

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760144

研究課題名(和文) 高速共焦点スキャナを用いた複雑な3次元マイクロ構造のデジタル光造形と混相流動計測

研究課題名(英文) Development of Three-dimensional Micro- Rapid Prototyping Technique using Highspeed Confocal Scanner and Flow Measurement of Micro- Multiphase Flow

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、赤血球のマイクロ挙動解明に向けたモデル実験に用いる、3次元特殊形状マイクロビーズの造形を念頭におき、マイクロ流路内に複雑な3次元形状の構造物を高速造形する手法の開発を目的とし、高速共焦点スキャナとDMD(デジタルミラーデバイス)を組み合わせた光造形法を提案した。光学設計においては、照度むらを無くすための光学設計に特に留意し、空間フィルタやビームホモジナイザを導入することにより、全域に渡っての輝度差を10%以内に抑えた。共焦点効果による硬化スポットは、理論的な共焦点深度よりも厚くなる傾向がみられるが、その厚みはレーザーの強度を抑え、露光時間を長めに取ることで薄くできる可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：In this study, we develop a rapid prototyping technique of a complex three-dimensional shape in a microchannel that in mind for use in the model experiment for the behavior elucidation of the red blood cells. We have proposed a three-dimensional lithography using DMD (digital mirror device) in combination with high-speed confocal scanner. The optical design to eliminate the illumination non-uniformity is particularly concerned by introducing a beam homogenizer and spatial filter, and it reduces to 10% the difference in brightness over the entire region. Since the curing spot of confocal effect is tend to be thicker than the theoretical confocal depths, the possibility of thinner polymerization is indicated by decreasing the intensity of the laser and a longer exposure time.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：マイクロ光造形 共焦点スキャナ デジタルミラーデバイス マイクロ混相流

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な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、流路の設計・製作や特殊形状のマイクロビーズ生成には試行錯誤が繰り返されている。

研究代表者は過去に赤血球のマイクロ流動挙動の解明のために、血球を模擬したマイクロビーズをマイクロ流体デバイスで作成し、共焦点マイクロ PIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定法) により、周囲流との相互作用を計測してきた (大石ら、科学研究費補助金: 若手(B)21760121、MicroTAS2010)。しかし、血球の両凹円盤形状のような複雑な3次元構造は作成するためには、従来の液滴硬化法では表面力優位のマイクロスケールにおいて硬化する前の液滴形状をコントロールすることが非常に難しく、また、パターン露光法で原理上、作成できるビーズはマスクに描かれた2次元的な形状に限られてしまう。

この不具合を解消する手段として考えられるのが、丸尾らが開発している内部硬化型マイクロ光造形法である (Maruo, et. Al., Appl. Phys. Lett., 2000)。これは、液体樹脂の内部にレーザー光を集光してピンポイントで硬化させ、その集光スポットをガルバノミラーで走査させることで3次元構造を形成する。ただしこの手法は、分解能が高い反面、スポットの走査のために一つの構造物を作成するのに数時間を要する場合があるだけでなく、装置制御の難しさや、装置の価格などの点で改善の余地がある。

2. 研究の目的

本研究では、赤血球のマイクロ挙動解明に向けたモデル実験に用いる、3次元特殊形状マイクロビーズの造形を念頭においた、マイクロ流路内に複雑な3次元形状の構造物を高速造形する手法の開発を目的とする。

本申請で開発する高速共焦点スキャナと DMD (デジタルミラーデバイス) を組み合わせた光造形法は、従来の造形手法とは一線を画しており、光学的にも理に適った理想的かつ効率的な手法である。本手法で作成する赤血球モデルの混相流計測を行うとともに、本手法が持つ高速性、製作精度、生産性、造形できる形状および機能の自由度の高さといったアドバンテージを生かし、マイクロ流体デバイスの開発手法において強力な造形ツールとして提案する。

3. 研究の方法

上記の背景から、申請者はマイクロ流動の可視化計測用の共焦点マイクロ PIV システムをマイクロ光造形法に応用する事を着想

した。システムの核をなす高速共焦点スキャナは、通常の対物レンズのみの光路に比べて非常に薄い被写界深度を持ち、さらに、マイクロレンズアレイによる集光により、焦点面以外の深さ領域には光が集中しない光学系となっている。これに加え、近年プロジェクタなどに用いられている DMD およびピエゾ z 軸ステージを組み合わせる事で、流路内に複雑な3次元形状をマスクレスで高速造形するシステムを構築する。具体的な研究の手順を以下に示す。

(1) 光源および樹脂の選定

本研究の核となる装置は共焦点スキャナであり、これの設計波長の範囲でできるだけ空間分解能の高いシステムを構築することが要求される。また、選定された光源に対して、効率よく硬化する樹脂を選定する。

(2) 光学系の構築

光源の決定後、その光を最終的に流路内の硬化させたい位置に導く光学系を構築する。特に留意すべき点は、2次元平面内における均一性と、z方向分解能に直結する共焦点深度の検討である。

