

サニャック型回転シア干渉計の作製と動作確認

発表者：1413019 伊波 雅生 指導教員：宮本 洋子

1 はじめに

本論文の目的はダブリズムを用いたサニャック型回転シア干渉計の作製を行い、ダブリズムの回転角 90° (回転シア 0°) の状態での p 偏光と s 偏光の位相差の分布を求めることである。測定した位相差の分布は方位角方向の位相勾配の測定のための基礎データとする。

2 回転シア干渉計による位相勾配の測定

光波 $u(r, \theta)$ とその複製を互いに $2\Delta\theta$ 回転させた光を重ね合わせたときの干渉縞の強度は次式で表せる。ここで、 r は動径、 θ は方位角を表す。

$$\begin{aligned} |u(r, \theta + \Delta\theta) + u(r, \theta - \Delta\theta)|^2 &= |u(r, \theta + \Delta\theta)|^2 + |u(r, \theta - \Delta\theta)|^2 \\ &\quad + 2|u(r, \theta + \Delta\theta)u(r, \theta - \Delta\theta)| \cos \Delta\Phi \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、光波 $u(r, \theta)$ の位相を $\Phi = \arg[u(r, \theta)]$ と定義し、 $\Delta\Phi = \arg[u(r, \theta + \Delta\theta)] - \arg[u(r, \theta - \Delta\theta)]$ とする。このとき光波の方位角方向の位相勾配 $\frac{\partial\Phi}{\partial\theta}$ は次式で与えられる。

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\theta} = \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{2\Delta\theta} \quad (2)$$

3 p 偏光と s 偏光の位相差の導出

本干渉計では光波 $u(r, \theta)$ とその複製を互いに垂直な直線偏光 (p 偏光と s 偏光) とし、その位相差を求める。 z 軸方向に伝搬する波数 $k = 2\pi/\lambda$ 、角周波数 ω の平面波について考える。 x 軸方向の電場の成分 E_x 、 y 軸方向の電場の成分 E_y を以下の式で表す。本研究では、p 偏光成分が x 成分、s 偏光成分が y 成分に対応している。

$$E_x = A_x e^{i(kz - \omega t + \alpha)} \quad (3)$$

$$E_y = A_y e^{i(kz - \omega t + \beta)} \quad (4)$$

A_x 、 A_y はそれぞれ x 成分と y 成分の振幅を表し、 α と β は $z = 0$ 、 $t = 0$ におけるそれぞれの位相を表す。また、 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 軸から 45° 方向の偏光成分の強度を I_{45} 、 135° 方向の偏光成分の強度を 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 I_0 、 I_{90} 、 I_{45} 、 I_{135} 、 I_{RC} 、 I_{LC} は以下で表せる。

$$I_0 = |A_x|^2 \quad (5)$$

$$I_{90} = |A_y|^2 \quad (6)$$

$$I_{45} = |A_x|^2 + |A_y|^2 + 2|E_x||E_y| \cos \delta \quad (7)$$

$$I_{135} = |A_x|^2 + |A_y|^2 - 2|E_x||E_y| \cos \delta \quad (8)$$

$$I_{RC} = |A_x|^2 + |A_y|^2 - 2|E_x||E_y| \sin \delta \quad (9)$$

$$I_{LC} = |A_x|^2 + |A_y|^2 + 2|E_x||E_y| \sin \delta \quad (10)$$

ただし、s 偏光と p 偏光の位相差 $\delta = \beta - \alpha$ とする。また、偏光状態を表すストークスパラメーターは以下のように測定することができる。

$$S_0 = I_0 + I_{90} \quad (11)$$

$$S_1 = I_0 - I_{90} \quad (12)$$

$$S_2 = I_{45} - I_{135} \quad (13)$$

$$S_3 = I_{RC} - I_{LC} \quad (14)$$

式 (5) から式 (14) よりストークスパラメーターは以下のように表せる。

$$S_0 = |A_x|^2 + |A_y|^2 \quad (15)$$

$$S_1 = |A_x|^2 - |A_y|^2 \quad (16)$$

$$S_2 = 2|E_x||E_y| \cos \delta \quad (17)$$

$$S_3 = -2|E_x||E_y| \sin \delta \quad (18)$$

求めたい位相差 δ は以下の式より求められる。

$$\delta = \arg[S_2 - iS_3] \quad (19)$$

4 ダブルプリズム

ダブルプリズムに入射した光波は底面で全反射し出射する。図 1 に入射光と出射光の位置関係を示した。



[a] ダブルプリズムの回転角 0° における入射光と出射光の位置関係

[b] ダブルプリズムの回転角 90° における入射光と出射光の位置関係 (光波は [a] の対称面の高さに入射)

図 1: ダブルプリズムの入射光と出射光の位置関係

ダブルプリズムの対称面から $\pm h$ 高い位置に入射した光波は $\mp h$ 高い位置から出射される。また、本研究では図 1[a] のように上面が底面から見て鉛直上向きとなっている状態をダブルプリズムの回転角 0° 、図 1[b] のように水平の向きとなっている状態を回転角 90° とした。

