

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05364

研究課題名(和文)幾何学的変換を利用した動径モードを有するラゲールガウスビームのモード変換

研究課題名(英文) Mode conversion of Laguerre Gaussian beam with radial mode by geometric transformation

研究代表者

小林 弘和 (Kobayashi, Hirokazu)

高知工科大学・システム工学群・准教授

研究者番号：60622446

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：軌道角運動量(OAM)を持つ光波であるラゲールガウス(LG)ビームは様々な分野への応用が期待されている。LGビームはOAMに対応する方位角モードと、それとは別の自由度として動径モードを有する。本研究では幾何学的変換を利用してLGビームの方位角モードと動径モードのモード変換技術確立することを目的とした。研究成果として方位各モードの通倍・分周変換の生成精度を実験的に評価し、動径モード変換については当初予定していた幾何学変換による実現はできなかったものの昇降演算子を利用した新たな手法を提案してシミュレーションによりその実効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ラゲールガウス(LG)ビームは空間モード分割多重通信や微粒子の回転操作(光スパナ)、量子情報・量子通信分野への応用が積極的に研究されている。近年では光波だけではなくX線や電波、電子ビームなどでもLGモードの応用が研究されている。いずれの応用においてもモード変換は非常に重要な基盤技術である。本研究ではこれまで実現が難しかった方位角モードの通倍・分周変換及び動径モード変換手法の提案をしており、より自由度の高いモード変換を利用した応用技術への貢献が見込まれる。

研究成果の概要(英文)：Laguerre-Gaussian (LG) beams, which are light waves with orbital angular momentum (OAM), have potential applications in various fields. The LG beam has an azimuthal mode having OAM and a radial mode as another degree of freedom. In this study, we established a mode conversion technique of azimuthal and radial modes of LG beams using geometrical conversion. As a result of the research, the generation accuracy of the multiplication and division transformations of azimuthal mode was experimentally evaluated. Moreover, although the radial mode transformation could not be achieved by the originally proposed geometrical transformation, a new method using a ladder operator was proposed and we confirmed its function through numerical simulations.

研究分野：特異光学、光計測、非線形光学、量子光学

キーワード：ラゲールガウスビーム 光渦 光の軌道角運動量 動径モード 幾何学変換 空間位相変調器

1. 研究開始当初の背景

1.1 動径モード p と方位角モード l

ラゲルガウス (LG) ビームは軌道角運動量(OAM)を持つ光ビームとして近年様々な分野で注目を集めており、空間モード分割多重通信や微粒子の回転操作(光スパン)、量子情報・量子通信分野への応用が積極的に研究されている。近年では光波だけではなく X 線や電波、電子ビームなどでも LG モードの応用が研究されている。

LG ビーム(LG $_p^l$)は方位角モードを表す整数 l と動径モードを表す整数 p (≥ 0)で特徴付けられる。ビーム断面の方位角方向に $2\pi l$ の位相分布を持ち、中心は位相特異点で強度の零点となる。 $|l| > 0$ のビームは波面が螺旋状となるため「光渦」とも呼ばれる(図 1 参照)。また動径方向については $(p + 1)$ 個の円環が存在し、隣り合う円環は位相差 π を有する。

本研究課題の根底にあるのは LG ビームの動径モード p の物理的な意味とその有用性の探求である。方位角モード l については 1 光子の持つ軌道角運動量 lh との物理的関係が明確であるが、動径モード p については離散化されたモードとしての物理的な意味やその有用性については未だに未解明な部分も多い。本研究では次項以降で述べる幾何学変換を利用した方位角および動径モード変換に注目してこの問いにアプローチしていきたい。

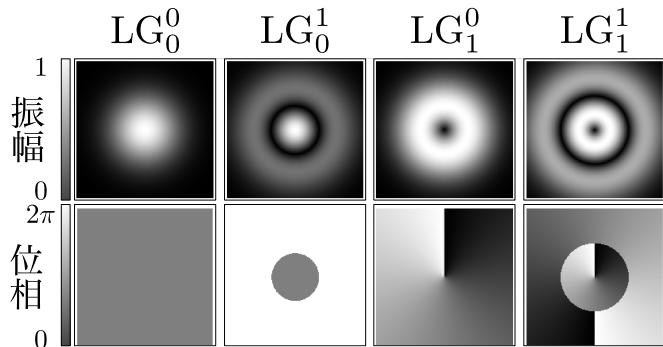


図 1. LG ビーム LG $_p^l(r, \theta)$ の光複素振幅 (振幅と位相)

