

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：11101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K18829

研究課題名（和文）軸対称偏光素子を利用したマイクロマシンの光回転駆動

研究課題名（英文）Optical rotational drive of microscopic objects using axially symmetric polarization elements

研究代表者

岡 和彦（OKA, Kazuhiko）

弘前大学・理工学研究科・教授

研究者番号：00194324

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：微小物体をレーザートラッピングによって回転駆動する新たな方法として軸対称偏光素子によって生成されたリング状光格子を用いる方法について研究を行った。まず、顕微鏡光学系に内在する波面収差がこの方法における回転制御の不安定性の原因となることを理論解析により見出した。そして、この結果に基づいて実験系を改良し、微小物体の安定的な回転駆動を実証した。さらに、光造形を用いて微小回転子を作成し、回転制御を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の微細加工技術の急速な進展に伴い、多種多様なマイクロマシンが作られるようになってきた。それらの応用にはマイクロマシンを非接触で駆動する動力源の開発が重要となる。本研究ではそのような用途への応用を目指して、軸対称偏光素子によって生成されたリング状光格子という新たな種類の光を用いた微小物体の遠隔回転駆動法を提案し、さらにその基本特性の向上を行った。この方法が完成すれば、簡便でかつ適応的な光駆動源として利用できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：A novel laser-trapping method for mechanical rotational drive of microscopic objects was developed by use of a ring-shaped optical lattice generated by axially symmetric polarization elements. Theoretical analysis of the optical system showed that the wavefront aberrations in the microscopic optical system can be the cause of instability of the rotational control. The stable rotational control of microscopic object was demonstrated by use of the optical system improved based on the analysis.

研究分野：工学

キーワード：リング状光格子 軸対称偏光素子 光駆動

1. 研究開始当初の背景

近年、微細加工技術が急速に進展し、それに伴って多種多様なマイクロマシンが作られるようになってきた。これに伴い、その駆動方法についても様々な研究が進められている。そのひとつに、レーザートラッピング技術に基づく光駆動がある。光駆動には、マイクロマシンを遠隔から非接触で駆動できるという特徴があり、たとえば電極などが設置しにくい液体中のマイクロポンプの駆動などにも利用できる。また、動力源(光源)と駆動対象(マイクロポンプなど)を分離できるため、ディスプレイなバイオチップなどへの応用も期待されている。このような背景のもとで、これまでに様々な光駆動法が研究されてきた。だが、まだ十分に発展しているとは言い難いのが実情である。たとえば、代表的なレーザートラッピング技術の一つとして計算機プログラムを空間光変調器に表示する方法があり、細胞操作などの用途には近年広く用いられるようになってきた。だが、用途がマイクロマシンの駆動源のような機械制御の場合には適応的な速度制御ができる簡便な方法が必要であり、現用の光駆動法だけですべての用途に十分対応できるとは必ずしも言える状況ではなかった。光駆動には遠隔駆動ゆえの複雑さや制限があり、これがこの駆動法の汎用性を制約する要因となっていたのである。

一方で筆者らのグループでは、リング状光格子と呼ばれる特殊なレーザー光を軸対称な偏光光学素子を用いて生成することに成功していた[1]。そこで筆者らはこのリング状光格子を用いて、主に微小な部品の回転駆動に適した新たな光駆動法の実現を目指すこととした。

2. 研究の目的

本研究で提案する光駆動法で鍵となるのは、軸対称な偏光光学素子を用いて生成された「リング状光格子」と呼ばれる特殊なレーザー光である。このリング状光格子の断面には、図1のように環状に配置された複数の光スポットが存在する。さらにこの光格子は、偏光を変調する光学系を用いて中心軸のまわりに連続的に回転させることができる。本研究ではこのリング状光格子を顕微鏡下で微小物体に照射して、新たな遠隔回転駆動方法として実現することを目的とし、その基本特性を調べるとともに性能向上を図った。