5 干渉計の作製手順

5.1 ダブルプリズムの調整

まず、ダブルプリズムの回転軸と s 偏光の光軸を以下の手順で一致させた。

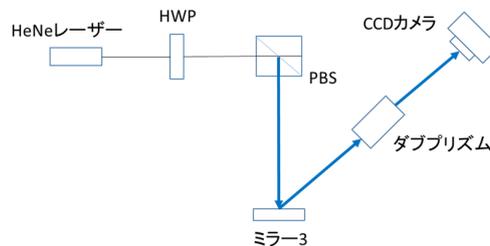


図 2: ダブルプリズムの調整に用いた系 (PBS:偏光ビームスプリッター、HWP:1/2 波長板)

1. 図 2 の光学系を作製し、ダブルプリズムの回転角 0° の状態でダブルプリズムあり/なしで CCD カメラ上でのビーム位置が一致するようにする。
2. ダブルプリズムの回転角 90° の状態でダブルプリズムあり/なしでビームの高さが一致することを確認する。

- ダブリズムと CCD カメラの間に両凸レンズを挿入し、ダブリズムの回転角 90° の状態でダブリズムあり/なしで CCD カメラ上の集光位置を一致させる。
- レンズを取り外し、ダブリズムの回転角 45° の状態でダブリズムを水平方向に動かし、入射光と透過光を一致させる。

5.2 ダブリズム調整後の手順

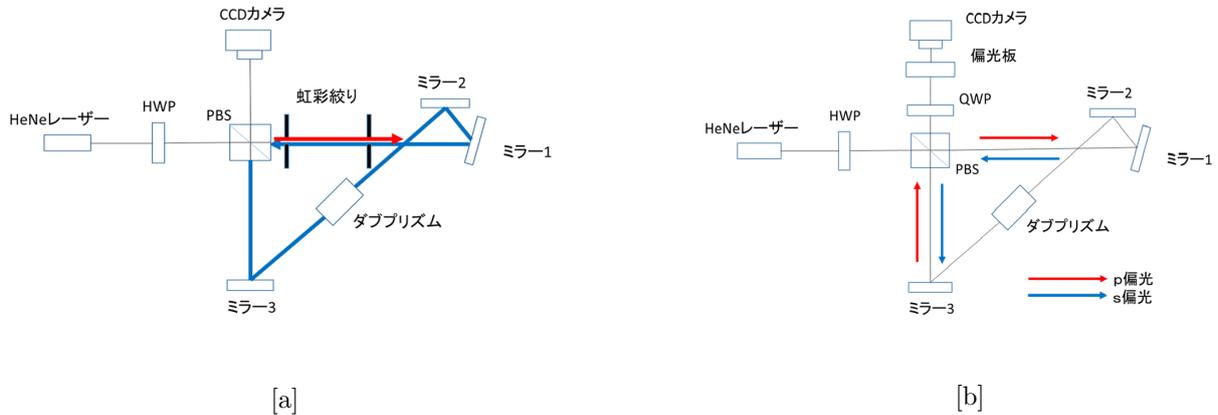


図 3: サニャック型回転シア干渉計の作製手順 (PBS:偏光ビームスプリッター、HWP:1/2 波長板、QWP:1/4 波長板)

- 図 3[a] の光学系を作製した。このとき、虹彩絞りは p 偏光が虹彩絞りの中心を通るように虹彩絞りを 2 つ設置した。
- s 偏光が虹彩絞りの中心を通るようにミラー 1、ミラー 2 を調節した。
- 虹彩絞りを取り外し、CCD カメラ上で p 偏光と s 偏光が重なり合うようにミラー 1、ミラー 2 を微調整した。
- 図 3[b] のように QWP(1/4 波長板) と偏光板を挿入することで任意の偏光成分の強度分布を測定可能にした。

6 p 偏光と s 偏光の位相差の分布の測定

作製した干渉計で I_0 、 I_{90} 、 I_{45} 、 I_{135} 、 I_{RC} 、 I_{LC} の測定を行った。測定した強度分布を図 4 に示す。

