

対数極座標変換の複製による光渦モード分離の高精度化

1200011 荒川 涼 (光制御・ネットワーク研究室)

(指導教員 小林 弘和 教授)

1. 研究背景と目的

現在、私たちは、仕事や趣味に欠かすことのできないツールとしてパソコンやスマートフォンといった通信デバイスを使用する。そして、通信デバイス間でやり取りされるデータ容量は年々増加しており、通信大容量化が求められている。通信の大容量化として、空間分割多重方式(SDM:Space Division Multiplexing)と呼ばれる方法が検討されている。空間分割多重方式には、光渦という光ビームを用いる方法のことをモード分割多重通信(MDM:Mode Division Multiplexing)という。光渦とは、等位相面が螺旋状にねじれており、強度分布が円環状で中心に強度暗点を持つ光ビームのことである。螺旋状の位相勾配をもつこの光渦は、整数 l で表される多数の空間モードを持つため、多重化通信、光情報処理、量子情報処理などに応用できる。

本研究では、ピクセル毎に光波の位相変調が可能である空間位相変調器(SLM)とレンズのフーリエ変換作用を用いて、光渦を異なる形状に幾何学変換してモード毎に分離する手法を実験的に確認したので報告する。

2. 対数極座標変換

今回の実験では、 (x, y) 平面から (u, v) 平面の対数極座標変換を考える。図1のように、平面 $z = x + iy = re^{i\phi}$ から平面 $w = a \log(z/b)$ (a, b は定数)に移す変換のことを対数極座標変換という。この変換による (x, y) と (u, v) の関係式は、

$$u = a \log(\sqrt{x^2 + y^2}/b), v = a \tan^{-1}(y/x) \quad (1)$$

である[1]。式(1)の a は v 軸方向のサイズを決定する定数であり、 b は対数極座標変換された分布を u 軸上の位置を決定する定数である。この変換を $2f$ 系におけるレンズのフーリエ変換作用を利用して実現する。位相停留法を用いた伝搬計算を行ない、式(1)の変換を実現するために光渦に付加する位相分布 ϕ を求め[2]、SLMに表示させる。このSLMに光渦を入射すると、円環状の位相分布を持った光渦が v 軸に沿った位相勾配を持つ分布に変換される。これをレンズで集光すればモード l 毎に異なる位置に集光されるためモード分離が可能となる。本研究ではさらに、式(1)の v の式に、 $\pm 2\pi$ を加えて位相分布を作成することで上下に同様の分布を複製し、集光した際のモード分離の精度を向上させる。

3. 実験構成・結果

図2に実験系を示す。ビーム径1.6mm、波長635nmのレーザーを使い、偏光板で水平偏光にして、右回りまたは左回りの円偏光を1/4波長板で生成し、Q-plateと呼ばれる光学素子を用いて、 $l = +1$ または $l = -1$ の光渦を生成する。この光渦に、SLMの対数極座標変換させる位相分布 ϕ を与え、レンズの代わりに焦点距離200mmの凹面鏡でフーリエ変換を行った。更に、補正用の位相分布 ϕ_a を与え、焦点距離75mmレンズの焦点面にCCDカメラを置いて、対数極座標変換された光渦ビームを観測した。図3(a)は、入射モード $l = +1$ 、図3(b)は、入射モード $l = -1$ の時に、CCDで観測した強度分布である。集光される場所が、モード毎に上下にずれていることがわかる。この結果を用いて、 $l = +1, -1$ のそれぞれのピーク時の光強度を正規化して、中心付近の縦軸に沿った断面強度分布を、図4に示す。 $l = \pm 1$ のモード分離度を評価するために以下の式で定義される分離度 R を使用する。

$$R = 1.18 \times \frac{d}{\sigma_{+1} + \sigma_{-1}} \quad (2)$$

d は、モード間の距離を表しており、 σ は、半値幅を表す。この式を使い計算すると、分離度は、 $R = 2.23$ と出た。分離度が、1.5以上あるので、よく分離されていることがわかる。

4. まとめ

q-plateで生成された光渦は、SLMで表示された位相分布 Φ と位相補正用の位相分布 ϕ_a で、対数極座標変換され位相勾配を持った矩形の分布となる。これを、レンズで集光することによって、光渦のモード分離が可能となることが分かった。

参考文献

- [1] G. C. G. Berkhout, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 105, 153601 (2010).
- [2] O. Bryngdahl, J. Opt. Soc. Am. 64, pp.1092-1099 (1974).

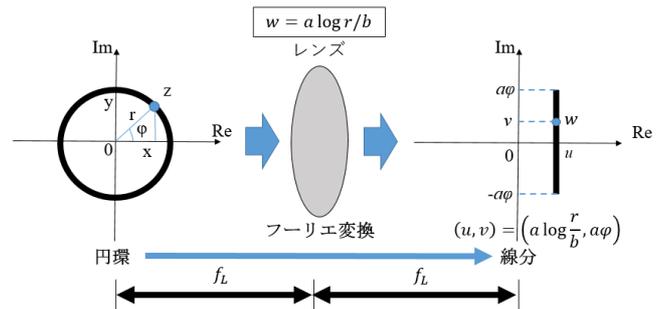


図1.対数極座標変換

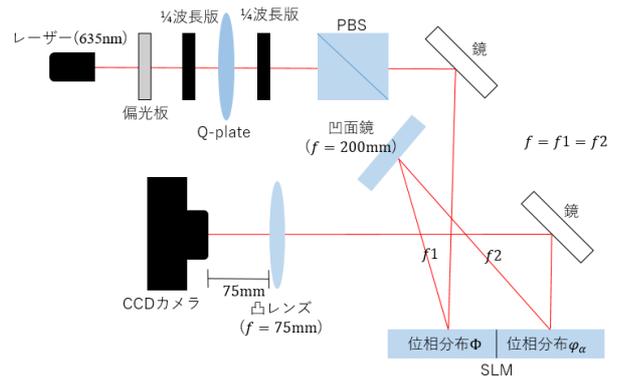


図2.実験系

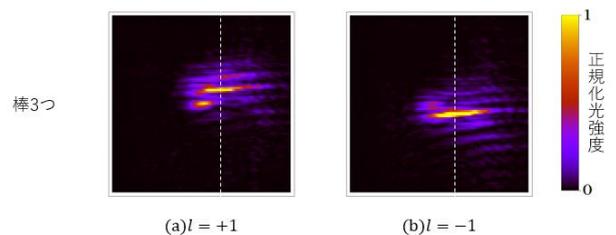


図3.実験結果

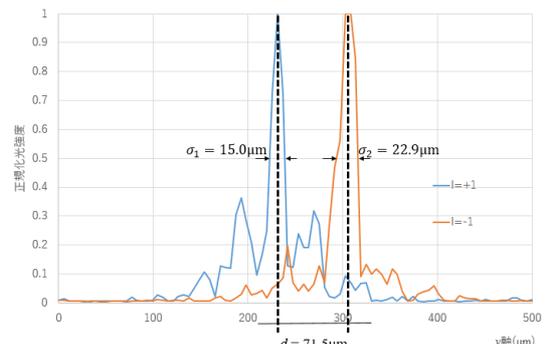


図4. $l = +1, -1$ のピーク時の断面