

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13667

研究課題名（和文）空間光変調を用いたスケーラブル光造形法の提案・開発

研究課題名（英文）Development of scalable micro-stereolithography using spatial light modulation

研究代表者

古川 太一（Furukawa, Taichi）

横浜国立大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：70749043

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：空間的に光の位相を変調することで光硬化性樹脂の硬化点の大きさを変え、ナノからセンチメートルスケールの造形をシームレスに実現するスケーラブル光造形装置を開発した。有機色素を含む光硬化性樹脂に硬化ビームとドーナツ状の硬化阻害ビームを同時に照射することで、サブミクロン以下の加工線幅の造形を試みた。結果、造形硬化阻害ビームの光強度を大きくするほど、加工線幅が細くなることを確認した。また、異なるNAの対物レンズを用いて、光還元によるサブミリ～センチメートルスケールの導電性金属構造の造形を実証した。さらに、様々な焦点サイズでの造形のために、シンプルな画像処理によるオートフォーカス機能を開発・実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光造形法の加工線幅や造形速度は装置に依存しており、著しく異なるスケールを同一装置で造形する方法の開発は発展途上である。生物模倣デバイス、マイクロマシン・マイクロデバイスなどの多くは、様々なスケールの構造から構成されていることが多く、要求される最小の加工線幅に合わせて造形装置ですべてのデバイスを造形すると非現実的な造形時間が必要となる。本研究によって、幅広い加工線幅でナノスケールからセンチメートルスケールの造形を実現できれば、これまでに多くの装置・プロセス・時間を必要とした加工が同一装置かつ短時間で作製可能になり、光造形法の応用範囲を拡大することができる。

研究成果の概要（英文）：We developed a multi-scale stereolithography system that can control the curing spot size of the photopolymer by a spatial light modulator. For nano-scale to micro-scale fabrication, a donut-shaped curing inhibition beam (785 nm) was spatially overlapped on the focal spot of curing laser (405 nm) to reduce the curing spot size. It was confirmed that the cured line width was narrowed by irradiating the two beams. For sub-milli scale or more largescale fabrication, the focal spot size of 405 nm laser was controlled by changing the numerical aperture (NA) of the objective lens. We demonstrated multi-scale fabrication of conductive metal structures by photoreduction using objective lenses having NA of 0.65 and 0.1. To realize fabrication according to the various focal spot size, we also developed and demonstrated an autofocusing method by simple image processing. We have also succeeded in mass-production in a wide area using the autofocusing method.

研究分野：光造形

キーワード：光造形法 3Dプリンティング 空間光変調 光硬化性樹脂 マルチスケール スケーラブル

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

3Dプリンティングの本質は、デジタルデータから直接造形物を出力できる『利便性・迅速性』、従来の加工では難しかった複雑造形を実現する『造形の自由度』にある。そのため、製品試作のみならず、最終製品の製造への需要も急速に増加し、3Dプリンティング市場全体の市場規模は2017年で60億ドルを超えた。この中でもマイクロ光造形法は、積層段差が少なくマイクロスケールの高精細な造形が実現可能な方法として注目を集めてきた。

しかしながら、一般的に光造形法の加工線幅や造形速度は装置に依存しており、著しく異なるスケールを同一装置で造形する方法の開発は発展途上である。生物模倣デバイス、マイクロマシン・マイクロデバイスなど、作製したいものの多くは、様々なスケールの構造から構成されていることが多く、要求される最小の加工線幅に合わせて造形装置ですべてのデバイスを造形すると非現実的な造形時間が必要になる。特に加工線幅1~10 μm 付近は、適切な市販造形装置が存在しないスケールギャップが存在し、3Dプリンティングの特徴である利便性・迅速性・造形の自由度を制限している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、『ナノからセンチメートルスケールのマルチスケール造形をシームレスに可能にするスケラブル光造形法』を実現である。空間的に光の位相を変調し、加工線幅を操ることで、サブマイクロスケールからマイクロスケールの幅広い加工線幅でのマルチスケールな造形を可能にする。また、この装置では、造形に廉価な半導体レーザーを用いるため、2光子光造形法のようなパルスレーザー光源を用いる手法と比較して、装置価格を抑え、開発装置の普及を容易にする。

