

光ビーム断面の扇形変換による光渦モード逡倍

1210079 鈴木健斗 (光制御・ネットワーク研究室)

(指導教員 小林弘和 准教授)

1. 目的

スマートフォンやパソコンなどの通信デバイスの普及に伴うデータ通信量の増加で通信の大容量化が求められている。通信の大容量化の手法の一つとして、モード分割多重化通があげられ、多数の空間モードを有する光渦の利用が検討されている。光渦とは、図1(a)のように強度分布が円環状で中心に強度暗転を持つ光ビームである。モード分割多重方式において、光モードの図1(b)のような加減算、図1(c)のような乗除算的操作を用いることによって、チャンネル操作が可能である。光渦モードの加減算的な変換技術は比較的簡単に実装できるが、乗除算の変換手法はまだまだ確かな技術が確立されていない。先行研究として、 $2f$ 系を用いた扇形変換による光渦モード逡倍変換[1]が実装されているが本研究では、空間光学系の簡素化と逡倍変換を実現する位相分布を工夫することで変換の効率化を図る。

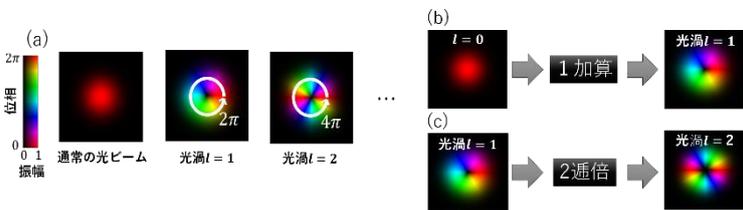


図1 (a)光渦モード l の強度と位相分布(b)光渦モード l の加算 (c)光渦モードの2逡倍

2. 扇形変換を実現する位相分布

極座標の入射面 (r, θ) にレンズの位相フィルタと光渦モード N 逡倍に必要な扇形変換を実現させる位相フィルタを付加したあと距離 f だけ伝搬させたのちに変換が完了するとする。 f 伝搬後の極座標の出射面 (ρ, ϕ) で確認できる回折像をフレネル回折積分で表し、それを出射面で扇形に変形することを考慮して計算することで求めた入射面に付加する扇形変換を実現させる位相フィルタの関数 $\varphi_n(r, \theta)$ は、

$$\varphi_n(r, \theta) = \frac{k}{f} \left(\frac{\alpha N r^{1+\frac{1}{N}}}{N+1} \cos \left[\frac{(N+1)\theta + 2n\pi}{N} \right] - \frac{1}{2} r^2 \right) \quad (2.1)$$

となる。ここで k は波数、 n は $1 \leq n \leq N$ を満たし、 α は実数である。これら N 個の位相分布を、

$$\varphi(r, \theta) = \arg \left[\sum_{n=0}^{N-1} e^{i\varphi_n(r, \theta)} \right] \quad (2.2)$$

のように和の偏角をとることによって、 N 逡倍を実現する位相分布が求まる。

また、扇形変換に伴う余分な位相を補正する位相フィルタの関数 $\Psi(\rho, \phi)$ は、

$$\Psi(\rho, \phi) = \frac{k}{f} \left\{ \left(\frac{\rho}{\alpha} \right)^N \left(\frac{\rho \cos[\phi(N+1)]}{N+1} \right) - \frac{1}{2} \rho^2 \right\} \quad (2.3)$$

となる。光渦モード2逡倍変換用位相分布 $\varphi(r, \theta)$ と変換を補正する位相分布 $\Psi(\rho, \phi)$ による逡倍変換の様子を図2に示す。

