

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04968

研究課題名(和文)撮像面から観察面への写像を用いたレンズレスデジタルホログラフィック超解像顕微鏡

研究課題名(英文) Lens-less digital holographic super-resolution microscopy with mapping from image plane to observation plane

研究代表者

茨田 大輔 (Barada, Daisuke)

宇都宮大学・工学部・准教授

研究者番号：80400711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、観察面と撮像面間の一対一対応を用いた超解像光学顕微鏡法を検討した。通常の光学顕微鏡では、分解能は照明波長によって制限される。よって、観察面における微細なパターンは撮像面において劣化する。しかしながら、観察面と撮像面間の写像は一対一対応であるため、原理的には撮像面の像は劣化した像から再構成可能である。本研究では、体積ホログラフィックビームカップラーを開発した。これは、デジタルホログラフィによる再構成のために点から広がる光波を任意の波動ベクトルをもつ平面波に変換し、参照波と重ね合わせるものである。この素子と波長405nmのレーザー光で30nmの分解能を達成することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は光の波長の10分の1程度の微細構造を観察可能な光学顕微鏡の実現可能性を示すものである。走査型顕微鏡ではないため、動きのある対象物を観察可能である。また、マーカが不要であるので、対象物への制限が少ない。これを実現するための体積ホログラフィック光学素子を開発した。これは体積ホログラフィック光学素子の新しい応用であり、学術的に意義がある。また、生きた細胞における細胞小器官のダイナミクスを観察する方法になりうる。今後の進展によって、本研究で提案する超解像光学顕微鏡法はバイオテクノロジー分野で活躍することが期待され、再生医療などに貢献する可能性があるという社会的意義をもつ。

研究成果の概要(英文)：In this study, a super-resolution optical microscopy by using one-to-one correspondence between object plane and image plane was investigated. In general optical microscopy, the resolution is limited by the wavelength of illumination light. Therefore, an image quality with a minute pattern on the image plane corresponding to the object plane is reduced. However, the mapping between the object plane and image plane is one-to-one correspondence so that the image on the object plane can be reconstructed from the low-quality image in principle. In this study, a volume holographic beam coupler, in which a point-spread wave is transformed to a plane wave with a wave vector, was developed. In addition, the generated plane waves are superposed with a reference beam for digital holographic reconstruction in the volume holographic beam coupler. By using the volume holographic beam coupler and point-spread beams with a wavelength of 405 nm, it was succeeded to achieve the resolution of 30 nm.

研究分野：応用光学

キーワード：超解像光学顕微鏡 デジタルホログラフィ 体積ホログラフィック光学素子

1. 研究開始当初の背景

光学顕微鏡は自然環境下で簡易的に使用することができるので、幅広い分野で研究ツールとして利用されている。しかし、一般の光学顕微鏡の分解能は、照明する光の波長によって制限される解像限界があることが知られている。そこで、より高い分解能を得るために、電子顕微鏡や走査プローブ顕微鏡が用いられるが、観察対象が制限される。例えば、生きた細胞の活動を長時間で観察する場合、点計測で走査が必要であるこれらの顕微鏡は適さない。また、電子顕微鏡は真空環境で用いるため、生きたまま撮影すること自体難しい。それに対し、光学顕微鏡の大きな特徴は、走査が不要な面計測(並列計測)が可能であり動画撮影が容易な点にある。よって、面計測性を維持したまま分解能を向上できれば、従来観察できなかった動きが観察でき、新しい現象の発見に貢献すると思われる。

これまで、波長より小さい微細パターンからの散乱光が遠方で作る光パターンを解析することによって、微細パターンを再構成できることを計算機シミュレーションによって示してきた。再構成が可能なのは、分解能の光学的限界によって劣化した画像であっても、元のパターンと1対1対応しているためである。そこで、この再構成を実験的に実現する方法を検討する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マーカーレスで面計測可能な超解像光学顕微鏡法の検討である。そのための新しい光学系を設計し、マーカーレスで面計測が可能であることと、評価用微細パターンを用いて超解像性をもつことを実証する。超解像性としては、使用レーザー光の波長 405nm の 10 分の 1 の 40nm 程度の分解能を実証する。

3. 研究の方法

(1) これまで、レンズレスデジタルホログラフィック超解像顕微鏡法の計算機シミュレーションによって、超解像性が原理的に可能であることを示してきたが、ノイズのない理想的な条件を想定していた。そこで人工的なノイズを用いて計算機シミュレーションにおいてロバスト性を評価した。また、ロバスト性を向上させる解析方法の検討を行った。