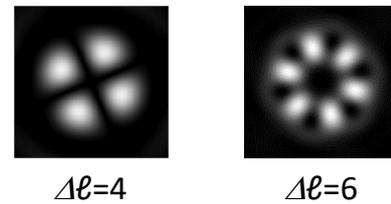


図1 リング状光格子

3. 研究の方法

本研究で鍵となるリング状光格子生成の光学系の概要を図2に示す。レーザー光源から射出された光は、まず、偏光子P、電気光学変調器EOM、1/4波長板QWPからなる偏光変調器PMを透過する。このPMを射出した光は、同じ強度の左回り円偏光LCPと右回り円偏光RCPの重ね合わせとなっており、両者の位相差はEOMで任意に制御できる。次にこの光を、軸対称偏光素子を利用したVortex Converter (VC)を透過させ、対物レンズMOで集光する。VCは、入射したLCPとRCPを、それぞれ異なるトポロジカルチャージ  $\ell_1$ ,  $\ell_2$  を持つ光渦に変換する。なお光渦とはらせん状の波面を持つ光波であり、らせんの中心に光強度が0となる位相特異点をもつ。そしてトポロジカルチャージとは、位相特異点の周りで位相が  $2\pi$  の何倍回っているかを示す指数である。VCによって生成された2つの光渦はMOの後焦点面で互いに干渉し、リング状光格子が作られる。このリング状光格子には、2つの光渦のトポロジカルチャージの差  $\Delta\ell = \ell_1 - \ell_2$  に等しい数の明点が生ずる。そしてこのリング状光格子の方位(回転角)は、PM中のEOMで与えられるLCPとRCPの間の位相差によって任意に制御することができる。したがって、このEOMにかける電圧によって光格子の回転が制御できる。たとえば、EOMに鋸歯状の電圧波形を印加すれば、光格子を連続的に回転できる。なお、この図ではVCが軸対称半波長板AHPと検光子Aからなる

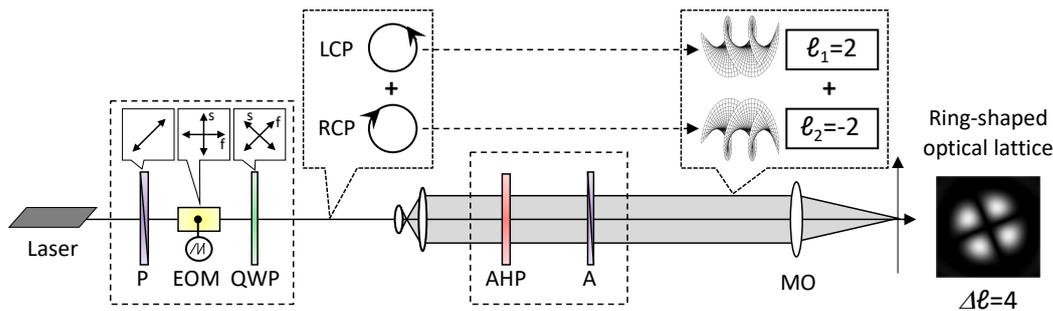


図2 リング状光格子生成光学系

構成を示しているが、この場合には4つの明点を持つリング状光格子が得られる。この部分を他の構成に変えれば、明点の数が6つなどの他のリング状光格子を生成することもできる。

この方法では、微小物体を、環状に配置された複数の明点によって多点で同時に捕捉するため、回転のバランスがよい。さらに、EOMに加える電圧で、マイクロマシンの部品の回転角（方位角）を直接制御できるため、たとえばフィードバック制御回路と組み合わせて回転速度や方位を適応的に制御することも容易である。また静的な回転位置決めも、加速/減速も可能である。さらに、回転速度がレーザー光の強度と無関係であるため、トラップ力と回転速度を別のパラメータとして制御することができる。たとえば強いレーザー光でマイクロマシンの部品をしっかりと保持したうえで、ゆっくりと回転させることもできる。また回転方向の反転も容易である。さらには、干渉する2つの光渦が共通光路を辿っているため、振動などに起因する位相変動の影響を受けにくいという特徴も有する。

本研究では、まず、この方法による光回転駆動の基本特性を、微小粒子を用いた実験と理論解析の両面から調べ、その性能向上を目指した。併せて、光造形を用いて微小回転子を作成し、マイクロマシン制御への応用を試みた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 回転制御の不安定性の原因の解明

始めに、図2のリング状光格子生成光学系をレーザートラッピング用の顕微鏡に組み込み、微小粒子の回転制御について実験的に調べた。なお、この研究に先立って我々は、予備的な実験によって微小粒子の捕捉とその回転制御には成功していた[2]。ただしその実験は常時成功するものではなく、どのような条件のときに捕捉や回転が可能となるのか、あるいは何が妨げる要因になっているのかは、判明していなかった。そこで我々は本研究の開始とともに精密な調整機構を追加した顕微鏡光学系を組み上げ、この調整によって微小粒子捕捉と回転の安定性を上げることを試みた。ところが、単純に顕微鏡光学系の調整を繰り返しても成功率は低いままであり、実験の再現性も乏しかった。そこで、この微小粒子捕捉および回転の安定性と再現性の問題を根本的に解決するため、リング状光格子の不完全さの原因を実験と理論の両面から探ることとした。

