

空間光変調器を用いた擬似振幅変調ホログラムによる光の空間モード変換

宮本研究室 北谷 拓磨

1. 研究目的

本研究は、中心に近づく程回折効率が小さくなるホログラムを作製し、空間光変調器(spatial light modulator SLM) を用いて 1 次のラゲールガウスビーム(LG ビーム) を正確に発生させることを目的とする。このようなホログラムはまた、光子の軌道角運動量状態および軌道角運動量重ね合わせ状態の柔軟な検出及び操作を実現することが期待される。そのためにホログラム用の位相変調パターンを作成する。そして、液晶素子を用いたホログラム装置である SLM と PC とを接続し、光を位相変調することで空間モードを変換する。変換されたビームを観察し、目的のビームが生成されていることを確認する。

2. 研究背景

近年光子の軌道角運動量もつれ合い状態の検出が非常に注目を受けており、量子通信分野への応用が期待されている[1][2]。そのためには、光子 1 個の軌道角運動量重ね合わせ状態の検出が重要である。

光子の軌道角運動量重ね合わせ状態を検出する手法として、ホログラムシフト法がある。ホログラムシフト法とは、ホログラムの欠陥位置を光軸からずらすことによって、複数の方位角モード成分の特定の重ね合わせ状態をガウスビームに変換する。さらにガウスビームに変換された成分をシングルモードファイバーで抽出することによって検出を行う手法である。しかし、軌道角運動量重ね合わせ状態の検出の課題として、従来の位相のみ変調するホログラムを用いると余分な方位角成分が混入する問題がある。その問題を解決するために、中心に近づくほど回折効率が小さくなるホログラムを作製する。このホログラムが実現すると、余分な方位角成分の混入を減らし、正確な軌道角運動量重ね合わせ状態の検出ができる可能性がある。

このようなホログラムはまた、欠陥位置を光軸に一致させたとき、ガウスビームの入力に対して動径方向のモード指数 0 の LG ビームを正確に発生させることが期待される。そこで本研究では動径方向のモード指数 0 の 1 次の LG ビームを発生させ、ホログラムが正しく動作することを確認する。

3. 作成するホログラム用の位相変調パターン

本研究では、ラゲールガウスビームを作り出すために反射型ブレース状位相ホログラムを用いる。ブレース状位相ホログラムは、理論上回折効率が 100 % であり、物体光と参照光の位相差を $[0, 2\pi)$ で折りたたみ、位相変調として記録したホログラムのことである。ガウスビームに位相因子 $\exp(im\varphi)$ を付加することで、ラゲールガウスビームを生成することができる。ここで m を方位角モード指数、 φ を方位角と定義する。近似的に動径方向のモード指数は 0 である。方位角モード指数 $m=1$ のときのホログラムの位相変調パターンを図 1 に示す。このホログラムは通常の回折格子とは異なり、中心部に欠陥次数 m の格子欠陥があるパターンである。

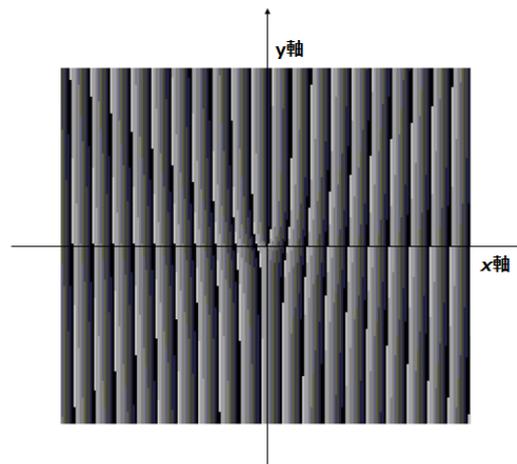


図 1 : $m=1, \sin\alpha > 0$ のときのホログラムの位相変調パターン。横軸が x 軸、縦軸が y 軸を表し、中心部の格子欠陥がある位置を原点とする。

ホログラムにおいて再生光と物体光を分離するために、再生光の伝搬方向に対して角度 α だけ傾いた方向へ物体光を伝搬させる。このときの物体光と再生光とのなす角を回折角という。回折角が大きければ、再生光と物体光を分離しやすくなるが、ホログラムの解像度もより高いものが必要となる。再生光が物体光に対して回折角 α 傾いて伝搬していると仮定すると、位相変調の式は、

$$\Phi_{\text{mod}} = m\varphi - k(\sin\alpha)x \quad (1)$$

となる。この位相変調を $[0, 2\pi)$ の範囲で折りたたんだものをホログラムの位相変調のパターンとする。

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{blaze}} &= \{m\varphi - k(\sin\alpha)x\} \bmod 2\pi \\ &= \left(m\varphi - \frac{2\pi}{\Lambda}x\right) \bmod 2\pi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sin\alpha} \quad (3)$$

