

軌道角運動量密度分布測定のためのサニャック型回転シア干渉計の改良

2033032 神田 涼吾

主任指導教員:宮本 洋子 指導教員:清水 亮介

1. 背景・目的

本論文の目的は、先行研究[1]において提案されたビーム断面内軌道角運動量密度分布を測定する手法について、光学系の設計やアライメント方法を改良し、非点収差を加えたラゲールガウス(LG)ビームの軌道角運動量の測定を行うことである。近年、細胞操作のための光ピンセット技術や材料加工を目的とした複雑な構造を持つ光ビームが生成されている。これらの応用を進めるためには力学的性質であるビーム断面内のエネルギーの流れが設計通りに実現できていることが確認できることが望ましい。先行研究[1]では回転シア干渉計という二光路を伝搬する光波の間に光軸周りの回転ずれ(シア角)を発生させて重ね合わせる干渉計を用いてビーム断面内の軌道角運動量密度分布の測定を行った。LGビームの測定においてはストークスパラメータ S_3 の積分値がシア角と比例し、理論通りの軌道角運動量が測定できた。しかし、非点収差を加えたLGビームの測定においては S_3 の積分値がシア角と比例しなかった。原因としては、P偏光とS偏光のビーム位置の不一致が挙げられた。そこで本研究では、P偏光とS偏光を一致させるためのCCDカメラとフィッティングを用いたアライメント方法を提案する。また、1/2波長板を干渉計の前に設置して干渉計内のP偏光とS偏光のバランス調整を行うことで位相差の補正を不要とし光学系の簡素化を行う。

2. 原理

2.1 偏光

z軸方向に伝搬する平面波について考える。電場のx軸方向(水平方向)成分 E_x 、y軸方向(鉛直方向)成分 E_y を

$$E_x = A_x e^{i(kz - \omega t + \alpha)} \quad (1)$$

$$E_y = A_y e^{i(kz - \omega t + \beta)} \quad (2)$$

と表す。ここで A_x 、 A_y はx成分、y成分の振幅、 α 、 β はそれぞれx成分とy成分の $z=0$ 、 $t=0$ での位相、 k は波数、 ω は角周波数である。式(1)と式(2)の実部をとると

$$\text{Re}[E_x] = E'_x = A_x \cos(kz - \omega t + \alpha) \quad (3)$$

$$\text{Re}[E_y] = E'_y = A_y \cos(kz - \omega t + \beta) \quad (4)$$

となり、式(3)、式(4)から t を消去し、 E'_x と E'_y が描く軌跡を表す式を求めると、

$$\left(\frac{E'_x}{A_x}\right)^2 + \left(\frac{E'_y}{A_y}\right)^2 - 2\left(\frac{E'_x}{A_x}\right)\left(\frac{E'_y}{A_y}\right)\cos\delta = \sin 2\delta \quad (5)$$

となる。ここで、 $\delta = \beta - \alpha$ である。式(5)は楕円を表す式になっており、 $0 \leq \delta < \pi$ のときに左回りの楕円偏光、 $\pi \leq \delta < 2\pi$ のときに右回り楕円偏光を表す。また、 $\delta = 0$ または π のときは直線偏光を表し、 $\delta = \pi/2$ または $3\pi/2$ かつ $A_x = A_y$ のとき円偏光を表す。

2.2 ストークスパラメータ

ストークスパラメータは光強度から求められるパラメータであり、偏光状態を定量的に求め計算するうえで便利である。x軸方向の直線偏光成分の強度を I_0 、y軸方向の直線偏光成分の強度を I_{90} 、x軸と偏光方向のなす角が 45° の直線偏光成分の強度を I_{45} 、x軸と偏光方向のなす角が 135° の直線偏光成分の強度を I_{135} 、右回り円偏光の強度を I_{RC} 、左回り円偏光の強度を I_{LC} とすると各偏光成分の強度は以下の式で表せる。