1.2 光複素振幅の幾何学変換による方位角モードの通倍変換

OAM の操作はいずれの応用に対しても非常に重要であるが、従来の手法では OAM モード l を別のモード $l' = l + \alpha$ (α は整数)へ加算的に変換することしかできず、モード l の光渦を α 倍して別のモード $l' = \alpha l$ に変換する OAM の通倍(乗算)および分周(除算)の操作技術は十分に確立されていなかった。特に OAM モードを用いた光計算や量子計算、あるいは

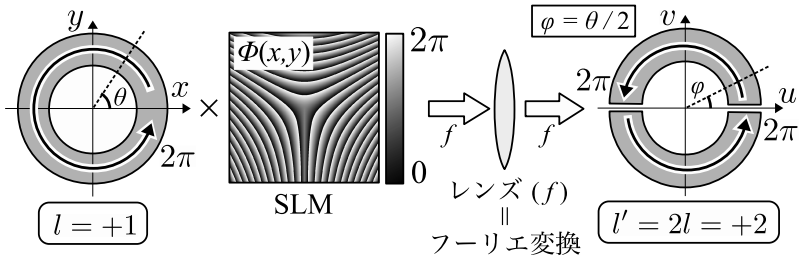


図 2. $\alpha = 2$ の方位角変換に必要な位相分布 $\Phi(x, y)$ と方位角モード l の通倍変換

OAM モードを利用した多重化通信技術においては、OAM の通倍・分周操作を高効率かつ高精度に行なうことが非常に重要である。

最近、我々は空間位相変調器(SLM)に表示した位相ホログラムにより、ビーム断面における光複素振幅の座標変換を行ない、OAM の通倍操作を実証した(図 2 参照)。この手法ではビーム断面の (x, y) 平面における方位角 $\theta = \tan^{-1}(y/x)$ を (u, v) 平面において $\varphi = \theta/\alpha$ に変換する方位角変換を利用する。これは光複素振幅に対する方位角方向への圧縮操作に対応する。例えば $\alpha = 2$ の場合、 (x, y) 平面における円環は、適切な位相分布とレンズによるフーリエ変換を施すことで方位角変換され、 (u, v) 平面において方位角方向に半分に圧縮されて半円環となる。もし異なる二つの方位角変換が同時に行われ、半円環が現れる位置を向かい合わせにできれば、出射光の OAM は入射光の OAM の 2 通倍した値となる($l' = 2l$)。同様に N 種の異なる方位角変換を行えば N 通倍、上記の逆変換を行えば分周操作がそれぞれ実装可能である。さらに我々は座標変換に必要な複数の位相を混合することで、一度の座標変換で OAM の通倍操作を高効率かつ高精度に実現可能であることを示した。

この手法は OAM の通倍・分周操作に限定されるものではなく、単一の座標変換では実現が困難な空間モード制御を複数の座標変換の混合で実現するための手段として幅広く応用でき、今後の光科学技術の発展に大きく貢献するものである。しかし、現状では変換効率や精度の向上、理論限界の見積もり、適用可能な波長範囲の拡大方法の探索など課題も多い。

2. 研究の目的

本研究では、まず方位角モードの通倍変換の精度評価と高精度化を行なう。次に動径方向への圧縮および伸張変換を利用して動径モード変換を実現し、動径モードの物理的な意味に迫るとともに、応用面を探る。これまで脚光を浴びてきた方位角モードに加えて、未解明な部分が残る動径モードに対するモード変換技術を確立することで動径モードの物理的な意味とその有用性について探求する手法は申請者独自のものである。動径モードに対する制御技術と物理的理解

