

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420050

研究課題名(和文)超精密部品の高速度形状検査のための三次元光学顕微計測基盤技術の開発

研究課題名(英文)3D Optical Microscopy for High-speed Measurement of Nano-micro-sized Components

研究代表者

臼杵 深 (Usuki, Shin)

静岡大学・電子工学研究所・准教授

研究者番号：60508191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：ライトフィールド顕微鏡のリフォーカス機能により高速に得られたイメージスタックに対してFocus Variationを適用し、深度マップを得た。光学顕微鏡とShape from Silhouetteにより得た形状モデルに対して深度マップを適用し、試料表面情報を含む三次元形状モデルの再構築を行った。さらに、表面プロファイルの高精度測定や奥行きが深い構造の測定に対応するために試料走査型OCT顕微鏡を提案した。低コヒーレンス干渉信号を光学顕微鏡の被写界深度内に固定した上で、測定対象を走査することで三次元形状を得る方法である。実験による検証の結果、光学顕微鏡の被写界深度の数十倍の深さ測定範囲が得られた。

研究成果の概要(英文)：A depth map (3D point cloud) was obtained by a focus variation method (Shape from Focus) which was applied to multiple images stacked by digital refocusing in the light field microscopy. Then, we developed a 3D shape modeling technique based on optical microscopy and Shape from Silhouette method combined with the depth map by light field microscopy. Furthermore, a reflection type OCT (Optical Coherence Tomography) with sample scanning scheme was developed for 3D measurement of deep structure such as a hole. In this scheme, the reference mirror is controlled based on processed images which are acquired to analyze the low-coherent interference signal for height measurement. The depth of field of this method was experimentally verified to be several tens of times as long as a typical optical microscopy.

研究分野：光計測

キーワード：光学顕微鏡 画像処理 三次元計測 ライトフィールド 低コヒーレンス干渉 OCT Focus Variation  
形状モデリング

### 1. 研究開始当初の背景

超精密部品の検査技術の動向は、微細化が進む生産加工現場において実用化されている技術として、暗視野散乱光検出型欠陥検査技術(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。しかし、微細化が限界に達しつつあり、集積化のトレンドは三次元化(多層構造化)であるため、三次元 SEM, X 線 CT, マイクロ三次元座標測定機等の三次元計測技術に注目が集まっている。ただ、計測スループット、計測対象へのダメージ、導入コスト等の観点から汎用インライン検査装置としての活用は困難である。さらに、最先端の生産加工現場においては、従来の外観検査や欠陥検査だけでなく、三次元計測データから生成した形状モデルを用いた計算機シミュレーションによるインライン機能評価が求められている。以上から、本研究では、非破壊性と高スループット性を有する光計測(光学顕微鏡)に着目する。しかしながら、光学顕微鏡はその焦点深度の浅さゆえ試料の三次元情報を取得することは一般的に困難とされる。それゆえ、イメージスタッキング技術(三次元計測技術)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、SFFM(Shape from Focus Microscopy, S. Nayer ら, コロンビア大学), LFM(Light Field Microscopy, M. Levoy ら, スタンフォード大学)がある。検査技術として考えた場合、それぞれの技術にはトレードオフがある。SFFM は試料の光軸方向への走査によるスループット低下, LFM は空間サンプリングがマイクロレンズアレイのピッチに制限されることによる空間分解能の低下、がそれぞれ課題となっている。本研究では、高解像度デジタルリフォーカス顕微鏡を独自に開発し、高速かつ高解像度のイメージスタッキングを実現する。

### 2. 研究の目的

本研究は、高速イメージスタッキング技術と三次元変調照明による超解像技術を高度に融合することによって、全く新しい三次元光学顕微鏡を開発し、マイクロ加工、リソグラフィ、3D プリンタ等により生産された超精密部品の立体形状を高速かつ高い空間分解能で計測するための基盤技術を確立することを目的としている。本基盤技術により、次世代の超精密部品の生産加工現場において、ナノ・マイクロ形状モデルを高速に生成することが可能となるため、外観検査や欠陥検査と共に計算機シミュレーションによるインライン機能評価が実現する。

### 3. 研究の方法

本研究では、高速かつ高分解能(高解像度)な検査技術の確立を目的として光学顕微鏡に基づいた三次元計測手法の開発を行う。取り組む研究対象は大きく分けて2つで、イメージスタッキングとプロファイル計測であ

る。

まずイメージスタッキングについては、ライトフィールド顕微鏡に着目する。ライトフィールド顕微鏡は光学顕微鏡にマイクロレンズアレイを導入することにより、異なる2平面での光線情報を記録することが出来る。これにより、光の位置と方向(振幅と位相)を扱うことが可能となるため、従来の強度イメージングでは困難なりフォーカシング(三次元計測)を実現する。また、マイクロレンズが小口径のレンズに相当するため被写界深度が拡張される。以上からライトフィールド顕微鏡により高速イメージスタッキングが実現する。しかし、ライトフィールドイメージングは空間情報を角度情報にエンコードする手法であり、それらの間にトレードオフが存在する。すなわちライトフィールド顕微鏡の空間分解能は低い。そこで独自に開発したサブピクセル超解像技術を適用し、トレードオフの解消を行う。ライトフィールド顕微鏡のリフォーカス機能により得られたイメージスタックに対してデータ処理を施し、深度マップ(三次元点群)の生成を行う。この深度マップを基として計測対象の表面情報を含む三次元形状モデルの再構築を行う。

次に、超精密部品の検査において、高い測定精度が要求される一方で、通常の光学結像ではプロファイル計測の精度(深さ方向の測定精度)が低いという問題に取り組む。また、奥行きが深い構造(斜面や穴の中)の測定に対応するために、非接触で光学顕微鏡との相性が良い OCT(Optical Coherence Tomography)に着目する。OCT はコヒーレンスゲーティングを利用して位相物体の断面像を得る技術であるが、これを高精度表面プロファイル計測に応用する。また高速性を確保するために光学顕微鏡(レンズ結像)と組み合わせた計測手法を開発する。

### 4. 研究成果

本研究では、高速イメージスタッキング技術としてライトフィールド顕微鏡に着目し、研究開発を行った。独自に開発したサブピクセル超解像技術により、ライトフィールド顕微鏡のトレードオフ(空間分解能と角度分解能)を解消することができた。図1に USAF1951 テストターゲットを用いた検証結果について示す。図1(a)に通常の光学顕微鏡画像、図1(b)に従来のライトフィールド顕微鏡画像、図1(c)に開発した高解像度ライトフィールド顕微鏡画像を示す。通常の光学顕微鏡では被写界深度が浅いため、試料中央行部のみピントが合っていることが分かる。デジタルリフォーカス像では、試料の大部分にピントが合っているが、空間分解能が劣化しているため、微細パターンが解像できていない。それらに対して、超解像デジタルリフォーカス像では、面内空間分解能を劣化させることな

く、被写界深度を拡大できていることが確認できる。

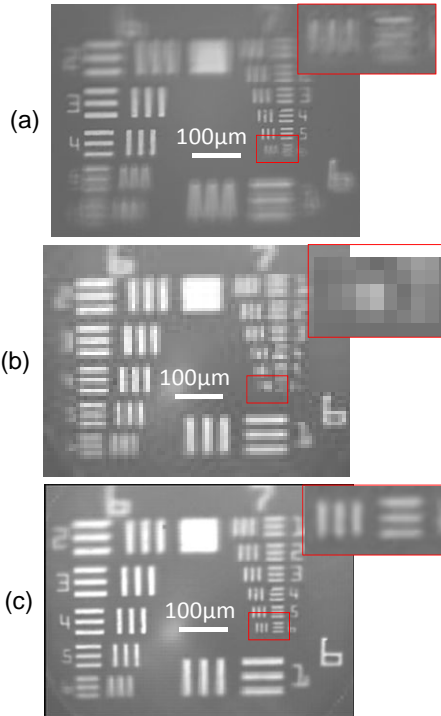


図1：(a)光学顕微鏡，(b)ライトフィールド，(c)高解像度ライトフィールド

次に、ライトフィールド顕微鏡のリフォーカス機能により得られたイメージスタックに対して Focus Variation(Shape from Focus)を適用し、深度マップ(三次元点群)を得た。ここでは、顕微鏡画像に混入するノイズにより深さ計測精度が低下する問題について、合焦判定時に三次元的な局所分散の考え方を新たに導入した。図2および図3に光軸に対して傾いた USAF1951 テストターゲットを対象とした深度マップを示す。図2が従来の二次元局所分散とメディアンフィルタ、図3が提案した三次元局所分散によるものである。この結果、従来の二次元局所分散と比べてノイズ抑制効果が高く、メディアンフィルタのように空間分解能を低下させることのない、高度な合焦判定手法を実現した。