$$I_0 = A_x^2 \quad (6)$$

$$I_{90} = A_y^2 \quad (7)$$

$$I_{45} = \frac{1}{2}A_x^2 + \frac{1}{2}A_y^2 + A_x A_y \cos\delta \quad (8)$$

$$I_{135} = \frac{1}{2}A_x^2 + \frac{1}{2}A_y^2 - A_x A_y \cos\delta \quad (9)$$

$$I_{RC} = \frac{1}{2}A_x^2 + \frac{1}{2}A_y^2 - A_x A_y \sin\delta \quad (10)$$

$$I_{LC} = \frac{1}{2}A_x^2 + \frac{1}{2}A_y^2 + A_x A_y \sin\delta \quad (11)$$

本研究では、x軸方向の偏光成分はP偏光成分、y軸方向の偏光成分はS偏光成分に対応している。ストークスパラメータは一般的に I_0 、 I_{90} 、 I_{45} 、 I_{135} 、 I_{RC} 、 I_{LC} を用いて以下のように定義される。

$$S_0 = I_0 + I_{90} \quad (12)$$

$$S_1 = I_0 - I_{90} \quad (13)$$

$$S_2 = I_{45} - I_{135} \quad (14)$$

$$S_3 = I_{RC} - I_{LC} \quad (15)$$

2.3 ダブルプリズム

本研究では回転シアの導入のためにダブルプリズムを使用する。ダブルプリズムは図1のような台形型のプリズムである。

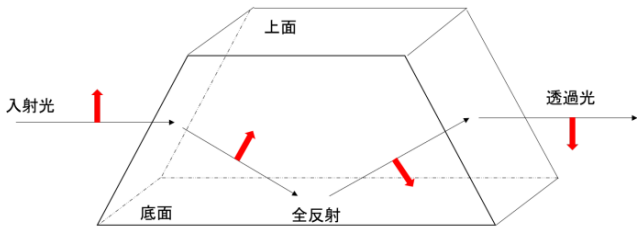


図 1. ダブルプリズムの入射光と出射光イメージ

図 1 のように底面から上面を見た方向にとった矢印の像を入射すると、底面で全反射し、像の上下が反転してダブルプリズムから出射する。本研究ではダブルプリズムを回転ホルダーにマウントすることでダブルプリズムを回転させた。ダブルプリズムを光軸周りに θ 回転させると出射光の像は入射光の像を方位角方向に 2θ 回転させたものになる。

2.4 回転シア干渉計

本研究で作製した回転シア干渉計を図 2 に示す。

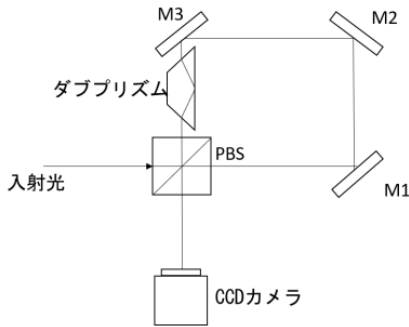


図 2. 回転シア干渉計(M:ミラー、PBS:偏光ビームスプリッター)

干渉計に入射した光波は偏光ビームスプリッター (PBS) によって P 偏光と S 偏光の 2 つの光波に分けられる。P 偏光は、PBS→ミラー1→ミラー2→ミラー3→ダブルプリズム→PBS→CCD カメラの順に伝搬し、S 偏光は、PBS→ダブルプリズム→ミラー3→ミラー2→ミラー1→PBS→CCD カメラと P 偏光とすれ違うように伝搬する。

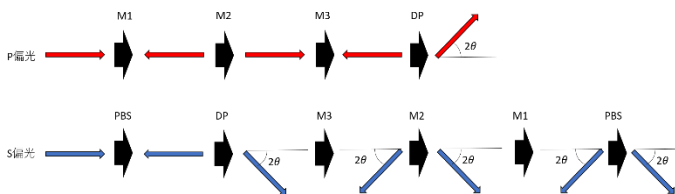


図 3. 反射による像の向きの変化

図 3 の赤、青の図の右方向を向いた矢印はそれぞれ

P 偏光、S 偏光の像である。P 偏光はミラー M1、M2、M3 で反射し左方向を向いた像になり θ 回転したダブルプリズムでの反射で最初の像から 2θ 回転した像になる。S 偏光は P 偏光と進行方向が逆のため、ダブルプリズムは $-\theta$ 回転していることになり、最終的に最初の像から -2θ 回転した像になる。結果、P 偏光と S 偏光の像の向きを比較すると 4θ のずれが生じ、この 4θ が本研究において干渉計で導入するシア角となる。