が深まればすでに方位角モードを利用している光計測や量子工学の分野に大きく貢献できると考えている。

具体的な例として $LG_0^0(r, \theta)$ から $LG_1^0(r, \theta)$ への変換を考える。二つの動径座標変換 $r \rightarrow a_1 r + a_2 r^2$ と $r \rightarrow b_1 r + b_2 r^2$ を $LG_0^0(r, \theta)$ に対して適用することで動径方向に圧縮および伸張を行ない、適切な振幅 (α, β) で両者の差分を取ることで $LG_1^0(r, \theta)$ を生成できる(図 3 参照)。この変換過程は動径座標変換に必要な複数の位相分布を適切な振幅となるように混合することで、一度の座標変換で実装することが可能である。この手法の利点は動径座標変換を利用しているため、入射ビーム径に依存しないことである。位相ホログラムや位相板を用いた従来の動径モード変換手法においては入射ビーム径を事前に測定し、その値に応じて位相分布を調整する必要があった。一方、本手法ではそのような調整がいらず、一度の座標変換でシンプルに実装可能である。また図 3 において生成される動径モードの相対振幅は $\gamma = 0.3$ となり、変換効率が低下するが、動径座標変換を r に関する二次以上の項まで考慮することにより改善が見込まれる。このような幾何学的変換を利用した動径モード変換技術が報告された例はなく、成功すれば世界初の技術となる。

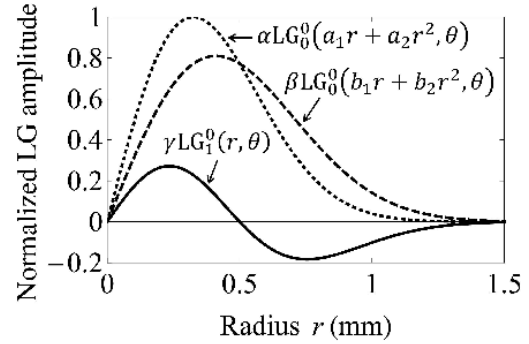


図 3. 座標変換による動径モード変換 [相対振幅 $(\alpha, \beta, \gamma) = (1.0, 0.8, 0.3)$, 座標変換定数 $(a_1, a_2, b_1, b_2) = (0.8, 46, 1.1, 20)$]

3. 研究の方法

ここまでは座標変換のために付加的に与える位相分布 $\Phi(x, y)$ に関する説明のみしてきたが、この位相分布自身も座標変換されて出力されるため、出力時にこの位相分布を除去する位相補正が必要である。補正用の位相分布 $\Psi(x, y)$ は $\Phi(x, y)$ を座標変換することで求められる。

図 4 に光複素振幅の幾何学変換の実験系を示す。高価な SLM を複数台使わずに済むように、二つの位相分布 $\Phi(x, y)$ と $\Psi(x, y)$ を単一の SLM の受光面に分割して表示する。またフーリエ変換を行なうレンズの代わりに焦点距離 f の凹面鏡を用いる。SLM と凹面鏡の距離を f と同一にすることで、座標変換用の位相分布 $\Phi(x, y)$ を付与された入射光がフーリエ変換されて SLM に帰還し、位相分布 $\Psi(x, y)$ で位相補正される。その後、空間フィルタで空間的な高周波成分を取り除いて雑音を除去する。また、伝搬方向を少し傾けた基本ガウスモードを参照光として干渉計測を行ない、角スペクトル法によりフーリエ面で一回折成分を抽出することで座標変換後の光波の光複素振幅を測定した。

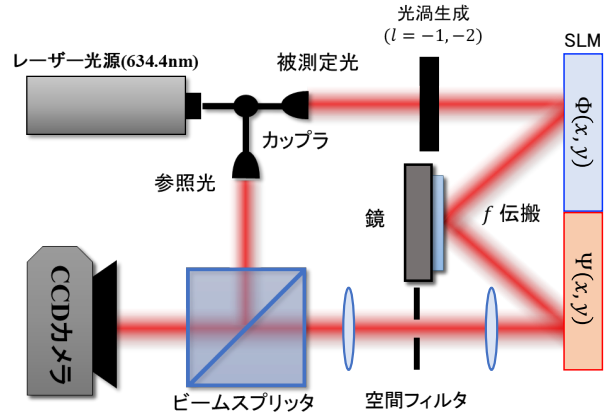


図 4. 幾何学変換の実験系

モード変換技術の評価において重要な指標は、モード変換の効率および精度と入射光のモード番号やビーム径などの光波パラメータとの関係性である。光複素振幅に対する幾何学的変換の理論的基盤は光波の伝搬計算に必要な積分計算(フレネル回折積分)を位相停留法と呼ばれる近似する点にあるため、この近似計算に対する光波パラメータの寄与を調べることで方位角モード通倍変換の理論的な効率や精度の限界を明らかにし、実験的に確認する。また、光複素振幅を測定し、それを元にして SLM に表示する幾何学変換用の位相分布を改善するフィードバックにより高精度化を行なう。

