3次元 PTV のための改良カラーデフォーカス法*

Improvement of the Color-Defocus Method for 3D PTV

植村 知正** 山本 恭史** 山内 俊典***
UEMURA Tomomasa YAMAMOTO Yasufumi YAMAUCHI Toshinori
福益 一希*** 井口 学†
FUKUMASU Kazuki IGUCHI Manabu

Abstract The defocus method is known as a method which can measure three dimensional coordinates of particles by one camera, and it is especially suitable for the 3D-PTV measurement of micro-flows. Although the color defocus method has solved some problems of the conventional defocus method, light absorption by color filters caused new difficult problems of insufficient light intensity. This paper proposes two new techniques which can take pictures more clearly than the existing color defocus method. By employing light-color filters, the serious problem of light absorption can be resolved. As a result, the combined use of those filters and HSI color analysis allows wider selection of filter colors. The introduction of laser illumination brings wider applications of the color defocus method, which enforces measurement precision of the method. Some measurement examples are shown here.

Keywords: Defocus method, Eccentric apertures, 3D-PTV, Fluorescent particle, Identification of colors

1. 緒言

3次元空間の速度分布を計測できる3次元PIVについては数多くの研究が行われており、PIVハンドブック[1]には2002年までの主要な方法が収録されている。近年は微小空間で速度分布を計測できるように工夫されたマイクロPIV技術の発展が著しい。さらに、3次元空間で3次元速度分布を計測できる3次元マイクロPIVについても技術開発が行われて、研究成果が報告されている。3次元マイクロPIVの手法として、a)顕微鏡を用いた2次元PTVの結果を深さ方向に集積する方法、b)インラインホログラフィによってトレーサの運動を追跡するホログラフィPTV、c)トレーサ像のボケ程度から粒子の3次元位置を計測する

デフォーカス法PTVなどが挙げられる。これらの手法の特徴を簡単にいえば、a)は濃度相関PIVができるため計測の質は高いが装置が高価、b)はPTV計測であるためa)よりも計測密度が低い。c)は装置が容易だがPTV計測であるためトレーサ分布密度が上がらない。b)とc)の方法はa)よりも対象までの距離が大きい場合にも適用可能であるため、流路形状が複雑な場合や混相流の計測手法として期待できる。

b)やc)のように3次元空間に分布したトレーサ粒子をステレオ撮影する方法ではトレーサの数密度が高くなると粒子像の重複（オクルージョン）が起こるため一時に大量のベクトルを得ることは難しい。オクルージョンの問題を軽減するた

* 2010.11.26 受付

** 関西大学システム理工学部機械工学科 〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3
TEL: (06)6368-0802 FAX: (06)6388-8785 E-mail: umra@kansai-u.ac.jp

*** 関西大学大学院理工学研究科

† 北海道大学大学院工学研究科物質工学専攻

めに3台または4台のカメラでステレオ撮影するシステム (V3V[2]、Tomographic PIV[3]など) が実用化されている。カメラの数を増やすことによって粒子を識別する能力が上がるが、同時に撮影系の調整や解析が難しくなる。

本稿で提案している方法は計測法 c)に分類できる画像撮影法であり、1台のカメラと簡単な光学系で粒子の3次元位置を計測できる特徴がある。この方法の起源は3次元的な曲面の計測に用いられた偏心アパーチャ法であるが、Willert と Ghalib ら[4]はそれをPTV計測に適用し、defocus method (デフォーカス法)と呼んだ。本稿でもこの方法をデフォーカス法と呼ぶ。デフォーカス法はトレーサ粒子像のぼけ量を粒子の合焦点位置からのずれ量に対応つけて位置を計測する方法である。Gharib らのグループはその後3台のカメラを固定配置してそれぞれのカメラで撮影した画像の視差から3次元位置を計測する方法を考案している[2] (この方法が上述のV3V計測法である)。計測原理から言えば、ピンぼけを利用しないのでステレオ撮影法に分類すべきものである。V3Vは遠方の領域でも精度良く計測できるが、逆に近接した領域や微小領域の計測にはそのままでは適用できない。

近年になってYoonとKim [5]はデフォーカス法を用いてマイクロチャネルの3次元流動を計測している。Kim らの研究の特徴はこの手法を微小領域の計測に適用した着眼点とピンボケ量と粒子の位置を較正実験で対応付ける点にある。

デフォーカス法は簡単な光学系で粒子の3次元位置を計測できる優れた方法であるが、改良を要する問題点も少なくなかった。

著者らは粒子分布密度が高いときに計測できない問題や計測領域が合焦点位置前後に二分割される問題を解決するために、アパーチャマスクの開口部にカラーフィルタを取り付けることを提案した (カラーデフォーカス法) [6, 7]。