2.5 回転シア干渉計による角運動量の測定

本研究では P 偏光 (0° の直線偏光) を測定対象としている。P 偏光を $u(r, \theta)$ 、 $-\Delta\theta$ シフトした S 偏光を $u(r, \theta + \Delta\theta)$ とする。この 2 つの合成波の右回り円偏光成分の強度は、

$$I_{RC} = \frac{|u(r, \theta)|^2}{2} + \frac{|u(r, \theta + \Delta\theta)|^2}{2} + \text{Re} \left[u(r, \theta)^* (-i) \frac{\partial u(r, \theta)}{\partial \theta} \right] \Delta\theta \quad (16)$$

となる。また、左回り円偏光成分の強度は、

$$I_{LC} = \frac{|u(r, \theta)|^2}{2} + \frac{|u(r, \theta + \Delta\theta)|^2}{2} - \text{Re} \left[u(r, \theta)^* (-i) \frac{\partial u(r, \theta)}{\partial \theta} \right] \Delta\theta \quad (17)$$

となる。ここで、ストークスパラメーター S_3 は、

$$S_3 = I_{RC} - I_{LC} = 2 \text{Re} \left[u(r, \theta)^* (-i) \frac{\partial u(r, \theta)}{\partial \theta} \right] \Delta\theta \quad (18)$$

となる。 S_3 を測定することで、角運動量密度に相当する値を直接測定することができる。

本研究では、ラゲールガウスビームについて測定を行う。ラゲールガウスビームの光波 u を円筒座標系 (r, θ, z) を用いて表すと、

$$u(r, \theta, z) = u(r, z) \exp(im\theta) \quad (19)$$

となる。 m は方位角方向のモード指数とする。このラゲールガウスビームを回転シア干渉計に入射したときの S_3 および S_0 は

$$S_3 = 2|u(r, z)|^2 m \Delta\theta \quad (20)$$

$$S_0 = 2|u(r, z)|^2 \quad (21)$$

となる。 S_3 は光波の強度 S_0 と $m\Delta\theta$ の積で表すことができ、軌道角運動量密度と $\Delta\theta$ の積である。また、 S_3 を積分することでビーム断面内の軌道角運動量、 S_0 を積分することでビーム断面内のパワーを求めることができる。ビーム断面内の積分を $\int_D dD$ と書くと以下のようになる。

$$IS_3 = \int_D S_3 dD = 2m\Delta\theta \int_D |u(r, z)|^2 dD \quad (22)$$

$$IS_0 = \int_D S_0 dD = 2 \int_D |u(r, z)|^2 dD \quad (23)$$

となる。これより、パワー当たりの S_3 の積分値は $\Delta\theta$ に比例し、比例係数 m がパワーあたりの軌道角運動量を与える。

3. 干渉計内の P 偏光、S 偏光のバランス調整

S_3 から軌道角運動量密度分布を得るためには、シア角 0° の状態で P 偏光と S 偏光が同振幅・同位相で出射し、出射光中の 135° の直線偏光成分が 0 となっていることが必要である。干渉計に 135° の直線偏光を入射し、干渉計内で π の位相差が生じて出射光が 45° の直線偏光となるよう設計されている。先行研究ではこの状態が得られなかったため、P 偏光と S 偏光の間に位相差が存在すると考え、波長板を追加して補正を行った。また、その副作用として偏光成分の読み替えも必要とした。しかし、本研究で干渉計出射光の P 偏光と S 偏光のパワーを測定したところ、一致していなかった。入射時の P 偏光と S 偏光のパワーのバランスの見直しにより出射光中の 135° の直線偏光成分を 0 に近づけることができる可能性があり、光学系とデータ処理の両方を簡素化できると考えた。