モード変換技術の評価において重要な指標は、モード変換の効率および精度と入射光のモード番号やビーム径などの光波パラメータとの関係性である。光複素振幅に対する幾何学的変換の理論的基盤は光波の伝搬計算に必要な積分計算(フレネル回折積分)を位相停留法と呼ばれる近似する点にあるため、この近似計算に対する光波パラメータの寄与を調べることで方位角モード通倍変換の理論的な効率や精度の限界を明らかにし、実験的に確認する。また、光複素振幅を測定し、それを元にして SLM に表示する幾何学変換用の位相分布を改善するフィードバックにより高精度化を行なう。

動径モード変換の理論構築としてまずは動径モード変換を実現する動径座標変換の最適化を行なう。所望の動径モードを生成する座標変換を解析的に求めることを第一目標とするが、それが難しい場合には伝搬シミュレーションを用いて冪級数で展開した動径座標変換により生成される LG ビームの変換効率と変換精度を計算して最適な座標変換を算出する。動径モード変換においては、図 3 に示したように動径座標変換された二つの光波を異なる振幅で重ね合わせる必要があるため、動径モード生成と同様に回折格子の位相深度を振幅に合わせて変化させた二つの位相分布を混合することで座標変換用の分布を作成する。その後、図 4 の系を用いて実験検証を行なう。

4. 研究成果

まず方位角モードの通倍・分周変換の結果について示す。本研究の提案時点では図 4 の $\Phi(x, y)$ の後方に凸レンズが配置されていたが、この凸レンズ自体の位相分布を $\Phi(x, y)$ に含めることで実験系の簡素化を図るとともに、通倍・分周変換の精度をあらかじめ数値計算によりシミュレーションして最適化を行なった。図 5(a)に入射光渦 $l = -1$ とそれを ± 2 通倍、 ± 3 通倍変換した光波の光複素振幅を示す。いずれも方位角方向の位相変化が通倍されていることがわかる。負の通倍において位相分布が渦を巻いている形状となっているのは、観測点に配置された CCD カメラ

までの伝搬によって生じる球面波位相の影響である。図 5(b)に通倍変換後の光渦モード分布を示す。これは通倍変換された光複素振幅と各光渦モードの内積を計算することで求めた。いずれの変換においても通倍された光渦モードが主要モードとなっており、電力比としておおよそ 80%以上を通倍モードが占めており高い変換精度が得られている。高次の通倍変換における精度の低下は変換に必要な位相分布の空間分解能に依存している。

次に分周変換については1/2分周を実験的に実装した。図 6(a)が入射光渦 $l = -2$ と1/2分周変換後の光複素振幅である。方位角方向の位相変化は 4π から 2π に半減していることがわかる。図 6(b)は1/2分周後の光渦モード分布である。通倍変換と同様におおよそ 80%以上を分周モードが占めている。図 6(a)において分周後の光複素振幅が動径方向に多重リングとなっている点については、分周変換の過程で不可避免的に生じるものであることが理論的にわかり、数値計算でも確認された。

動径モード変換の理論解析については、動径モードを固有値に持つ微分演算子(モード演算子)に対して幾何学変換を施した際に、固有値が通倍あるいは分周されるように条件を課すことで動径モード変換に必要な条件を導出することを試みた。結果的には有用な座標変換を見出すことはできなかったものの、座標変換によるモード演算子に関する知見を得ることができた。また、座標変換を利用するのではなく、動径モードの昇降演算子を実験的に実装する手法を提案し、シミュレーションにてその実効性を確認した。動径モードの昇降演算子は図 7に示すように干渉系内に片方の経路では $re^{\pm i\theta}$ の振幅位相変調を施し、もう片方の経路ではレンズによるフーリエ変換の後に同様の振幅位相変調(ただし、動径座標をビーム径に合わせて定数倍して r' とする)を施す。これによって、方位角モードの低下と共に動径モードが上昇あるいは下降する。図 8がそのシミュレーション結果であり、所望のモードと同様の円環の数が得られた。ただし、下降演算後の位相分布が渦巻いている点やモード分布が未評価であるため今後の課題としたい。

