

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：13801  
研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））  
研究期間：2019～2023  
課題番号：18KK0403  
研究課題名（和文）超高分解能観察の実現に向けた近接場光位相共役によるサブ波長ピッチ空間変調照明

研究課題名（英文）Structured illumination using near-field optical phase conjugation for observation with sub-wavelength resolution

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） 11,700,000円  
渡航期間： 4ヶ月

研究成果の概要（和文）：研究期間全体を通じて、本研究課題である近接場光位相共役による集光パターン生成技術についてFDTDシミュレーションによる理論検討を実施した。シミュレーションにおいては実機に即したパラメータセッティングを用いた。更に、デジタル光位相共役鏡のプロトタイプの開発、散乱レンズによる高分解能光パターンニング手法の提案、波面最適化に基づいた微弱光用位相共役技術の開発、を行った。最終年度後半は、清華大学精密機器工程系の訪問教員として、空間光変調器による波面制御とレーザー干渉計を組み合わせることによって、微細構造を有する表面の高分解能計測に関する研究開発を実施した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題における主要な研究成果である近接場光位相共役散乱レンズによる集光パターン生成技術とその集光パターンを顕微鏡観察のための構造化照明に応用する技術は、生命科学における細胞や分子の高分解能観察に利用可能であると共に、光遺伝学における細胞操作技術として有用である。また、本研究課題の研究成果は、半導体や精密部品の製造分野においても、マイクロ光造形による加工技術、光学顕微鏡や光干渉計による検査・計測技術、光ピンセット法によるマニピュレーション技術、として有用である。これらの事柄は学術的にも社会的にも意義深い。

研究成果の概要（英文）：During the entire research period, I conducted a theoretical study of the illumination pattern generation technique by near-field optical phase conjugation with the FDTD method. In the simulations, we used parameter settings that are consistent with those of actual devices. In addition, we developed a prototype of a digital optical phase conjugator, proposed a high-resolution optical patterning method using a scattering lens, and developed a phase conjugation technique for weak scattered light based on wavefront optimization. In the latter half of the final year, as a visiting faculty member of the Precision Instrumentation and Engineering Department at Tsinghua University, I conducted research and development on high-resolution measurement of micro-structured surfaces by combining wavefront control using spatial light modulators and laser interferometry.

研究分野：光計測、生産工学・加工学

キーワード：近接場光学 位相共役 散乱レンズ 構造化照明 顕微鏡 レーザー干渉計 空間位相変調器 波面整形

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 広視野かつ高空間分解能の構造化照明(空間変調照明)顕微法(SIM: Structured Illumination Microscopy)はライフサイエンスにおける蛍光観察手法として実用化・製品化に至っている。構造化照明顕微法は非破壊で光学レンズ結像を利用するためエリアセンサによる高速イメージングが可能という特徴から、半導体などの製造分野における検査・計測手法として注目が集まっている。ただし、空間的に変調された構造化照明のピッチ(空間周波数)により空間分解能が規定されるため、従来の光干渉による構造化照明生成手法では得られる空間分解能は200nm程度(従来の光学顕微鏡の2倍)となる。一方、次世代の半導体製造分野における精密計測では100nm(サブ波長)分解能が要求されるため、空間ピッチの小さい(高空間周波数)構造化照明の生成手法の開発が急務である。

(2) 光の波長による限界を超えた空間分解能を有するイメージング技術として走査型近接場光学顕微鏡があり、50nmから100nmのサブ波長分解能での光イメージングが可能である。しかし、先端直径が50nmから100nmの近接場光学プローブを二次元的に操作する必要があり、画像取得に時間がかかる。したがってスループットが低いため、半導体などの製造分野における検査・計測手法としては実用的ではない。