3.1 干渉計内の偏光依存の損失

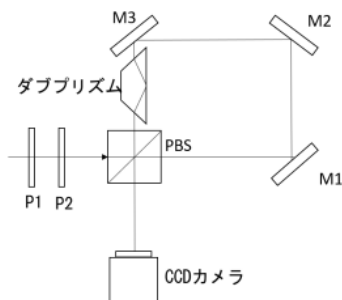


図 4. 干渉計内の損失測定のための光学系(P:偏光板、M:ミラー、PBS:偏光ビームスプリッター)

図 4 のようにダブリズムを M3 と PBS の間に底面が干渉計の内側を向くように設置し、偏光板 P2 によって干渉計入射光の P、S 偏光を選択した。偏光板 P1 の透過軸の角度は 135° で固定してある。そして、干渉計の各素子の前後のパワーを測定することで偏光依存のロスを測定した。偏光ごとの損失を表 1 に記す。

表 1. 干渉計内の偏光ごとの損失

P 偏光依存の損失	S 偏光依存の損失
-46.6%	-49.0%

よって S 偏光のほうが 2~3% 程度干渉計全体のロスが大きいことがわかった。

3.2 1/2 波長板を用いた P 偏光、S 偏光のバランス調整

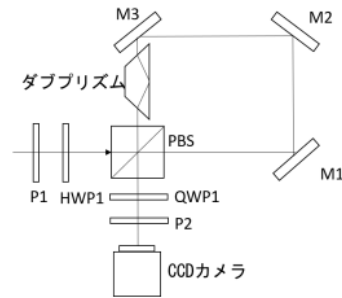


図 5. 1/2 波長板を用いて偏光成分間のバランス補正を行う光学系(P:偏光板、HWP1:1/2 波長板、QWP1:1/4 波長板、M:ミラー、PBS:偏光ビームスプリッター)

図 5 のように干渉計の前に 1/2 波長板を設置した。その後、出射光の 135° の直線偏光成分が最も小さくなるように 1/2 波長板の角度を設定した。その時のそれぞれの偏光成分の強度分布を撮影した。撮影した画像を次に示す。

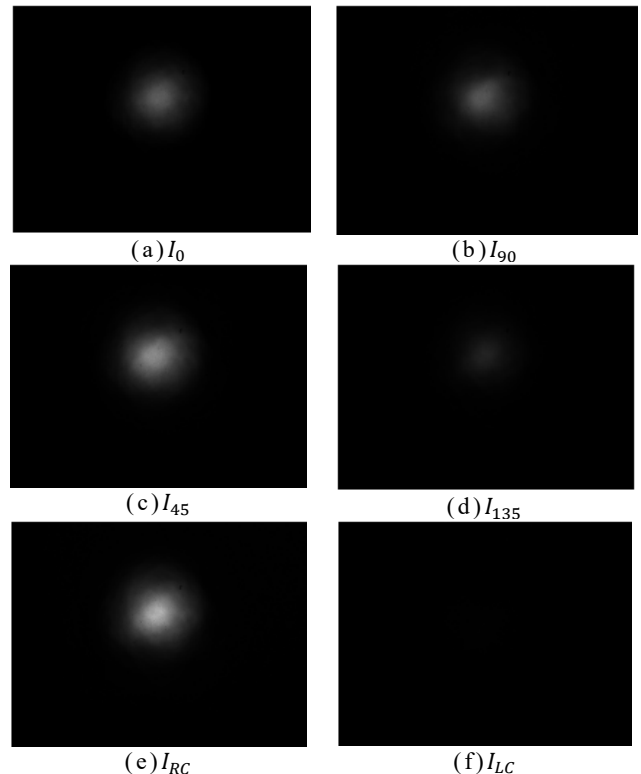


図 6. 1/2 波長板を用いたときの各偏光成分の強度分布

理想では I_{135} が 0 でそのときの I_0 と I_{90} 、 I_{RC} と I_{LC} が一致しているはずだが、図 6 をみると I_{135} が I_{45} の 28% の強度であり、円偏光成分間では強度のほとんどを I_{RC} が占めている。この結果より、1/2 波長板でのバランス調整だけでは I_{135} を 0 にすることはできず、干渉計内で設計上想定していない位相差が発生していることが