3. 研究の方法

図1に、提案するスケラブル光造形法のコセプトを示す。ナノからマイクロスケールの造形(加工線幅: サブ100nm~1 μm)では、硬化用ビーム(波長405nm)の焦点に、面内方向の光強度分布がドーナツ状の硬化阻害ビーム(波長785nm)を重ね合わせ、硬化阻害ビームの中央部だけに硬化範囲を制限する方法を採用する。このリング状の硬化阻害ビームは空間光変調器(SLM)を用いて形成し、位相変調のパラメータであるトポロジカルチャージ(TC)を変更することでドーナツビームのリング径を変更して加工線幅を可変する。サブミリスケールより大きい造形(加工線幅: 1 μm 以上)では、硬化ビームの集光点の大きさを開口数(NA)で変更する。当初、硬化ビームにおいてもSLMを用いてドーナツビームを形成し、加工線幅を変更する予定であったが、より廉価な装置の開発を目指し、NAの変更による加工線幅可変を採用した。

本装置は、光源に連続発振レーザー(青色および赤色半導体レーザー)を用いるため、高額なフェムト秒パルスレーザーや高強度の紫外レーザーが不要であり、廉価な装置を構築できる点も特徴である。

4. 研究成果

スケラブル光造形装置の開発

図2に開発したスケラブル光造形装置の概略図を示す。装置は、光硬化性樹脂を硬化させる青色レーザー、硬化を阻害する赤色レーザー、メカニカルシャッター、空間光変調器、3軸自動ステージ、観察光学系から構成される。光源に連続発振の半導体レーザーを用いることで、廉価に実現可能な構成にした。硬化ビーム(青色レーザー)と硬化阻害ビーム(赤色レーザー)は、それぞれビームエキスパンダーでビーム径を調整した後、硬化阻害ビームのみSLMで空間的に位相変調しドーナツビームを形成する。その後、2つのビームをダイクロイックミラーで重ね合わせ、対物レンズで試料に集光する。色収差による焦点の位置ずれを考慮して、硬化阻害ビームのビームダイバージェンスを調整可能な光学系にした。レーザー照射のON・OFFはメカニカルシャッターで行い、レーザー走査は3軸自動ステージで行う方式を採用した。