始めに、微小粒子の回転制御に失敗する場合にリング状光格子がどのような振る舞いをしていのかを実験的に調べたところ、多くの場合、主に下記の2つのパターン①と②のいずれか、ないしその組み合わせとなっていることが判明した。

- ① リング状光格子の中心（光軸上）に、本来は生ずるはずのない明点が現れる。そしてこの中心の明点は、リング状光格子の光軸周りの回転に伴って、明滅する。このリング状光格子で微小粒子を捕捉すると、回転に伴い微小粒子が周辺の明点（本来のリング状光格子の明点）と中心の明点の間を行き来し、その過程で捕捉が外れたり回転が止まったりする。
- ② リング状光格子の強度分布に偏りが生じて、ある方位の明点が他の方位の明点に比べて強度が強くなる。この偏りが出る方位は、リング状光格子の回転によらず一定のままである。例えば左方向の強度が強い場合には、微小粒子は左側の明点で始めに捕捉され、その後はリング状光格子が回転しても左側にとどまることとなる。

次に、このような異常なリング状光格子の振る舞いがどのような原因で生ずるかを、理論的に調

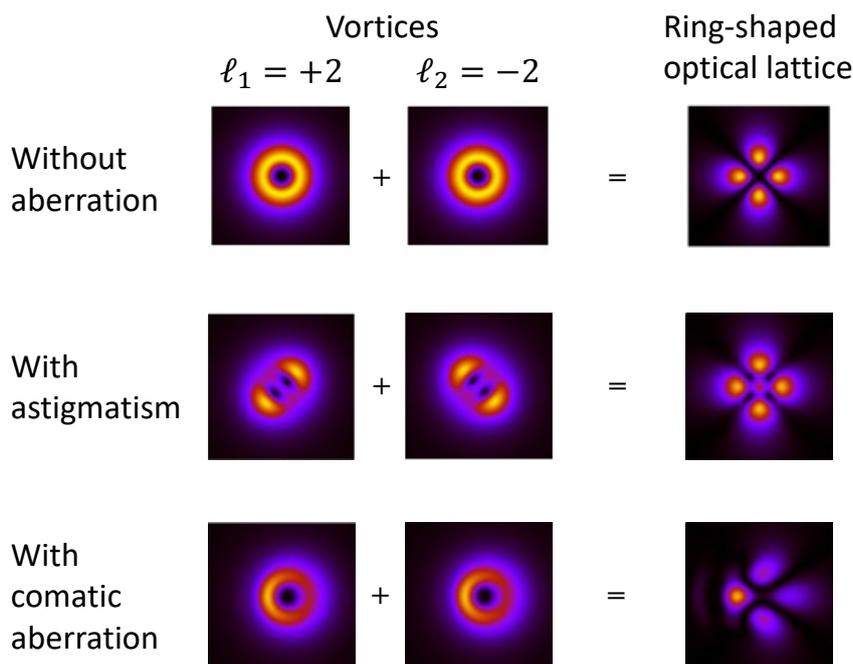


図3 非点収差とコマ収差によるリング状光格子の乱れ

べた。そのために、対物レンズ M0 の後焦点面での 2 つの光渦の干渉において、さまざまなタイプの不完全さが顕微鏡光学系に付加された場合について数値シミュレーションを行い、上述のような異常な振る舞いが生ずる原因を探った。その結果、レーザー射出光に内在する非点収差と、顕微鏡光学系内の微小なコマ収差が、それぞれ上述の①と②の原因となりうることを突き止めた。図 3 の上段に示すように、もし光学系が完全であるならば、顕微鏡の後焦点面における 2 つの光渦の強度分布は円環状になり、中心部は位相特異点となって強度が 0 となる。なお、位相特異点のトポロジカルチャージはこの場合それぞれ  $l_1 = +2$ ,  $l_2 = -2$  である。この 2 つの光渦を互いに干渉させると 4 つの明点が円環状に配置されたリング状光格子となる。なお、PM 中の EOM は 2 つの光渦の間の初期位相差を制御する働きがあるため、この初期位相差を変えるとリング状光格子が回転する。これに対して、光源からのレーザー光に非点収差が残っている場合には、図 3 の中段のように、各々の光渦の位相特異点が 2 つずつに分裂し、それぞれが  $+1$  ないし  $-1$  のトポロジカルチャージをもつこととなる。