分かった。

4. 干渉計内で発生している位相差の評価

4.1 位相差の補正がないときのストークスパラメータ測定

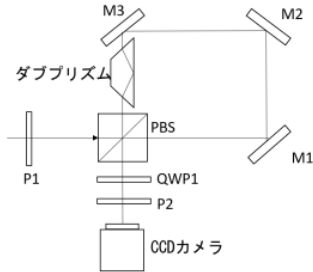


図 7. 位相差の補正がないときのストークスパラメータ測定のための光学系(P:偏光板、QWP:1/4 波長板、M:ミラー、PBS:偏光ビームスプリッター)

1/2 波長板をはずして干渉計に 135°の直線偏光を入射し、出射光のストークスパラメータを測定することで、干渉計内で発生している位相差を評価する (図 7)。まずそれぞれの偏光成分の強度を図 8 に示す。

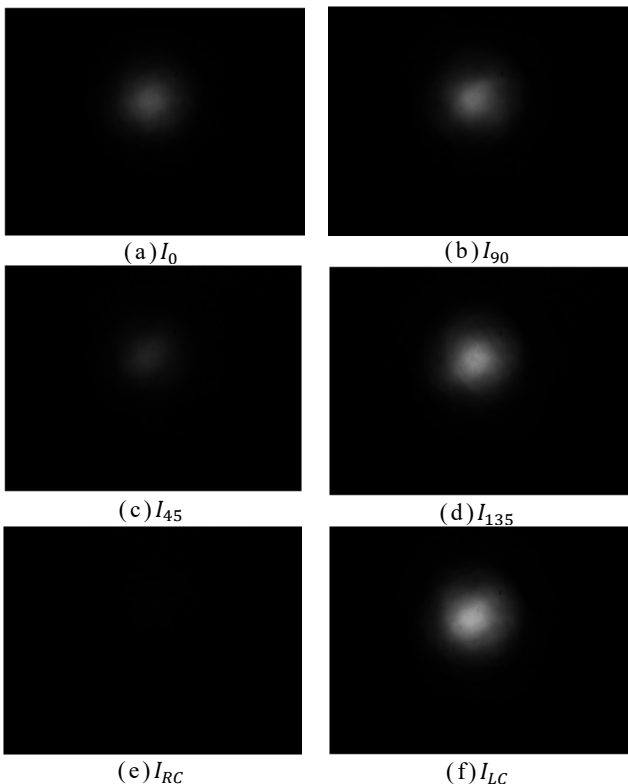


図 8. 位相差の補正がないときの各偏光成分の強度分布

次に強度分布から計算したストークスパラメータの分布と位相差の分布を図 9 に示す。

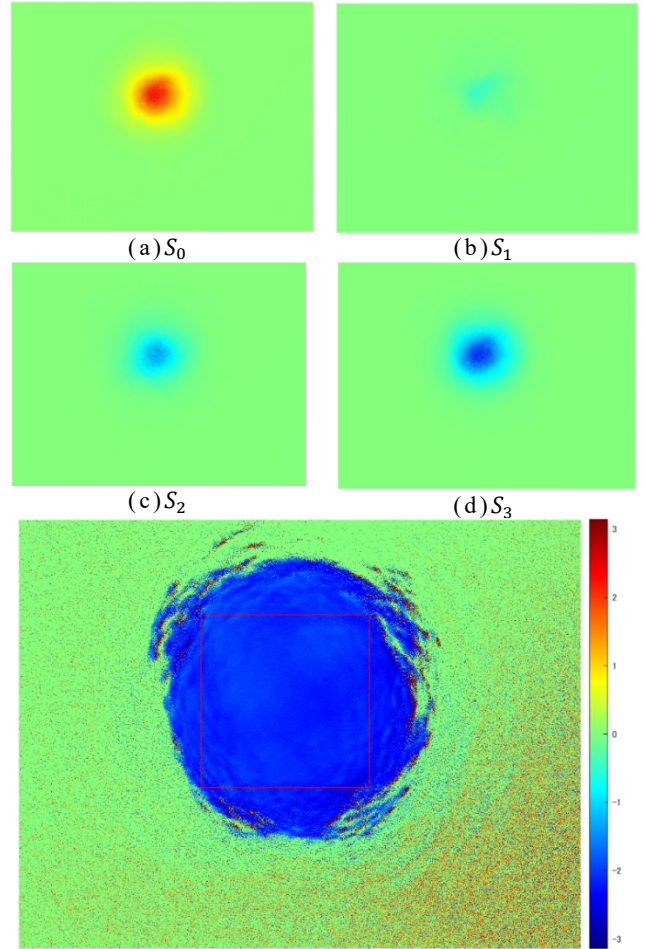


図 9. 位相差の補正がないときのストークスパラメータと位相差の分布

位相差の分布を見るとビーム断面全体で負の位相差が存在することがわかる。ここで S_2 と S_3 のビーム断面内の平均値を求める。分布は 1024×1344 pixel の画像であり最も左上の座標を (1,1)、最も右下の座標を (1024,1344) とする。