Λ はホログラムのピッチである。本研究ではSLMをホログラムとして用いるので、位相変調幅は入力画像の輝度値の変調幅として指定する。また、回折効率を制御したいので位相変調幅の異なるパターンを作成する必要がある。式(2)で求めた位相変調パターン Φ の位相変調幅 2π に対応させる輝度値変調幅を様々に変更してホログラムパターンを作成する。具体的には、以下の式を用いて輝度値を計算する。

$$\Phi \times \frac{(\text{輝度値変調幅})}{2\pi} \quad (4)$$

4. SLMの表示倍率の測定

まずPCとSLM(浜松ホトニクス X10468-01)の設定方法や動作環境を知るために、位相変調パターンを表示した時に画像の1画素あたり何 μm の倍率でSLMに表示されるのかを実験により明らかにする。SLMはPCに対して外部ディスプレイ装置として振る舞い、位相変調値は表示画像の輝度値として指定できる。本実験ではPCとSLMを接続し、PCの第一画面の複製をSLMに表示することで位相変調を行う。SLMを第二画面とし、第二画面の解像度を 800×600 に設定した。これはSLMの液晶の画素数に合わせる為である。また、第一画面は解像度 1280×600 に設定した。本実験で使用するPCはLet's note CF-S10、OSはWindows 7の64bitである。PC側のディスプレイ出力端子はHDMI、SLMコントローラの入力端子はDVIなので、変換アダプタを使用した。この実験では、位相変調幅 2π を想定して作成した位相変調パターンを表示した。表示したパターンはホログラムピッチについて $30\mu\text{m}$ 間隔で $30\mu\text{m} \sim 210\mu\text{m}$ まで設計した。このとき、画像の1画素がSLM上の1画素に対応すると想定した。SLMの表示倍率の測定に用いる光学系を図2に示す。

