

ステレオストリーク PTV を用いた三次元速度場計測システムの開発

Development of 3-Dimensional Velocity Field Measurement System

Using Stereo Streak PTV

80816601 内藤真弓 (Mayumi Naito)

Supervisor : 菱田公一 (Koichi Hishida)

1. 緒言

現在、医学、生物化学分野において、マイクロ、ミリスケール流れの速度計測がさかんに行われている。人体の健康状態を左右する赤血球の挙動の解明、熱交換器のような熱流体輸送デバイスの高効率化のために、3次元流動場の速度計測の必要性が高まっている。ステレオPTV法(Particle Tracking Velocimetry)は、2方向から見ることによって2次元データから3次元空間を再構成し、3方向の速度成分を算出する手法であり、3次元速度場に用いられてきた。しかし再構成時に検出される偽粒子像との誤対応が原因で、計測の正確性が低下するという問題がある^[1]。これまでカメラを3台以上設定することにより、誤対応数を減らす取り組みがなされてきたが、光学系の簡素化のために2台のカメラでより正確な計測が望まれている。

橋らは、露光時間を任意に調節し、粒子軌跡画像を撮影するステレオPTV-SS法(PTV with streak searching)を提案し^[2]、2台のカメラで精度の良い3方向速度ベクトルを算出した。しかし偽粒子との誤対応の評価に関しては改善の余地がある。本研究では粒子の対応付けをより正確に行うために、偽粒子像の除去手法の1つとして、投影法による粒子像内の焦点深度(DOF, Depth of Focus)から、粒子の存在範囲を3次的に推定する手法を提案した。投影法によるステレオPTV-SS法を開発し、3次元速度場に適用することを本研究の目的とする。

2. 計測システム

実験装置について Fig. 1 に示した。テストセクション部は、幅 30 mm、奥行き 30 mm で、壁面はガラス製である。撮像デバイスに、ImperX 社の CCD カメラ(2m30H-L 輝度階調 12bit、解像度 1920 × 1080)を用いた。そして波長 440 nm の Blue LED を用いて2方向からテストセクションを照射し、中心部で交差させ、CCD カメラの撮像面に対して垂直に入射するように光学調整を行った。テストセクション部にマイクロバブルを含む流れが上昇する仕組みとなっており、それぞれバブルの速度を計測した。Fig. 2 には本研究で用いたマイクロバブルの粒径分布を、Fig. 3 には撮像画像を示した。代表速度を主流方向の平均流速、代表長さを流路幅とすると、この時のレイノルズ数は 260 であった。ここで、カメラ内座標を(Y, Z)、撮像面に対して垂直な方向である深さ方向を X と置き、焦点面位置を X=0 と設定した。

3. 画像処理アルゴリズム

画像処理手順を Fig. 4 に示した。それぞれの処理についての概要を説明する。

3.1 粒子検出処理

体積照射を行っているため、Fig. 3 に示すように、バブル影絵の濃淡は、撮像面との距離によって違う。このような輝度変動が大きい場合に適用が可能な、動的2値化法を粒子検出処理に用いた。動的2値化法は、個々の粒子に対して異なる閾値を設定して重心位置を検出する処理法である。これを用いることで、画像全体における輝度分布のばらつきによって検出精度が低下するという問題が解消される。

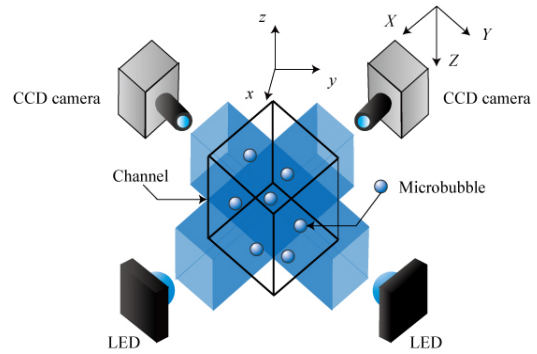


Fig. 1. Schematic of the experimental setup.