このとき、(442,211)、(839,211)、(442,352)、(839,352) で囲まれた範囲 (図の赤い四角で囲んだ部分) をビーム断面の一部とし、 S_2 と S_3 の範囲内の平均値を求め、その値からビーム全体の位相差を求めた。結果を次の表 2 にまとめる。

表 2. ビーム全体の位相差

S_2 の平均値	S_3 の平均値	全体の位相差 [rad]
-15.7407	-30.1290	-2.0522

5. 1/4 波長板による位相差の補正

干渉計内で想定外の位相差が発生していることがわかったため、1/4 波長板によって P 偏光と S 偏光の位相差を -1.5711 rad 補正し、振幅比を $1:0.9827$ とし

た。位相差の補正値が 2.05rad に届いていないが光学系のスペースの都合上 $1/2$ 波長板を併用した位相差の補正は行わなかった。また、この方法では偏光成分の読み替えが不要となる。

図 10 にストークスパラメーターと位相差の分布を示す。

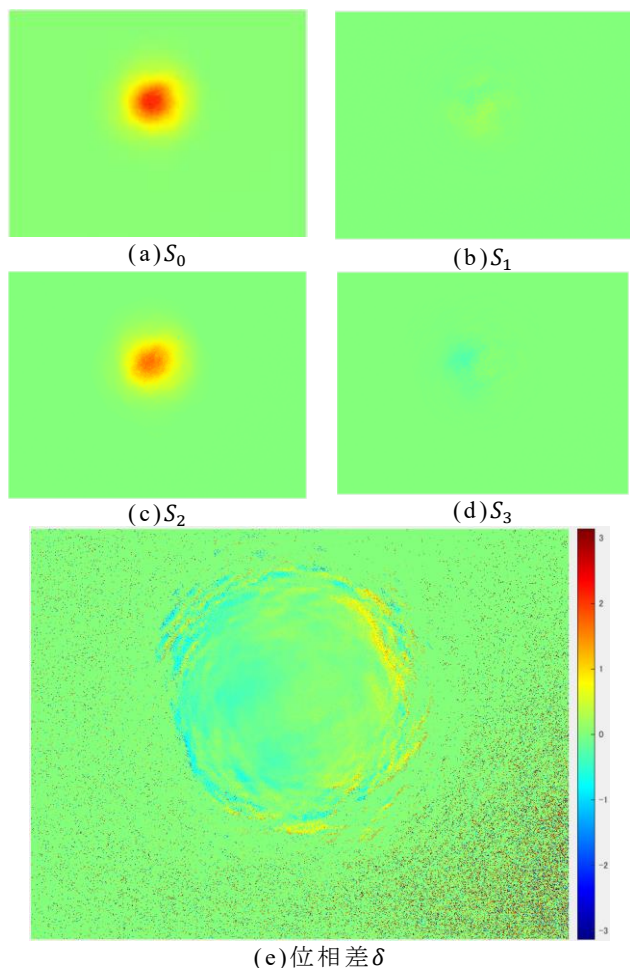


図 10. $1/4$ 波長板を用いたときのストークスパラメーターと位相差の分布

理想通り S_1 と S_3 は 0 に近づき、位相差は中央付近では 0 となった。右側から左側にかけて位相差が変化しているのは P 偏光にたいして S 偏光が左右方向に傾いていることが原因である。

