マイクロレンズアレーを利用した 多点マイクロ光造形法に関する研究*

—オーバーハング形状物の大量造形—

安部 新一** 野口 裕之*** 村川 正夫***

Multi-point Micro-stereolithography Using Microlens Array
—Mass Production of Overhanging Structures—

Shinichi ABE, Hiroyuki NOGUCHI and Masao MURAKAWA

Stereolithographies (SLs) using conventional methods lacks the ability to fabricate bulk multiple or mass parts simultaneously. In most cases, this is due to the fact that there is only one light source, e.g. a laser. Meanwhile, using multiple light sources for multipoint projection is expensive. In this experiment, we used a projector with a digital mirror device (DMD) and microlens arrays to simultaneously produce multiple micro-SL parts. We devised a multipoint fabrication method that employs mold image projection and microlens arrays. The object is fabricated on a controlled glass base that translates on X-Y table and translates on the Z-axis for lamination. We confirmed the formation of SL parts containing overhanging structures.

Key words: stereolithography, microlens arrays, digital mirror device (DMD), digital light processing (DLP)

1. 緒 言

一般的な光造形ではレーザー光などのビーム光源を用いており、1本のレーザービームを高速に走査させて紫外線硬化樹脂の硬化を行っている。そのため、大量の造形品の製作は長時間を要し、同形状のものを多数個製作する場合にはその数の分だけ時間を要することが問題となっている。たとえば10個の造形品を作るには10倍の造形時間が必要である。一方、多点の集光ビームから同時に複数の光造形物を作る方法として光ファイバーを利用することも考えられるが、ファイバー1点ごとに光の制御を行うことは、その数が増すほど難しい。また、液晶マスクを用いた面露光タイプの光造形では¹⁾²⁾、液晶マスクの1点1点を通した光は、個々に集光することができないため、作成できる形状には制約があった。また、液晶マスク自体の短波長光耐光性が弱いことも問題点である³⁾。

そこで本研究では、これらの問題を解決する方法として、マイクロレンズアレーおよびDLP™ (Digital Light Processing) プロジェクターを用いて、安価な可視光線を使用した多点硬化型光造形装置を提案する⁴⁾。プロジェクターで投影した光をマイクロレンズアレーで集光することにより、本装置では100 μm～1000 μmサイズの造形品を一度に多数個製作することができる。

理論的にはレンズアレーのレンズの数だけ、例えば1000個の造形も1個と同じ時間で造形できる。したがって、この技術により今までネックとなっていた、マイクロ部品の大量生産の基礎技術が確立された。

さらに本研究では、実用性を考慮し、オーバーハング形状の

造形を可能にした。このオーバーハング形状を造形するためには薄膜の造形物を製作する必要があり、露光量の細かな調整が必要となる。この解決にDLP画像制御用パーソナルコンピュータ上で画像の照度、すなわち画面の明るさ調整または、造形速度の調整を行うことにより造形物の厚さおよび硬化幅の調整を行った。また本装置ではパーソナルコンピュータ(PC)の表示の特性を生かし、造形品のサイズに応じて造形のピッチを変更することができるため、さまざまな造形品サイズの対応と取り数の制御が、容易にできる。

2. 実験方法および実験装置

2.1 造形装置概要

図1に試作した光造形装置の概略図を示す。

DLPプロジェクターとその画像を表示するために専用の画像用パーソナルコンピュータ、そして投影した光を遮断するためのロータリーシャッター、その光を集光するためのマイクロレンズアレー、青紫色光硬化性樹脂をセットするためのプレパラートとそれをX、Y平面で動作させるXYテーブル、マイクロレンズアレーの焦点位置の調整を行うテーブル、造形物を造形していくプラットフォームとZ軸方向に移動させるためのZ軸テーブル、そしてそれらのXYZ軸テーブル位置をコントロールするコントローラーと制御用パーソナルコンピュータなどから、装置全体が構成されている。

まず、画像用パーソナルコンピュータから出力する画面データパターンをDLPから投影する。その光はロータリーシャッターが開いたときに、マイクロレンズアレーを通り集光され、各マイクロレンズにより同ピッチで、プレパラート上の青紫色光硬化性樹脂を硬化させる構造である。ここで投影する画像は、