(3) 硬化条件の割り出し

光学系を実際に組んだ状態にて、光量と硬化物の形状の関係を調査する。特にz方向の硬化物の厚みが共焦点効果により薄くできることを立証する。

その後、

(4) 3次元構造物生成のための機器同期

平面内の硬化を確認したのち、3次元マイクロ光造形の実現のために DMD とピエゾを同期させる制御手法を開発する。

(5) 応用検討

赤血球などの形状を模擬したビーズを作成し、流動挙動の解明のためにマイクロ PIV による可視化計測を行う。また、ビーズにとどまらず、システムの応用先として流路内に特殊な機能を付加できるような3次元構造物の構築について考案する。

4. 研究成果

(1) 光源および樹脂の選定

光源は白色光を含めいくつかテストした結果、共焦点スキャナの設計波長の幅のうち短波長の UV レーザとした。波長幅が狭いレーザを使うことで共焦点効果を最大限に高めることができ、短波長の UV 光は焦点のスポットサイズも理論的には可視光域より小さくできる利点がある。樹脂は紫外線硬化タイプの中でも、光源の波長に吸収のピークがあり、マイクロチャンネルに流しやすい低粘度のものを選定した。

(2) 光学系の構築

レーザーは光線の中心で一番強度が高いガウシアンプロファイルを持っており、これを拡大・平行化しさらに均一な強度分布とするために、空間フィルタおよびビームホモジナイザを導入した。均一化したレーザー光はDMDに反射させ、共焦点スキャナの中間光路に直接導入する方式を採用し、パターンが共焦点光学系を通過して対物レンズの焦点に結像することが確認できた(図1)。ただし、本方式は非常に緻密な光路のハンドリングを要し、また光路長も長くなってしまいうため、装置の移動などが容易にはできない。将来的にはやはり光ファイバで共焦点スキャナ内に導入し、共焦点スキャナ内にDMDを設置する一体型が望ましいと考える。

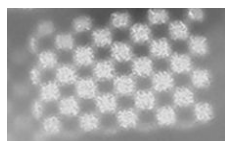


図1 DMDによるパターン反射

(3) 硬化条件の割り出し

本装置を用いて流路空間内に充填したUV硬化樹脂にパターン光を照射する実験を、条件を変えて数多く試行した。硬化物の厚さは、対物レンズを含む光学系の光学特性とレーザー強度、照射時間の主に3つのパラメータに依存し、対物レンズは同倍率で比較した場合、集光力の高い高NAレンズの方が共焦点深度に近い厚みを実現できることが分かった。また、流路の深い位置ほどレーザー強度を抑え、照射時間を長めに取ることで、焦点面以外の硬化を防ぐことができる。

最終的に得られた2次元硬化物の厚さは共焦点スキャナによってした結果、共焦点深度の4~5倍の厚さを有しているものの、共焦点無しに比べると約半分くらいにまで薄くすることができている(図2)

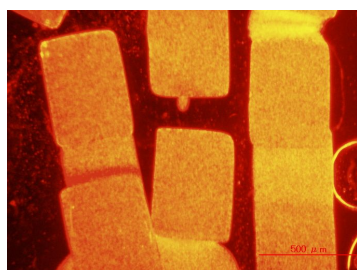
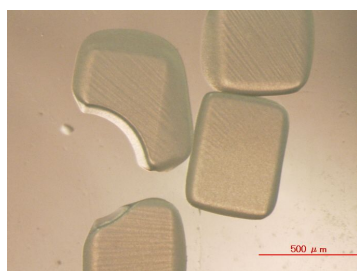


図2 硬化物の例

(4) 3次元構造物生成のための機器同期

DMDとピエゾを一括して制御するために、LabViewを用いたプログラムを作成した。さらにz方向の移動中や位置決め中の硬化を防ぐために電磁シャッターを組み込み、より造形エラーを少なくできる構成とした。

(5) 応用検討

現時点では、円形パターンの照射により血球を模した円盤形状の硬化物を生成することに成功しているが、流路の中央を露光すると硬化しながら比重の変化により沈んでしまったり、壁を支持として硬化すると壁から剥離させることが難しいなどの欠点が明らかになっている。今後、硬化の高速化や壁面剥離性の改善などを試みる。

流路内にレンズのような3次元構造物を構築する案については、現時点ではz方向の分解能が不足しており、滑らかな構造物を作ることは難しい。z方向分解能の向上と、LabViewによる高度な硬化制御などにより改善を試みている。

また、本研究期間内では特許の出願にこぎつけることができなかったが、現在、出願を視野に入れて定量的なデータの整理を進めている。

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3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.

M. Oishi, H. Kinoshita, T. Fujii, M. Oshima, Simultaneous Measurement of Internal and Surrounding Flows of a Moving Droplet Using Multicolour Confocal Micro-Particle Image Velocimetry (micro-PIV), Measurement Science and Technology, 査読有, Vol.22 (2011), 105401, pp.1-13.

[学会発表](計4件)

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).

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).

M. Oishi, K. Utsubo, H. Kinoshita, T. Fujii, M. Oshima, Simultaneous Measurement of Tank-Treading Motion of Red Blood Cell and Surrounding Flow using Target-Tracking Confocal Micro-PIV, The 11th Asian Symposium on Visualization (ASV-11), June 6, Niigata, Japan (2011.6.6).

〔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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし