

令和 2 年 7 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05499

研究課題名(和文) 光ビーム断面内のエネルギーの流れの測定に関する研究

研究課題名(英文) Measurement of energy flow across the cross section of optical beams

研究代表者

宮本 洋子 (Miyamoto, Yoko)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：50281655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は光ビーム断面内のエネルギーの流れを測定する新しい手法の提案・実証を行うことを目的とした。測定対象として自由空間伝搬中の光渦の反転を選定し、回転シア干渉計による角運動量分布測定に注力した。干渉計を設置して調整方法を確立した。方位角モード指数 $m=1$ のドーナツビームに対する測定では、パワーあたりの角運動量を定量的に求めることに成功した。より複雑な光渦の反転現象については、定量的な測定は行えていないが、シア角を小さくする改良により克服可能と考えられる。さらに、本測定法を弱測定の一つとして定式化することに成功し、弱値に相当する方位角方向の位相勾配が増幅される現象を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本手法により、光ビームの角運動量分布の定量的な測定が可能であることが示された。複雑な構造をもつビームについてはまだ測定に成功していないが、今後の改良で克服可能と考えられる。これにより光ビームのもつ力学的な性質の評価・活用が進むことが期待される。

本研究ではまた、光の角運動量分布測定を弱測定 of 枠組みの中に位置付けることができた。これにより、方位角方向の位相勾配を弱値として特定することができ、弱値の増幅についても確認することができた。これらはシア干渉計一般を弱測定 of 枠組みでとらえることが可能であることを示唆するものであり、学術的な意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：This project aimed to propose and demonstrate a new method to measure the energy flow across the cross section of optical beams. Vortex inversion during free-space propagation was chosen as the target, and angular momentum measurement by a rotational shearing interferometer as the method. The interferometer was built and alignment method was established. For a doughnut mode with azimuthal mode number $m=1$, angular momentum per power was successfully measured quantitatively. Quantitative measurement was not achieved for the more complex vortex inversion phenomenon, but it should be possible by improving the system to allow smaller shear angles. We were also able to formalize the method as a weak measurement, and confirmed amplification of weak value in the form of phase gradient in the azimuthal direction.

研究分野：量子光学

キーワード：量子エレクトロニクス 電磁場の力学的作用 光の運動量 光の角運動量 回転シア干渉計 弱測定

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、細胞操作や材料加工、マイクロモーターの駆動等を目的とした複雑な構造もつ光ビームが生成されるようになり、そのようなビームのもつ力学的性質が注目されるようになってきている (Bekshaev et al., *J. Opt.* **13** (2011) 053001)。これらの応用を進める上では、力学的性質の基礎となるビーム断面内のエネルギーの流れが設計通りに実現されているか確認できることが望ましい。一方、基礎物理学の観点からは、複雑に変転するビーム内で運動量や角運動量が全体としてどのように保存されているかという点に興味を持たれる。

このような光ビーム断面内の運動量分布や角運動量分布については理論計算は進められているものの、実際のビームを用いた実験はまだあまり進展していない。宮本 (研究代表者) はこれまで、複素振幅分布を詳細に測って運動量分布と角運動量分布を計算によって求める手法を提案してきた。特にこの手法を非点収差によってビーム内の渦の回転方向が自由空間伝搬中に反転する現象 (Molina-Terriza et al., *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001) 023902) に適用することで、渦が反転してもビーム全体の角運動量の符号は変わらないことを初めて実証した (Miyamoto et al., *J. Opt.* **15** (2013) 044002)。

上記手法では実験データの空間微分を行うため、ノイズが強調されることが難点であった。そのため光渦の反転現象について、角運動量の符号が変わらないことは明らかにできたが、理論との定量的な一致は確認できていない。そこで宮本はサニャック型回転シア干渉計 (図 1) によって角運動量分布を直接測定する手法を新規に考案し (中澤他, *Optics and Photonics Japan* 2015)、ビーム断面内のエネルギーの流れを精密に測定する研究に着手した。

2. 研究の目的

本研究は光ビーム断面内のエネルギーの流れを測定する新しい手法の提案・実証を行うことを目的とした。具体的には以下の 3 つを目指した。

- (1) 近軸近似領域の一樣な偏光状態の光ビームを想定し、ビーム断面内の運動量分布や角運動量分布を簡便かつ精度よく測定する手法を提案する。
- (2) 自由空間伝搬中の光渦の反転や、符号の異なる光渦の対生成・消滅、同符号の複数の光渦の融合・分裂など、興味深い運動量分布や角運動量分布を持つ光ビームを発生させ、提案手法による測定を行う。
- (3) 非一樣な偏光状態の光ビームや、もつれ合い光子対の運動量分布・角運動量分布の相関測定等への拡張について検討する。

3. 研究の方法

シア干渉計を用いた光の運動量分布および角運動量分布の測定原理について回転シア干渉計を例に簡単に述べる。シア干渉計では一般に元の光場とこれをわずかにシフトしたものを重ね合わせて、干渉によって生じた強度分布を記録する。

元の複素振幅分布を $u(r, \phi)$ 、方位角方向にシフトしたものを $u(r, \phi + \Delta\phi)$ 、干渉計中の位相シフトを ψ とすると、強度分布は

$$I = |u(r, \phi)|^2 + |u(r, \phi + \Delta\phi)|^2 + 2 \operatorname{Re} [u^*(r, \phi) u(r, \phi + \Delta\phi) \exp(i\psi)]$$

となる。

ここで $\psi = \mp\pi/2$ とおくと、強度分布はそれぞれ

$$I_{\mp\pi/2} \sim |u(r, \phi)|^2 + |u(r, \phi + \Delta\phi)|^2 \pm 2 \operatorname{Re} [u^*(r, \phi) (1/i) \partial_{\phi} u(r, \phi)] \Delta\phi$$

となり、差分から干渉信号 $\operatorname{Re} [u^*(r, \phi) (1/i) \partial_{\phi} u(r, \phi)] \Delta\phi$ を得ることができる。これを $\Delta\phi$ で割ったものがまさに伝搬方向の角運動量分布である。同様に並進シア干渉計の干渉信号から運動量分布が得られる。

以下の方法により上述の干渉計を実装し、光ビームの運動量分布・角運動量分布の測定を行った。

- (1) 測定対象のビームの選定とパラメーターの決定
伝搬シミュレーション等により測定対象のビームを選定し、ビーム生成時のパラメーターや測定位置を決定する。運動量分布・角運動量分布のどちらを測るか決定する。
- (2) 光ビームの生成
ホログラム、空間光変調器による位相・擬振幅変調、空間分布をもつ偏光素子等の手法を用いて (1) で選定した光ビームの生成を行う。
- (3) 干渉信号記録用カメラの導入・テスト
干渉信号の記録に適したカメラを導入し、動作テストを行う。
- (4) 干渉計の設置と調整
(1) の決定に合わせて並進シアまたは回転シア干渉計を設置し、適切なシアが実現されるよう調整を行う。
- (5) 角運動量分布・運動量分布の測定
(2) で生成した光ビームに対して測定を行う。正しく測定できているか検討し、必要な修正を行う。

4. 研究成果

以下に主要な成果を挙げる。

- (1) 測定対象のビームの選定とパラメータの決定
研究協力者の Alonso 氏（ロチェスター大）と議論しつつ、測定対象として自由空間伝搬中の光渦の反転を選定し、回転シア干渉計による角運動量分布測定に注力することとした。伝搬シミュレーションにより、光渦が反転したビームにおいて渦の近傍には渦の回転方向の角運動量をもつ領域があり、観察する領域を広げるに従って総角運動量の符号が逆転することを確認した[Miyamoto et al., OSK-OSA-OSJ Joint Symposia (2019)]。

- (2) 光ビームの生成

測定対象として以下の光ビームを生成した。

- ① 方位角モード指数 $m = 1$ のドーナツビーム
回転シア干渉計の評価のため、単純な角運動量分布をもつビームの例として生成した。生成には非一様な遅相軸をもつ波長板 (s-plate) を用いた。
- ② 伝搬中に光渦が反転するビーム
上述のドーナツビームに円筒面レンズで非点収差を加えることによって生成した。
- ③ 弱値の増幅を観察するための光ビーム
後述のように本測定法を弱測定的一种として定式化し、弱値である方位角方向の位相勾配が増幅される様子を観察するためのビームを生成した。このビームは互いに逆方向の角運動量をもつ 2 つのビームの重ね合わせとなっており、2 つのビームの振幅比が 1:1 に近づくと弱値の増幅が起こる。

本研究では測定対象としなかったが、以下の実験も行なっている。

- ④ 非一様な偏光状態を持つ光ビームの生成[Reddy et al., Opt. Express (2017)]
空間光変調器の偏光特性を利用して、偏光状態と空間モードの不可分性 (non-separability) を連続的に制御できる光ビームを生成し、粗面による散乱光の特性を明らかにした。発展的研究として弱値の増幅を観察することを優先したため、このビームは測定対象としていない。
- ⑤ 動径方向のモード関数制御[Choudhary et al., Opt. Lett. (2018)]
研究協力者の Boyd 氏（ロチェスター大）との共同研究による成果であり、強度分布の変換を行う位相素子と変換過程で生じた余分な位相を取り除く位相素子の組み合わせで振幅分布を制御する技術である。動径方向の高次モードは本研究の測定対象としなかったが、高次モードの単一光子検出への応用が期待される技術である。

以上に加えて、複屈折結晶中の光渦の展開現象についての新しい解析手法の提案[Miyamoto, Complex Light and Optical Forces XI (2017)]、ホログラム材料についての検討[早瀬他, Optics and Photonics Japan (2018) 他]、非点収差を用いてインコヒーレント光の軌道角運動量スペクトルを明らかにする方法の提案[Miyamoto et al., ODF (2018) 他]等の関連する成果を得た。

- (3) 干渉信号記録用カメラの導入・テスト

撮像素子の保護層によって生じる余分な干渉縞を低減する仕組みを持ち、光波の干渉信号を正確に記録することができるカメラを導入し、運用方法について検討した。

- (4) 干渉計の設置と調整

上記に基づき回転シア干渉計を設計し、電気通信大学への設置を行った。偏光を利用したサニャック型干渉計を採用し、偏光状態を表すストークスパラメータの形で角運動量に相当する干渉信号を抽出するものとした。回転シア導入の中核となるダブルプリズムの調整方法に取り組み、2 ビームの中心軸およびダブルプリズムの回転軸を一致させる手法を確立した。残存する 2 ビームの中心軸およびダブルプリズムの回転軸のわずかな不一致の影響の評価を行った。

- (5) 角運動量分布の精密測定

(2)の①、②のビームについて角運動量分布の測定を行った。

①については想定通りの回転対称に近い角運動量分布が得られた。また干渉信号のシア角 $\Delta\phi$ に対する傾きから、パワーあたりの総角運動量を求め、方位角モード指数と一致することを確認した。本手法によって角運動量の定量的な評価が可能であることが示された。

②についても想定に近い角運動量分布が得られた。しかし干渉信号はシア角 $\Delta\phi$ に対して線形にならなかった。本実験での最小のシア角は 4 度であったが、複雑な構造をもつビームにおいては、定量評価のためにより小さいシア角での測定が必要であると考えられる。

- (6) 弱値の増幅の観察

偏光状態を用いた干渉信号の抽出について検討する過程で、本測定法を弱測定的一种として定式化し、方位角方向の位相勾配が弱値に相当することを明らかにすることができた[宮本他, 日本物理学会 (2019)]。そこで弱測定としての側面を強調する実験として、弱値である方位角方向の位相勾配が増幅される様子を観察する実験を行った(図 2)。弱測定は特定の始状態と終状態の組み合わせについて測定対象の物理量を別の系(測定器系)に弱く結合させ、その後測定器系に対して通常の測定を行うことで弱値と呼ばれる形で読み出す枠組みである。本実験は研究協力者の Chandran-Thodika 氏(電気通信大学(当時))が担当した。

- (7) その他の成果

関連の深い研究として、2017 年に Naik らにより空間シアと運動量シアを組み合わせること

による光渦の発生が報告された(Naik et al., Sci. Rep. 7(2017) 2)。この現象について、一般の入力モードに対する操作を記述する理論を確立し、Chandran-Thodika 氏の協力を得て実験により検証した [Miyamoto et al., ICOAM (2019) 他]。

以上から、本手法により、光ビームの角運動量分布の定量的な測定が可能であることが示された。複雑な構造をもつビームについてはまだ測定に成功していないが、実験系を改良してシア角を小さくすることで克服可能と考えられる。これにより光ビームのもつ力学的な性質の評価・活用が進むことが期待される。

本研究ではまた、光の角運動量分布測定を弱測定 of 枠組みの中に位置付けることができた。これにより、方位角方向の位相勾配を弱値として特定することができ、弱測定に特有の弱値の増幅についても確認することができた。空間シアと運動量シアの組み合わせによる空間モード操作も一種の「弱い効果」の抽出という枠組みでとらえることができる。これらはシア干渉計一般を弱測定 of 枠組みでとらえることが可能であることを示唆するものであり、学術的な意義は大きい。

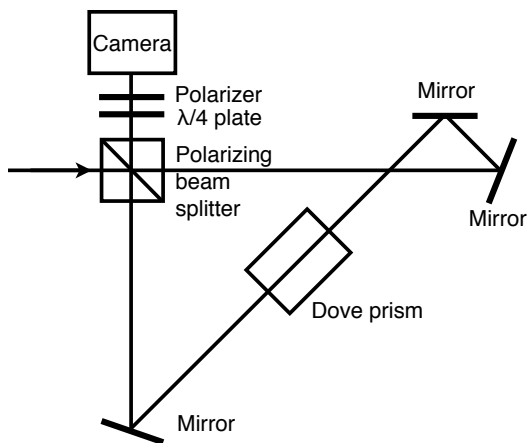


図1 回転シア干渉計(概念図)