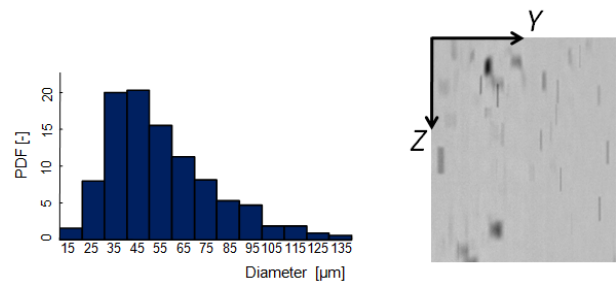


Fig. 2. PDF of microbubble diameter.

Fig. 3. Shadow image.

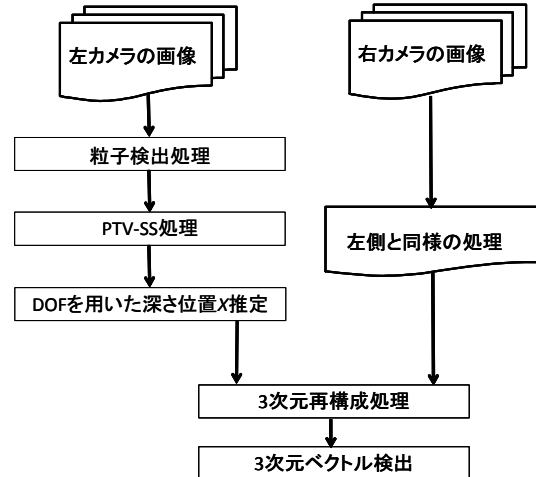


Fig. 4. Flowchart of image processing.

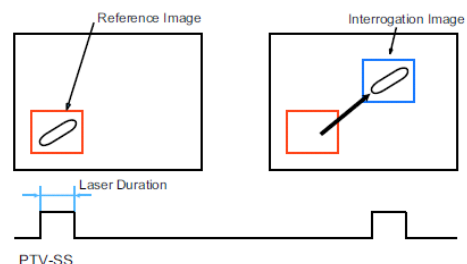


Fig. 5. PTV-SS method^[2].

3.2 PTV-SS 処理

まず流れの方向を把握するために、補助的なベクトル情報を算出することができる PIV(Particle Image Velocimetry)処理を行った。その後、PTV-SS 法を用いて Y-Z 方向の 2 次元速度ベクトルをそれぞれ算出した。Fig. 5 に示すように PTV-SS 法は、撮像デバイスの露光時間を任意に調節して粒子軌跡画像を撮影し、その軌跡長から次の粒子位置を推測する手法である。これにより、効率的に粒子の検出を行うことができ、PTV の計算の速度が向上する上、速度ベクトルの誤検出を防ぐことが可能である。

3.3 DOF を用いた深さ位置 X の推定

本研究では偽粒子像との対応付けを避けるために、3 次元再構成を行う前に DOF を用いて、深さ方向の位置の推定を行った。Fig. 6 に、深さ方向 X 位置の推定の手順を示した。Fig. 6(a) に示すように、それぞれのマイクロバブルの影絵から Y 方向に沿って輝度分布を検出した。次に得られた輝度分布から DOF の検出を行った。Fig. 6(a) に記した円の部分のような、輝度分布の極大点及び極小点付近において、Y と Y+1 間の勾配角 θ を算出した。この θ の値が、 $80^\circ < \theta < 100^\circ$ であれば、Fig. 6(b) に示すように位置 Y は DOF 領域内であるとした^[3]。Fig. 6(a) に示したマイクロバブルの場合、Fig. 6(c) に表すように DOF 領域は 11 pixels と算出された。Fig. 6(d) は、過去の実験で得られた深さ方向 X とマイクロバブルの DOF の関係を表した図である。この図から、Fig. 6(a) のマイクロバブルはおおよそ X 位置 -2 mm から -1 mm または 2 mm から 3 mm の間に存在すると推定することが可能となる。

3.4 3次元再構成処理

2 台のカメラからそれぞれ得られた 2 方向速度成分と深さ方向 X 位置の情報、較正により得られる 3 次元情報を基に 3 方向速度成分目の速度を算出した。Fig. 7 は 2 方向からの対応付けを示した図である。微小時刻後のマイクロバブルに対しても同様の処理を行うことにより 3 次元速度ベクトルを得た。ここで、前処理で得た DOF からの深さ位置 X の情報を用いることで、偽粒子像との誤対応を避けることが可能となった。

