

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06063

研究課題名（和文）生産・加工現場での高分解能観察を可能にする低コヒーレンス干渉型変調照明顕微鏡

研究課題名（英文）Low coherence interference structured illumination microscopy for high resolution measurement and inspection in manufacturing

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） 18,600,000円

研究成果の概要（和文）：低コヒーレンス干渉型構造化照明顕微鏡を開発した。振動や温度ドリフトが存在する状況においても回折限界を超える高分解能を達成した。表面微細パターンの非蛍光観察においても高分解能化することが出来た一方で、アーチファクトの発生やパターンのピッチ誤差といった計測手法としての実用化における問題が確認された。フーリエタイコグラフィーに基づいた空間周波数の逐次的更新アルゴリズムの導入、空間光位相変調器による構造化照明の制御により問題を解決した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

振動ノイズに強く、工業利用も可能な構造化照明顕微鏡を開発した。従来の光学顕微鏡の2倍の高分解能観察が可能な構造化照明顕微鏡は、格子状照明を動かしながら取得した画像と照明の位置情報をコンピューター処理して対象物の画像を再現する。生物蛍光観察用として実用化されているが、製造現場では振動や温度変化などの影響で利用が困難であった。そこで、スーパーluminescentダイオードという特殊な光源を用いて構造化照明を制御することで、振動や温度変化など外部環境の影響を受けない高分解能観察を可能にした。小型、高精度化が進む光学素子の検査、蛍光色素を使えない生物試料など幅広い観察対象に利用できる。

研究成果の概要（英文）：Low coherence interference structured illumination microscope was developed for high resolution beyond the diffraction limit even in an environment with vibration and thermal drift. Although high resolution non-fluorescent imaging of patterned surface was achieved, there were artifacts and pitch errors in the reconstructed image which is a fatal problem in practical measurement and inspection. The problem was resolved by introducing the reconstruction algorithm with iterative update of spatial frequency base on Fourier ptychography and by controlling the structured illumination with a spatial light modulator instead of a mirror on a piezo electric actuator.

研究分野：光計測

キーワード：構造化照明 超解像 表面微細パターン 空間位相変調器 フーリエタイコグラフィー ライトフィールド デコンボリューション 低コヒーレンス干渉

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 半導体製造過程において実用化されている顕微計測・外観検査技術として、測長 SEM と AFM を併用した三次元検査解析、高解像度ウェーハ外観検査がある。これらは、静環でクリーンかつ恒温な環境が要求される他、計測対象の限定、導入コストの観点から、一般的な生産・加工現場での利用は困難である。ところが、3D プリントに代表される微細造形技術や超精密加工技術の普及に伴い、振動、ドリフト、ノイズが想定される環境においても、高分解能(サブマイクロメートル)で高スループットが要求されるようになってきた。例えば、精密部品、精密金型、医薬品などの生産・加工現場では、従来の外観検査や欠陥検査だけでなく、高分解能計測に基づいたインプロセス・インラインでの機能評価(精度、製品寿命、信頼性)が求められている。本研究では、高分解能、高スループット、非破壊、ロバスト、低導入コスト、のキーワード全てを満たすことが可能な光計測(光学顕微鏡)を扱う。一般に光学結像型の光計測手法は、レンズとエリアセンサを利用したもので高速並列処理が可能な反面、回折限界により空間分解能は光源波長程度に制限される。一方、走査型の光計測手法はレーザ共焦点、多光子吸収、STED、近接場光学等があり、実際に 10nm の空間分解能を達成したものもある。ただ、光スポット(プローブ)を計測領域全域に走査する必要がありスループットが低い。つまり、光計測は空間分解能とスループットの間にトレードオフの関係がある。

