852$, $C_3=-0.611$, $C_4=0.285$, $C_5=0.212$, $C_6=-0.117$, $C_7=0.0149$ である.

なお, 校正曲線まわりの深度の標準偏差は 0.39 mm である.

3.3 計測手順

3.1, 3.2 節の方法を用いて, 可視化画像から3次元速度ベクトルを求める計測手順をつぎに示す.

(1) 光ディスクよりイメージプロセッサに $1/30$ 秒間隔で連続した3画像を取り込む.

(2) 画像の中のトレーサ粒子と背景の区別をつけ, トレーサ粒子像の大きさおよび重心座標を求める. なお, トレーサ粒子の位置 (x, y) は粒子像の重心座標とする.

(3) 粒子追跡相関法によって画像間のトレーサ粒子対応付けを行う.

(4) 色相/深度校正曲線を用いて, 色相の値によってトレーサ粒子の深度を決定する. ただし, トレーサ粒子を構成する全画素の色相の平均値を用いて, トレーサ粒子の深度 z とする.

(5) (3)(4)の作業を繰り返すことにより3次元速度ベクトル分布を得る.

4. 流れ場への適用

Fig. 10 に矩形水路内の一様流れの3次元速度ベクトル分布を, また **Photo. 1** にはそのコンピュータグラフィックスによる3次元表示結果を示す. ただし, これは透視投影法を用いているため遠くの速度ベクトルは相対的に小さくなる. (a)は斜め上方から, (b)は真横からみたものである. 流れ方向にほぼ一様な速度ベクトル分布が得られている.

Fig. 10 Three-dimensional velocity vector distribution of uniform flow in an open channel

(a)

(b)

Photo. 1 Three-dimensional representation of Fig. 10 by computer graphics

つぎに **Fig. 11** に示すように水路の中央部に球を設置し, 球周りの流れに適用した. 図の濃淡模様部分はカラーспекトル光の照射されている範囲を示す.

Fig. 12 に球周りの流れの3次元速度ベクトル分布の結果を, そして **Photo. 2** にはそのコンピュータグラフィックスによる3次元表示結果を示す. (a)は斜め上方から, (b)は真横からみたものである. 推定された速度ベクトルの数は少ないが, 球周りの流れ場のようすを比較的良好に表わしている. 球前方では速度が小さく上方を向いているようす, 球の側方で流れが速く

Fig. 11 Visualization of flow around a sphere

Fig. 12 Three-dimensional velocity vector distribution of flow around a sphere

(a)

(b)

Photo. 2 Three-dimensional representation of Fig. 12 by computer graphics

なっているようすがよくわかる。

以上の測定結果は流れ場のようすをよく表わしており、本計測システムの有用性を示している。

5. 不確かさ解析による評価

ここでは本 3 次元速度ベクトル計測システムの有効性を評価し、今後の改良、改善点を見いだすため、アメリカ規格協会・アメリカ機械学会性能試験規約

PTC 19.1⁹⁾に基づく計測の不確かさ解析による評価を行う。

これは計測過程の各段階で考えられうる計測誤差要因のかたより誤差（要素正確度）と偶然誤差（要素精密度）を求め、誤差の伝播を考慮して、最終的な計測量の不確かさを $\{(\text{総括正確度})^2 + (\text{スチューデント } t \text{ 値} \cdot \text{総括精密度})^2\}^{1/2}$ の 95% 包括度で評価する手法である。すなわち不確かさの上限値に対する推定値である。

本計測法では、3 次元速度ベクトルは次式から求められる。

$$\mathbf{V} = \left(\frac{\Delta x_m}{\tau}, \frac{\Delta y_m}{\tau}, \frac{\Delta z}{\tau} \right) \quad (7)$$

ここで、 Δx_m , Δy_m は粒子追跡相関法によるトレーサ粒子の主方向 x , それに垂直な方向 y への空間移動量そして Δz は色による粒子の深度測定によって得られる z 方向への空間移動量である。また、移動時間 τ は時系列画像のフレーム周期の整数倍で一定であり、その不確かさは空間移動量の不確かさと比べて無視できる。そこで x , y , z 方向いずれの速度の 95% 包括度 U_{RSS} とも次式で与えられる⁹⁾。

$$U_{RSS} = \frac{\sqrt{B_L^2 + (t^* S_L)^2}}{\tau} \quad (8)$$

ここで、 B_L , S_L は Δx_m , Δy_m , または Δz の空間移動量測定における正確度と精密度である。なお t^* はスチューデント t 値である。

本計測手法における不確かさの主要因を列挙すると、つぎのようになる。

1. 粒子追跡相関法によるトレーサ粒子の 2 次元位置測定に伴う不確かさ (Δx_m , Δy_m へ影響)
 - (1) レンズの歪に伴う不確かさ
 - (2) 粒子の重心位置決定に伴う不確かさ
2. 色による粒子の深度測定に伴う不確かさ (Δz へ影響)
 - (1) スリット光照射位置に伴う不確かさ
 - (2) 色/深度校正曲線への当てはめに伴う不確かさ
3. トレーサ粒子の追従性に伴う不確かさ (Δx_m , Δy_m , Δz へ影響)

