ラゲールガウスビームを用いた光駆動マイクロマシンの開発

Development of optically driven micromachines using a Laguerre-Gaussian beam

学 齊藤洋平 (横国大) ○正 丸尾昭二 (横国大)

*Youhei Saito and Shoji MARUO, Yokohama National University

Recently, Laguerre-Gaussian beam (L. G. beam) attracts interest because of its ability to generate orbital angular momentum. The angular momentum enables to rotate multiple microparticles simultaneously just by irradiating the laser beam. In this study, we developed an optical manipulation system using a L. G. beam as a driving source. In our system, a spatial light modulator is used to convert from Hermite-Gaussian beam (H. G. beam) into L. G. beam by giving azimuth direction phase distribution. By using this system, we first examined the driving performance of multiple microparticles by changing the conditions of L. G. beams. Next, we fabricated some types of microrotors driven by the L. G. beam by two-photon microstereolithography. Furthermore, we improved driving performance of the microrotors by changing the shape of rotor. Finally, we made prototype of a viscous micropump driven by the L. G. Beam.

Key Words: Laguerre-Gaussian beam, optical manipulation, two-photon microstereolithography

1. 緒言

近年、指先サイズの微小な流体回路を用いて、化学分析や細胞分析などを行なうバイオチップ技術が盛んに研究されている。バイオチップを用いることによって、使用する試料・試薬の低減、高精度な分析が可能などの利点がある。しかしながら、現在、利用されているバイオチップの多くは、流体搬送手段として、外部シリンジポンプを利用している。このため、システム全体の小型化が困難である。

そこで我々は、2光子マイクロ光造形法[1]により、流路内部に各種流体素子を作製し、光トラッピング技術により非接触遠隔駆動させる光駆動バイオチップの開発を行っている。我々は、現在までに、ローブマイクロポンプ[2]や粘性を利用したディスクマイクロポンプ[3]などを開発してきた。しかし、従来の光トラッピング技術では、複数素子の同時駆動が困難、レーザー光の走査が必要といった難点がある。ごく最近、この困難解決法の1つとして、回転素子に形状異方性をもたせて、光照射で高速回転するヘリカルロータポンプを提案・開発した[4]。

一方、本研究では、ラゲールガウスビーム (L. G. beam : Laguerre-Gaussian beam) という特殊な光を利用した新しい光マニピュレーション技術を用いて、各種マイクロマシンを高効率に駆動する方法を検討した。まず、L. G. beamによる、光駆動特性を実験的に明らかにした。さらに、L. G. beamによって、回転駆動する回転体の設計・試作を行なった。さらに、ローターの形状を改良することにより、約15倍の回転数を得ることに成功した。最後に、L. G. beamを用いたマイクロマシンとして、粘性ポンプを作製した。

2. L. G. Beamの原理・特徴

L. G. beamとは、Fig.1に示すように、エルミートガウスビーム (H. G. beam : Hermite-Gaussian beam) の波面に対して円周方向に 2π の整数倍の位相分布を与えたビームである。光の位相において、0 と 2π は等価であるため、等位相面は連続したらせん形状となる。また、L. G. beamの光軸上では、0~ 2π の全ての位相を持つことになるため、光軸は位相特異点となり、その光強度が0となる。このため、焦点面でドーナツ状の光強度分布が得られる。

Fig.1 : Schematic of a Laguerre-Gaussian beam
(a) T. C. : 1, (b) T. C. : 2

このL. G. beamの理論式はヘルムホルツ方程式を円筒座標系で変数分離することによって、式(1)のように得られる[5]。

$$E_{lp}(r, \phi, z) = C_{lp} \exp[-ik(\frac{r^2}{2R})] \exp[-\frac{r^2}{w^2}] \times \exp[-i(2p+l+1)\psi] \exp[-il\phi] \quad (1) \\ \times (-1)^p (\frac{\sqrt{2}r}{w})^l L_p^l(\frac{2r^2}{w^2})$$

ここで、 w はビーム径、 k は波数、 R は曲率半径、 ψ はグイ位相、 L_p^l はラゲール多項式である。この式における、 $\exp[-il\phi]$ の項が円周方向の位相分布を表わしており、 l はらせんの条数を表わしており、トポロジカルチャージ (T. C. : Topological Charge) と呼ばれる。式(1)から、ポインティングベクトルを求めると式(2)のようになる。

$$S(r, \phi, z) = C \frac{z_r}{z_r^2 + z^2} [\frac{zr}{z_r^2 + z^2} \hat{r} + \frac{1}{kr} \hat{\phi} + \hat{z}] \quad (2)$$