6. P 偏光と S 偏光の位置調整のためのアライメント方法

6.1 アライメント方法

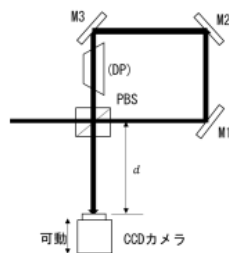


図 11. ビーム位置評価のための光学系(M:ミラー、PBS:偏光ビームスプリッター、DP:ダブプリズム)

図 11 のように偏光ビームスプリッターと CCD カメラ間の距離 d を変化させ、それぞれの位置で撮影した画像のビーム位置をフィッティングで求めることでビームの位置と向きを評価し、それに基づいて調整を行った。

6.2 ダブプリズムを設置したときのビーム位置

ダブプリズムを底面が干渉計の内側を向くように設置し、P 偏光と S 偏光のビーム位置の推移にフィッティングを行った。x 座標の推移を図 12 に示す

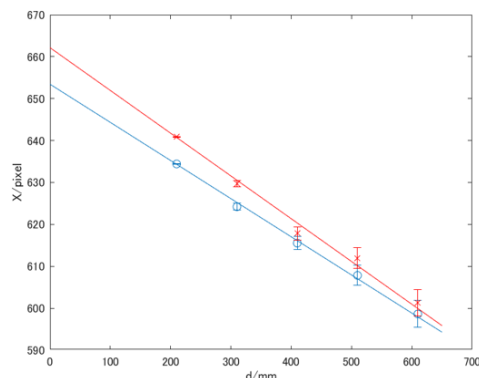


図 12. ダブプリズムを設置したときの P/S 偏光の x 座標の推移(青:P 偏光、赤:S 偏光)

結果から、P 偏光と S 偏光の伝搬方向は 0.002° 以内、位置はビーム径の 3% 以内で一致した。

y 座標の推移を図 13 に示す。

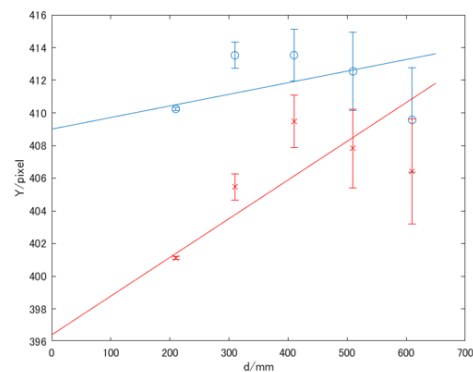


図 13. ダブプリズムを設置したときの P/S 偏光の y 座標の推移(青:P 偏光、赤:S 偏光)

結果から、P 偏光と S 偏光の伝搬方向は 0.004° 以内で一致したが、位置はビーム径の 18%以内までしか合わせることができなかった。本研究では以上のビーム位置の状態ではラゲールガウスビームの軌道角運動量の測定を行っている。

本手法では P 偏光、S 偏光、ダブプリズムの中心軸について、4pixel(ビーム径の 5%)以内での一致まで評価できると期待している。

7. ラゲールガウスビームの軌道角運動量の測定

図 14 に光学系を示す。He-Ne レーザーから得られた光波は P1 と QWP1 によって右回り円偏光となる。その後、1/2 波長光渦リターダによって動径方向のモード指数 $p = 0$ 、方位角方向のモード指数 $m = 1$ のラゲールガウスビームとなる。その後、P2 によって 135° の直線偏光となる。ここで位相差の補正を行うために干渉計前に 1/4 波長板を設置した。P 偏光は M1、2、3、DP の順で干渉計を伝搬、S 偏光は DP、M3、2、1 の順で伝搬し、PBS で合成され、CCD カメラへと伝搬する。