以上のうち、トレーサ粒子の流れへの追従性はトレーサ粒子の大きさと比重に依存し、比重が 1 であれば大きさが小さいほど追従性は良い⁴⁾。したがって、画素分解能が高くなれば、より小さなトレーサ粒子を用いることが可能となり追従性は良くなる。そこで、これは本測定法の本質的な問題ではないと考え、ここでは相対的に大きいと考えられる 1., 2. の項目の不確か

さのみについて検討する。この1.と2.の不確かさの各要素正確度、要素精密度をつぎのように見積った。

1. のレンズの歪に伴う不確かさと粒子の重心位置決定に伴う不確かさは、測定位置に設置した校正用基準点プレートを直接撮影することにより得られる、画像上での基準格子点間隔の深さによるずれのばらつきを精密度 (x 方向: ± 0.75 pixel, y 方向: ± 0.83 pixel) とし、正確度としては画素分解能 (0.45 mm) を考慮した。2. のスリット光照射位置に伴う不確かさは、色/深度校正板の x 方向一定の位置 (同一深度) での色相の値のばらつきを精密度 (± 0.20 mm) とし、校正板に付けた基準線 (目盛り) の幅 (0.78 mm) を正確度とした。さらに、色/深度校正曲線への当てはめに伴う不確かさは、(5), (6) 式の最小2乗法による当てはめに伴う誤差 (精密度: 0.39 mm) である。以上により、本実験における最終的な不確かさである95%包括度を(8)式から計算すると以下のとおりとなる。

x 方向: ± 10.67 mm/s

y 方向: ± 11.70 mm/s

z 方向: ± 15.53 mm/s

このように、本実験では $\tau = 2/30$ s であるので95%包括度は比較的大きな値となり、矩形水路の平均流速80 mm/s に対して、得られた3次元速度ベクトルの精度は高くはないが、(8)式より、 τ を大きくとれば不確かさを小さくできる。しかし、求められる速度ベクトルは時間間隔 τ での平均速度ベクトルであるので、特に変化の速い非定常流を対象とする場合には τ を大きくとることはできない。また、 τ を大きくとると、トレーサ粒子の空間移動量が長くなるので、粒子の対応付けが難しくなり過誤のベクトルが増加する¹⁰⁾。したがって流れに対応した時間間隔 τ の設定が必要である。つぎに Δx_m , Δy_m に関しては、その不確かさは画素分解能に大きく依存する。最後に Δz については、色/深度校正曲線の当てはめに伴う精密度が特に大きな影響を与える。したがって、画素分解能や色分解能が高くなれば、本計測法の精度は向上する。

6. おわりに

色情報に基づく流れ場の3次元速度ベクトル分布画像計測システムを開発し、その有用性を実証した。2次元トレーサ画像中での粒子の対応付けには従来の相関法と粒子追跡法の二つを併用するとともに、プリズムを用い連続的に深さ方向に変化する色情報からトレーサ粒子の深度を測定し、3次元速度ベクトルを得る新しいシステムを開発した。この方法の最大の利点は、比較的簡単に流れ場の3次元速度ベクトル分布が求められることにある。しかし、一方向からのトレーサ画像から3次元速度ベクトルを求めるため、トレーサ粒子の密度が高くなると、画像中での深さ方向のトレーサ粒子の重なりが避けられない。したがって、原理的に数台のTVカメラを用いる方法に比べ、多くの速度ベクトルは得ることはできない。

本測定法の精度向上には、1) 画像処理関連機器の画素分解能、色分解能の向上、2) 光学系構成の精度向上、3) 分解能の優れた分光装置の採用などが必要である。

参考文献

- 1) T. P. K. Chang, A. T. Watson and G. B. Tatterson: Image Processing of Tracer Particle Motions as Applied to Mixing and Turbulent Flow, Chemical Engineering Science, **40**-2, 269/285 (1985)
- 2) 西野, 笠木, 平田, 佐田: 画像処理に基づく流れの3次元画像計測に関する研究, 日本機械学会論文集, B編, **55**-510, 404/412 (1989)
- 3) 加賀, 井上, 山口, 吉川: トレーサ粒子追跡による気流速度の3次元計測, 流れの可視化, **9**-Suppl., 55/60 (1989)
- 4) 木村, 河野, 高森: 時空間相関法に基づく流れ場の3次元速度ベクトル計測, 計測自動制御学会論文集, **27**-5, 497/502 (1991)
- 5) 流れの可視化学会編: 新版流れの可視化ハンドブック, 157/206, 朝倉書店 (1986)
- 6) 池田光男: 色彩工学の基礎, 1/16, 朝倉書店 (1988)
- 7) 日本機械学会編: 画像処理とパターン計測技術, 102/105, 朝倉書店 (1986)
- 8) 長谷川, 中山, 横井: 画像処理の基本技法 (技術入門編), 46/49, 技術評論社 (1987)
- 9) アメリカ機械学会編 (日本機械学会訳): 計測の不確かさ, 丸善 (1987)
- 10) 木村, 高森, 井上: 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, 101/107 (1987)