

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01226

研究課題名（和文）高速・高分解能な光加工計測を実現する近接場位相共役レンズの開発

研究課題名（英文）Development of near-field optical conjugation lens for high-speed and high-resolution 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） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：代表的な高分解能光加工技術のフォトリソグラフィはフォトマスクの作成・交換、代表的な高分解能光計測技術の近接場光学顕微鏡はプローブスキャンがそれぞれ必要であり、一般的には分解能とスピード（効率）がトレードオフの関係となっている。本研究では、独自に開発した近接場位相共役によるサブ波長集光スポット生成技術を拡張し、高分解能光パターニングのための近接場光散乱レンズを提案する。研究期間全体を通して、近接場プローブによる微小光源、散乱光の波面計測、位相マップの重ね合わせと位相共役計算、位相共役光の再生について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

本研究では、位相共役光学と近接場光学の融合により、光パターニング技術における空間分解能とスピードのトレードオフ問題の解決可能性を示した。これにより、生産加工、ナノテクノロジー、ライフサイエンス、など多くの分野において、マスクレスフォトリソグラフィ、スキャンレス近接場光学顕微鏡、高速・高分解能光ピンセットといった画期的なイノベーションの創出が可能となる。さらに、レーザホログラフィやプラズモニクスといった先端フォトニクスとの高い親和性を考慮すると、本研究成果は学術的にも社会的にも意義深いものである。

研究成果の概要（英文）：Photolithography, a typical high-resolution optical processing technology, requires photomask creation and exchange, and near-field optical microscopy, a typical high-resolution optical measurement technology, requires probe scanning, which generally involves a trade-off between resolution and speed (efficiency). In this study, we propose a near-field scattering lens for high-resolution optical patterning by extending our originally developed sub-wavelength focused spot generation technique using near-field optical phase conjugation. Throughout the research period, we have conducted research and development on the small light sources using a near-field optical probe, measurement of wavefronts of the scattered light, superposition of phase maps and calculation of phase conjugation, and regeneration of phase conjugated light.

Translated with DeepL.com (free version)

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 光パターニング 光造形 光ピンセット 構造化照明 超解像

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 光パターニング技術の応用は多岐に渡り、フォトリソグラフィ、超解像蛍光顕微鏡、光ピンセットなど、近年の産業発展に大きく貢献している。対物レンズ(屈折レンズ)による光結像は高速である反面、回折限界(波長とレンズの開口数)のため空間分解能が低く、パターン生成範囲がレンズ倍率によって制限されるという問題がある。一方、回折限界を超える(光波長に依らない)空間分解能を有する近接場光学プローブを用いる手法も開発されているが、広い生成範囲を得るためには機械的運動を伴った走査に膨大な時間がかかる他、十分な光強度(信号ノイズ比)が得られないという問題がある。

(2) 一般的には、屈折レンズを用いて光パターニングを行うため、屈折角に加えて光波長とレンズ開口数により表現できる光波の空間周波数が制限される(回折限界)。一方、近年、空間位相変調器(SLM: Spatial Light Modulator)によるデジタル位相共役技術を利用した散乱レンズの研究が活発に行われている。散乱レンズでは、屈折レンズのような開口数に制限されず、屈折角より大きい散乱角により高い空間周波数の光波を表現することができるため、高分解能な光パターニングが可能である。ただし、散乱レンズにおいても集光性能は光波長に制限される。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、光パターニング技術における空間分解能とスピードのトレードオフという未解決研究課題に取り組むにあたって、独自に開発した近接場光位相共役によるサブ波長集光スポット生成技術を拡張し、高分解能光パターニングのための近接場光位相共役散乱レンズの開発を行う。分解能とスピードのトレードオフを解消し、サブ波長分解能($0.1\mu\text{m}$)、広範囲($10\text{mm} \times 10\text{mm}$)、機械的運動を伴わない高速パターニング(毎秒30パターン)を同時に実現するとともに、ナノ・マイクロスケールの加工・計測・マニピュレーションに十分な光強度(信号ノイズ比)を得ることを目的とする。