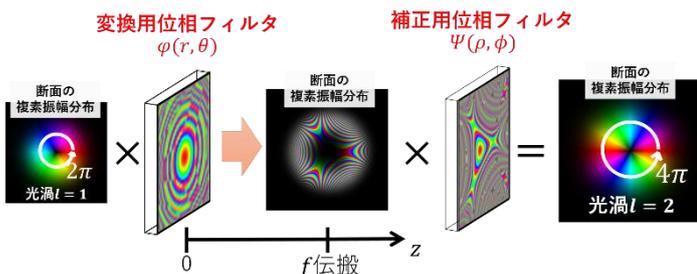


図2 2逡倍変換の様子

3. 扇形変換による光渦モード逡倍実験

光渦モード逡倍実験の実験系を図3に示す。光源は635[nm]のファイバピグテールLDであり、光ファイバケーブルで参照光と被測定光に分けてそれぞれ水平偏向を準備している。被測定光はq-plate(光渦リターダ)($q=1/2$)を用いて光渦モード $l=1$ と $l=-1$ を生成する。生成した光渦に反射型空間位相変調器(SLM)で逡倍変換の位相分布 $\varphi(r, \theta)$ を付加し、鏡などを用いて距離 f 伝搬後にSLMで補正の位相分布 $\Psi(\rho, \phi)$ を付加させ、レンズとピンホールで雑音を除去した後にCCDカメラで観測する。さらに光渦の位相成分を角スペクトル法により抽出するために参照光と被測定光を干渉させる。

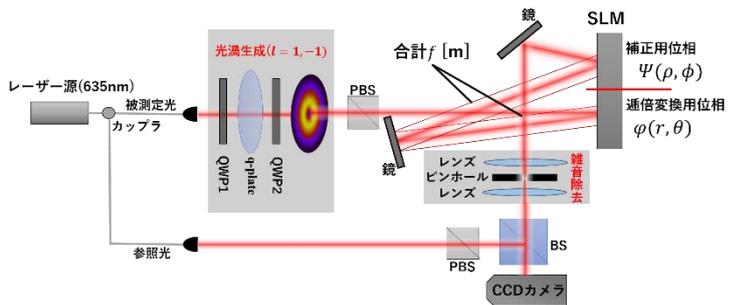


図3 光渦モード逡倍実験の実験系

4. 実験結果

観測した強度分布と角スペクトル法で抜き出し r た位相分布を図4(a)に示す。光渦の位相成分を抜き出して光渦モードの確率を計算したものを図4(b)に示す。

生成された光ビーム断面の強度分布が三角形になった。これはSLMが有限の大きさを持つことが原因であると考えられるため、改善には別の工夫が必要であると考えられる。光渦モード2逡倍変換後の光渦モード $l = \pm 2$ の確率はどちらも80%以上であった。これにより2逡倍変換は成功したといえる。また、先行研究[1]による逡倍手法での変換後の光渦モードの確率は、 $l=2$ で81%、 $l=-2$ で73%であり、本研究での確率は、それぞれ88%と89%であるので、効率化も達成した。

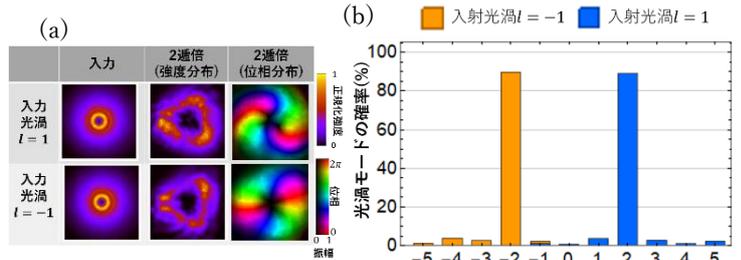


図4 (a)観測した強度分布と抜き出した位相分布 (b)光渦モードの確率

5. まとめと展望

複数の位相フィルタによる扇形変換を、変換用の位相フィルタと補正の位相フィルタとの2つの位相フィルタで実装することに加え、レンズの機能を持つ位相フィルタを変換用の位相フィルタに付加し補正用のフィルタを工夫することで、本来 $2f$ 系での扇形変換であったものから、SLMのみの空間光学系で実装する手法の提案を行い、それを実証した。3逡倍、4逡倍以降もパラメータを調整することで実装可能である。この技術は空間モードの制御に幅広く貢献でき、今後の光科学技術に大きく発展すると考えられる。

参考文献

[1] S. Takashima, H. Kobayashi, K. Iwashita, "Integer multiple for the orbital angular momentum of light using a circular-sector transformation" Phys. Rev. A **100**, 063822(2019)