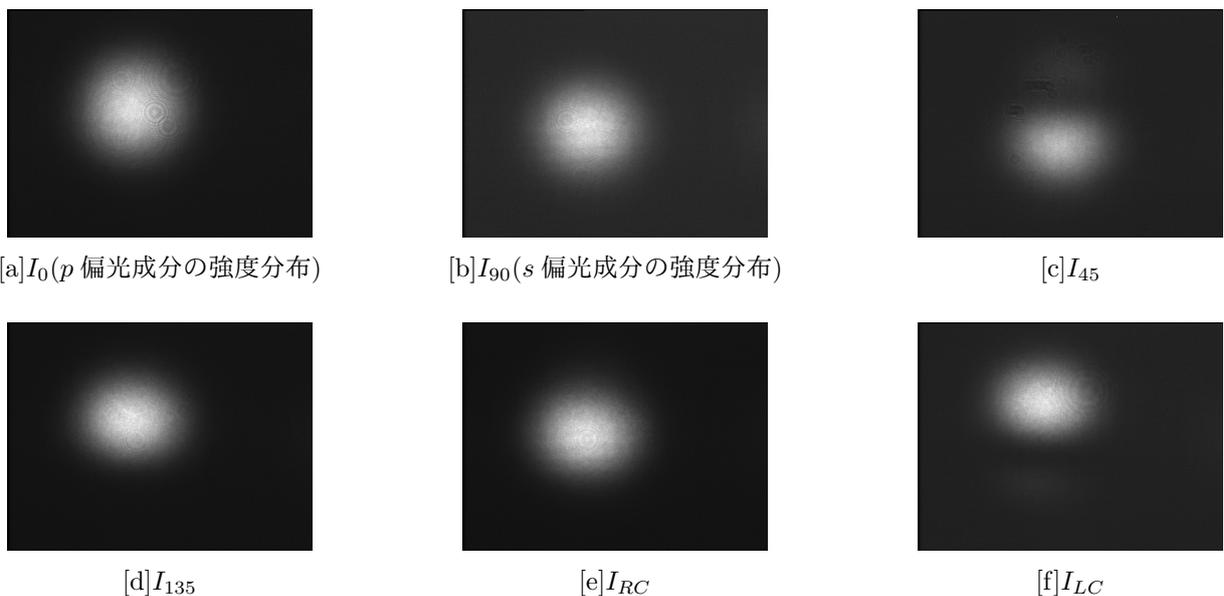


図 4: ストークスパラメータ導出に用いた各偏光成分の強度分布

図 4[c]~[f] では干渉縞が見られるので p 偏光と s 偏光は CCD カメラ上で重なりあっていることがわかる。図 4 より求めたストークスパラメータの空間分布を図 5 に示し、図 5 より求めた p 偏光と s 偏光の位相差の分布を図 6 に示す。



図 5: ダブルプリズムの回転角が 90° の状態でのストークスパラメータ (s_0 は最大値が 1 となるように規格化、 $s_1 \sim s_3$ は規格化前の s_0 で割った値) 図 6: ダブルプリズムの回転角が 90° の状態での p 偏光と s 偏光の位相差の分布

p 偏光と s 偏光は CCD カメラ上のビームが当たっている箇所では位相差が一定値となるのが理想的な状態である。実際には図 6 より CCD カメラ上の p 偏光と s 偏光の位相差は横方向ではほぼ一定であるが縦方向では変化している。このように p 偏光と s 偏光で位相差の分布が生じている理由として、p 偏光と s 偏光の光軸の向きが完全に一致しておらず、p 偏光と s 偏光が CCD カメラ上に到達する時間差が場所により異なっていることが考えられる。このとき、横方向では位相差が変化しておらず、縦方向でのみ位相差が変化していることから p 偏光と s 偏光では縦方向にのみ相対的な傾きを持っていることがわかる。

また、図 6 から p 偏光と s 偏光の位相差の変化はビーム断面内で 2π 未満である。使用した光源が波長 633 nm の HeNe レーザーであることと、ビーム径が約 350 pixels であり使用した CCD カメラの 1 pixel あたりの大きさが $13.5 \mu\text{m} \times 13.5 \mu\text{m}$ であることから p 偏光と s 偏光の相対的な傾きは 0.008° 程度であることがわかった。

7 まとめ・今後の展望

本論文ではサニャック型回転シア干渉計を作製した。さらに回転角 90° (回転シア 0°) の状態でのストークスパラメータを求め、ストークスパラメータから p 偏光と s 偏光の位相差の分布を求めた。求めた位相差の分布から作製した干渉計では p 偏光と s 偏光の光軸が完全に一致しておらず、CCD カメラ上では p 偏光と s 偏光が相対的な傾きを持っていることが確認できた。

今後は p 偏光と s 偏光の相対的な傾きを修正する。また、ガウスビームの方位角方向の位相勾配の測定を行うことで干渉計の動作確認を行う。

参考文献

- [1] 米村高志, 「偏光を利用する位相測定法を用いたラゲールガウスビームの位相分布測定」, 電気通信大学卒業論文, (2004)
- [2] 米村高志, 「偏光を利用する位相測定法の改良とラゲールガウスビームの位相分布測定」, 電気通信大学修士論文, (2006)
- [3] 川田善正, 「はじめての光学」, 講談社, (2014)
- [4] 中澤誠人, 「サニャック型回転シア干渉計の試作」, 電気通信大学卒業論文, (2014)
- [5] Yoko Miyamoto, Atsushi Wada, Takashi Yonemura and Mitsuo Takeda, “Detailed measurement of the phase distribution of an optical beam with inverting vortex”, J.Opt. **15**, 044002(2013).