

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 4日現在

機関番号：13801  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23760112  
 研究課題名（和文） アクティブな空間光制御による三次元超解像イメージングと欠陥形状高速計測  
 研究課題名（英文） 3D Super-Resolution Imaging for High-Speed Defect Inspection by Using Active Spatial Control of Light  
 研究代表者  
 臼杵 深 (USUKI SHIN)  
 静岡大学・若手グローバル研究リーダー育成拠点・特任助教  
 研究者番号：60508191

## 研究成果の概要（和文）：

複数レーザーの立体的干渉を利用した三次元変調照明生成・制御手法を提案した。レーザーの空間的配置，入射角度，偏光条件を最適化することで，高い空間周波数を有する三次元照明の生成とナノオーダーの空間位置制御が可能となる。四光束干渉実験装置による検証の結果，理論解析に即した変調照明生成を確認した。得られた信号情報と与えた照明情報から観察試料を再構成するための処理手法を開発した。複数三次元画像と与えた照明情報から，三次元超解像が実現することを確認した。

## 研究成果の概要（英文）：

First, we proposed the novel technique for the generation and control of 3D structured illumination based on 3D interference of multiple laser beams. Then, we performed numerical simulations for optimizing several parameters such as spatial position of multiple laser beams, incident angles and conditions of polarization of light. Actually, it was found that the 3D structured illumination with high spatial frequencies in all directions could be generated and controlled by phase shift of multiple laser beams. Furthermore, we developed the apparatus for the 3D structured illumination using 4 laser beams interference. As a result of a series of experiments, we confirmed the generation and precise control of the 3D structured illumination. In order to realize the 3D super-resolution by the proposed method, it is needed that 3D information of the specimen is reconstructed from obtained image information and given information of the structured illumination. By the series of numerical simulations based on Fourier optics, the 3D super-resolution was confirmed by using 13 obtained 3D images and 3D deconvolution technique.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000円	930,000円	4,030,000円

## 研究分野：光計測

科研費の分科・細目：機械工学，生産工学・加工学

キーワード：アクティブ光制御，変調照明，超解像，三次元顕微法，デコンボリューション，多光束干渉，マルチビーム，インプロセス検査

## 1. 研究開始当初の背景

光計測は本質的に非破壊・非浸襲であり，遠隔センシングによる高速化の可能性があることから広範な分野において親和性が高

い。ゆえに，新たな光学計測技術開発を目指し国内外問わず活発に研究活動が行われている。現行する光計測技術は，情報取得方法の観点から，点計測走査型，面内一括計測型

に大別できる。一般に面内一括型は、光情報の並列処理性を利用したもので高速処理が可能な反面、回折限界に支配されるため原理的に光源波長以下の解像力を達成することは困難である。一方、点計測走査型は共焦点顕微法の他、多光子吸収法(W. Denk ら, USA Bell Lab), STED 顕微法(V. Westphal, S. W. Hell ら, ドイツ Max-Planck-Institute), 近接場光学顕微法(M. Otsu, 東京大学)等があり、10nm の高解像力を誇るものも存在する。しかし、計測領域全域にわたり点走査の必要がありスループットが低い。つまり、光計測技術には本質的に、解像力とスループットの間トレードオフの関係が潜在していた。以上に対し、本研究における計測技術は、面内一括型の高スループット性、アクティブな空間光制御による超解像計測特性を高度に融合した、新しい光学計測技術である。

次に、顕微計測による三次元イメージングについて述べる。一般的に光学顕微鏡はその焦点深度の浅さゆえ試料の三次元形状情報を取得することは困難であるが、光学的に三次元形状を顕微計測する手法に関する研究が国内外で活発に行われている。代表的な手法として、前段で述べた共焦点顕微法の他、Shape from Focus Microscopy(S. Nayer ら, コロンビア大学), Light Field Microscopy(M. Levoy ら, スタンフォード大学)がある。Shape from Focus Microscopy は試料の光軸方向への走査、Light Field Microscopy はマイクロレンズアレイによる空間解像力の低下、がそれぞれ課題であり、実用的な応用には至っていない。本研究では、マイクロレンズアレイによる1ショット三次元高速イメージングに注目し、Light Field Microscopy における空間解像力の低下をアクティブな空間光制御による超解像で補うことによって、新しい計測手法の開発を行う。また、これらの融合による三次元超解像イメージングへのアプローチは国内外問わず皆無である。