(3) 時間反転波を発生させる手法として光位相共役鏡(PCM: Phase Conjugation Mirror)があるが、反射率(光利用効率)が低いため実用には至っていなかった。近年、空間位相変調器(SLM: Spatial Light Modulator)を利用したデジタル光位相共役鏡を補償光学と組み合わせ、ライフサイエンスにおける観察で波面収差補正や散乱抑制に用いられる研究が国内外で活発に行われている。PCMは、入射光の複素振幅の位相共役をとり、光を反射させる。このとき、位相共役光は入射光の時間反転光として伝搬する。スポット光源から光を入射した場合、時間反転光は光源に集中し、集光スポットを形成する。このとき、光位相共役による反射光は、PCM上で記録できる入射光の位相情報のみで構成されることから、波長より大きいスポットが形成される。

## 2. 研究の目的

(1) 空間分解能は顕微鏡の仕様の中で最も重要視されるが、光干渉により変調照明を生成する基課題においては、達成可能な空間分解能は高々200nm程度である。しかし、次世代の製造分野における検査・計測に対応するためには100nm(サブ波長)の空間分解能が必要となる。そこで、空間分解能を決定する変調照明について100nmピッチを実現することを本研究の目的とする。

(2) 具体的には、近接場光学と光位相共役によるサブ波長レーザ集光法を基にエバネッセント光とデジタル光位相共役鏡を融合した全く新しいサブ波長ピッチ空間変調照明の生成手法を提案する。エバネッセント光(近接場光)をナノ粒子(量子ドット)により伝搬光として取り出し、広開口の散乱媒質を通して位相共役鏡で波面を記録する。再生する位相共役波(反射光)は時間反転波であるので、ナノ粒子の位置に集光スポットを形成する。本手法は、デジタル位相共役鏡による高効率な時間反転波の再生、長い作動距離、ナノ粒子の配置による変調照明の空間分布制御などの様々なメリットを有する。

## 3. 研究の方法

(1) 時間領域差分法(FDTD: Finite Difference Time Domain)に基づいた数値シミュレーションにより本提案手法の実現可能性を検討する。ここでは、微小開口型の近接場光プローブを含む光学系をモデル化し、微小光源として利用する。その近接場光源を散乱させて伝搬光に変換し、遠方波面を記録する。記録波面(複素振幅)の複素共役をとり光源として設定し、時間反転波として光学系を逆伝搬させる。元の光源位置における光強度から集光性能を評価する。

(2) 時間反転波による集光スポット生成を確認後、光源位置を変化させながら遠方波面の記録および複素共役を計算する。任意の位置の光源に対応する複素共役波面を重ね合わせた波面を光源として設定し、時間反転波として光学系を逆伝搬させることで所望する構造化照明を生成する。

(3) デジタル光位相共役鏡および近接場光学プローブシステムを実機開発する。散乱波面記録方法については位相シフト干渉計を採用する。近接場光が微弱であることにより、散乱波面の干渉計測が困難であることが予想されるが、極めて高いSN比を有するレーザフィードバック干渉計のパイオニアであるProf. Tan Yidong(Department of Precision Instruments, 清華大学, 中国)との国際共同研究によりこの問題の解決を目指す。

#### 4. 研究成果

(1) 提案手法について FDTD シミュレーションによる理論検討を実施した。光位相共役によりプリズム上のエバネッセント波の散乱光源であるナノ粒子の位置に時間反転波が集光していることを確認した。光源波長 532[nm], ナノ粒子の径が  $d=100$ [nm] の場合, およそ 200[nm] (半値全幅) の集光径が得られ, 光位相共役によるサブ波長集光 (回折限界を超える分解能に相当する) を確認できた。

(2) デジタル光位相共役鏡のプロトタイプの開発を行った。まず, 位相シフト干渉法による物体光の波面計測システムを開発した。次に, 計測した波面の位相情報を反転 (複素共役) させた波面を計算し, その位相パターンを SLM に入力することで, SLM 面に入射した参照光を反射させた。この時, 参照光を物体光の伝搬経路へ反射させることでこの光は物体光と同じ位相分布を持ち, 進行方向のみ異なる時間反転波として出射される。物体光路に位相物体を配置してその波面の歪みを記録し, その光位相共役波を再生することで, 再度位相物体を通過した際に歪みを打ち消すことを確認することで, システムの検証を行った。