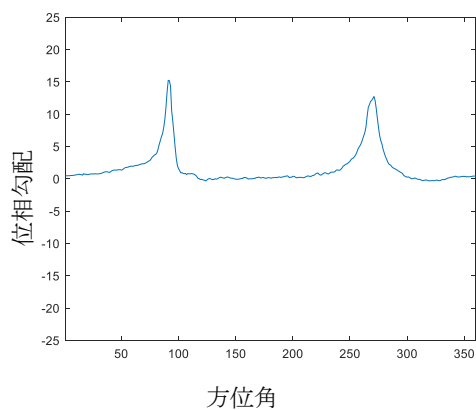


図2 弱値(方位角方向の位相勾配)が特定の方角で増幅されている

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Choudhary Saumya, Sampson Rachel, Miyamoto Yoko, Magana-Loaiza Omar S., Rafsanjani Seyed Mohammad Hashemi, Mirhosseini Mohammad, Boyd Robert W.	4. 巻 43
2. 論文標題 Measurement of the radial mode spectrum of photons through a phase-retrieval method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 6101 ~ 6104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.43.006101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Salla Gangi Reddy, Kumar Vijay, Miyamoto Yoko, Singh R. P.	4. 巻 25
2. 論文標題 Scattering of Poincare beams: polarization speckles	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 19886 ~ 19893
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.25.019886	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計36件（うち招待講演 12件/うち国際学会 24件）