(2) 本研究では、光学結像の高スループットと高分解能を併せ持つ変調照明顕微法に着目する。蛍光顕微鏡として実用化されている変調照明顕微法は、縞模様の強度分布の変調照明と観察試料との間のモアレ効果を利用して光学結像の遮断周波数より高い空間周波数の情報を低周波側にシフトさせ、画像処理により高周波の情報を再現して空間分解能を向上させる。広視野顕微鏡であるため、並列画像処理により高速かつ高分解能観察が実現する。それゆえ、蛍光観察だけでなく、工業利用が期待されている。しかし、一般的にレーザ干渉により変調照明を生成するため、蛍光結像における問題はないが、通常光結像においてはスペckルノイズの影響が大きく、画像処理結果にアーチファクトを発生させる。さらに、光干渉による定在波照明を高精度に位置決めすることが要求される他、微弱な振動であっても画像処理結果が不安定となるため、一般的な生産・加工現場での実用化は困難である。

(3) 本研究では、低コヒーレンス干渉に基づいた照明および位相検出光学系を導入し、振動やドリフトが想定される環境においても、低スペckルノイズかつ高分解能観察を可能にする。その上、低コヒーレンス干渉の特徴である光軸方向の絶対測長を利用することで、従来必要であった既知寸法のターゲットを用いた変調照明位相のキャリブレーションが不要となる。このようなアプローチは国内外問わず皆無であり、全く新しい顕微計測・外観検査の実現が期待できる。

2. 研究の目的

(1) 高分解能蛍光観察手法として知られる変調照明顕微法に対して、低コヒーレンス干渉に基づいた照明および位相検出光学系を導入することにより、振動(変位換算:数マイクロメートル)、ドリフト(温度換算:数 μm)、ノイズ(SN 比:20dB)が想定される、精密部品、精密金型、医薬品などの生産・加工現場において、高速(領域 1mm \times 1mm を 30fps)かつ高分解能(サブマイクロメートル)で観察が可能な、全く新しい顕微計測・外観検査装置を開発することを目的としている。

(2) 本手法により、照明位相検出機構により高精度位相制御が不要となるため、ピエゾアクチュエータをステッピングモータに置換することで、高速、長走査範囲、低導入コストを実現する。また、ナノ・マイクロ形状モデリングのための高分解能計測データを高速に提供することにより、次世代の生産・加工現場におけるインプロセス・インライン評価システムの開発にも取り組む。

3. 研究の方法

(1) 照明位相検出光学系を有する低コヒーレンス干渉型変調照明顕微鏡の開発を行う。本研究において開発する顕微鏡は、照明側と検出側にそれぞれ低コヒーレンス干渉光学系が配置され、高強度可視 SLD 光源、高感度デジタル CMOS カメラ、位相制御ピエゾアクチュエータ、干渉信号検出器、機器制御・画像取得・高分解能化処理用ワークステーションから構成される。光学系はクリーン暗室内の除振台に配置される。照明側と検出側の低コヒーレンス干渉光学系を構築し、離散的なドットチャートを用いた検証実験を行う。具体的には高分解能化の再現性、画像取得条件の最適化、振動・ドリフト・ノイズへの耐性を検証する。

(2) 偏光ピックアップ照明システムを導入し、多光束同時干渉照明系を構築し、高速二次元高分解能イメージングを実現する。ここでは、レーザ光源による多光束干渉を用いるため、複雑な干渉パターンが発生し、空間周波数解析と高分解能化処理が複雑化することが懸念されるが、本研究は低コヒーレンス干渉に基づいているため、各方向の情報を独立に扱うことが可能であるため、大きな問題とはならないことが予想される。最終的な二次元高分解能イメージングの検証のための観察試料として最小 100nm ピッチのシーメンススターを購入・使用する。この改良により回転機構が不要となり位置決め誤差が低減する。また、取得画像数も低減されるため、従来

