

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656118

研究課題名(和文)色収差を利用した3次元共焦点マイクロPIVシステムの開発

研究課題名(英文)Development of Three-dimensional Confocal Micro-PIV System using Chromatic Aberration

研究代表者

大島 まり(Oshima, Marie)

東京大学・大学院情報学環・教授

研究者番号：40242127

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マイクロ流動の新しい3次元計測法の開発を目的とし、共焦点スキャナと色収差を組み合わせた手法を提案した。光学設計においては、市販のレンズの組み合わせのみで16.5ミクロンの色収差量を生成することに成功し、光学配置の検討により、狭帯域ではあるが色収差画像の取得に成功した。さらに、三板式カラーカメラやLDLS(レーザー励起光源ユニット)の導入により、よりノイズが少なく、鮮明な粒子画像の取得を可能としている。流れを計算するPIVアルゴリズムの開発と実装は、現在の色収差画像では精度を保证するには不十分であるため、引き続き開発と検証を進めていく。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have proposed a new three-dimensional measurement method of micro-flow that combines the confocal scanner and a chromatic optics. In optical design, we succeeded in generating a chromatic aberration amount of 16.5 microns only with a combination of lenses commercially available. Then, although under a narrow wavelength range, the chromatic particle image is successfully obtained. In addition, the introduction of the LDLS (Laser-Driven Light Source) and a three-plate color camera enable noise reduction and acquisition of clear particle images. Since the development and implementation of PIV algorithm to calculate the flow velocity can't guarantee the measurement accuracy with the current chromatic particle image that has narrow wavelength range, the development and validation continues in both hardware and software.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：共焦点マイクロPIV 色収差 3次元計測

1. 研究開始当初の背景

μ -TAS (Micro Total Analysis Systems) は化学、生化学、医学、薬学、など多くの分野において、世界中で研究開発が盛んに行われている手のひらサイズのマイクロ流体デバイスである。その多くは、マイクロスケールの流路内で様々な流体や固体、細胞などの混相流をハンドリングし、所望の機能を実現させる試みであるが、その性能を最大限に引き出すためには流路内の流動現象を正確に把握する必要がある。マイクロ PIV は非侵襲でマイクロ流動場の速度計測を行うために最適な手法であるが、光学的制約から 2 次元計測が主であり、3 次元計測は開発途上である。

従来のマイクロスケールにおける 3 次元計測法は大きく分けて 2 種類ある。一つは、カメラを 2 台用いて視差を利用する Stereo micro-PIV (Lindken et al., Exp. Fluids, 2006) もう一つは、粒子の焦点ぼけ画像から深さ位置を特定して粒子を一つずつ追跡する Defocusing micro-PTV (Park et al., Exp. Fluids, 2006) である。前者は 2 台のカメラが必要であることと複雑なキャリブレーション (校正) 作業を要する。また、実体顕微鏡を用いるために高倍率での計測ができない。後者は粒子追跡エラーを防ぐために粒子濃度を高くできず、情報密度が低い。また、焦点ぼけ画像をパターンマッチングする手法のため、パターン取得の作業が必要である事と、粒子サイズや照明のバラつきに対して精度が著しく低下する可能性がある。

そこで、高精度で使いやすく、場の計測が可能な 3 次元マイクロ PIV の開発が期待されている。

2. 研究の目的

本研究では、共焦点マイクロ PIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定法) の欠点であった 3 次元計測に向けて、クロマティック (色収差) レンズを利用した共焦点光学系とカラーハイスピードカメラを組み合わせ、新しい 3 次元マイクロ速度場計測法の開発を行う。

3. 研究の方法

本手法は、色収差を用いて静止固体表面の 3 次元形状を測定する手法に着想を得ており、その原理 (Chromatic Confocal Sensing) を図 1 に示す。共焦点光学系における対物レンズの位置に、色収差を持つレンズ (Chromatic lens) を置く。照明に白色光を落射させると、色収差レンズによって波長ごとに分離され、z 軸上で異なる高さに集光する。対象物からの反射光はビームスプリッターを介して分光器へ導かれるが、このとき、共焦点の原理より、対象物表面のちょうどその高さで反射した波長の光のみがピンホールを通る。それをスペクトル分析することで光軸における対象物表面の高さを計測できる。