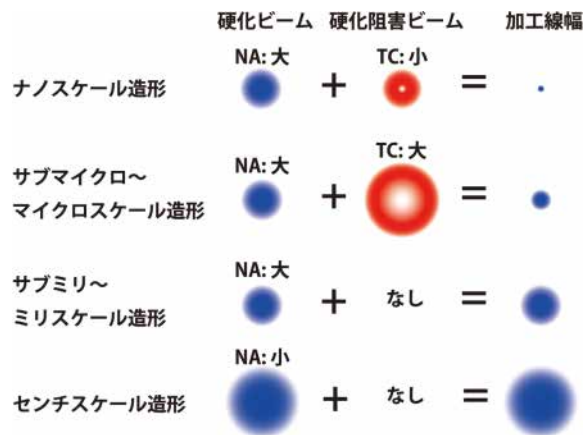


図1 スケラブル光造形法のコセプト

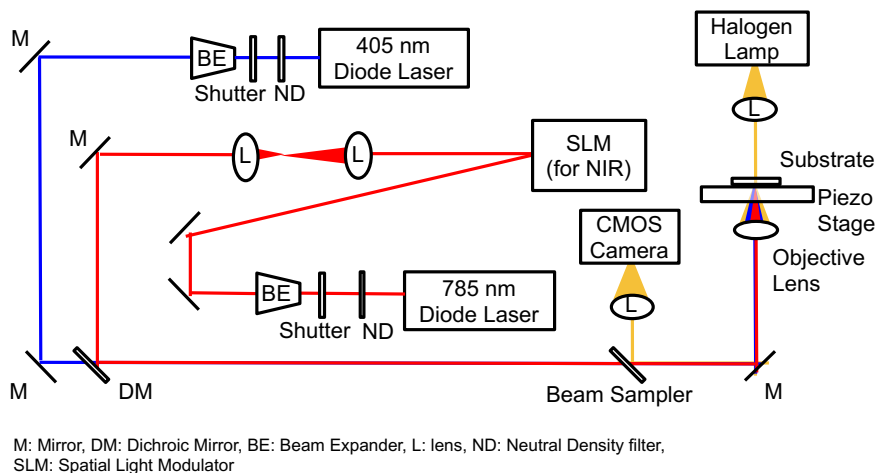


図2 スケーラブル光造形装置の概略図

マイクロスケール以下の造形の検証

硬化用ビーム (波長 405 nm) の焦点に、ドーナツ状の硬化阻害ビーム (波長 785 nm, TC: 1) を重ね合わせ、マイクロスケール以下の造形が可能か検証を行った。硬化阻害を実現するために、有機色素(マラカイトグリーン)を含む光硬化性樹脂を作製し、実験を行った。図 3 に示すように、照射レーザーパワーを大きくするほど、硬化阻害が生じ、加工線幅が細くなることを確認した。現状では、硬化阻害ビームのレーザーパワー不足や最適な樹脂の選定が行えていないことなどの理由から、ナノスケールの加工線幅は得られていない。また、硬化阻害を行った造形物は、ガラス基板に十分に接着せずに、未硬化樹脂洗浄の際にガラス基板から剥がれてしまうことが多々あった。この原因として、ビームの重ね合わせが十分に行えていないことや、硬化ビームの焦点位置が基板から離れてしまっていることなどが挙げられる。そのため、硬化ビームの焦点を高精度に造形基板表面に一致させて造形を行うことが必須となる。

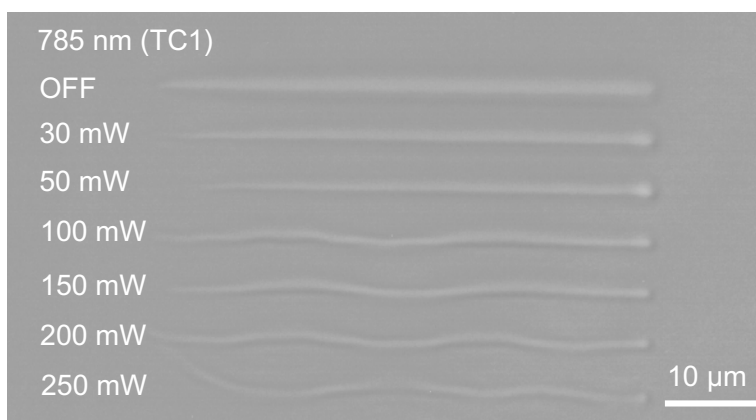


図3 硬化ビームと硬化阻害ドーナツビームによるマイクロスケール以下の造形

サブミリスケール以上の造形の検証

サブミリスケール以上の造形においては、異なる NA の対物レンズを用いることで加工線幅を変更し、マルチスケール造形を実現した。その一例として、異なる NA (0.65 と 0.1) の対物レンズを用いてマルチスケール造形を実証した(論文業績 Komori et al., *Optis Express* **28**(6), 8363-8370, 2020)。サンプルには硝酸銀を含むゼラチンマトリクスを用い、青色レーザーを照射することで光還元し、銀を析出させることで金属構造の造形を行った。

図 4 に示すように、硝酸銀濃度 0.8 wt%、ゼラチン濃度 2 wt%、レーザー出力 20 mW で造形を行った。その結果、走査速度の増加に伴い、加工線幅は単調に減少した。NA の変更、走査速度の変更を行うことで、約 0.9 μm~15 μm の幅広い加工線幅で金属造形が可能であることを示した。また、これらの造形物は導電性があることも確認した。対物レンズへの入射ビーム径をさらに小さくすることで、実効 NA を小さくすれば、さらに太い加工線を描画することも可能である。

最後に、NA の異なる対物レンズを用いることで、サブミリ~センチメートルスケールの複雑な金属構造を造形可能であることを示した(図 5)。また、いずれの NA による造形でも連続的な金属構造が作製できた。また、それらの導電性についても確認できた。以上のように、作製する構造物の大きさにより、対物レンズの NA を変更することで、マルチスケール

造形が可能であることを実証した。

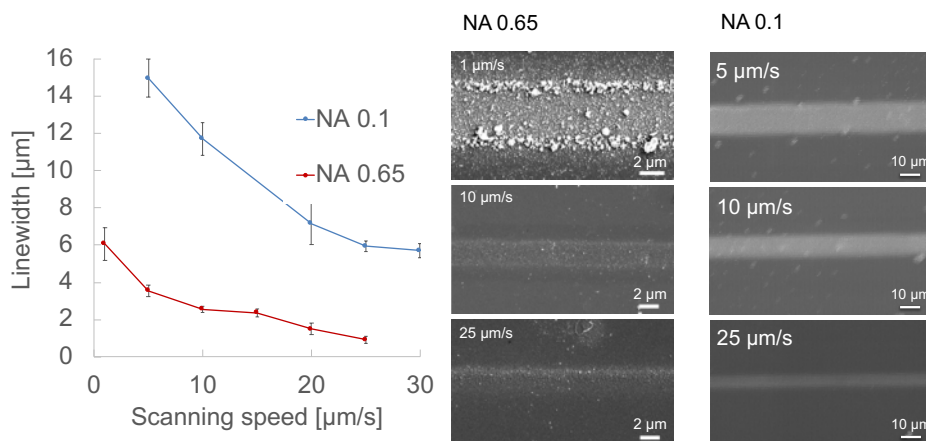


図4 異なる NA での加工線幅

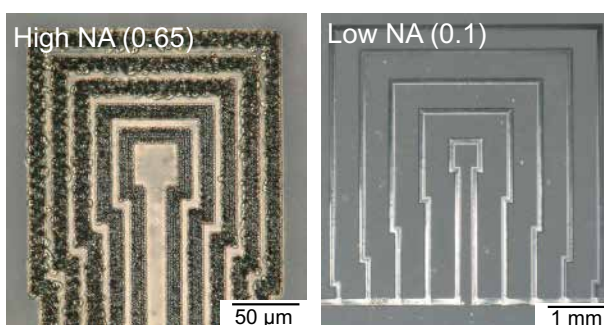


図5 異なる NA でのマルチスケール金属造形

オートフォーカス機能の開発

先に挙げた基板表面と焦点位置のずれの問題を解決するために、レーザーを集光した際に形成される硬化形状（以下、ボクセルと呼ぶ）の透過画像を用いて焦点を基板表面に高精度に一致させるオートフォーカス機能を提案・実証した(論文業績 Fujishiro et al., *Optics Express* **28**(8), 12342-12351, 2020)。この手法の検証実験では、サブミクロン程度のボクセルでもオートフォーカスができることを示すため、2光子造形法を用いた。本手法は、デバイスを追加する必要がなく、使用する光硬化性樹脂の制限もないため、廉価かつ簡便にスケーラブル光造形装置にオートフォーカスを付与することが可能である。

図6に、開発したオートフォーカス方法の概要を示す。焦点をガラス基板内部から基板表面へ段階的に移動しながら各位置においてレーザーの照射と透過画像の撮影を行う。焦点が基板表面に近づくと光硬化性樹脂は硬化し、透過画像にボクセルが現れる。このボクセルの出現を出現前後の画像の関心領域における輝度値合計の差分により検出する。ここで、光硬化性樹脂の硬化前後の屈折率差は 0.04 程度と非常に小さいため、ボクセルサイズがサブミクロン程度だと画像のコントラストが悪く、検出が難しくなる。そこで、ボクセルの検出に影響すると思われるノイズ成分を除去するためにローパスフィルタを透過画像に適用し、それらの画像を用いてボクセルの出現を差分検出した。結果、これらのシンプルな画像処理によって、再現性よく数百ナノメートルの高精度なオートフォーカスを実現した。