(2) 計算機シミュレーションの状況を実験で行うためには、デジタルホログラフィにおいて信号波と参照波をどのように重ね合わせるかが課題であった。当初の方法では、大面積受光素子を用いることによって、観察対象物と撮像素子の間に距離をとれるように、参照波を導入するというものであったが、物体からの信号波を遠方で観察可能なように変換する方法を新たに提案した。その変換のための体積ホログラフィック光学素子を作製した。

(3) 使用するレーザー光の波長 405nm より短い 100nm 間隔の 2 点から広がる光波を作製した体積ホログラフィック光学素子を通し、超解像性の評価を行った。

4. 研究成果

(1) 提案する方法では、撮像面上で元画像からの散乱光のデジタルホログラムとその導関数が得られるので、観察面の複素振幅から撮像面の複素振幅とその導関数の写像を考え、その逆写像を用いることによって、観察面にある元画像パターンの再構成する計算機シミュレーションを行った。その際、デジタルホログラムに 0.001% のホワイトノイズを含ませた。また、元画像の最小線幅は 40nm とした。このデジタルホログラムから元画像を再構成した結果を図 1 に示す。再構成画像では、ややノイズが含まれるものの再構成可能であることが示された。しかし、実際には 0.001% より多くのノイズが含まれることが予想されるが、シミュレーション上ではこれ以上のノイズを含ませるとまったく再構成されなくなった。よって、この方法ではロバスト性が低いことがわかった。

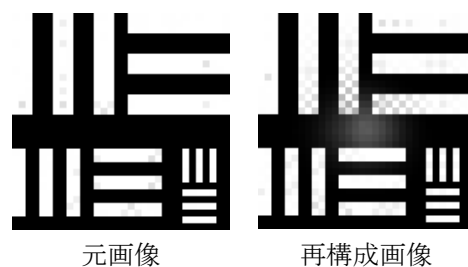


図 1 レンズレスデジタルホログラフィック超解像顕微鏡の計算機シミュレーション結果

(2) 対象物のパターンが微細であるほど、広角に広がる散乱光が発生する。(1)で想定する方法では、元画像から広がる光波の大部分を撮像素子で受光する必要があるが、広角成分を受光するためには、対象物と撮像素子の距離を近づけるか、撮像素子を大面積化する必要があった。しかし、同時に参照波を撮像素子上で重ね合わせる必要があるため、近づけることは難しいという問題があった。散乱光(信号波)と参照波を重ね合わせるためには、ビームカップラーが必要であるが、そのビームカップラーとして体積ホログラフィック光学素子を用いることにより、信号波と参照波を重ね合わせると同時に、対象物の各点から広がる光波を広がりの小さい平面波状の光波