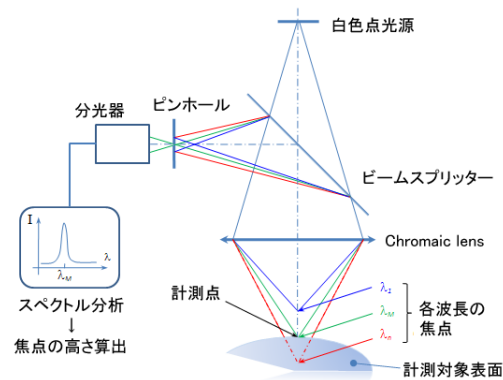


図 1 色収差共焦点 3 次元形状測定法

上記の原理を応用した本手法においては、共焦点光学系に高速共焦点スキャナを用い、分光器の代わりにカラーハイスピードカメラを置く。これに色収差を持つレンズを組み合わせ、流路に流したトレーサ粒子を撮影すると、粒子の高さ位置に応じて波長の異なる散乱光が観察できると考えられる。つまり、静止した 3 次元物体の代わりに動く粒子を用い、高速共焦点スキャナと色収差の特性を併用することで流動場の面スキャンと粒子の深さ情報の同時取得が可能となり、3 次元マイクロ PIV 計測を可能にしている点が斬新なアイデアである。この実現には機器の単なる組み合わせだけでなく、高度な光学設計とカラー画像の新たな解析アルゴリズム開発に大きなチャレンジ性を有している。

研究期間を大きく 2 つのステージに分けて研究を遂行する。ステージ 1 では光学設計と PIV アルゴリズムの構築に充てる。ステージ 2 では 3 次元マイクロ流動の計測と精度検証を行う。具体的な研究の手順を以下に示す。

(1) 光源、光学素子、カメラ、粒子の選定
光源は十分な輝度と波長幅を持つ白色光、もしくは必要に応じて多波長レーザなど他の光源の使用も検討する。色収差を発生させる光学素子は十分な色収差量を発生しつつ、他の収差を極力抑えなければならない。カメラは感度特性やノイズレベルを重視し、トレーサ粒子は、基本的に波長シフトを起こさない非蛍光粒子を使用する。

(2) 光学配置の検討
色収差を発生させる光学素子は、基本的には共焦点スキャナと対物レンズの間になると考えられるが、物理的に光学配置が難しい場合は顕微鏡を使わず独自に光路を組むことも視野に入れる。

(3) PIV アルゴリズムの開発
通常モノクロ PIV と異なり、深さに依存した色情報が加わるため、新たなアルゴリズムを開発する。また、サンプル画像を用いた検証も行う。

(4) 3次元マイクロ流動の計測

理論解と比較できる傾斜流路や、バックステップ流れなどを検討し、精度検証を行う。

4. 研究成果

(1) 光源、光学素子、カメラ、粒子の選定

白色光源としては共焦点スキャナの光学設計に合致できる、輝点の小さいLDLS(レーザ励起光源ユニット)を導入し、他の白色光源に比べて理想的な照明とした。色収差光学素子は、光学設計ソフトウェアを用いて市販のレンズの組み合わせを検討し、可視光の範囲内(455nm~615nm)において16.5 μm の色収差量を発生させることに成功した(図2)。カメラについては、一般的な単板カラーフィルタ式では偽色の発生や各色輝度の定量性が不十分であることが判明し、3色が独立した3板式を採用した。トレーサ粒子は同じ径でも散乱光の強い銀コーティング粒子、もしくは酸化チタン粒子が比較的鮮明な画像を得られている。

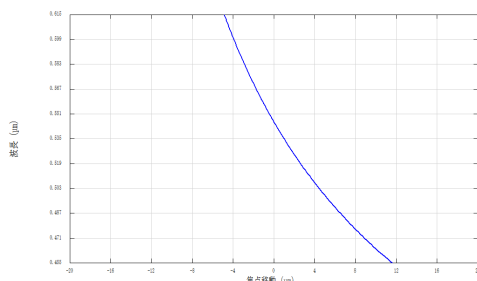


図2 色収差光学素子の収差特性

(2) 光学配置の検討

選定した色収差光学素子を共焦点スキャナと対物レンズの間に挿入することで、色収差を発生させつつ対物レンズの交換による倍率の変更を容易にした。

図1におけるビームプリッター(BS)に相当する光学素子(つまり、励起光と反射した散乱光を分離する素子)について、当初は共焦点スキャナ内のダイクロミックミラーの位置に石英BSを配置したが、カメラに粒子の散乱光以外の反射光が映り込んでしまい、計測が非常に困難であることが判明した。そこで現時点では、石英BSに代わり、偏光BSやマルチバンドBSを用いるなどして粒子像のみをより鮮明に取得する試みを続けている。