その他の共同研究成果として、まずフランス・ボルドー大学の Etienne Brasselet 教授との共同研究として、OAM ビームを用いた液晶分子の再配光制御の実験を行ない、研究成果は Nature Photonics に採択された。また、申請者と同時期に OAM 通倍変換の実験を実施していたイタリア・パドヴァ大学の Gianluca Ruffato 助教と共同研究を行ない、OAM 通倍・分周変換の過程で現れるコースティクス(caustics, 光線が重なり合い明るく見える包絡線)についての理論及び実験研究成果はそれぞれ Optics Communications に採択された。

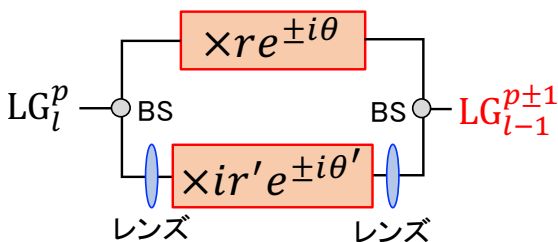


図 8. 動径モード昇降演算子の実装

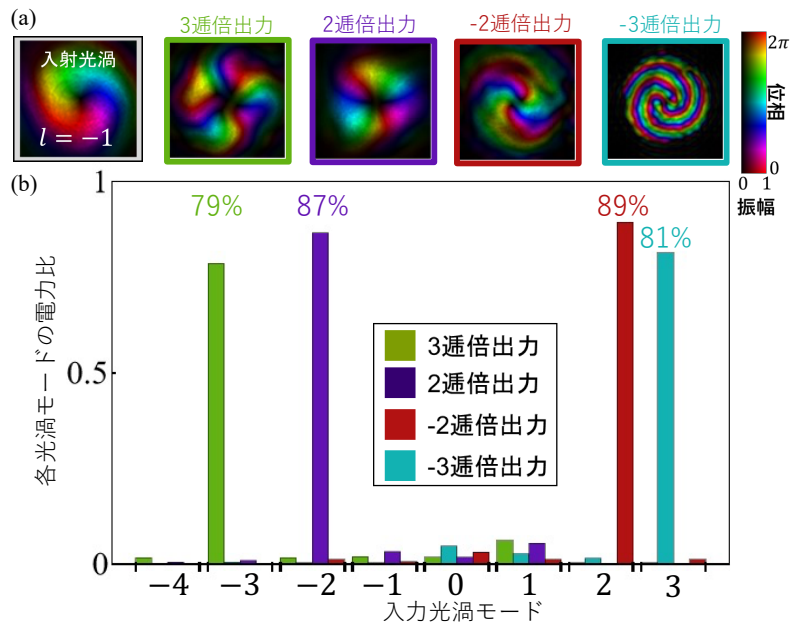


図 5. (a) 入射光渦と通倍後の光渦の光複素振幅 (b) 通倍後の光渦のモード分布解析結果

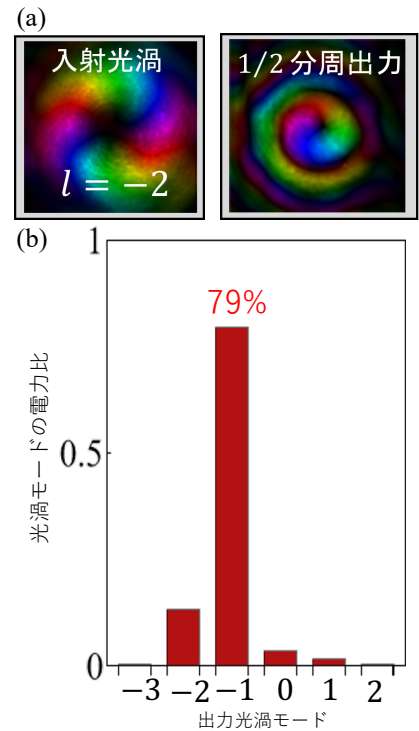


図 6. (a) 分周変換前後の光複素振幅 (b) 分周変換後のモード分布

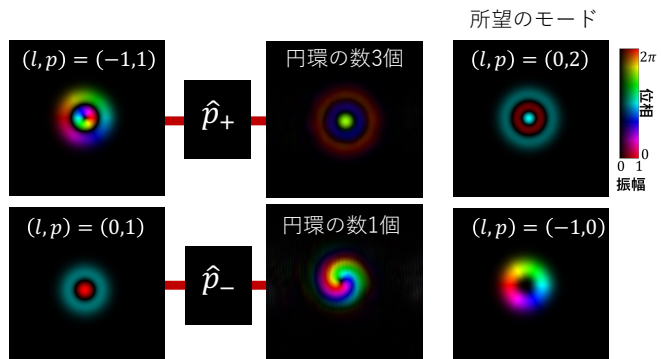


図 7. 動径モード昇降演算子のシミュレーション

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ruffato Gianluca, Brunetta Samuele, Kobayashi Hirokazu	4. 巻 517
2. 論文標題 A general conformal framework for regular cusp beams	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 128325 ~ 128325
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optcom.2022.128325	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 El Ketara Mohamed, Kobayashi Hirokazu, Brasselet Etienne	4. 巻 15
2. 論文標題 Sensitive vectorial optomechanical footprint of light in soft condensed matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Photonics	6. 最初と最後の頁 121 ~ 124
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41566-020-00726-2	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Ruffato Gianluca, Kobayashi Hirokazu	4. 巻 490
2. 論文標題 Roulette caustics in transformation optics of structured light beams	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 126893 ~ 126893
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optcom.2021.126893	査読の有無 有
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 該当する