1. 発表者名 Y. Miyamoto
2. 発表標題 Twisting optical modes
3. 学会等名 2020 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Miyamoto, C. T. Samlan, S. Gautam, D. N. Naik, and N. K. Viswanathan
2. 発表標題 Correction to spatial mode transformation in a modified interferometer
3. 学会等名 Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Y. Miyamoto, C T Samlan, S. Gautam, D. N. Naik, and N. K. Viswanathan
2 . 発表標題 Spatial mode transformation in a modified interferometer
3 . 学会等名 Joint Symposia on Optics, Optics and Photonics Japan 2019 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 C. T. Samlan and Y. Miyamoto
2 . 発表標題 Birefringent optical twister
3 . 学会等名 日本光学会 Optics and Photonics Japan 2019
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Ochiai, S. Hayase, K. Nitta, and Y. Miyamoto
2 . 発表標題 Characterizing electron-beam resist gL-1000-5 for hologram fabrication
3 . 学会等名 Irago Conference 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Miyamoto
2 . 発表標題 Spatial mode transformation in an interferometer
3 . 学会等名 International Conference on Optics & Electro-Optics: XLIII Symposium of Optical Society of India (ICOL-2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Miyamoto
2. 発表標題 Interferometric manipulation of spatial modes
3. 学会等名 14th International Conference on Correlation Optics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Miyamoto and G. R. Salla
2. 発表標題 Probing the orbital angular momentum spectrum of complex incoherent mixtures
3. 学会等名 Light in Nature VII (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Miyamoto, M. Hayashi, and M. Iha
2. 発表標題 Size-dependent angular momentum of an optical beam with inverted vortex
3. 学会等名 OSK-OSA-OSJ Joint Symposia (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Miyamoto
2. 発表標題 The misaligned interferometer and the 2D harmonic oscillator
3. 学会等名 28th International Laser Physics Workshop (LPHYS '19) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林道明, 伊波雅生, 宮本洋子
2. 発表標題 空間光変調器を用いた非点収差を持つラゲールガウスビームの生成
3. 学会等名 第44回光学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 落合洋介, 早瀬茂法, 宮本洋子
2. 発表標題 ホログラム作製のための電子線レジスト gL-1000-5 の多重露光特性測定
3. 学会等名 第44回光学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Miyamoto and C. T. Sاملan
2. 発表標題 The modified interferometer as twisting operations on spatial modes
3. 学会等名 5th International Conference on Optical Angular Momentum (ICOAM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 C. T. Sاملan and Y. Miyamoto
2. 発表標題 Weak value amplification of skew aberration
3. 学会等名 Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC '19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Miyamoto and G. R. Salla
2. 発表標題 Analyzing the orbital angular momentum spectrum of incoherent mixtures through astigmatism
3. 学会等名 11th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication (ODF '18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 C. T. Sاملan, D. N. Naik, N. K. Viswanathan, and Y. Miyamoto
2. 発表標題 Ultra short polarization singularities from two beam interference
3. 学会等名 11th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication (ODF '18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Miyamoto and G. R. Salla
2. 発表標題 Probing the orbital angular momentum spectrum of incoherent mixtures
3. 学会等名 27th International Laser Physics Workshop (LPHYS '18) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮本洋子, 伊波雅生
2. 発表標題 ダブルリズムを用いたサニャック型回轉シア干渉計
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮本洋子
2. 発表標題 回轉対称性、角運動量と光渦
3. 学会等名 研究会「光・物質・生命・宇宙におけるキラリティ」（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 早瀬茂法, 宮本洋子, 落合洋介
2. 発表標題 ホログラムの作製のための電子線レジストの多重露光特性の研究
3. 学会等名 日本光学会 コンテンポラリーオプティクス研究グループ「ダイバーシティの光明」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊波雅生, 宮本洋子
2. 発表標題 サニャック型回轉シア干渉計を用いた位相勾配測定 II
3. 学会等名 日本光学会 Optics and Photonics Japan 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 早瀬茂法, 宮本洋子, 落合洋介
2. 発表標題 経路干渉計法による光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出用ホログラムの作製
3. 学会等名 日本光学会 Optics and Photonics Japan 2018
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Miyamoto
2 . 発表標題 Generation and characterization of polarization structures
3 . 学会等名 3rd International Conference on Photonics Solutions (ICPS2017) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. G. Reddy, V. Kumar, Y. Miyamoto, and R. P. Singh
2 . 発表標題 Correlations in Stokes parameters of vector speckles
3 . 学会等名 4th International Conference on Optical Angular Momentum (ICOAM) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. G. Reddy and Y. Miyamoto
2 . 発表標題 Intensity correlation properties of scattered light beams
3 . 学会等名 13th International Conference on Correlation Optics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. G. Reddy and Y. Miyamoto
2 . 発表標題 Propagation of non-separable light beams through a tilted lens
3 . 学会等名 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Miyamoto
2. 発表標題 Optimizing holograms for quantum information technologies
3. 学会等名 International Topical Meeting On Applied and Adaptive Optics (INTOPMAA-17) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. G. Reddy, R. P. Singh, Y. Miyamoto
2. 発表標題 Experimental generation of Bessel-Gauss coherence functions
3. 学会等名 Optical Manipulation Conference (OMC '17) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮本洋子
2. 発表標題 光の空間モード変換と量子情報技術への応用展開
3. 学会等名 日本学術振興会 光エレクトロニクス第130委員会 第307回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Miyamoto
2. 発表標題 Characterization of the unfolding process of an optical vortex
3. 学会等名 Complex Light and Optical Forces XI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. G. Reddy, V. Kumar, R. P. Singh, and Y. Miyamoto
2 . 発表標題 Scattering of vector vortex beams: polarization speckles
3 . 学会等名 Asia Communications and Photonics Conference (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 S. G. Reddy, R. P. Singh, and Y. Miyamoto
2 . 発表標題 Mode dependent spatial intensity correlations in scattered light beams
3 . 学会等名 Irago (Interdisciplinary Research And Global Outlook) Conference 2016 (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 S. G. Reddy and Y. Miyamoto
2 . 発表標題 S-wave plate for generating vector vortex beams and its characterization
3 . 学会等名 OSJ - OSA Joint Symposia on Plasmonics and Digital Photonics (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 北谷拓磨, 宮本洋子
2 . 発表標題 空間光変調器を用いた擬似振幅変調用の位相変調パターンの設計と評価
3 . 学会等名 日本光学会 Optics and Photonics Japan 2016
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 S. G. Reddy, Y. Miyamoto
2. 発表標題 Scattering of Scalar and vector optical vortices
3. 学会等名 日本光学会 コンテンポラリーオプティクス研究グループ「ディーブラーニングと光」
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 宮本洋子, Maruthi Manoj Brundavanam, Sunil Vyas, 中川賢一
2. 発表標題 複屈折結晶中の光渦の展開
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>宮本研究室ホームページ http://www.qopt.es.uec.ac.jp 高校生向け講演 宮本洋子「回転する光の不思議」夢ナビライブ2019 東京会場 2019年</p>

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
研究協力者	ボイド ロバート (Boyd Robert)	ロチェスター大学・光学研究所・教授	

6. 研究組織 (つづき)

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	アロンゾ ミゲル (Alonso Miguel)	ロチェスター大学・光学研究所・教授	
研究協力者	チャンドラン・トディカ サムラン (Chandran-Thodika Samlan)	ボルドー大・博士研究員	