デフォーカス法が改良を要するもう一つの問題点は光量不足の問題である。通常のデフォーカス法でも偏心アパーチャマスクの開口が小さいために絞りを全開にした場合と比べると光量は1/10程度に減少する。カラー分離フィルタによってイメージセンサに到達する光量がさらに減るため、カラーデフォーカス法ではどうしても光量不足 (またはカメラの感度不足) に陥り勝ちにな

る。

Tien と Kartes[8]は画面上の粒子像の数密度を減らすために著者らと同じように開口部にRGBフィルタを付ける方法を提案しているが、光量不足に対応するためにEstevadeordal と Goss[9]の提案した背景照照明法を採用している。

これに対して著者らは照明方法を限定するのではなくカラーフィルタの選択によって光量不足に対応する方法を提案した[10]。著者らの方法ではさまざまな画像撮影法を選択できる柔軟性に富んでいる。

本論文では最初に著者らの提案したカラーデフォーカス法について説明し、次いで光量不足に有効なフィルタの選択と色分離の方法およびレーザ照照明を利用する方法について述べる。

2. カラーデフォーカス法

2.1 デフォーカス法

3次元PTVでは、粒子の光軸方向の位置計測が必要となる。デフォーカス法は粒子像のボケ量から粒子の合焦点位置からのズレ量を求める方法である。一般にデフォーカス法といえばボケ量を正確に定義できる偏心アパーチャを用いる方法をいう。

Fig.1 に偏心アパーチャマスクを用いたデフォーカス法の原理の模式図を示す。偏心アパーチャマスクとは複数の偏心した開孔を持つ絞り板でこれをレンズに装着して撮影すると、粒子Aが合焦点位置にある場合は像面上のA'に一つの粒子像として結像される。これに対して、合焦点位置から離れた位置にある粒子Bはぼけ像になり、

Fig.1 An optical arrangement of the defocus method.

開口の数と同数の粒子像に分かれる。ピンぼけ量を粒子像 B'_1 と B'_2 間の距離 d_{AB} と定義すると、 d_{AB} は合焦点位置から B までの距離と一対一対応する。また粒子が合焦点の光軸方向手前にあるか、奥にあるかで観察される粒子像 B'_1 、 B'_2 の位置関係が逆転する。デフォーカス法はこれらの現方法である。この方法の利点は光学系が簡単で粒子の単眼 3 次元位置計測が可能なことである。

正三角形形状配置の 3 個の開口（アパーチャ）部を持つマスクを用いて白点を撮影した画像を Fig.2 に示す。合焦点位置にある白点は Fig.2(a) のように 1 個の白色の像となり、粒子が合焦点位置から離れると Fig.2(b)、Fig.2(c) のようにその位置ズレ量に応じた大きさの三角形パターンが現れる。3 個に分かれた粒子像の広がりが粒子像のボケ量に対応するので、3 個の粒子像の中心を結ぶ三角形の外接円の半径でボケ量を定義できる。従来のデフォーカス法では、合焦点位置に近い粒子像は Fig.2(b) のように 3 つの像が重複して分離できず、ボケ像間の距離を正確に計測できない。また粒子像の数が粒子の 3 倍に増えるため、粒子数が多い場合や分布密度が高い部分では像の重複のため三角パターンを抽出できない。

2.2 カラーデフォーカス法

このような粒子像の重複を避けるために、粒子像を着色するカラーデフォーカス法を考案した。

Fig.2 Particle images obtained by defocus method.

Fig.3 An aperture mask for color defocus method.

Fig.4 Particle images obtained by color defocus method.

Fig.5 Particle images on RGB color planes.

カラーデフォーカス法では、Fig.3 のように正三角形の各頂点位置に開口を設け、そこに RGB 色分離フィルタを取り付けたマスクを用いる。このマスクをレンズに取り付け、明るく照明された白色粒子を撮影すると Fig.4 のように RGB3 色の粒子像で構成された三角形パターンが形成され、着色された粒子像はそれぞれ別の色画面上に記録される。

画面に Fig.4(b) のように表示される粒子像は R、G、B の色画面上に別れて記録されているため、Fig.5 のように各色画面上で他色粒子像との重複なく抽出できる。