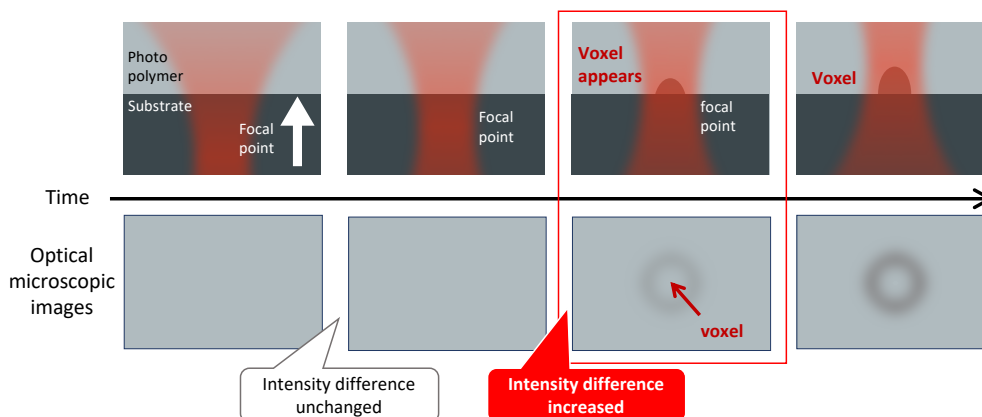


図6 オートフォーカスの概略図

図 7 にオートフォーカスから造形までを自動で行った例を示す。オートフォーカスは画像の中心の位置で行い、サイズの異なる 3 つのフレーム（フレーム外径 100, 200, 270 μm ）をレーザーパワー 20 mW、走査速度 100 $\mu\text{m}/\text{s}$ で造形した。結果、自動でオートフォーカスと造形が行えることを実証した。また、電子顕微鏡観察により、3 つのフレームすべてがガラス基板表面に密着していることを確認した。さらに、この機能を利用することで、同一基板上への造形物の大面積量産も可能なことを示した。

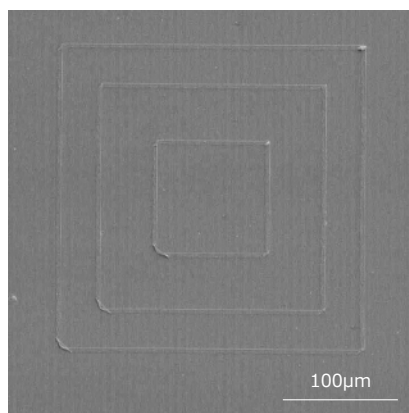


図 7 オートフォーカスを利用して作製した造形物

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. Fujishiro, T. Furukawa, and S. Maruo	4. 巻 28
2. 論文標題 Simple autofocusing method by image processing using transmission images for large-scale two-photon lithography	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 12342-12351
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.390486	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 T. Komori, T. Furukawa, M. Iijima, S. Maruo	4. 巻 28
2. 論文標題 Multi-scale laser direct writing of conductive metal microstructures using a 405-nm blue laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 8363-8370
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.388593	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 古川太一, 小森拓真, 飯島志行, 丸尾昭二
2. 発表標題 青色レーザーを用いた導電性金属パターンの直接描画法
3. 学会等名 第10回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 狐崎進吾, 野田洋平, 古川太一, 丸尾昭二
2. 発表標題 青色レーザーを用いた高精細マイクロ光造形システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会2018年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤城陽子, 古川太一, 丸尾昭二
2. 発表標題 オートフォーカス機能を備えた2光子マイクロ光造形装置の開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018 in Kitakyushu
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shingo Kozaki, T. Furukawa, and S. Maruo
2. 発表標題 A single-photon microstereolithography system for the production of high-aspect-ratio structures
3. 学会等名 International Symposium on SSS Laser Processing (3S-LP) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoko Fujishiro, T. Furukawa, and S. Maruo
2. 発表標題 A simple autofocus system for large-scale, two-photon microstereolithography
3. 学会等名 International Symposium on SSS Laser Processing (3S-LP) (国際学会)
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
---------	---------------------------	-----------------------	----