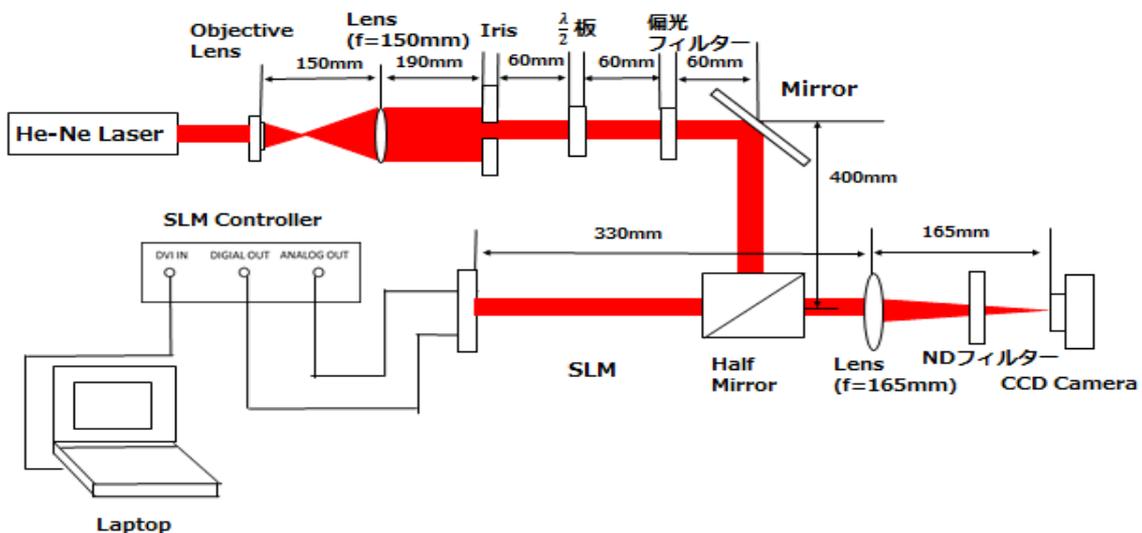


図2: SLMの表示倍率の測定に用いる光学系

SLM に広範囲にビームが当たるようにするために対物レンズと平凸レンズを使用して He-Ne レーザ($\lambda=632.8\text{nm}$)から出た光のビーム径を 5mm に拡大した。これは SLM の液晶部分の大きさが $16\text{mm}\times 12\text{mm}$ のためである。また、He-Ne レーザは偏光状態が s 偏光であったため、アイリスでビームの中心部を選択した後 $\lambda/2$ 板と、偏光フィルターを使用して p 偏光に偏光状態を変えた。本研究で用いる SLM は p 偏光成分のみ位相を変調するためである。 0° 入射とするためビームスプリッタ(BS)を通して SLM に入射した。SLM から出射した光は平凸レンズ($f=165\text{mm}$)を使用してフーリエ変換し、CCD カメラで強度分布を観察した。CCD カメラ画像上で回折光の間隔を pixel 数から計算した。最後に回折光の間隔から SLM 上で表示されているホログラムピッチを計算した。実験結果を図 3 に示す。

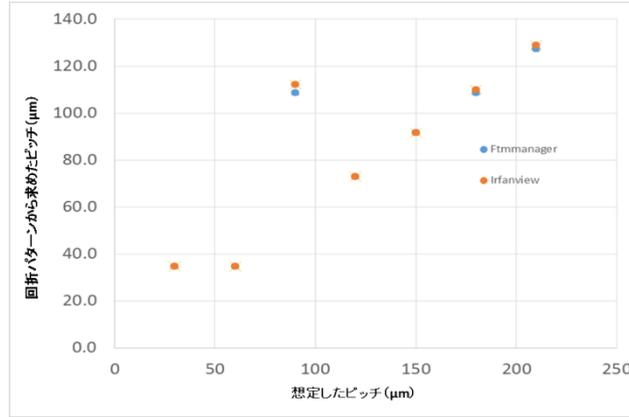


図 3 : 想定したピッチと回折パターンから求めたピッチの関係

図 3 の結果から、FtmManager 及び Irfanview を使用した時、想定ピッチが $120\mu\text{m}$ 以上のとき、想定ピッチと実際のピッチが比例した。この 2 つの直線の傾きとその不確かさを最尤推定法を用いて計算した。その結果、アプリケーション FtmManager 及び Irfanview を使用した時、PC の主画面(1280×800 画素) に対して、第二画面(800×600 画素) として接続したとき、画像 1 ピクセルが SLM 上では 0.61 ± 0.03 ピクセル、すなわち $12.2\pm 0.6\mu\text{m}$ で表示されることが分かった。

5. SLM 位相変調特性測定

本実験では擬似振幅変調用の位相変調パターンを作成する基礎データとするために、画像の輝度値変調幅と SLM による位相変調幅の関係を調べる。過去のデータ[3]から輝度値 186 で位相が 2π 変調されると想定し、位相変調幅 $0.25\pi\sim 2\pi$ を想定して作成したホログラムの位相変調パターンを SLM に表示して回折効率を測定する。まず -2 次から $+2$ 次までの回折次数毎の回折効率の理論値を求める。ブレイズ状の変調を想定した場合、 ± 1 次回折光の回折効率 $\eta_{\pm 1}$ は以下で与えられる。

$$\eta_{\pm 1} = |A_{\pm 1}|^2 = \text{sinc}^2\left(1 \mp \frac{t}{2\pi}\right) \quad (5)$$

$A_{\pm 1}$ は ± 1 次回折光の振幅、 t は位相変調幅を表している。平面波を SLM に入射し位相変調を行い、出射した光を平凸レンズを使用してフーリエ変換した。分離した回折光の中から、アイリスを使用して -2 次から $+2$ 次の回折光をそれぞれ選択し、パワーメータで -2 次から $+2$ 次の回折光のパワーを求めて回折効率を計算した。回折効率の算出の仕方を以下に示す。

$$\text{回折効率} = \frac{x\text{次回折光のパワー}}{\text{一様な輝度値を表示した時の } 0 \text{ 次光のパワー}} \quad (6)$$