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 地主 拓未, 小林 弘和
2. 発表標題 自由空間中を螺旋伝搬する高次ラゲールガウスビームの生成
3. 学会等名 光エレクトロニクス研究会6月研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内田 涼太, 小林 弘和
2. 発表標題 光波の偏光と縦電場で誘起される光トルクを用いた液晶分子の空間配向制御
3. 学会等名 光エレクトロニクス研究会6月研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 地主 拓未, 小林 弘和
2. 発表標題 高次LGモードから生成した光子対の伝搬距離操作に伴う2光子位相特異点の生成
3. 学会等名 量子情報技術研究会 (QIT)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内田 涼太, 小林 弘和
2. 発表標題 ベクトルビームの電場で生じる光トルクを用いた液晶の空間配向制御
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林弘和
2. 発表標題 光渦を利用したイメージング技術
3. 学会等名 テラヘルツ・光科学の最新トレンド 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 地主 拓未, 小林 弘和
2. 発表標題 Two-Photon Phase Singularity via SPDC Pumped by Higher- Order Laguerre-Gaussian Beam with Radial Mode
3. 学会等名 The 12th Advanced Lasers and Photon Sources Conference (ALPS2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林弘和
2. 発表標題 光波の3次元構造により液晶内に誘起される光トルク
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林弘和, 横川恒助, 岩下克
2. 発表標題 動径モードラゲールガウスビームのGouy位相による光強度分布の回転制御
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林弘和, 岩下克
2. 発表標題 空間位相変調器を用いた光軌道角運動量の遷倍変換
3. 学会等名 フォトニックネットワーク研究会 6月研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 健斗, 小林 弘和, 岩下克
2. 発表標題 空間位相変調器を用いた扇形変換による光渦モード通倍と分周
3. 学会等名 Photonic Device Workshop 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 健斗, 小林 弘和, 岩下克
2. 発表標題 ビーム断面の扇形変換による光渦モード通倍と分周
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 地主 拓末, 小林 弘和, 岩下克
2. 発表標題 空間位相変調器を用いた高次ラゲールガウスビームの生成効率の測定
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田 涼太, 小林 弘和, 岩下克
2. 発表標題 光波の伝搬方向による液晶分子の配向制御
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------