

STED 顕微鏡の多点走査化のための光渦アレイ化

Generation of optical vortex arrays for multipoint scanning in STED microscopy

1240164 柳田 瑞季 (光制御・ネットワーク研究室)
(指導教員 小林 弘和 准教授)

1. 研究背景・目的

従来の光学顕微鏡の空間分解能は光の回折限界のために光波の波長程度が限界であった。その限界を超える分解能を持つ光学顕微鏡を超解像顕微鏡といい、その 1 つに STED 顕微鏡がある。STED 顕微鏡とは、蛍光分子を付着させた観察対象に回折限界まで集光した励起光と脱励起光用光渦ビーム (STED 光) を同時に照射して、円環状の強度分布の中心にある暗点部のみを発光させることで回折限界を破る顕微鏡である。従来の STED 顕微鏡では観察点を走査することで 2 次元像を得ていたが、本研究では対象物に複数の励起光と STED 光を照射し、一度に多点を観察することで測定を高速化することを考える。本稿では光渦アレイを実験的に生成してその強度分布と間隔を観測した結果を報告する。

2. 光渦

円環状の断面を持つ STED 光は光渦で実現できる。光渦とは、ビーム断面が円環状の光強度分布を持ち、方位角方向に $2l\pi$ (l はモード番号を表す整数) の位相変化を伴う光波であり、その複素振幅 $OV_l(r, \theta)$ は次の式で表される。

$$OV_l(r, \theta) \propto r^{|l|} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \exp(il\theta)$$

ここで、 σ はビーム径、 r はビーム断面の動径座標、 θ は方位角を表す。

3. アレイ化の原理

アレイ化には DMD とレンズを用いた。DMD とは独立に傾きを on/off する微小ミラーが格子状に配列した素子である。縦横に間隔 Δx のドットを表示した DMD の表面は矩形波列 $g_{\Delta x}(x)$ になる。矩形波列 $g_{\Delta x}(x)$ をデルタ関数列 $h(x)$ と単一矩形波 $g(x)$ の畳み込みで表し、次式のように定義する。

$$g_{\Delta x}(x) = h(x) * g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x') g(x - x') dx' \quad (1)$$

光が焦点距離 f の 2 倍の距離を伝搬するとき、レンズはフーリエ変換作用を示すので式(1)をフーリエ変換すると、

$$F[g_{\Delta x}(x)] = \frac{1}{\Delta x} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left[\frac{k}{f}\left(u - n\frac{\lambda f}{\Delta x}\right)\right] \times \text{sinc}\left(\frac{k_x d}{2}\right) \quad (2)$$

になり、図 1 に示すように周期 Δx_a の離散的な sinc 関数を表す。ただし、周期 Δx_a は次式で与えられる。

$$\Delta x_a = \frac{\lambda f}{\Delta x} \quad (3)$$

従って、光が DMD、レンズを順に通過すると、観測面では入射光の波面をアレイ化したものが得られる。

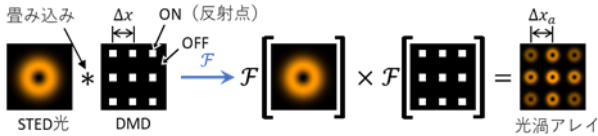


図 1 畳み込みとフーリエ変換

3. 光渦アレイの生成実験

光渦アレイ生成の実験系を図 2 に示す。光源には波長 633nm の He-Ne レーザを使用し、1/4 波長板で生成した円偏光を軸対称偏光素子 (q-plate) に入射して $l = 1, 2$ の光渦を生成した。格子状のドットを表示した DMD に光渦を反射させて周期的な光渦アレイを生成し、焦点距離 50mm のレンズで集光して CMOS カメラで観測した。

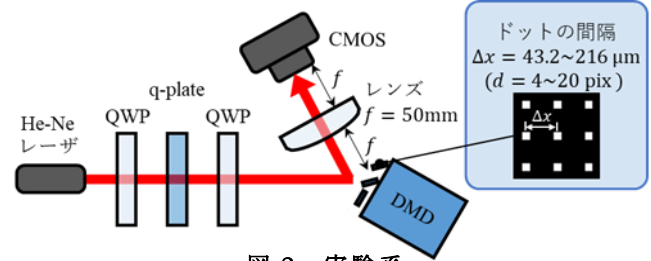


図 2 実験系

生成した光渦アレイの間隔と DMD パターンの間隔の関係を図に示す。図は縦軸が光渦アレイの間隔 Δx_a [mm] を表し、横軸が DMD パターンの間隔 Δx [μm] を表す両対数グラフである。実線は理論曲線である。光渦アレイの間隔と DMD パターンの間隔が式(3)で示すように反比例することを確認できた。 $l = +1, +2$ の光渦アレイの間隔はどちらも理論値よりおよそ 1.44 倍大きい値になった。

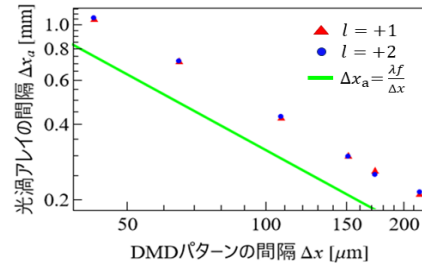


図 3 DMD パターンの間隔と光渦アレイの間隔の関係

次に、アレイ内の光渦の強度分布と破線部の正規化強度を表 1 に示す。光渦アレイの間隔が狭くなるほど隣合う光渦同士が干渉し、光渦 1 つ 1 つの強度分布が乱れた。アレイ内の光渦は、 $\Delta x = 43.2, 108 \mu\text{m}$ では円環状の強度分布を保った。 $\Delta x = 172.8 \mu\text{m}$ ではアレイ内の光渦は隣接する光渦と多数の干渉縞を形成し、円環状の強度分布ではなくなった。また正規化強度では強度が急峻に変動した。よって、光渦が接するほど密度の高い光渦アレイは、目的である STED 光には向かないことがわかった。

表 1 アレイ内の光渦の強度分布と正規化強度

	$\Delta x = 43.2 \mu\text{m}$	$\Delta x = 108 \mu\text{m}$	$\Delta x = 172.8 \mu\text{m}$
強度分布			
正規化強度			

4. まとめ・今後の展望

独立稼働可能な微小ミラーが平面上に接続された DMD を用いて、光渦を複数の反射点と畳み込みすることで光渦アレイを生成した。光渦アレイの密度を大きくすると光渦の円環状の強度分布が崩れた。

参考文献

[1] 星 貴之, “レンズとフーリエ変換”, 2011/11/11, <https://hoshistar81.jp/pdf/111111doc.pdf>