4. 計測結果及び考察

本計測システムの実流動場への適用性を確認するために、マイクロバブルを含むバブル上昇流における 3 方向速度計測を行った。Fig. 8 に、5 フレーム分重ね合わせた上昇流内のマイクロバブルの速度ベクトルを示した。これより主流方向(z 方向)に沿って、各マイクロバブルが時系列で追跡できていく様子が見られる。また Fig. 8 より現時点での計測可能領域は $x \times y \times z = 10.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ であることが確認された。平均速度は 10 mm/s であり、標準偏差は 0.8 mm/s となった。このばらつきは Fig. 2 に示すようにマイクロバブル粒径のばらつきによるものが主な原因であると考えられる。

5. 結言

本研究では、投影法によるステレオ PTV-SS 法を提案し、3 次元速度場に適用した。結果、偽粒子像との誤対応を避けることが可能となり、3 次元速度場に対して信頼しうる計測が可能であることが確認された。

参考文献

- [1] G. E. Elsinga et al., 13th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2006.
- [2] H. Tachibana et al., 6th Int. Symp. on Particle Image Velocimetry-PIV05, California, USA, 2005.
- [3] J. Tan and Z. Jin, *Optics Communication*, **281**, 2233-2237, 2008.

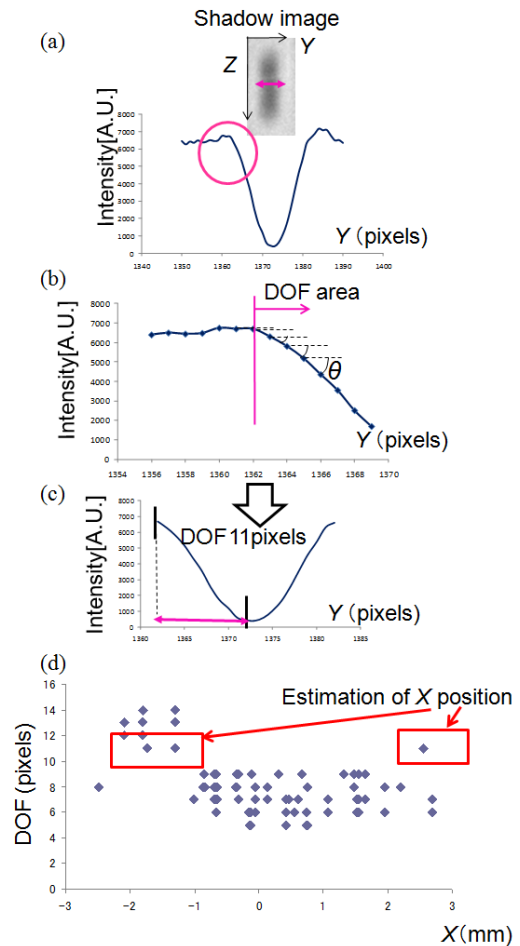


Fig. 6. Flowchart of estimating depth position. (a) Detection of intensity profile of a microbubble. (b),(c) Detection of DOF from the intensity profile. (d) Estimation of depth position, X.

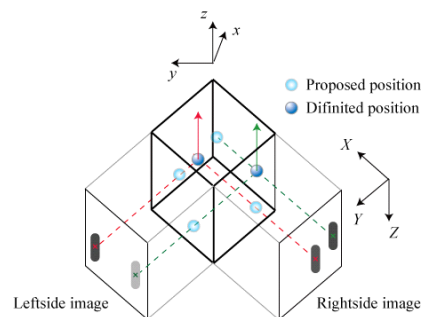


Fig. 7. Matching based on stereo and DOF data.

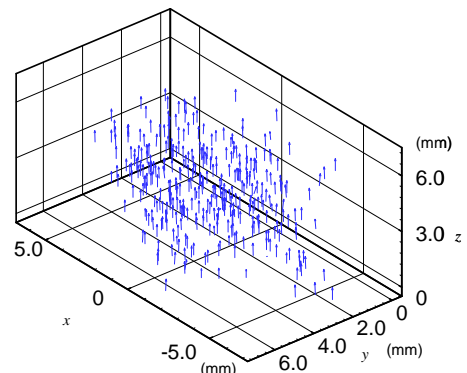


Fig. 8. Three dimensional three components velocity vectors of microbubbles.