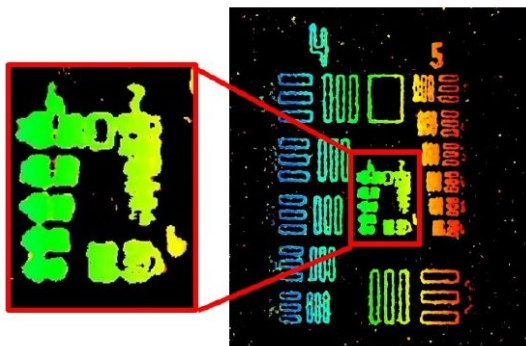


図2：従来の二次元局所分散とメディアンフィルタによる深度マップ

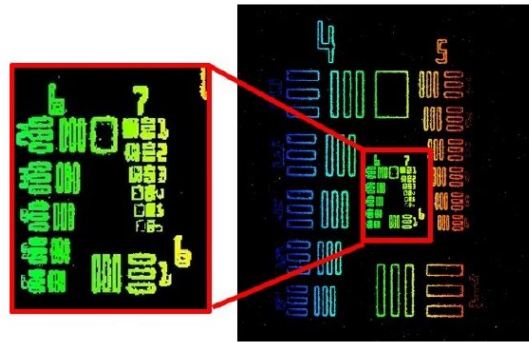


図3：提案した三次元局所分散による深度マップ

続いて、光学顕微鏡と Shape from Silhouette 法により得た形状モデルに対してライトフィールド顕微鏡で得た深度マップを適用し、試料表面情報を含む三次元形状モデルの再構築を行った。これをマイクロ工具のインプロセス計測に応用した。図4に開発した三次元インプロセス計測システムを示す。図5には従来の Shape from Silhouette 法により得られたマイクロエンドミルの形状モデル、図6には提案手法による形状モデルを示す。提案手法により、マイクロドリルやマイクロエンドミルの刃先の複雑な切れ刃構造と共に、表面の欠陥を可視化することができた。

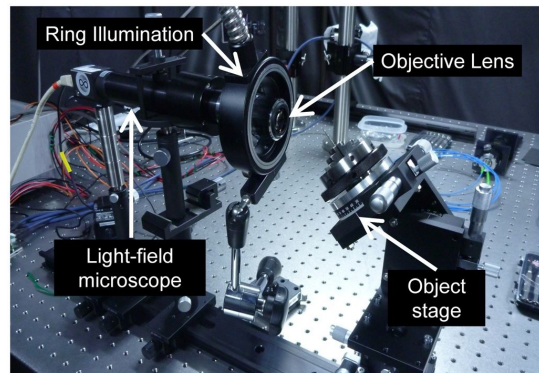


図4：三次元インプロセス計測システム

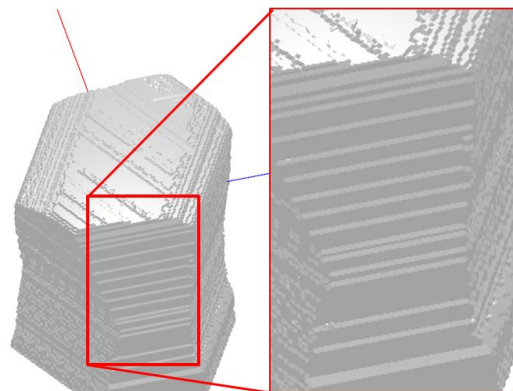


図5：従来手法によるマイクロエンドミルの形状モデル

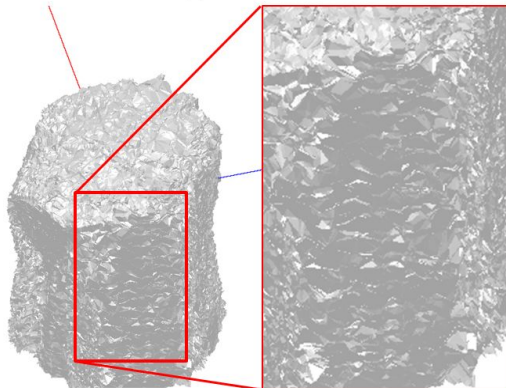


図 6：提案手法によるマイクロエンドミルの形状モデル

さらに、通常の光学顕微鏡では測定が困難な状況、例えば奥行きが深い構造（斜面や穴の中）の測定に対応するべく、高さ（深さ）の情報を得るために低コヒーレンス干渉の特徴であるコヒーレンスゲーティングに着目して研究開発を行った。これにより数百倍の信号ノイズ比でのプロファイル計測が可能となるため、奥行きが深い構造の可視化や形状再構築が実現する。本研究では、光学顕微鏡と反射型 OCT（Optical Coherence Tomography：コヒーレンスゲーティングを利用して位相物体の断層像を得る技術）を組み合わせ、対象の表面プロファイルを含む形状を高速に三次元計測することを提案した。ここでは、光学顕微鏡の被写界深度は狭く、高さ（深さ）測定範囲はミリメートル程度に限定されるという問題に対応すべく、試料走査型 OCT 顕微鏡（図 7）を提案した。これは画像処理に基づいて参照ミラーを制御し、低コヒーレンス干渉信号を光学顕微鏡の被写界深度内に固定した上で、測定対象である試料を走査することで三次元形状を得る方法である。図 8 に計測手順フローチャートを示す。実験による検証の結果、提案手法により、光学顕微鏡の被写界深度の数十倍の高さ（深さ）測定範囲が得られた。