の3倍程度の高速化を見込むことができる。

(3) 照明の生成・制御システムの自動化して繰り返し測定を行い、ロバスト性や安定性について評価を行う。

(4) 独自に開発した低コヒーレンス干渉に基づいた照明制御装置と位相検出装置の積極的活用の一環として、位相シフト干渉法による位相計測と新たな超解像イメージングについて可能性を探索する。

(5) 観察試料回転により、低開口数の対物レンズ使用時における効率的な空間周波数情報の取得について実験的に見当する。

(6) 空間光変調器の導入により構造化照明の空間分布と位相の同時制御について実験的に検討する。

(7) 極小画素ピッチのイメージセンサ導入によるスパースデコンボリューションの実験的検討と100nm空間分解能の実現可能性の検討を行う。

(8) 構造化照明によるライトフィールドデコンボリューションについてシミュレーションおよび実験により有効性の検討を行う。その際、計測技術としての実用化を考慮し、周波数外挿による高分解能化と位相回復の実現の他、画質向上（アーチファクトの低減）を行う。

4. 研究成果

(1) 低コヒーレンス干渉型構造化照明顕微鏡のプロトタイプ試作および検証を行った。振動や温度ドリフトによりサブミクロンオーダの測定環境変動が存在する状況においても、計測した照明位相をフィードバックすることにより、超解像を実現した。これにより、参照ミラーの位置決め機構についても、低速なピエゾステージ（位置決め分解能1nm）から高速なステップモータステージ（位置決め分解能1 μ m）への置換が可能となり、低コスト化を実現した。

(2) フーリエタイコグラフィーに基づいた空間周波数再構成アルゴリズムの開発と検証を行った。従来の構造化照明顕微法の空間周波数再構成において、分離した空間周波数成分を重ね合わせる際に生じる重複（オーバーラップ）部分によって、イメージング結果に誤差が生じる問題がある。適切な重み付けによる重ね合わせにより誤差を最小化できるが、環境変動や機器のアライメント誤差によって適切な重みを求めることは困難である。そこでコンピューテーショナルイメージングとして知られるフーリエタイコグラフィーに注目し、その再構成アルゴリズムを構造化照明顕微法に実装・導入した。計算時間を増大させることなく、オーバーラップの影響の少ない合成結果ならびに誤差の少ないイメージング結果を得た。

(3) 更なるイメージングの高速化を目的として、偏光ピックアップを用いた多光束同時干渉照明光学系の開発を行った。

(4) ラインアンドスペースパターンでの検証を行った。予備実験により、ラインアンドスペースは回折格子として働くため、モアレ信号取得のためには少なくとも2種類の1次回折光による結像が必要であることがわかった。開発した顕微鏡は、対物レンズの外からの暗視野照明のため、効率良い回折光の取得を考えて、二光束を対向入射させる方式に変更した。結果として、回折限界およそ600nmの結像光学系を用いて400nmのラインアンドスペースを解像することができた。

(5) 観察試料を回転させることにより、構造化照明の相対的なピッチを変化させることが可能であり、これにより、特に低開口数の対物レンズを使用した際に発生する空間周波数情報の不足の問題解決に有効であることを着想した。また観察試料の回転は全方向の空間分解能の向上に寄与することから、開発装置に観察試料の回転機構を導入した。これに関して、シミュレーションによる機能の確認を行った。

(6) 本研究における観察（計測）対象のスパース性、構造化照明のスパース性、両方を考慮した新たな画像・信号処理の提案を行った。製造業（工業）分野における観察（計測）対象は、マスクや配線のように疎（密ではない）なパターンを有する。また、構造化照明も2次元的な縞であり、疎（密ではない）なパターンである。このことからスパース性を過程したデコンボリューション処理が適用可能であると考え、シミュレーションによる検討を行った。結果として、90%程度のスパース性を確保できる試料条件においては、実現可能な空間サンプリングのピッチにおいて、100nmの空間分解能が可能であることを示すことができた。