算出した実験値と理論値の比較を図 4 に示す。

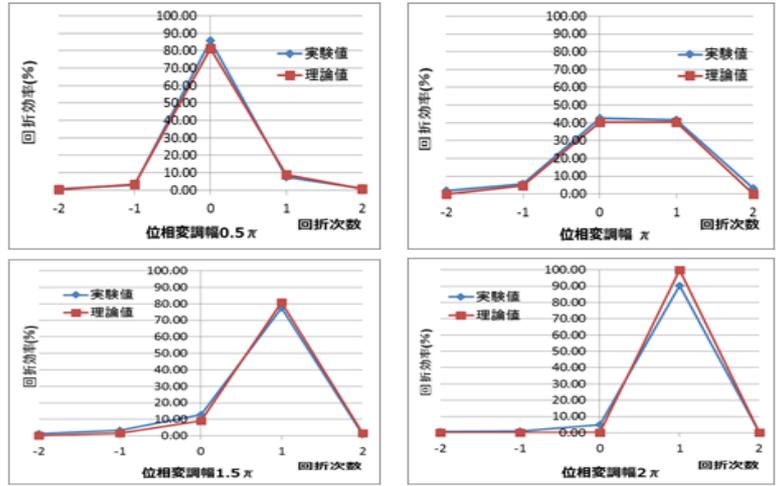


図4：想定位相変調幅 $0.5\pi \sim 2\pi$ のときの回折効率

図4の結果から、想定位相変調幅 $0.25\pi \sim 2\pi$ で実験値と理論値はほぼ一致した。このことから、想定通りの位相変調が得られ、従来の輝度値変調幅と位相変調幅の変換データが使用できることが分かった。

6. 擬似振幅変調用の位相変調パターン設計

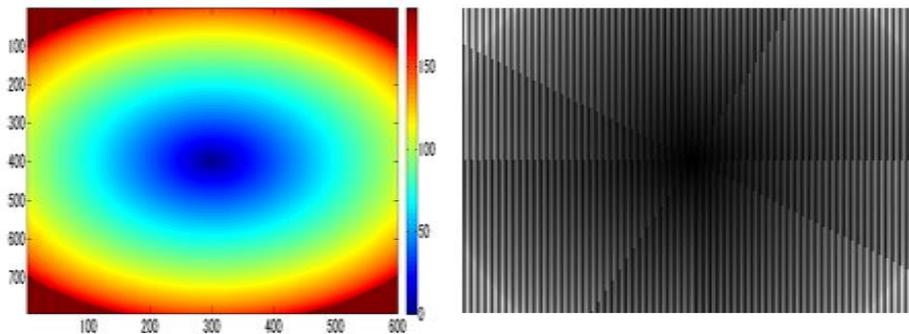
本研究で作製するホログラムは、入射光に対して $re^{i\varphi}$ の振幅及び位相変調を行うものである。ここで r は欠陥位置からの距離、 φ は方位角を表す。このホログラムはガウスビームの入力に対して方位角モード指数 $m=1$ 、動径モード指数 $p=0$ の理想的なラゲールガウスビームを出力する。また、中心をシフトして用いることで $m=0$ と 1 のモードの正確な重ね合わせ状態を出力すると期待される。この変調を位相のみを変調する素子で実現するために、中心に近づく程回折効率が小さくなるホログラムを設計する。振幅が中心からの距離に比例するように設計するため、回折効率は中心からの距離の2乗に比例するように設計する。そのため下記の位相変調パターンを用いる。

$$\Phi = \left[\left(\varphi - \frac{2\pi}{\Lambda} x \right) \bmod 2\pi \right] \times \frac{t}{2\pi} \quad (7)$$

ここで t は位置依存の位相変調幅である。 Λ はホログラムのピッチを表す。ホログラムの中心(原点)では位相変調幅 0 とし、外側にいく程位相変調幅が増大し、最終的にはホログラムの端で位相変調幅 2π となるように設計する。試作に用いる SLM は輝度値 255 のとき位相変調幅は 2.79π である[3]。ホログラム面内の原点からの距離から、得たい回折効率を設定する。その回折効率から位相変調幅を求め、輝度値変調幅に換算する。換算後の位相変調パターンの式を示す。

$$\Phi = \left[\left(\varphi - \frac{2\pi}{\Lambda} x \right) \bmod 2\pi \right] \times \frac{t}{2\pi} \times \frac{186}{2\pi} \quad (8)$$