(3) 海外共同研究者の Prof. Tan Yidong を招へいし, 研究発表会を実施して情報交換を行うとともに, 高精度波面計測制御およびデジタル光位相共役鏡の開発 (理論, 実験) についての助言を受けた。

(4) 提案手法であるサブ波長ピッチ空間変調照明生成システムの要素技術である光位相共役に不可欠な散乱波面計測について実験的に検討を行った。高分解能波面計測が可能な位相シフト干渉法を用いたデジタル光位相共役鏡について研究開発を行った。

(5) 位相共役光の再生について, ピクセルマッチングにより, 無散乱体場では, 入射光に即した位相共役光の再生が確認できた。一方で, 散乱体場では, 位相共役マップ投影時に集光スポットを確認できたが, 集光スポット付近は散乱抑制が不十分な結果となった。光学系の綿密な調整と校正により集光精度の改善が期待できる。

(6) 位相共役の精度向上を目的として, 波面の記録と時間反転波の再生におけるキャリブレーションシステムの開発を行った。さらに, FDTD 法に基づいたシミュレーションを実施し, 本システムにより生成可能な変調照明の最高空間周波数について物体面における 2 点分解能により評価した。

(7) SLM による波面制御に基づいた構造化照明の生成技術について研究開発を実施した。従来は, 位相シフト干渉法による波面計測と位相共役に基づいて波面を制御していたが, 近接場散乱光が微弱であることにより波面計測が困難であるという問題について, 波面最適化による位相共役を採用した。これにより, 近接場散乱光, 遠方からの微弱散乱光であっても波面制御が可能となり, 応用範囲を拡大することができた。

(8) 清華大学精密機器工程系 Tan 研究室の訪問教員として, SLM による波面制御とレーザ干渉計の組み合わせによる Profilometry に関する研究開発を行った。本研究課題である空間光変調に基づいた高分解能顕微計測に Tan 研究室の独自技術であるレーザフィードバック干渉計を組み合わせることによって, 微細構造を有する表面の高分解能計測を可能とした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kenjiro T. Miura, R.U. Gobithaasan, Md Yushalify Misro, Tadatoshi Sekine, Shin Usuki	4. 巻 20
2. 論文標題 Rational Generalized Trigonometric Curve: Rationalization of Generalized Trigonometric Curve	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 225-233
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