(7) 表面微細パターンの非蛍光観察においても構造化照明顕微法が機能することを確認し、回

折限界を超えて高分解能化が達成された一方で、アーチファクトの発生、パターンピッチの不均一性、明るさ（強度）の不均一性、が解像結果に現れた。これは、提案手法の実用化において、計測の観点から重大な問題である。原因として、ノイズや振動の影響の他に、光学パラメータの誤差や空間周波数スティッチングの誤差が考えられる。従来の空間周波数スティッチングでは画像コントラストに基づいた重み付き加算が用いられるが、計算コストが低い一方で重複部分に誤差が生じやすい。そこで、フーリエタイコグラフィーに基づいた空間周波数の逐次的更新アルゴリズムの導入を行った。これにより、パターンピッチの不均一性、明るさ（強度）の不均一性を大幅に低減することができたが、アーチファクト発生の問題は未解決であった。アーチファクト発生の原因は結像方式の違いにあり、部分コヒーレント結像でありながら従来の空間周波数再構成にはインコヒーレント結像モデルを使用しているという問題があった。そこで、従来の空間周波数再構成を一新し、結像方式によらず観察対象のライトフィールド（振幅と位相）の取得計算を行う「構造化照明によるライトフィールドデコンボリューション」を提案した。構造化照明によるライトフィールドデコンボリューションでは、正方向と逆方向のライトフィールドの伝搬計算を先験情報（構造化照明、レンズ瞳関数、取得画像）を用いて行い、それらの差分により推定した観察対象ライトフィールドを更新するという手法で、周波数外挿による高分解能化と位相回復を実現する手法である。シミュレーションにより有効性を確認した。

（８）振動やノイズに対してロバストなシステムの開発を目的として、空間光位相変調器（SLM）による構造化照明の制御について取り組んだ。従来は、ミラーをピエゾアクチュエータで駆動させることにより構造化照明の位相をコントロールしていたが、SLMによるコントロールとすることで稼働部（振動源）の１つを取り除くことが可能となった。また、SLMへの入力を直接的に構造化照明の位相として扱うことができるため、従来の干渉位相計測値のフィードバックが不要となり、システムの小型化（振動の影響低減）が可能となった。さらに、SLMでは構造化照明の２次元位相パターンを空間的に制御することができるため、観察対象が複雑な表面微細パターンを有している場合においても、より自由度の高いイメージングが可能となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Usuki Shin、Shibata Gaku、Miura Kenjiro T	4. 巻 31
2. 論文標題 High-resolution nonfluorescent imaging with structured illumination for patterned surface measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 084003 ~ 084003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6501/ab85d7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazumichi Yagi, Sho Suzuki, Shin Usuki, Kenjiro T. Miura	4. 巻 17
2. 論文標題 G1 Hermite Interpolating with Discrete Log-aesthetic Curves and Surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 pp.607-620
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kenjiro T. Miura, Sho Suzuki, R.U. Gobithaasan, Shin Usuki	4. 巻 16
2. 論文標題 A New Log-aesthetic Space Curve Based on Similarity Geometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 pp.79-88
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 中村優人, 鈴木晶, 白杵深, 北澤弘幸, 三浦憲二郎	4. 巻 84
2. 論文標題 人工関節表層メッシュ構造の生成 -幾何形状の回転対称性を利用したABF法の改良-	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 pp.731-737
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yasuki Miyazaki, Takafumi Hirano, Takaaki Kobayashi, Yoshihiro Imai, Shin Usuki, Yuichi Kobayashi, Kenji Terabayashi, Kenjiro T. Miura	4. 巻 30
2. 論文標題 Acquisition of Disaster Emergency Information Using a Terrain Database by Flying Robots	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 pp.443-452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kaiyi Zhu, Yueyue Lu, Shulian Zhang, Haowen Ruan, Shin Usuki, Yidong Tan	4. 巻 43
2. 論文標題 Ultrasound modulated laser confocal feedback imaging inside turbid media	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 1207-1210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Usuki, K. Tamaki, K. T. Miura	4. 巻 11
2. 論文標題 Three-Dimensional Reconstruction by Time-Domain Optical Coherence Tomography Microscope with Improved Measurement Range	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 787-794
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. T. Miura, S. Suzuki, R.U. Gobithaasan, P. Salvi, and S. Usuki	4. 巻 14
2. 論文標題 Log-aesthetic flow governed by heat conduction equations, Computer-Aided Design and Applications	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 227-233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 14件）