そして、このような光渦を干渉させると、中心（光軸上）では完全な打ち消し合う干渉が起こらず、2 つの光渦の初期位相の差によっては明点が生ずる。すなわち、①に示した現象が発生することとなる。一方、顕微鏡光学系に微小なコマ収差が残っている場合には、図 3 の下段のように、各々の光渦の円環状の強度分布に偏りが生ずることとなる。この場合、両者の干渉によるリング状光格子にも強度分布に偏りが生ずる。この偏りは各々の光渦の強度分布の偏りなので、2 つの光渦の間の初期位相を変えても偏りの方位は変わらない。したがって②に示した現象が生ずる。

そもそも光渦は、らせん状の位相分布を持つため、その位相分布を乱す波面収差の影響を受けやすい[3]。特にリング状光格子生成の光学系においては、非点収差とコマ収差の影響が大きいことがわかった。したがって実験光学系を作成する際には、この 2 種類の収差をできるだけ低減するように組む必要がある。

## (2) 光学系の改良によるリング状光格子の安定性向上

上述の理論解析によって、光学系に内在する非点収差とコマ収差がリング状光格子の異常の原因であることが示唆された。そこで、この理論解析を検証しさらにリング状光格子の安定性を向上させるために、光学系の改良を行った。図 4 に改良後の光学系の模式図を示す。まず、レーザー光源の非点収差については、レーザー直後に空間フィルタとしてのシングルモード光ファイバー (SMF) を設置し、可能な限り低減させることとした。一般にレーザートラッピングに用いられる半導体レーザーの多くは、射出光のビーム形状が楕円化してさらに非点収差を含んでいる。本研究開始時の光学系では、このビーム形状の補正に一般的なアナモフィックプリズムペアを利用していたが、①の不完全さが生じたことは結果としてそれでは補正が不十分であったことを意味している。そこでこのプリズムペアを廃して代わりに SMF を導入し、非点収差を可能な限り低減させることとした。一方、コマ収差に関しては、顕微鏡光学系の各所の調整でできるだけ低減させることとした。一般に顕微鏡の光学系においては、いろいろな場所での微小な調整のズレがコマ収差の原因となる。上述の理論解析の結果は、リング状光格子がコマ収差にも敏感に影響されることを示唆しているため、その低減が重要となる。なおこの調整のために、対