ここで、 z_r はレイリー長である。ポインティングベクトル S と光の運動量 p との間には式(3)のような関係がある。

$$p = \frac{S}{c^2} \quad (3)$$

ここで、 c は光速である。光速はスカラー定数なので、ポインティングベクトルの向きが光の運動量の向きと一致する。よって、L. G. beamの運動量は円周方向成分を持つ。本研究では、この円周方向の運動量（軌道角運動量）を利用した光マニピュレーション技術の開発を目指す。

3. L. G. Beamを用いた光マニピュレーションシステム

Fig.2に、本研究で用いる光マニピュレーションシステムの概要図を示す。このシステムでは、レーザー（ $\lambda=532[\text{nm}]$ ）から出射したH. G. beamは空間光変調器（SLM：Spatial Light Modulator）に入射される。このSLMは、内部に液晶が入っており、入力した画像データに対応する任意の位相分布を与えることができる。このとき、SLMに円周方向に位相が連続的に変化するホログラムを入力することによって、L. G. beamが形成される。形成されたL. G. beamは、結像レンズによって集光され、縮小写像系を通過し、対物レンズ（ $\times 60$, NA 1.45）で集光されている。その結果、焦点面にドーナツ状の光強度分布が形成される。

4. L. G. beamの特性調査

4.1 L. G. beam形成ホログラム

L. G. beamによる光マニピュレーションには、Fig.2に示した光学システムを利用する。ただし、SLMに対して円周方向の位相分布を与えるだけでは、所望のリング状の光分布のみを焦点面に形成することができない。これは、位相変調を受けない光である0次回折光が原因である。0次回折光が含まれると、リングの中心に焦点ができてしまい、光マニピュレーションの妨げとなる。そこで、フレネルレンズの位相重ね合わせを行なう。フレネルレンズは、レンズを挿入した場合と同様の位相変調を与えるホログラムであり、集光点を光軸方向に移動させることができる。よって、円周方向の位相分布にフレネルレンズの位相分布を重ね合わせることで、0次回折光とリング状光分布の形成面をずらすことができる。このフレネルレンズの位相重ね合わせを行なったホログラムの例をFig.3に示す。

Fig.2 : Optical manipulation system using L. G. beam

Fig.3 : Input holograms with different T. C.

(a) T. C. : 16, (b) T. C. : 32, (c) T. C. : 64

Fig.4 : Light intensity at the focal plane

(a) T. C. : 16 (b) T. C. : 32 (c) T. C. : 64

Fig.5 : Microparticles rotated by a L. G. beam with T. C. of 16

4.2 T. C. によるビーム形状の変化

これらのホログラムを入力して得られた焦点面の光強度をFig.4に示す。H. G. beamからL. G. beamへ正しく変換されていることが確認できた。また、T. C. を大きくすることにより、リングの半径が大きくなることもわかった。

4.3 L. G. beamによる微粒子駆動実験

駆動特性の評価実験として、ポリスチレン微粒子（直径 $1[\mu\text{m}]$ ）を用いた光マニピュレーション実験を行なった。実験では、純水中に分散させたポリスチレン微粒子を、スぺーサを挟んだ2枚のカバーガラスの間に注入した。この微粒子を分散させた水にT. C.の異なるL. G. beamを入射させて、微粒子の捕捉と駆動を試みた。その結果、Fig.5に示すように、円周上に捕捉された微粒子が反時計周りに回転する様子が観察された。また、回転半径と回転速度がT. C. に依存して変化することがわかった。

Fig.6に、T. C. を8, 16, 32, 64, 128と変化したときの微粒子の回転半径を測定した結果を示す。この結果から、T. C. と微粒子の回転半径は比例関係にあることがわかった。

また、高速カメラ（FASTCAM-Net 500 : PHOTRON）を用いて微粒子の回転を撮影し、回転速度を計測した。この結果をFig.7に示す。

Fig. 6 : Dependence of rotation radius on T. C.

Fig. 7 : Dependence of rotation speed on T. C.

Fig. 8 : Dependence of rotation speed on laser power

Fig.7より、この実験では、微粒子の回転速度はT. C. 16のときが最大となることがわかった。また、レーザーパワーと微粒子の回転速度の関係を調べた。この結果をFig.8に示す。Fig.8より、レーザーパワーが増えると線形的に回転数も増加することがわかった。

5. L. G. beamによるマイクロ回転素子の駆動

2光子マイクロ光造形法を用いて、マイクロ回転素子を試作し、駆動実験を行なった。Fig.7に示したL. G. beamによる微粒子駆動実験の結果から、T. C. が16のとき、微粒子の回転速度が最も速くなった。そこで、このときの回転半径に適合した半径を持つ回転体を設計した。設計した形状をFig.9に示す。

