

高次ラゲールガウシアンビームの Gouy 位相による光強度分布の回転制御

Rotation control of light intensity distribution with Gouy phase of higher-order Laguerre-Gaussian beam

1235129 横川 恒助 (光制御・ネットワーク研究室)
(指導教員 小林 弘和 准教授)

1. はじめに

ラゲールガウシアンビーム(LG ビーム)は高次のガウシアンビームであり、方位角方向の位相変化を表すモード番号 l と動径方向の位相変化を表すモード番号 p によって特徴づけられる。モード l はビームの断面内に光軸を中心に $0\sim 2\pi l$ の方位角位相を含むことを示す。モード p は動径方向の位相変化として光軸から外側へ π の位相変化が p 回あることを示しており、リングの数を示す。図1に各モード番号の複素振幅分布(振幅:明度, 位相:色相)を示す。また、ガウシアンビームは Gouy 位相と呼ばれる伝搬で変化する位相を持ち、平面波と位相のずれが生じる。Gouy 位相の位相変化量はモード毎に異なり、異なる2つ以上のモードを重ね合わせたビームは Gouy 位相の差によって強度分布が角加速度をもち、伝搬すると回転する[1]。

このような角加速度をもつビームは光計測や微粒子制御への応用が期待され、ビームを通過する粒子の速度測定や回転する強度分布の光圧による微粒子の回転制御が可能となる。本研究では、2つモードを重ね合わせたビームに生じる伝搬による強度分布の回転を制御することを目的とする。本稿では基本ガウシアンビーム($LG_{l,p}=LG_{0,0}$)と動径モード p を有する高次の LG ビームに生じる Gouy 位相の差を調整し、干渉による強度分布の回転制御を行ったので報告する。

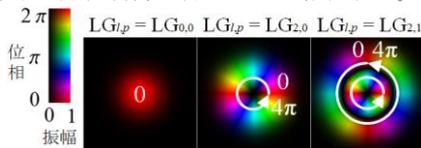


図1 LG ビームの複素振幅分布

2. 位相変化による強度分布の回転

$LG_{0,0}$ と $LG_{2,0}$ を重ね合わせたビームの強度分布は図2に示すように八の字型となる。一般に、 $LG_{l,p}$ のビームに χ の位相を与えると同位相の位置が $\theta=\chi/l$ だけ回転し、 $LG_{0,0}$ と重ね合わせた強度分布も θ だけ回転する。この位相差 χ が伝搬によって生じる Gouy 位相の位相差と対応し、ビームが伝搬することで強度分布が回転する。

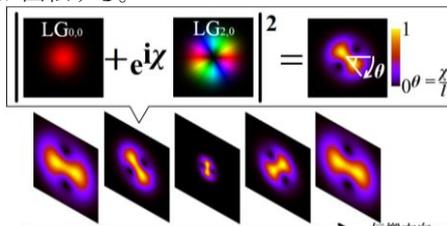


図2 $LG_{0,0}$ と $LG_{2,0}$ の強度分布の回転

3. Gouy 位相による強度分布の回転

z 軸方向に伝搬する $LG_{0,0}$ のビーム半径は $z=0$ の位置で最小値 W_0 (ビームウエスト半径)になる。ビーム半径が $\sqrt{2}W_0$ になるまでの伝搬距離はレイリー長 z_r と呼ばれ、波長 λ を用いて $z_r=\pi W_0^2/\lambda$ と表される。LG ビームの Gouy 位相は、

$$\chi_{l,p}(z) = (2p+|l|+1) \tan^{-1} \frac{z}{z_r} \quad (1)$$

と表される。また $LG_{0,0}$ と $LG_{l,p}$ の強度分布の回転角 $\theta(z)$ はそれぞれのビームの Gouy 位相の位相差から

$$\theta(z) = \frac{\chi_{l,p}(z) - \chi_{0,0}(z)}{l} = \frac{2p+|l|}{l} \tan^{-1} \frac{z}{z_r} \quad (2)$$

と表される。式(2)より回転角はモード l の変化では増加せず、モード p を変化させることで増加することがわかる。

4. 実験構成・結果

強度分布回転の実験系の概略を図3に示す。He-Ne レーザー(波長 633nm)を用いて $LG_{0,0}$ のビームを空間位相変調器(SLM)へ入射し、位相変調することで $LG_{0,0}$ と高次モード $LG_{l,p}(l=2,p=0\sim 40)$ を重ね合わせたビームを生成した。生成したビームをレンズ($f=300\text{mm}$)で集光した際に $z_r=148\text{mm}$ と $z_r=32\text{mm}$ となるように調整し、Gouy 位相の変化による強度分布の回転を CCD カメラで観測した。 $z_r=148\text{mm}$ の $LG_{0,0}+LG_{2,40}$ の回転を強度 60%の輪郭で3次元分布にしたものを図4に示す。 $z_r=32\text{mm}$ のビームのビームウエスト位置の回転角を 0° とし、観測した強度分布の回転角を図5に示す。式(2)の理論式を用いて z_r についてフィッティングした結果を実線と点線で示している。動径モード p により回転量が式(2)に従って増加した。

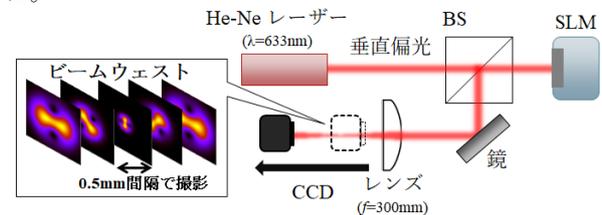


図3 実験系

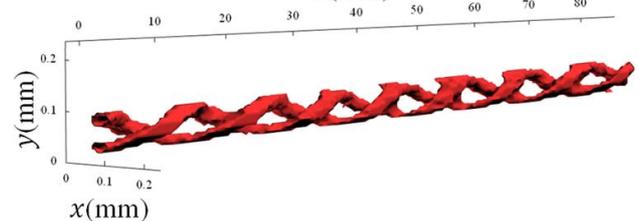


図4 $LG_{0,0}+LG_{2,40}$ の三次元分布

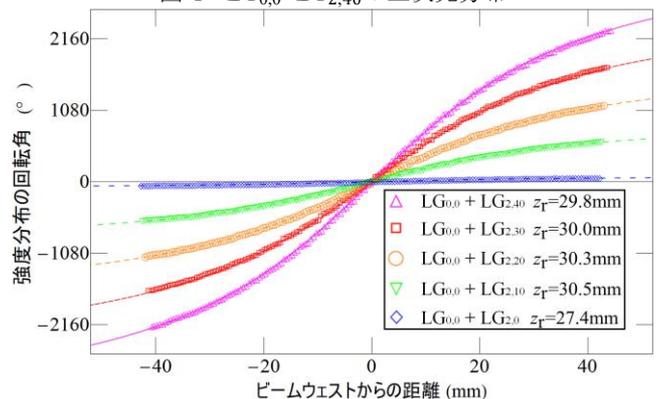


図5 強度分布の回転角

5. まとめ

$LG_{0,0}$ と高次モード $LG_{l,p}(l=2,p=0\sim 40)$ を重ね合わせたビームを生成して強度分布の回転を観測した。モード l,p に依存した Gouy 位相の変化によって生じる強度分布の回転から回転量全体を制御することができた。また、レイリー長 z_r についても調整することで、距離当たりの回転量を制御できた。

参考文献

[1] J. Hamazaki, Y. Mineta, K. Oka, and R. Morita, "Direct observation of Gouy phase shift in a propagating optical vortex," Opt. Express 14.28, 8382-8392 (2006).