式(8)を用いて作成した擬似振幅変調ホログラムによる位相変調パターンを図5に示す。



(a) 輝度値変調幅の分布

(b) 作成した位相変調パターン

図5：擬似振幅変調ホログラムの位相変調パターン

図5から、設計した通りホログラム面内の原点から外側に行くにつれて、輝度値変調幅が増大していることが確認できた。

7. 擬似振幅変調ホログラムによる光の空間モード変換

本実験では擬似振幅変調の手法を用いて1次のLGビームを正確に発生させられるかを確認する。そこで6.で設計したホログラムと位相変調のみを想定したホログラムにそれぞれ光を入射し、生成したビームの強度分布を比較する。具体的にはSLMで位相変調された直後の像(近視野の位置)及びSLMで位相変調されてから長くビームが伝搬した時の像(遠視野の位置)及び中間位置の像をCCDカメラ上に結像し、光強度分布の違いを観察した。ホログラム出力観察用(中間位置)の光学系を図6に示す。

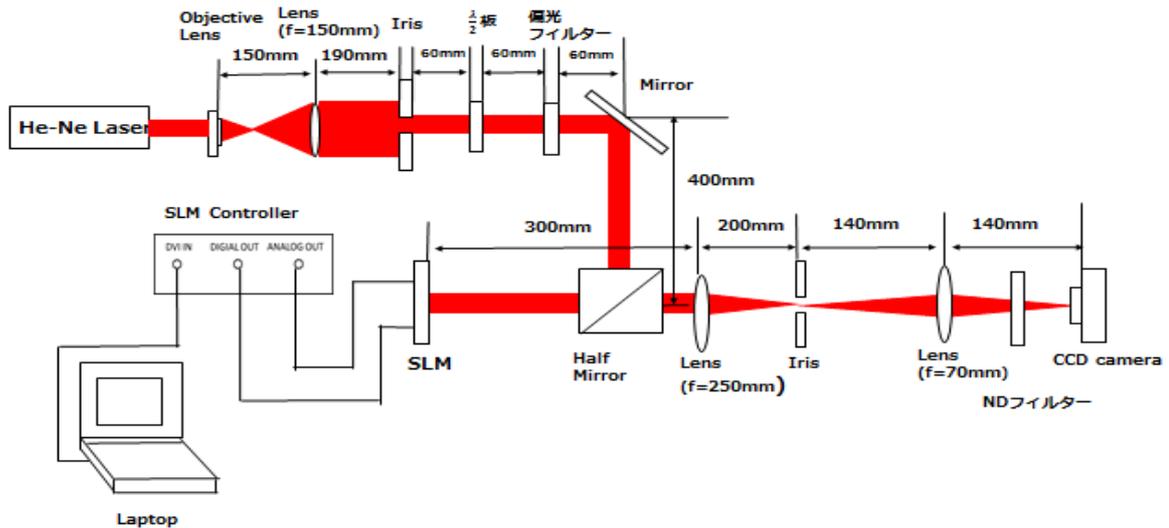
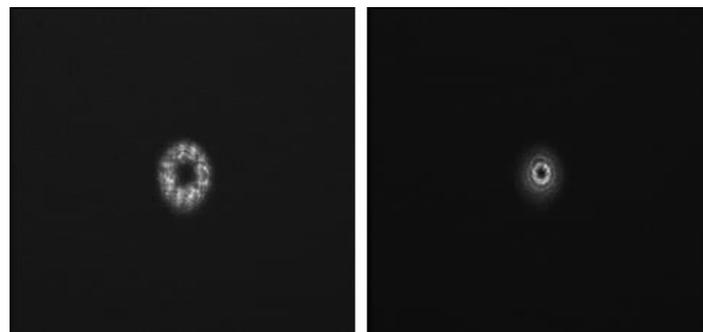


図6：ホログラム出力観察用の光学系(中間位置観察時)

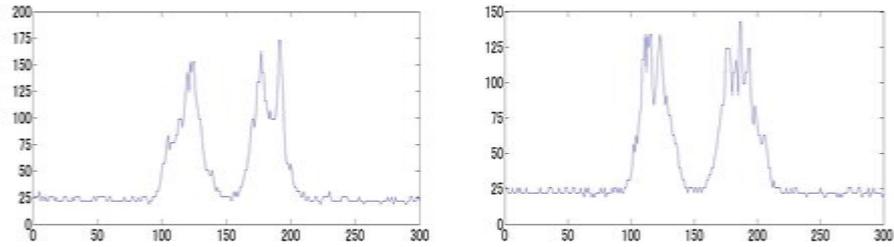
直径5mmに広げたレーザー光をSLMに入射し位相変調を行い、出射した光を平凸レンズ($f=250\text{mm}$)を使用してフーリエ変換した。フーリエ変換された回折光に対して、レンズから200mmの位置に設置したアイリスを用いて1次回折光を抽出した。抽出した1次回折光をレンズ($f=70\text{mm}$)を用いて結像し、結像位置にCCDカメラを置くことで、アイリスの位置の等倍像をCCDカメラ上で撮影した。これはホログラム出射光の中間位置に対応する。図7にCCDカメラ上の強度分布の比較を示す。