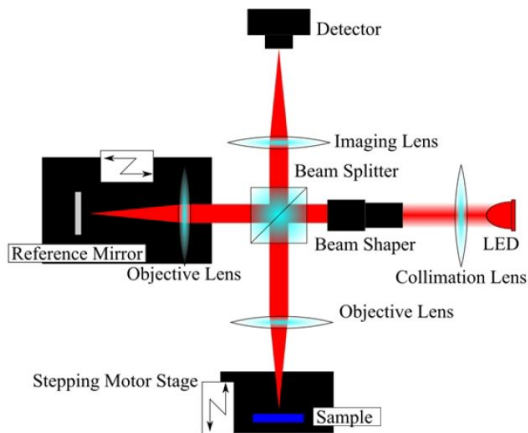


図 7：試料走査型 OCT 顕微鏡

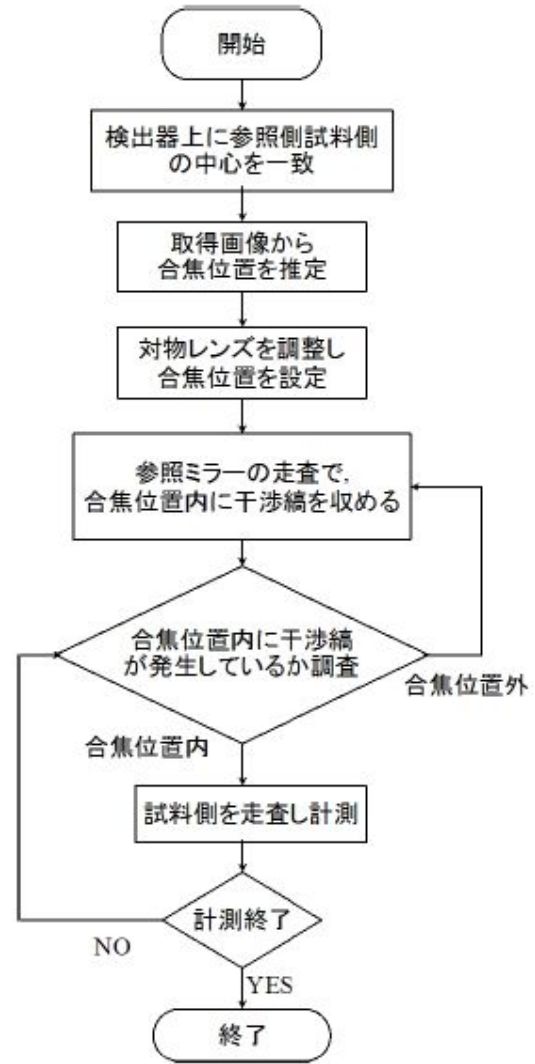


図 8：試料走査型 OCT 顕微鏡の計測手順フローチャート

#### 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 5 件)

- (1) S. Usuki, M. Uno, and K. T. Miura, Digital Shape Reconstruction of a Micro-Sized Machining Tool Using Light-Field Microscopy, International Journal of Automation Technology, Vol.10, No.2 pp.172-178, 2016. 査読有
- (2) S. Usuki, T. Takada and K. T. Miura, Optical Microscopy with Improved Resolution Using Two-beam Interference of Low-coherence Light, Measurement, Volume 78, pp.373-380, 2016. 査読有
- (3) 萬立洋次郎, 臼杵 深, 三浦憲二郎, 顕微鏡動画像における合焦位置推定をもちいたマイクロ形状計測, 砥粒加工学会誌, Vol.57, No.11, pp.735-738, 2013. 査読有

〔学会発表〕(計22件)

- (1) Tomohiro Suzuki, Shin Usuki, and Kenjiro Miura, Multi-resolution microscope image processing system using feature points and edge information, Image Processing: Machine Vision Applications IX, Electronic Imaging 2016, 2016年2月15日, San Francisco (アメリカ)
- (2) S.Usuki, Y. Ohashi, K. T. Miura, 3D measurement using light field microscopy with improved resolution, Workshop on microscopy, biology, medicine, and advanced CMOS imagers, Information Sensing Technologies, 2015年11月20日, 静岡大学浜松キャンパス, 静岡県・浜松市
- (3) Masaru Uno, Shin Usuki, Kenjiro T. Miura, 3D measurement and reconstruction using microscopic depth images, The 5th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2013年11月14日, Taipei (台湾)

〔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・電子工学研究所・准教授

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・工学部・教授

研究者番号：50254066