同時に、励起光を共焦点光学系に通さず、共焦点光学系と励起光の焦点を意図的にずらすことによって反射光の映り込みを防ぐ手法を試し、図3のように狭帯域BSの波長範囲内ではあるが、色収差粒子画像を得ることに成功した。

(3) PIV アルゴリズムの開発

図3の色収差粒子画像に対し、PIVアルゴリズムの開発を進めている。現時点では数十nmの色収差幅しか撮像できていないため、z

方向速度算出のダイナミックレンジが低く、また、使用した流路もマイクロチャンネルではなくランダムな流れのあるチャンバであるため、定量的な検証はまだできていない。

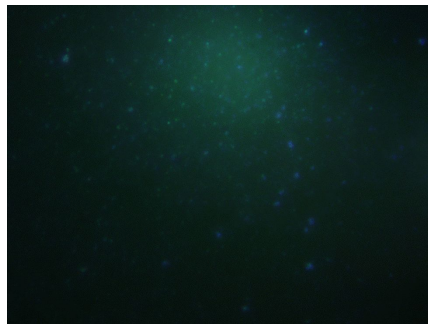


図3 色収差粒子画像の例

(4) 3次元マイクロ流動の計測

流路は作成済みであり、現在、計測と検証を行っている段階である。

本研究期間内では特注の光学素子(偏光BS、LDLS専用光ファイバ)の作成が予算範囲を超えていることと、時間を要することから、理想的な色収差画像を取得することはできなかったが、限定された波長範囲内では十分に実現可能性を示すことができた。

今後さらに光学系とアルゴリズムの改良を重ね、特許の出願を視野に入れた定量的なデータの整理を進めていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

M. Oishi, K. Utsubo, H. Kinoshita, T. Fujii, M. Oshima, Continuous and Simultaneous Measurement of the Tank-Treading Motion of Red Blood Cells and Surrounding Flow Using Translational Confocal Micro-Particle Image Velocimetry (Micro-PIV) with Sub-Micron Resolution, Measurement Science and Technology, 査読有, Vol.23 (2012), 035301, pp.1-18.

X-B. Li, F-C. Li, J-C. Yang, H. Kinoshita, M. Oishi and M. Oshima, Study on the mechanism of droplet formation in T-junction microchannel, Chemical Engineering Science, 査読有, Vol.69 (2012), pp.340-351.

[学会発表](計5件)

松浦佑樹, 大石正道, 向井信彦, 大島まり, 張英夏, 混相流断層画像を基にした液滴の3次元形状の再構築, 映像表現&コンピュータグラフィックス研究会, 久

留米高専，福岡 (2013.11.25)

M. Oishi, H. Kinoshita, T. Fujii and M. Oshima, MEASUREMENT OF THREE DIMENSIONAL FLOW STRUCTURE DURING MICRODROPLET FORMATION USING PHASE-LOCKED MULTICOLOR CONFOCAL MICRO-PIV, The 17th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2013), Freiburg, Germany (2013.10.29).

C. Li, M. Oishi, H. Kinoshita, T. Fujii, M. Oshima, Lateral Migration and Deformation of Single Red Blood Cell, 第 41 回 可視化情報シンポジウム, 工学院大学, 東京 (2013.7.16).

M. Oishi, H. Kinoshita, T. Fujii, M. Oshima, Phase-locked confocal micro-PIV measurement of three dimensional flow structure of transient droplet formation mechanism in T-shaped micro junction, 65th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (APS-DFD 2012), San Diego, CA, USA (2012.11.20).

M. Oshima, M. Oishi, H. Kinoshita, T. Fujii, Visualization and Measurement of Flow-Induced Dynamic Motion of Red Blood Cells Using Tracking Confocal Micro-PIV System, ASME 2012 Summer Bioengineering Conference (SBC2012), Puerto Rico, USA (2012.6.22).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.oshimalab.iis.u-tokyo.ac.jp/english/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大島 まり (OSHIMA, Marie)

東京大学・大学院情報学環・教授

研究者番号： 40242127

(2) 研究分担者

大石 正道 (OISHI, Masamichi)

東京大学・生産技術研究所・技術専門職員

研究者番号： 70396901

(3) 連携研究者

なし