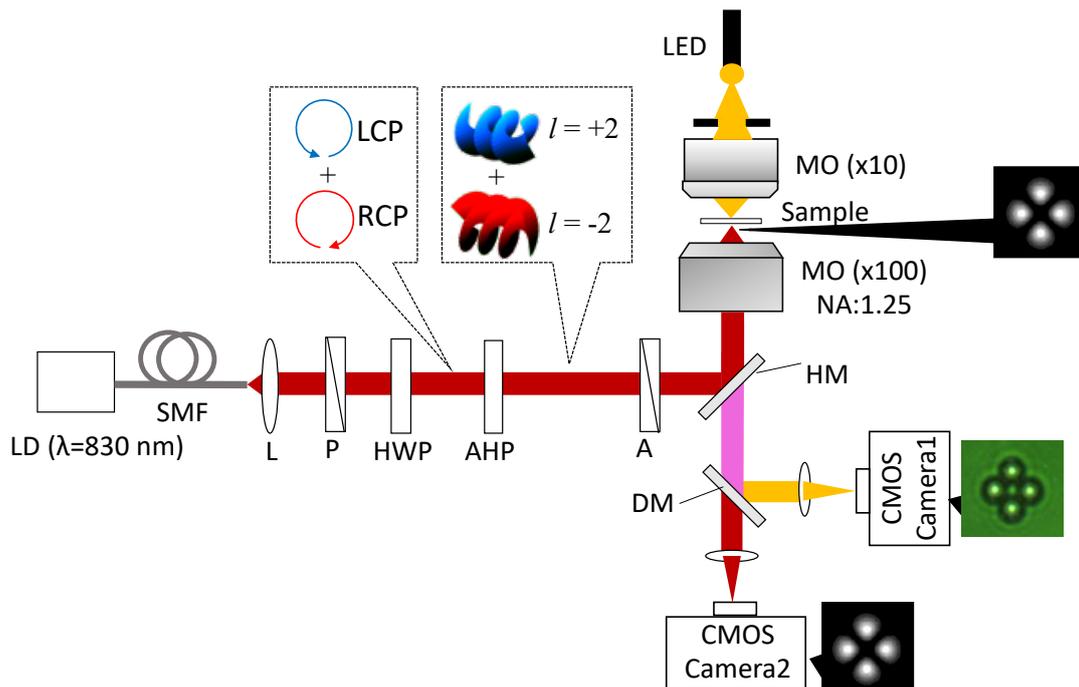


図 4 リング状光格子を用いた回転駆動光学系の改良

物レンズ M0 の後焦点面でのリング状光格子の強度分布をモニターする第 2 のカメラを追加した。第 1 のカメラは捕捉される微小粒子にピントを合わせるため、M0 の後焦点面に生成されるリング状光格子にはピントが合わない。そこでダイクロイックミラー DM でレーザー光と LED 光を分け、第 2 のカメラでレーザーから生成されるリング状光格子の強度分布をモニターすることとした。この改良した光学系で 4 個の直径 3.0  $\mu\text{m}$  のラテックス球の捕捉と回転の実験をしたところ、再現性が大幅に上がり、安定した回転制御を常時実現できるようになった。

### (3) 微小回転子の試作とリング状光格子による制御

リング状光格子による微小粒子の安定的な回転制御に目処が立ったため、次にマイクロマシンの遠隔駆動への第 1 歩として、微小な回転子をリング状光格子で回すことを試みた。この用途を念頭に置くとミリメートル以下の微小な回転子が必要となるため、その作製方法として本研究では光造形を用いた。具体的には、フォトリジスト (SU-8) に対して波長 1035 nm のフェムト秒パルスレーザーを照射し、三光子吸収過程で光造形することで 10  $\mu\text{m}$  程度の大きさを持つ微小回転子を作製した。現有設備の制約と実験の安全の都合上、精密な微小回転子の作成は難儀を極めたが、それでも実験を担当した学生の頑張りでなんとかリング状光格子に適した微小回転子の雛形を作成することに成功し、予備的な実験ではあるが回転制御の可能性を示す事ができた。

以上のように本研究では、リング状光格子を顕微鏡下で安定的に生成できることを示し、さらにそれが微小物体の顕微鏡下での回転制御に利用できることを示した。この方法は、マイクロマシンの動力源として有望であり、他にもマイクロメーターオーダーの微小な物体の捕捉、回転制御にも利用可能である。

### [参考文献]

- [1] M. Sakamoto, K. Oka, R. Morita, and N. Murakami, “Stable and flexible ring-shaped optical-lattice generation by use of axially symmetric polarization elements,” *Opt. Lett.* **38**, 3661-3664 (2013).
- [2] 小原 威吹, 坂本 盛嗣, 山根 啓作, 森田 隆二, 岡 和彦, “軸対称偏光素子を用いたトラップ粒子の回転制御 (II),” 2017 年春季 第 64 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, 15a-312-3 (2017).
- [3] 宮本 洋子, 和田 篤, “ラゲール・ガウスビームの発生と検出,” *光学* **35**, 618-624, (2006).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kazuhiko Oka, Keisaku Yamane, Moritsugu Sakamoto, and Ryuji Morita	4. 巻 11927
2. 論文標題 Spectroscopic polarization measurement and control using channeled spectrum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 11927ON
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2616272	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kazuhiko Oka, Keisaku Yamane, Moritsugu Sakamoto, and Ryuji Morita
2. 発表標題 Spectroscopic polarization measurement and control using channeled spectrum
3. 学会等名 OPTICS & PHOTONICS International Congress 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村 正啓, 山中 蛭, 因幡 拓磨, 小見 康真, 坂本 盛嗣, 岡 和彦
2. 発表標題 リング状光格子による微小物体回転の安定性向上 - 波面収差の影響 -
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡 和彦, 坂本 盛嗣, 山根 啓作, 森田 隆二
2. 発表標題 チャンネルドスペクトルによる分光偏光計
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	陳 暁帥  (CHEN Xiaoshuai)  (40812277)	弘前大学・理工学研究科・助教    (11101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------