ナノ・マイクロデバイスの欠陥計測技術の動向としては、微細配線化・多層配線化が進む半導体生産現場において実用化されている技術として、ベアウエハ上微粒子の暗視野散乱光検出技術(日立製作所)や高解像度ウェーハ検査技術(KLA-tencor)が挙げられる。これらの技術は差分画像を用いてsub-100nm サイズの欠陥の有無判別を行うものであるのに対して、本提案手法は欠陥の有無の判別にとどまらず、二次元欠陥レビュー、三次元欠陥形状計測が可能である。例えば、欠陥が波長以下の空間領域に複数個配置された場合に、配置や分布の計測が可能である。更に、欠陥形状を計測することにより、欠陥種の判別や欠陥原因の究明が可能となる。以上の点において、本手法は欠陥計測技

術としてより広範な応用が期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究は、アクティブな空間光制御による超解像計測特性とマイクロレンズアレイによる三次元光イメージングを高度に融合することによって、ミリメートルの空間領域(mm)<sup>3</sup>においてサブマイクロメートル(sub- $\mu\text{m}$ )の三次元空間解像力が実現可能な全く新しい欠陥形状計測手法の確立を目的としている。本手法は、遠隔伝搬光結像の一括取得、光学画像並列処理、光計測の本質である非破壊性、複数情報取得に基づいた外乱抑制、の観点から、次世代のナノ・マイクロデバイスの生産現場における高速計測手法として有効なアプリケーションとなることが期待できる。具体的な研究目的として、以下の研究課題を設定し、三次元超解像イメージングの実現と高速欠陥形状計測への応用を目指す。

- (1) 超解像顕微観察システムへのマイクロレンズアレイ結像光学系の導入
- (2) マイクロレンズによる取得像の三次元空間への逆投影処理手法の開発とマイクロレンズアレイ取得像群の逆投影による Focal Stack (焦点系列画像) の生成
- (3) アクティブな空間光制御により取得・生成した複数 Focal Stack の逐次的デコンボリューション処理手法(三次元超解像再構成手法)の確立
- (4) 三次元空間分布変調照明の生成手法および高精度アクティブ制御技術の確立

## 3. 研究の方法

まず、超解像顕微観察システムへのマイクロレンズアレイによる三次元結像光学系を導入し、試料の多方向からの観察像群の取得(三次元イメージングのための焦点深度の拡張)を行う。具体的に、以下のような計画の下で研究を遂行する。

- (1) マイクロレンズアレイの設計: Light Field Microscopy を参考にし、焦点深度の拡大と面内空間解像力の低下のトレードオフ、対物レンズ仕様やイメージセンササイズを考慮した上で、最適な値(F 値, ピッチ, アレイサイズ)を算出する。
- (2) マイクロレンズアレイ結像光学系の導入: 特注マイクロレンズアレイを光学結像系に導入する。顕微鏡筒および CCD イメージセンサ間にアダプタにより組み込む。リレーレンズも同様にアダプタにより組み込む。結像光学系の高さ拡大による振動対策にあたって、門型のカメラ保持機構も導入する。なお、これらの光学系は空気ばね式除振システムに配置され、実験はクリーン暗室内で行われる。

(3) 評価実験：観察試料として、サイズが既知である 100nm~1 $\mu$ m 径のナノ標準粒子の他、光学顕微鏡評価用テストターゲット、SPM 評価用テストターゲットを用いる。照明光源は高輝度白色 LED および波長 532nm 高出力 DPSS レーザを用いる。

次に、マイクロレンズによる取得像の三次元空間への逆投影処理手法の開発を行い、マイクロレンズアレイ取得像群の逆投影により Focal Stack (焦点系列画像) を生成する。更に、アクティブな空間光制御により取得・生成した複数 Focal Stack に適用する逐次的デコンボリューション処理手法の確立を行う。具体的には、開発済みの空間変調照明シフトによる複数画像を用いた超解像再構成処理手法に Constrained Iterative 3D Deconvolution を組み込むことにより、三次元超解像を達成する。まず、MATLAB により開発したフーリエ結像光学シミュレータを用いて収束性やノイズ耐性を検討し、処理パラメタの最適化を行う。次に開発装置で得られた複数 Focal Stack に適用し実験的に検討する。

続いて、複数光源の空間的干渉による三次元変調照明の生成手法および高精度アクティブ制御技術の確立を行う。FDTD (Finite Difference Time Domain: 時間領域差分) 法に基づいて構築した三次元顕微鏡観察領域時系列電磁場解析シミュレータを用いて光源配置、入射角、偏光条件の最適化を行った後、ナノ標準粒子を用いて実験による生成確認を行う。

最後に、以上で開発した技術を統合し、実験的に検討する。ここでは、大画素 CCD カメラシステム、F マウント対応顕微鏡筒を開発実験装置に組み込むことで、より高精細な三次元イメージングが可能となる。