1. 著者名 臼杵深	4. 巻 51
2. 論文標題 三次元顕微計測に基づいたマイクロ形状モデリング	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 512-516
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 三浦憲二郎, R.U. Gobithaasan, 關根惟敏, 臼杵深	4. 巻 87
2. 論文標題 一般化三角関数曲線とそのスプライン化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.21-00154	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 Kenjiro T. Miura, Dan Wang, R.U. Gobithaasan, Tadatoshi Sekine, Shin Usuki	4. 巻 19
2. 論文標題 Uniqueness Theorem on the Shape of Free-form Curves Defined by Three Control Points	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 293-305
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 Tadatoshi Sekine, Hiromi Itaya, Shin Usuki, and Kenjiro T. Miura	4. 巻 -
2. 論文標題 Defective judgment for automotive wire harness using convolutional neural network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2021COL0038	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, R.U. Gobithaasan, Peter Salvi, Dan Wang, Tadatoshi Sekine, Shin Usuki, Jun-ichi Inoguchi, Kenji Kajiwara	4. 巻 -
2. 論文標題 ek-curves: Controlled Local Curvature Extrema	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Visual Computer	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00371-021-02149-8	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 Dan Wang, R.U. Gobithaasan, Tadatoshi Sekine, Shin Usuki, Kenjiro T. Miura	4. 巻 18
2. 論文標題 Interpolation of Point Sequences with Extremum of Curvature by Log-aesthetic Curves with G2 continuity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 399-410
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 K.T. Miura, S. Suzuki, S. Usuki, R.U. Gobithaasan	4. 巻 7
2. 論文標題 -curve -Introduction of Cusps to Aesthetic Curves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Computational Design and Engineering	6. 最初と最後の頁 155-164
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 Usuki Shin, Shibata Gaku, Miura Kenjiro Takai	4. 巻 -
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 -
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 無
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 S. Usuki, K. Kuwae, T. Sekine, K. T. Miura	4. 巻 24
2. 論文標題 Super-resolution and Optical Phase Retrieval Using Ptychographic Structured Illumination Microscopy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Precision Engineering and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12541-024-01009-4	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 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Keichi Kuwae, Shin Usuki, Tadatoshi Sekine and Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Super-resolution and Optical Phase Retrieval using Ptychographic Structured Illumination Microscopy
3. 学会等名 THE 15th INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF MEASUREMENT TECHNOLOGY AND INTELLIGENT INSTRUMENTS (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉武春陽, 疋田雅裕, 白杵深, 三浦憲二郎, 關根惟敏
2. 発表標題 近接場光散乱レンズの開発-波面制御による光散乱抑制-
3. 学会等名 2024年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Keichi Kuwae, Shin Usuki, Tadatoshi Sekine and Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Super-resolution and Optical Phase Retrieval using Ptychographic Structured Illumination Microscopy
3. 学会等名 THE 15th INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF MEASUREMENT TECHNOLOGY AND INTELLIGENT INSTRUMENTS (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉武春陽, 疋田雅裕, 白杵深, 三浦憲二郎, 關根惟敏
2. 発表標題 近接場光散乱レンズの開発-波面制御による光散乱抑制-
3. 学会等名 2024年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Reiji Yagi, Shin Usuki, Kenjiro T. Miura, Tadatoshi Sekine, Takuma Sugi
2. 発表標題 A new light-field microscope system for high-resolution 3D bio-imaging
3. 学会等名 The 9th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tadatoshi Sekine, Shin Usuki, Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 tochastic Modeling and Analysis of Automotive Wire Harness Based on Machine Learning and Polynomial Chaos Method
3. 学会等名 EMC Europe 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tadatoshi Sekine, Hiromi Itaya, Shin Usuki, Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Performance Judgment of Automotive Wire Harness Based on Convolutional Neural Network
3. 学会等名 IEEE International Symposium on EMC+SIPI 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑江慶地, 白杵深, 關根惟敏, 三浦憲二郎
2. 発表標題 タイコグラフィーに基づいた定量位相顕微鏡の研究開発と計測応用
3. 学会等名 2022年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺龍之介, 北澤弘幸, 關根惟敏, 白杵深, 三浦憲二郎
2. 発表標題 Poisson Disk Samplingによる点群生成とそれらを用いたメッシュ生成
3. 学会等名 2022年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 吉武春陽, 小野田寛太, 白杵深, 關根惟敏, 三浦憲二郎
2. 発表標題 微細構造を利用した光位相共役レンズの開発
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白杵深, 關根惟敏, 三浦憲二郎, 執行航希, 杉拓磨
2. 発表標題 ライトフィールド顕微鏡による三次元計測
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白杵深, 關根惟敏, 三浦憲二郎, 前岡遥花, 執行航希, 杉拓磨
2. 発表標題 生物試料の三次元計測のためのライトフィールド顕微鏡の開発-画素ずらしによる高分解能化と蛍光観察-
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野田寛大, 佐瀬優志, 白杵深, 關根惟敏, 三浦憲二郎
2. 発表標題 高分解能光パターンニングのための散乱波面計測
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野田寛大, 佐瀬優志, 臼杵深, 關根惟敏, 三浦憲二郎
2. 発表標題 近接場位相共役レンズによるパターンニング
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会
4. 発表年 2020年

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 ISMTI 2019 (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 佐瀬優志, 奈田 晃, 關根惟敏, 白杵深, 三浦憲二郎
2. 発表標題 光位相共役を用いたサブ波長集光についての研究：デジタル位相共役鏡の構築
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
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
談 宜東  (Tan Yidong)	清華大学・精密機器工程系・教授	

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		
中国	清華大学		