Tien と Kartes ら[8]は同じ方法を試みたが「カラーフィルタによる吸収（光の減衰）が強くて通常の照明方法では鮮明な粒子像を撮影できない」と考えて、Estevadeordal と Goss[9]の提案した白色背景光で照明して粒子の影を撮影することによって粒子像のコントラストを改善する方法を探っている。著者らは照明光源、フィルタの材質や色、適切な開口径の寸法などの組み合わせの選択によって狭帯域の RGB 分離フィルタよりも大幅な露光倍率を実現している[10]。アパーチャ径と配置三角形は大きいことが望ましい。現実には像ひずみやマスク取り付け位置を考慮しつつレンズの有効径の範囲内で試行錯誤的に決定している。

カラーデフォーカス法は「1 台のカメラで 3 次元位置計測できる」という長所を引き継ぐだけでなく、粒子像を着色することで、三角形パターンの識別を容易にし、粒子像の混雑を避けられる。その結果として、カラーデフォーカス法はより広

い計測領域で従来の方法より高密度の粒子分布状態での計測が可能になる。

2.3 較正法

本手法では較正実験により作った予め粒子像のボケ量と合焦点位置からのズレ量とを対応付ける較正曲線を作成しておき、計測したボケ量から粒子の3次元位置を決定する。

粒子像のボケ量は RGB 各粒子像の中心を結ぶ三角形の外接円の半径として定義する。原画像を色分離した Fig.5 のような画像から RGB 各粒子像の中心座標 (x_r, y_r) , (x_g, y_g) , (x_b, y_b) を求めると、計測対象粒子の中心座標とそのボケ量は式(1)、(2)で与えられる。

粒子の中心座標：

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{x_r + x_g + x_b}{3}, \frac{y_r + y_g + y_b}{3} \right) \quad (1)$$

ボケ量(三角形の外接円の半径)：

$$b = \frac{1}{3} \sum_{i=r,g,b} \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \quad (2)$$

3. カラーデフォーカス法の性能向上

デフォーカス法ではレンズに小さいアパーチャ孔を持つマスクを付けて撮影するので通過光量がかかなり減る。カラーデフォーカス法では白色光を3原色に分割するため光強度はさらに1/3に減り、フィルタの吸収によって10~50%の光量が失われる。その結果として光量不足に陥り易い。

光量不足に対応する方法として、a)高感度カメラの使用、b)強い照明、c)透過率の高いフィルタの使用などが挙げられる。本論文では機器の性能向

上に依存するのではなく、実験と解析の工夫によって対応する2つの方法を提案する。すなわち、薄色フィルタによって光の透過量を大幅に増やす方法と PIV で標準的に使用されるレーザを照明光源として利用する方法である。

3.1 CMY 補色フィルタの使用

白色光が RGB の3原色の和であるとするれば補色 CMY は3原色のうちの2色の混合であるため、フィルタは2倍の光量を通過させる。従って偏心アパーチャに補色フィルタを使用すれば透過光量が2倍になると期待できる。

CMY フィルタを使用した場合の粒子像を Fig.6 に示す。図から RGB の各色画面上にあまり強度差のない粒子像が2個ずつ発生していることが分かる。たとえば黄色(Y)の粒子像は赤画面(R)と緑画面(G)上に輝点が現れる。同様にシアン(C)は G と B 画面、マゼンタ(M)は R と B 画面上の輝点となる。このように CMY 像は RGB 画面の2画面に像が記録されるので、そのままではカラーデフォーカス法の重要な特徴である「粒子像の数密度を減らす」ことの効果が減る。その解決のために RGB 値から HSI (色相、彩度、輝度)を画素ごとに計算(Fig.8)して色相に着目して画素の色を弁別し、その結果を改めて RGB 画面(例えば、シアン画素を B 画面、マゼンタ画素を R 画面、イエロー画素を G 画面)にその色相の輝度で記入すればよい。すなわち、CMY 色で記録されたものをそれぞれ RGB 色に変換すれば RGB 画面上に明るい粒子像が得られる。なお、ここでは狭帯域の CMY フィルタを使用した場合の例を示したが、次の項で述べる薄色フィルタの用法は薄色 CMY フィルタにも適用できる。

Fig.6 Particle images obtained by using CMY color filters.

Fig.7 Color conditions of particle images obtained by using light color filters.

$$\begin{aligned} \text{Hue :} \quad & \theta = \cos^{-1} \left(\frac{2r - g - b}{\sqrt{6} \cdot c} \right) \\ \text{Saturation :} \quad & c = \sqrt{(r - 1/3)^2 + (g - 1/3)^2 + (b - 1/3)^2} \\ \text{Intensity :} \quad & I = R + G + B \\ & r = \frac{R}{R + G + B}, \quad g = \frac{G}{R + G + B}, \quad b = \frac{B}{R + G + B} \\ \text{where, } R, G, B : & \text{ values of intensity,} \\ & r, g, b : \text{ relative intensities.} \end{aligned}$$

Fig.8 Values of Hue, Saturation, Intensity.