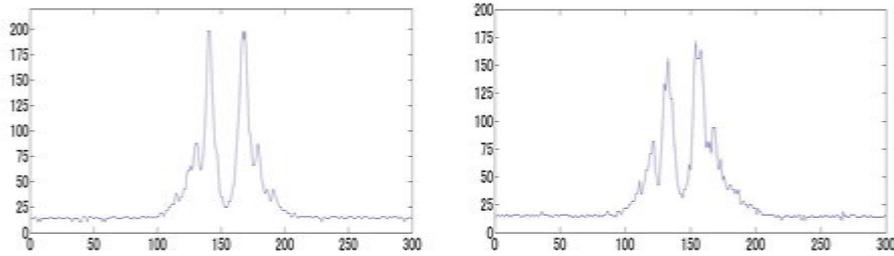
(a)振幅変調+位相変調 (b)位相変調のみ

図7：1次のLGビームの光強度分布

また、図8~9にそれぞれの光強度分布の断面図を示す。



(a) x 軸上の強度分布 (b) y 軸上の強度分布
 図 8 : 中間位置の光強度分布の断面図 (振幅変調+位相変調)



(a) x 軸上の強度分布 (b) y 軸上の強度分布
 図 9 : 中間位置の光強度分布の断面図 (位相変調のみ)

図 7~9 の結果から、振幅変調を行った場合はノイズはあるものの $m=1, p=0$ の LG ビームに特徴的な一重のドーナツ状の強度分布となっている。位相変調のみを行った場合は、1 次の LG ビームの特徴であるドーナツ状の強度分布の外側に余分な同心円状のパターンが現れた。光強度分布の断面図 (図 9) から、強度が下がる肩の部分にピークが現れていることが確認できる。このことから擬似振幅変調を行った場合、位相変調のみを行った場合と比べて純粋な LG ビームを得られることが分かった。

8. まとめ

本研究では、中心に近づく程回折効率が小さくなるホログラムを作製し、空間光変調器 (spatial light modulator SLM) を用いて 1 次のラゲールガウスビーム (LG ビーム) を正確に発生させることを目的として以下のことを明らかにした。

1. PC と SLM の設定方法や動作環境を知るために、位相変調パターンを表示した時に画像の 1 画素あたり何 μm の倍率で SLM に表示されるのかを実験により明らかにした。画像の想定ホログラムピッチが 6 ピクセル以上の条件で、PC の主画面 (1280×800 画素) に対して、第二画面 (800×600 画素) として接続したとき、画像の 1 ピクセルが SLM 上では 0.61 ± 0.03 ピクセル ($12.2 \pm 0.6 \mu\text{m}$) で表示されることが分かった。
2. 位相変調幅 $0.25\pi \sim 2\pi$ を想定して作成したホログラムの位相変調パターンを SLM に表示し、そのときの回折効率を測定した。その結果、想定位相変調幅 $0.25\pi \sim 2\pi$ について、想定通りの位相変調が得られ、従来の輝度値変調幅と位相変調幅の変換データが使用できることが分かった。
3. 中心に近づくほど回折効率が小さくなるホログラムを作製し、振幅変調と位相変調を同時に行い生成したビームと、従来のホログラムを用いて位相変調のみを行い生成したビームを比較し評価を行った。擬似振幅変調を行った場合、位相変調のみを行った場合と比べて純粋なラゲールビームを得られることが分かった。

参考文献

- [1] N. J. Cerf, M. Bourennane, A. Karlsson, and N. Gisin, "Security of Quantum Key Distribution Using d-Level Systems," Phys. Rev. Lett. 88, 127902 (2002).
- [2] H. Nihira, C. R. Stroud, Jr., "Robust multipartite multilevel quantum protocols," phys. Rev. A 72, 022337 (2005).
- [3] 鳥生 太雅, 「空間光変調器を用いた干渉計の安定化」 電気通信大学修士論文, (2010)
- [4] 和田 篤, 「位相特異点を持つ光ビームの発生と伝搬に関する研究」 電気通信大学博士論文, (2006)