

## 自由空間伝搬制御によるラゲールガウスビームのモード上昇・下降操作

1250137 日永 直仁 (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・目的

光ビーム断面の複素振幅分布が異なる空間モードに情報を付加して多重化を行うモード分割多重通信 (MDM) は、同一波長での多重化が可能であり、既存の波長多重通信と組み合わせることで通信の大容量化が期待されている。MDM を利用した光無線通信で使用されるビームの一つに、Laguerre-Gaussian (LG) ビームがあり、複素振幅分布が異なる空間モードとして方位角モード  $l$  と動径モード  $p$  の二つの異なるモードを持つ。その複素振幅はビーム横断面の極座標を  $\mathbf{r} = (r, \theta)$  とすると以下の式で表される [1]：

$$\text{LG}_p^l(r, \theta) \equiv A e^{-r^2/w_0^2} \left( \frac{\sqrt{2}r}{w_0} \right)^{|l|} L_p^{|l|} \left( \frac{2r^2}{w_0^2} \right) e^{il\theta}. \quad (1)$$

ここで、 $A$  は振幅、 $w_0$  はビーム径、 $L_p^{|l|}(\cdot)$  はラゲール陪多項式である。図 1 は、横軸を方位角モード  $l$ 、縦軸を全モード数  $N = 2p + |l|$  とした場合の LG ビームの複素振幅分布を表し、LG モード  $(l, p)$  の異なるモードは直交しているため、モード毎に異なるデータを伝達できる。モード変換技術は通信において中継器などで必要となる技術であり、方位角モード  $l$  のみを利用したモード変換技術は確立されている。しかし、方位角モード  $l$  と動径モード  $p$  を組み合わせた MDM に必要なモード変換技術は確立されていない。本稿では、任意の LG モードに対するモード上昇・下降の操作を自由空間伝搬制御を用いて光学的に実装することを目的として、シミュレーションした結果を報告する。

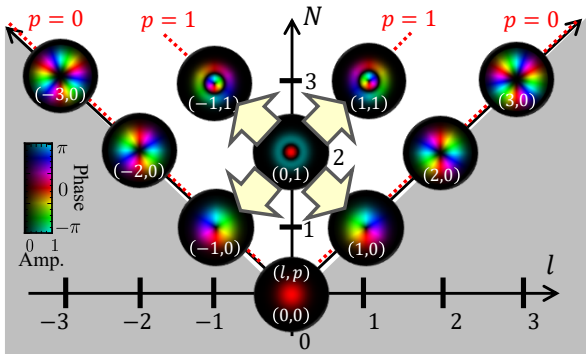


図 1: 空間モード  $(l, p)$  を持つ LG ビームの複素振幅とモード昇降の操作。

## 2. 自由空間伝搬制御によるモード上昇・下降の手法

図 1 の LG モードを 4 種類の斜め方向に一つ遷移させるようなモード上昇・下降変換の操作は自由空間伝搬とべき関数の組み合わせで構成できる。図 2 に示すように、入射分布  $\psi_{\text{in}}(\mathbf{r})$  に対して正と負の自由空間伝搬 (距離  $f$ ) でべき関数の空間フィルタ  $g(\mathbf{s}) = u \pm iv$  を挟んだ 2 種類の操作を行なった分布に対して適切な位相差  $\Delta\theta$  をつけて

和をとれば LG モードが変換された分布  $\psi_{\text{out}}(\mathbf{t})$  を得る。モードの遷移方向はべき関数の空間フィルタ  $g(\mathbf{s})$  の符号と位相差を調節することで選択できる。さらに、図 2 の入射面と出射面に追加で  $f$  の伝搬距離を設ければ、負の伝搬を打ち消すことで正の伝搬のみで構成可能となり、光学系での実装が容易になる。ただし、このとき出力される分布はモード昇降変換に加えて  $2f$  だけ伝搬した分布が出力され、2 種類の操作の和をとる際は位相差だけでなく振幅比を考慮する必要がある。

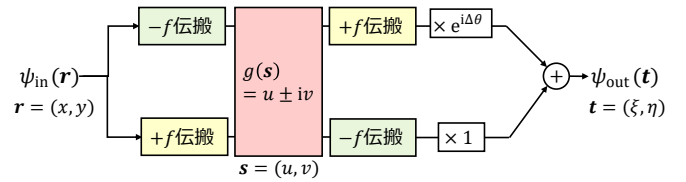


図 2: 正と負の自由空間伝搬でべき関数の空間フィルタ  $g(\mathbf{s})$  を挟んだモード昇降操作。

## 3. モード上昇・下降シミュレーション

( $l = -1, p = 0$ ) の LG モードを入射分布  $\psi_{\text{in}}$  として、図 2 (a) の操作を行ないモード変換のシミュレーションの結果を示す。シミュレーション結果  $\psi_{\text{out}}$  と所望の分布との相関係数は 99.9% であり、( $l = -1, p = 0$ ) の LG モードは ( $l = 0, p = 1$ ) の LG モードに上昇した。図 1 では、右斜め上方向に一つ遷移する操作にあたる。そのほかの LG モードでも、同様に LG モードの上昇が確認でき、べき関数の空間フィルタの符号と和をとる際の位相差を調整することで、4 種類の方向でのモード上昇・下降操作を確認することができた。

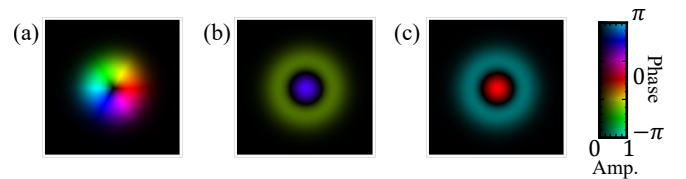


図 3: (a) LG モード ( $l = -1, p = 0$ ) の入射分布  $\psi_{\text{in}}$ , (b) シミュレーション結果  $\psi_{\text{out}}$ , (c) 所望の LG モード ( $l = 0, p = 1$ ) の複素振幅分布。

## 4. まとめ・今後の予定

自由空間伝搬制御によるモード変換の手法を用いて、LG モードを一つ上昇・下降させることを確認できた。今後は、正の伝搬のみで構成した光学系の実装を行ない、LG モード昇降変換の実験をする。

## 参考文献

- [1] E. Karimi *et al.*, “Radial quantum number of Laguerre-Gauss modes,” *Phys. Rev. A* **89**, 063813 (2014)