3.2 薄色 RGB フィルタの使用

色の薄いフィルタはその色の光だけではなく白色光も透過させるため光量が増して明るい粒子像が得られる。しかし白色光を通すと全ての色画面にも像が現れるので粒子像の数密度は減らない。この色画面間での漏れ（クロストーク）現象を旨く処理すれば明るい粒子像が得られる。

薄色フィルタを用いて撮影した粒子像の三角パターンを Fig.7 に示す。Fig.7 の粒子像はカラー画面、赤画面、緑画面、青画面の状態を示している。薄色フィルタは白色光も透過させるので、例えば赤画面上には Fig.7(b) のように赤粒子像の位置だけではなく青と緑の粒子像の位置にも薄く像が現れるが、赤画面上の画素が他の色画面上の同じ位置の画素より明るい。薄色フィルタを通った光の HSI 値（色相、彩度、輝度）は、色相（H）は変化しないで彩度（S）が下がるだけであり、輝度（I）は上昇する。したがって、薄色フィルタによる粒子像の色は色相値から容易に色を識別できるのである。複数の像が重複した位置の画素は輝度レベルと色相を勘案して識別すればよい。Fig.8 に HSI 値の計算式を示す。

3.3 アルゴンイオンレーザ照明を利用したカラーデフォーカス法

照明光源としてレーザを利用できれば十分な光量でパルス的に照明できるので光量不足の問題だけで無く、撮影時間間隔の精度も向上する。

レーザ光はコヒーレントで単色波長の光源であるが、高強度の照明光源として利用する場合は複数波長で使えるものが少なくない。ここではアルゴンイオンレーザを用いてカラーデフォーカス法を実現する方法を述べる。

アルゴンイオンレーザは 515nm（緑）と 488nm

Fig.9 Pictures of a fluorescent particle illuminated by argon ion laser light.

（青紫）の発振波長を持っているが、赤色（600～700nm）の帯域の波長は出さない。青と緑の 2 色を用いたカラーデフォーカス法も考えられるが、赤色光を加えれば通常のカラーデフォーカス法（RGB の 3 色）を実現できる。PIV でトレーサ粒子と物体からの反射を区別するために用いられる蛍光染料ローダミン B は 450～600nm の波長を吸収して 550～750nm の蛍光を発する。ローダミン B で染色したトレーサ粒子をアルゴンイオンレーザで照明すればトレーサ粒子は赤い蛍光色を発するが、トレーサ粒子からは吸収されなかったレーザ光も散乱させているので RGB の 3 色が揃う。蛍光の強度と散乱光の強度割合は染色濃度とカメラのホワイトバランスを利用してできるだけ RGB の強度が均一になるように調整する。Fig.9 はローダミン B で染色した蛍光粒子をアルゴンイオンレーザで照明して、カラーデフォーカス法で撮影した例である。

4. 微細円管内の流れの 3 次元計測

レーザ照明を適用したカラーデフォーカス法の計測例を示すために、微細円管内の流れの 3 次元計測を行った。Fig.10(a) が実験装置の配置図である。内径 1mm のフッ素樹脂製のチューブに白色粒子（18μm）を混ぜた流体を流す。流体と流路素材の屈折率の違いによる影響を軽減するために、流体にヨウ化カリウム水溶液を用いて両方の屈折率を整合させた。ガラス製の容器内にチューブを縦方向に固定し、容器内を同じ濃度のヨウ化カリウム水溶液で満たしておく。流体はシリンジポンプを用いて流量 5.0×10^{-4} ml/sec でチューブ内を流した。

この流れを 10 fps で撮影した画像を Fig.10(b)

Fig.10 An experimental setup and an example picture of laser color defocus method.
(a) A thin tube immersed in index matching liquid.
(b) An example picture taken by the laser color defocus method.

に示す。事前に較正実験を行い、3 角形パターンの大きさ（ピンぼけ量に相当）と粒子の光軸方向位置を対応付けておく。画像中の3 角形パターンの大きさを評価し、較正実験の結果を用いて粒子の3 次元位置を計測する。各時刻の粒子の3 次元座標から同一粒子を判定し、4 時刻追跡法で速度ベクトルを求めた。

Fig.11 は管軸付近の薄い領域（0.1mm、管径の10 %）内の速度分布である。51 個の速度データの放物線分布からの計測値のばらつきは $4.1 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$ であった。

Fig.12 は 86 個の計測データの管断面内の分布である。管壁付近にはトレーサが入り難いため、計測点が少なく、管中心付近には多くのトレーサが通過していることがわかる。

Fig.11 Measured velocity distribution within a thin plane of the tube axis.