#### 4. 研究成果

高い空間分解能で三次元結像データを取得するための高解像度デジタルリフォーカス顕微鏡を研究・開発した。コンピュータグラフィックスの分野で利用されるデジタルリフォーカス技術を顕微鏡に適用し、被写界深度を拡大、焦点系列画像を取得した。さらに、マイクロレンズアレイを用いたデジタルリフォーカスにおける弱点である空間分解能の低下を補うために、前年度までに開発した結像光路シフトによるサブピクセル超解像を適用した。その結果、高解像度の全焦点画像および焦点系列画像を 1 ショット結像 (1 方向結像) により取得することが出来た。また、高解像度焦点系列画像に対して、ウェーブレット変換に基づいた合焦判定およびバイラテラルフィルタによる平滑化処理を適用し、顕微鏡テストターゲットの三次元点群データを抽出した。

顕微鏡動画像からスケールフリーかつマーカーフリーに広域合焦点画像を生成する手法を提案、研究・開発した。この手法により、視野が狭く被写界深度が浅いという顕微鏡の欠点を補うことが可能となる。具体的には、動画像からの特徴量抽出に基づいたモザイクング、局所分散値に基づいた合焦判定を行う。1 フレーム毎に結果更新し広域合焦点画像を生成する。なお、以上の処理は GPU に実装されており、ナノ・マイクロ工業製品の高速外観検査への応用が期待される。

提案手法であるマルチビームの立体的干渉を利用した三次元変調照明生成・制御手法に対して、3DFDTD (三次元時間領域差分) 法によるシミュレーションを行った。その結果、複数レーザの空間的配置、入射角度、偏光条件を最適化することにより、三次元方向それぞれに高い空間周波数 (ピッチが 0.3 マイクロメートル程度) を有する照明強度分布が 1mm $\times$ 1mm $\times$ 1mm の空間領域に生成可能で、位相シフトによるナノオーダーの空間位置制御が可能であることが分かった。

四光束干渉実験装置を構築し、ポリスチレンラテックス標準粒子を計測対象として三次元空間変調照明を三次元的に空間シフトさせた。その結果、理論およびシミュレーションに即した観察画像における周期的な輝度変調を確認した。変調コントラストについても実験的に検討した結果、四光束の光路長、強度、偏光を均等化することにより、コントラスト値 0.9 が実現することを確認した。

提案手法により三次元的な超解像を実現するためには、得られた信号情報と与えた照明の情報から観察資料の情報を再構成することが必要である。そのための再構成処理について検討した。照明分布のフーリエ解析の結果、提案手法による三次元変調照明は四光束干渉に基づいているため、空間周波数領域における再構成処理のためには 1 点 (ピクセル) につき 13 の未知数 (空間周波数スペクトル) を求めることが必要となることが分かった。実際に 13 種類の取得三次元画像を用いて、照明の高い空間周波数を再構成処理 (三次元デコンボリューション) に反映させることにより、三次元的に超解像が実現することをフーリエ光学に基づいたシミュレーションによって確認した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- (1) S. Usuki, H. Kanaka and K. T. Miura, Generation and Control of 3D Standing Wave Illumination for Wide-Field High-Resolution 3D Microscopic

Measurement, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol.14, No.1, pp.55-60, 2013. 査読有

- (2) S. Usuki and K. T. Miura, Nano-Micro Geometric Modeling Using Microscopic Image, Key Engineering Materials, Vols. 523-524, pp.345-349, 2012. 査読有
- (3) R. Kudo, S. Usuki, S. Takahashi and K. Takamasu, Influence of standing wave phase error on super-resolution optical inspection for periodic microstructures, Measurement Science and Technology, Vol.23, No.5, 054007, 2012. 査読有

[学会発表] (計20件)

- (1) S. Usuki, M. Uno, K. T. Miura, Resolution-improved digital refocusing microscope for microstructure measurement, Proceedings of the 12th euspen International Conference, pp.280-283, 2012年6月4日, Nacka Strandsmassan (スウェーデン)
- (2) S.Usuki, Advanced Microscopic Imaging by Spatial Control of Light and Multi-Image Reconstruction, Proceedings of International Symposium on Ultraprecision Engineering and Nanotechnology 2012, pp.31-36, 2012年3月15日. 首都大学東京 (東京都)
- (3) S. Usuki, H. Kanaka, K. T. Miura, Generation and Control of Wide Field Three Dimensional Structured Illumination for Advanced Microscopic Imaging, 4th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2011年11月16日, Langham Place Hong Kong Hotel (香港)

[その他]

ホームページ等

<http://www.shizuoka.ac.jp/tenure/>

<http://ktm11.eng.shizuoka.ac.jp/profile/usuki/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

臼杵 深 (USUKI SHIN)

静岡大学・若手グローバル研究リーダー  
育成拠点・特任助教

研究者番号：60508191

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

三浦 憲二郎 (KENJIRO T. MIURA)  
静岡大学・創造科学技術大学院・教授  
研究者番号：50254066