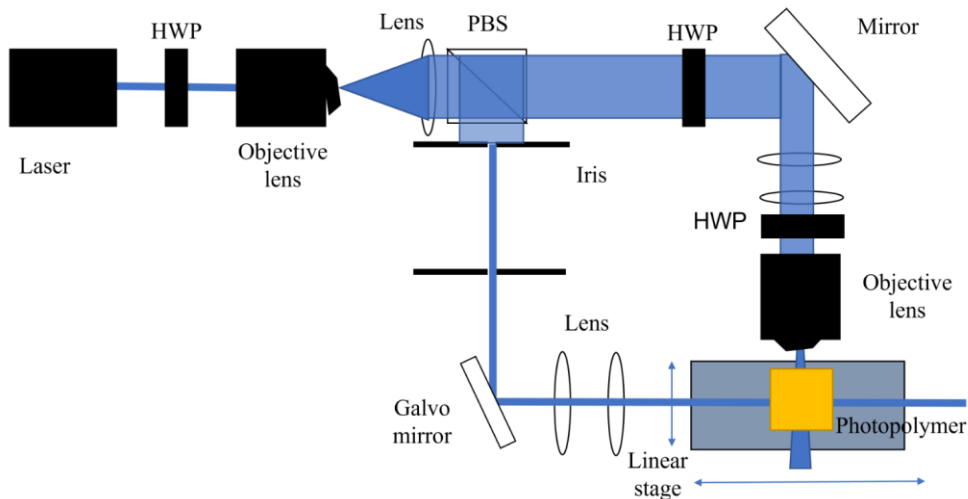


図 3 体積ホログラフィック光学素子の作製および点から広がる光波の分解能評価光学系

に変換する方法を提案した。このとき平面波の波動ベクトルは、各点の位置に依存するように体積ホログラフィック光学素子を設計し、方向の違いとして分離できるようにした。提案する光学系を図 2 に示す。この光学系は体積ホログラフィック光学素子の作製光学系も兼ねている。体積ホログラフィック光学素子の作製は感光性媒体であるフォトポリマーへの露光によって行った。作製した体積ホログラフィック光学素子および点から発生した平面波状の回折光を図 3 に示す。この体積ホログラフィック光学素子のサイズは $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times \text{任意高さ}$ とした。

また、図 2 の光学系は(1)において問題となったロバスト性を解決するものである。

(3) (2)において提案した図 2 の光学系をよび作製した図 3 の体積ホログラフィック光学素子および 100nm 離れた 2 点から広がる光波を用いて超解像性の評価を行った。その結果を図 4 に示す。この図より 2 点は分離されていることがわかり、さらに 1 点の広がりには 30nm 程度離れると強度が $1/e$ 程度となり、 30nm 程度の分解能を有することが確認された。



図 2 作製した体積ホログラフィック光学素子と回折光

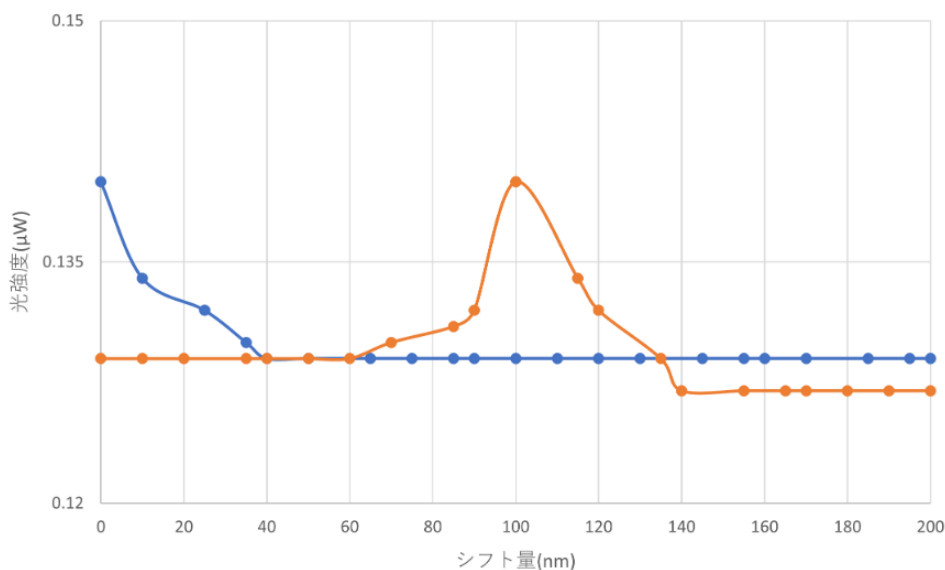


図 4 提案する方法における超解像性の実証実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 茨田大輔
2. 発表標題 Theoretical study of volume holographic optical elements for ultra-high-definition imaging
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷口尚也, 茨田大輔, 谷田貝豊彦
2. 発表標題 Investigation of holographic optical elements for optical separation of crosstalk noise in reconstructed data pages
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 卯柳翼, 茨田大輔
2. 発表標題 レイリー・ゾンマーフェルトの回折積分行列の逆問題によるイメージングにおける導関数を用いたロバスト性の向上
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 卯柳翼, 茨田大輔
2. 発表標題 レイリー・ゾンマーフェルトの回折積分を用いた 光波再生方法の検討
3. 学会等名 第4回JSAPフォトニクスワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Barada
2. 発表標題 Improving method of noise robustness in holographic data storage using pixel amplitude function
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 卯柳翼、茨田大輔
2. 発表標題 巡回行列を用いたレイリー・ゾンマーフェルトの回折積分の計算
3. 学会等名 第19回 情報フォトニクス研究グループ研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 卯柳翼、谷田貝豊彦、茨田大輔
2. 発表標題 Fast calculation algorithm for spatial digital signal reconstruction by circular matrix in holographic data storage
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------