Fig.12 Distribution of measured points in a tube cross section. Colors are correspond to velocities.

5. 結言

カラーデフォーカス法の弱点であった光量不足の発生を回避する複数の方法を提案した。

光量不足を解消／軽減するには高感度カメラを用いればある程度解決できる。また、ガラスに誘電体コーティングした色分離フィルタは吸収が少ないので撮影条件はある程度緩和される。しかしながら、高性能な機器を要する方法は計測者にとって大きな制約事項になる。

本論文では色の種類が多く入手し易いプラスチックフィルタを使用して光量不足を回避する方法を提案した。すなわち、色の種類の選択よりも透過光量の多いフィルタの選択の方が重要と考えて、薄色フィルタ（白色光を通す）を用いて粒子像の輝度を高める方法を示した。

また、照明光源としてレーザを使用する方法を

提案した。カラーデフォーカス法は粒子の3次元位置を計測するだけではなく、3次元PTV計測を実現することを主目的としている。計測対象がレンズに近いほど計測精度が良くなるので本方法はマイクロ流れの3次元計測に適している。本論文で提案した方法を用いればカラーデフォーカス法の画像の質が向上するため、PTV計測の精度も上がる。また、画像撮影に十分な光量があれば高速度カメラを用いて高速流の計測も可能になる。今後の課題としてはトレーサの数密度の上限を高める必要がある。

速度計測では画像の撮影間隔／露光時間間隔を正確に制御する必要がある。レーザは照明強度が強いだけではなく、照明時間間隔を非常に正確に制御できる。カラーデフォーカス法にレーザ光照明を導入できることは極めて有用と思われる。

Nomenclature

r, g, b : relative intensities of red, green, and blue
 R, G, B : values of intensity of red, green, and blue
 H, S, I : Hue, Saturation, Intensity
 C, M, Y : cyan, magenta, yellow

Greek letters

θ : hue [rad]

Subscripts

c : center
 r, g, b : red, green, blue

参考文献

- [1] The Visualization Society of Japan ed., PIV Handbook (in Japanese), Morikita Publishing, Tokyo (2002).
- [2] Pereira, F., Ghalib, M., Dabiri, D. and Modarress, D., Defocusing Digital Particle Image Measurement Technique. Application to Bubbly Velocimetry: A 3-component 3-dimensional DPIV Flows, Exp. in Fluids, Vol.29 Suppl. S78-S84 (2000).
- [3] Elsinga, G. E., Scarano, F., Wieneke, B. and van Oudheusden, B. W., Tomographic Particle Image Velocimetry, Exp. in Fluids, Vol.41, 933-947 (2006).
- [4] Willert, C. and Gharib, M., Three-Dimensional Particle Imaging with a Single Camera, Exp. in Fluids, Vol.12, 353-358 (1992).
- [5] Yoon, S. Y. and Kim, K. C., 3D Particle Position and 3D Velocity Field Measurement in a Microvolume via the Defocusing Concept, Meas. Sci. Technol. Vol.17, 2897-2905 (2006).
- [6] Umeda, K., Yamamoto, Y. and Uemura, T., Color Eccentric Aperture Method to Measure Positions of Particles Scattered in 3-D Space (in Japanese), J. Visualization Society of Japan, Vol.26, Suppl.2, 249-250 (2006).
- [7] Uemura, T. and Yamamoto, Y., Improved Defocus Method for Three Dimensional Micro-PIV, Proc. JSME 84th Fluid Engineering Symposium (in Japanese), OS1-105 (2006).
- [8] Tien, W-H., Kartes, P., Yamasaki, T. and Dabri, D., A Color-coded Backlighting Defocusing Digital Particle Image Velocimetry System, Exp. in Fluids, Vol.44, 1015-1026 (2008).
- [9] Estevadeordal J. and Goss L., PIV with LED: Particle Shadow Velocimetry (PSV), 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 10-13 (2005).
- [10] Uemura, T., Yamamoto, Y., Iguchi, M. and Yamauchi, T., Color Defocus Method for Three-Dimensional PTV Measurement with Single Camera, J. Visualization Society of Japan, Vol.29 (9), 43-49 (2009).