Fig.9(a)は、半径7.5[μm]のディスクの外周に45本のピン（直径1[μm]、高さ1[μm]）をつけたローターである。Fig.9(b)は、18枚の羽根を持つローター（半径7.5[μm]）である。Fig.10に、作製したローターのSEM画像を示す。

L. G. beam (T. C. : 16) を用いてこれらの回転素子の駆動実験を行なった。回転駆動時の様子をFig.11に示す。実際に、ピン付きディスクおよび羽根車の回転駆動を確認することができた。このときの回転数はピン型で1.5[rpm]、ブレード型で16.2[rpm]であった。

Fig. 9 : Schematics of microrotors
(a) disk with pins, (b) rotor with blades Fig. 10 : SEM images of microrotors
(a) disk with pins, (b) rotor with blades Fig. 11 : Microrotors driven by a L. G. beam
(a) disk with pins, (b) rotor with blades

6. 高速回転ローターの開発

前章より、ピン型とブレード型のローターでは、回転数に10倍程度の差が出ることがわかった。このことから、大きな光トルクを得やすい形状があると考えられる。そこで、ブレード型ローターの厚さを変更し、回転数が変化するか調べた。この結果をFig.12に示す。Fig.12より、ローターの厚みが増えると回転数は徐々に高くなり、ローター厚さが $7.5[\mu\text{m}]$ のとき約15倍の回転数 $240[\text{rpm}]$ が得られた。この厚さ $7.5[\mu\text{m}]$ のローターの造形物のSEM画像、駆動時の様子をFig.13に示す。

7. L. G. beamを用いた粘性ポンプの作製

次に、L. G. beamを用いた光駆動マイクロマシンとして粘性ポンプを作製した。このポンプは、Fig.14に示すように、U字型の流路の湾曲部にローターを設置したものである。このとき、ローターを回転駆動させると、ローターの周りでは粘性力が発生する。この粘性力によって、液体を搬送する。

この粘性ポンプでは、ローターの回転により発生する粘性力が非常に重要である。そこで、安定した粘性力を発生させるため、ローターの外周部に壁面を付与した(Fig.15)。

このローターを流路内部に設置し、 $500[\text{mW}]$ のL. G. beamを照射したところ、ローターは $38.5[\text{rpm}]$ で駆動した(Fig.16)。さらに、流れを可視化するために散布した $1[\mu\text{m}]$ のジルコン微粒子が約 $3[\mu\text{m/s}]$ で搬送されることを確認した。

Fig.12 : Dependence of rotation speed on thickness of rotor

Fig.13 : High-speed driven rotor
(a) SEM Image, (b) Schematic of rotation

Fig.14 : Schematic of viscous pump

Fig.15 : SEM Image of high speed driven rotor with a casing

Fig.16 : Viscous micropump driven by a L. G. Beam

8. 結論

光駆動マイクロマシンの新しい駆動法として、L. G. beamを用いた光マニピュレーションシステムを開発した。この新システムは、従来のガルバノミラー方式と異なり、光の軌道角運動量を利用することによりレーザー走査なしで回転素子を駆動できる。実際に開発したシステムを用いて、複数微粒子の駆動実験を行ない、L. G. beamによる光マニピュレーションの特性を明らかにした。さらに、2光子マイクロ光造形法により、マイクロ回転素子を試作し、駆動させることに成功した。ローターの形状を変更することにより、回転数を約15倍させることに成功した。最後に、L. G. beamを用いた粘性ポンプを作製し、 $1[\mu\text{m}]$ のジルコン微粒子を約 $3[\mu\text{m/s}]$ で搬送することに成功した。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（特定領域 バイオ操作）および科学技術振興機構さがけ「ナノ製造技術の探索と展開」の支援を受けて行われた。

文献

- [1] S. Maruo, O. Nakamura and S. Kawata, "Three-dimensional microfabrication with two-photon absorbed photopolymerization," Optics Letters 22, no.2, 132-134 (1997).
- [2] S. Maruo and H. Inoue, "Optically driven micropump produced by three-dimensional two-photon microfabrication," Applied Physics Letters 89, no. 14, Art No. 144101 (2006)
- [3] 井上宏之, 丸尾昭二, "光駆動ディスクマイクロポンプの提案・開発" ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 講演論文集 (2007).
- [4] 高浦彰, 丸尾昭二, "光駆動ヘリカルロータポンプの開発," 第25回日本ロボット学会学術講演会 3F24 (2007) .
- [5] M. J. Padgett, L. Allen "The Poynting vector in La-guerre-Gaussian laser modes" Optics Communications, 121, 36-40 (1995)