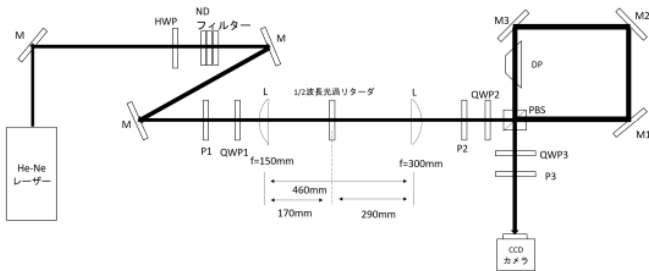


図 14. LG ビームの軌道角運動量の測定のための光学系(M ミラー、P:偏光板、HWP:1/2 波長板、QWP:1/4 波長板、L:平凸レンズ、PBS:偏光ビームスプリッター、DP:ダブプリズム)

本研究では、シア角 $0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ における、軌道角運動量の導出に必要な各偏光成分の強度 $I_0, I_{45}, I_{90}, I_{135}, I_{RC}, I_{LC}$ を測定し、ストークスパラメータを求めることで軌道角運動量の測定を行った。

シア角 $0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ$ におけるストークスパラメータ S_3 (軌道角運動量密度) の積分を行うことで軌道角運動量を求めた。

IS_3/IS_0 の値とシア角の関係を以下の図 15 にまとめる。

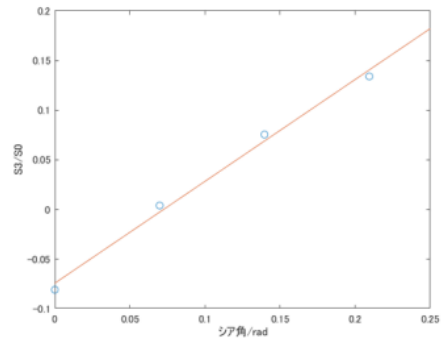


図 15. LG ビームの S_3/S_0 とシア角の関係

図 15 の傾きをフィッティング関数

$$Y = a(1) + a(2)X \quad (24)$$

を用いてフィッティングを行うことで求める。Y は IS_3/IS_0 の値、X はシア角 (radian) に対応する。フィッティングパラメータはそれぞれ、

$$a(1) = -0.074 \pm 0.008 \quad (25)$$

$$a(2) = 1.03 \pm 0.06 \quad (26)$$

となった。本実験では方位角方向のモード指数 $m = 1$ の光波を用いた。 IS_3/IS_0 のシア角に対する傾き $a(2)$ と方位角モード指数が理論通り一致した。しかし、シア角が 0 のときの軌道角運動量は 0 となるはずだが負の値をとった。

8. まとめ

軌道角運動量密度分布測定のためのサニャック型回転シア干渉計について、P 偏光と S 偏光の位置および伝搬方向を一致させること、シア角 0 での干渉計の出射光を理想的な偏光状態である 45° の直線偏光とすることに取り組んだ。後者については 1/2 波長板による P 偏光、S 偏光のバランス調整のみでは 135° の直線偏光成分を 0 にすることができないことが分かった。そこで干渉計内で発生している想定していない位相差を測定した。前者については、干渉計出射光の P 偏光と S 偏光の位置関係について CCD カメラとフィッティングを用いて評価し、それをもとにアライメントを行ったが、ビーム系の 18%までしか合わせることができなかった。上記の結果を踏まえ、位相差の補正を 1/4 波長板で行ってシア角 0 での干渉計の出射光を 45° の直線偏光に近い状態にした。これにより先行研究で必要としていた偏光成分の読み替えが必要ない方法でラゲールガウスビームの軌道角運動量の測定を行った。

文献

[1] 伊波雅生, 「光ビームの軌道角運動量密度分布の測定」, 電気通信大学修士論文, (2019).
 [2] Yoko Miyamoto, Atsushi Wada, Takashi Yonemura and Mitsuo Takeda, J. Opt. 15, (2013) 044002.