1. 発表者名 Gaku Shibata, Shin Usuki and Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 High-resolution non-fluorescent imaging with structured illumination for patterned surface measurement
3. 学会等名 ISMTII2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shin Usuki, Gaku Shibata and Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Measurement of patterned surfaces with non-fluorescent structured illumination microscope
3. 学会等名 SPIE Optics + Photonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shin Usuki and Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Light-field acquisition and super-resolution with structured illumination
3. 学会等名 BISC2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小澤英明, 小野田寛大, 白杵深, 關根惟敏, 三浦憲二郎
2. 発表標題 構造化照明によるライトフィールド再構成-超解像と位相回復を実現するアルゴリズム-
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Evan H. E. Putranto, Shin Usuki, Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Microscope image matching in scope of multi-resolution observation system
3. 学会等名 Electronic Imaging 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirohito Kondo, Shin Usuki and Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Sparse deconvolution of structured illumination microscope image
3. 学会等名 The 4th International Conference on Nano Electronics Research and Education (ICNERE) Joint Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirohito Kondo, Shin Usuki and Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Sparse deconvolution non-fluorescent imaging with structured illumination microscopy
3. 学会等名 ICPE2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin Usuki, Gaku Shibata and Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 High-resolution non-fluorescent imaging with low-coherence interference structured illumination microscopy
3. 学会等名 ASPE2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin Usuki and Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Computational microscopy toward light-field acquisition and super-resolution
3. 学会等名 ISOM2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin Usuki
2. 発表標題 Super-resolution light field microscope and its application
3. 学会等名 MSCEIS 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shin Usuki, Katsuaki Tamaki, Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Low-coherence Interference Wide-field Optical Microscopy with Improved Axial Measurement Range
3. 学会等名 ISMT11 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shin Usuki, Yoshitake Tani, Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Light Field Microscopy Combined with Super-resolution Techniques
3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia in the 78th JSAP Autumn Meeting 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshitake Tani, Shin Usuki, Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Improving spatial resolution of the light field microscope with Fourier ptychography
3. 学会等名 SPIE Optics + Photonics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Evan H. E. Putranto, Tomohiro Suzuki, Shin Usuki, Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Forming spatial resolution of intermediate level microscopy images for continuous zooming transition on multi-resolution processing system
3. 学会等名 SPIE Optics + Photonics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柴田岳, 白杵深, 三浦憲二郎
2. 発表標題 構造化照明顕微法における試料回転とその効果の検証
3. 学会等名 2018年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeshi Terao, Tomohiro Takada, Shin Usuki and Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Low-coherence interference structured illumination microscopy with a fringe measurement system
3. 学会等名 16th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 白杵深, 玉木克明, 三浦憲二郎
2. 発表標題 測定範囲を拡張したOCT顕微鏡による反射面の立体形状計測
3. 学会等名 2017年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 白杵深
2. 発表標題 ライトフィールド顕微鏡 - 超解像技術との組み合わせと応用 -
3. 学会等名 第11回NIBBバイオイメージングフォーラム (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 観察システム	発明者 白杵深, 高田智裕	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2016/074265	出願年 2016年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>静岡大学教員データベース - 教員個別情報 : 白杵 深 (USUKI SHIN) https://tdb.shizuoka.ac.jp/RDB/public/Default2.aspx?id=10728&l=0</p>

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
---------	---------------------------	-----------------------	----