(2) 近接場光位相共役散乱レンズは、散乱波面計測と高分解能光パターニングから構成される。近接場微小開口プローブにレーザを入射、プローブ先端に発生した近接場光を散乱体により伝搬光に変換する。近接場光のサイズは光波長に依らないため、散乱レンズによる集光性能も光波長に制限されないことが期待できる。微小光源スキャンにおいてプローブ位置に対応した散乱波面を位相シフト干渉計により計測する。記録した散乱波面の位相共役と波面重ね合わせにより位相マップを算出し、SLMに入力することで時間反転波を再生し、近接場光パターンを散乱体表面に生成する。散乱体表面の全てのプローブ位置に対応した波面計測、波面重ね合わせに基づいた位相共役マップ計算により、任意の近接場光パターンが生成可能となる。別途実施したシミュレーションにより、近接場プローブの開口径を $0.05\mu\text{m}$ とすることにより、 $0.1\mu\text{m}$ 程度のパターニング分解能が達成可能であることが示された。さらに、レーザをSLMに入射することにより再生された時間反転波は、プローブを介することなく近接場光発生に寄与するため、ロスのない十分な光強度(信号ノイズ比)が期待できる。以上についての検証を目的として研究開発を実施する。

3. 研究の方法

(1) CADと有限要素法のソフトウェアを用いて近接場位相共役レンズの設計および最適化を行う。CADによるモデル化および時間領域差分法(FDTD: Finite Difference Time Domain)に基づいたシミュレーションによる数値解析を実施し、サブ波長集光と任意パターン生成を確認する。さらに、光学部品配置、近接場微小開口プローブの形状、散乱体形状と散乱係数、といったパラメータについて最適化し、位相共役レンズを設計する。併せて、ノイズ、振動、ドリフト、サンプリング、量子化といった誤差要因についてもシミュレーションにより検討を行う。

(2) 近接場位相共役レンズの装置開発・実験検討を実施する。まず、位相シフト干渉計および空間位相変調器から構成されるデジタル位相共役システムを開発し、対物レンズによる集光スポット生成および位相共役レンズによる光パターニングを確認する。近接場光学プロービングシステム、最適化設計した散乱体をそれぞれ開発し、統合するにより近接場位相共役レンズとする。性能を大きく左右する散乱体については、シミュレーションによる最適化を実験と連動させながら開発を進める。散乱体は幾何形状および散乱係数が既知であることが要求されるため、標準粒子(例:ポリスチレンラテックス)を光透過性材料(例:アガー)で攪拌し、透明容器内でゲル化させる方法を検討する。実験においては、本手法の有効性を検討するとともに、空間分解能、パターン生成範囲、パターニングスピードといった性能およびその限界について検討し、シミュ

レーション結果との比較を経て誤差要因や改善方法について検討する。

(3) 任意の近接場光パターンを生成するにあたって、散乱体表面の全てのプローブ位置に対応した散乱波面を計測し、波面の重ね合わせ、位相共役(複素共役)に基づいて位相マップを算出する。散乱体表面全面に対応する位相マップをリスト化する。空間分解能(0.1 μm)、パターン生成範囲(10mm \times 10mm)とした場合、100億点もの波面計測と位相マップ計算が散乱体毎に必要となるため、計測の自動化、計測環境の改善も含めて実施する。

4. 研究成果

(1) 位相シフト干渉法に基づいた波面計測システムの開発、位相マップの重ね合わせと位相共役計算、位相共役光の再生についての実験的検証、近接場プローブによる微小光源生成システムの開発を行った。位相共役光の再生については、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。

(2) 近接場光位相共役散乱レンズの作動距離および三次元空間分解能について FDTD シミュレーションにより評価した。10 μm 以上の作動距離とサブマイクロメートルの三次元分解能を同時に達成可能であることがわかった。

(3) 波面最適化による位相共役技術について研究開発を実施した。従来の位相シフト干渉法を用いた位相計測による位相共役では、微弱な近接場光を光源とした場合、干渉信号はSN比が極めて低く、カメラとSLMの間で六自由度の精密なアライメントが必要となるため、近接場光位相共役の実現は困難であった。そこで、波面最適化に基づいた位相共役技術を採用することによって、近接場散乱光や半透明位相物体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。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4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 2022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 白杵深	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, 白杵深	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 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 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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

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 Stochastic 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 Shin Usuki
2. 発表標題 Computational microscopy for biomedical imaging with improved resolution
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Biomedical Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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 2022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 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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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 researchmap 白杵 深ウスキ シン (SHIN USUKI) https://researchmap.jp/7000000133 三浦・白杵・關根研究室Webサイト 白杵 深 [Associate Professor] https://mc2-lab.com/profile/usuki/</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
研究分担者	關根 惟敏 (Sekine Tadatoshi) (00765993)	静岡大学・工学部・准教授 (13801)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	三浦 憲二郎 (Miura Kenjiro) (50254066)	静岡大学・創造科学技術大学院・教授 (13801)	

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