*原稿受付 平成17年10月14日

**正会員 (株) インクス (東京都新宿区西新宿3-20-2)

***正会員 日本工業大学 (埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1)

画像用 PC の画素数と DMD の画素数を同じにして投影する．PC の 1 画素を DMD の 1 個のミラーに対応させた．

表 1 に DMD の仕様を示し，図 2 に DMD の平面図，図 3 に DMD のミラー部分の模式図を示す．ミラーは+側に 12 度，一侧に 12 度傾く仕様となっている．これにより光の反射方向を変更させて，PC 上の画像を表示させることができる．また液晶マスクに比べ DMD ミラーの反射率は約 90%と大きいため，光エネルギーを大きく確保することができる．その上ミラーとミラーの間隔は 0.8 μm 程度と狭く⁵⁾，スクリーンドアすなわち網屏が少ない反射光が得られる．

本実験では，市販の DLP プロジェクター内部のカラーフィルターを取り除き，青紫色光硬化性樹脂が硬化する波長 405 nm を強く照射できるようにした．表 2 は使用した樹脂の仕様を示す．

積層造形を行うためには，1 層目の造形が完了した時点でシャッターにより光を一端遮断し，2 層目を造形することが必要である．2 層目に異なる形状を造形する時は，造形開始位置の変更も必要となる．

このシャッターにより，これらの一連の動作を連続的に行うことができるため，造形を自動化することができる．

光の集光幅は，多段造形の場合プレパラート上に所望の集光幅に調整し，プラットホーム上に 1 層ずつ積層していく．その集光幅のサイズは，マイクロレンズアレーとプレパラート間の距離によって，調整可能である．本実験では，30 μm に調整した．

また，マイクロレンズアレーの集光形状は一般的な丸形状ではなく，四角形の形状に集光するものを使用している．したがって，造形品の角部分を，R 形状でなく，四角形のエッジに近い形状に造形することが可能となった．表 3 にマイクロレンズアレーの仕様を示す．図 4 にマイクロレンズアレーの写真，図 5 にマイクロレンズアレー表面の一部拡大写真とマイクロレンズアレーの断面図および焦点距離の位置関係を示す．

図 6 は造形部の詳細図である．プラットホームは Z 軸上に取り付けてあり上下に動作する．プレパラートは X, Y テーブルの上に取り付けてあり，造形用の樹脂はこのプレパラート上に滴下する．マイクロレンズアレーはプレパラート上面から 425 μm 下方位置にセットされている．シャッターは，0.1 秒単位で開く時間の制御をすることができる．DMD は PC 画像と同期しミラーを動作させる物であるが，光源より発生した光を受けて，画像処理用の PC にて作成した画像を投影する．

Fig.1 Illustration of the prototype stereolithography system

Table1 Spec of DMD

size	0.55 inch (13.97 mm)
array	800×600 pixel
pixel number	480,000 pixel
mirror size	16.2 × 16.2 μm
gradient	12 °

Table2 specifications of the resin

name	FC Hard
model number	VRM-10011
main ingredient	acrylate compound
type	heat hardening
distributor	Meiko inc (PAT No.3127230)

Fig. 2 Pixel structure of the DMD used in the SL system

Fig. 3 Detailed structure of the micro mirror part of the DMD

Table3 Micro lens array spec

pitch	focal distance (λ=550 nm)	size	number of lens
200 μm	509 μm	10mm×10mm×1mm	50×50 (2500 lens)

Fig.4 Microlens array(glass)

Fig.5 Magnified images of lens array surface and cross-section

Fig.6 Block diagram of the stereo lithography machine

2.2 マイクロレンズの集光部詳細と造形手順

図7は、マイクロレンズアレーのレンズ1枚部を詳細に示した図である。本実験の造形手法は、規制液面法である。DLPからの照射光はマイクロレンズアレーを通り各マイクロレンズで集光される。レンズから焦点までの距離は509 μmである。プレパレート表面の集光幅を30 μmに設定すると、レンズからプレパレート上面までの距離は425 μmとなる。レンズの頂点から焦点までの寸法が500 μmであるから集光する光の角度 θ は約22.6°である。造形品の側面には段差が生じる。たとえば積層厚さが20 μmとすると4 μm程度の段差になる。

積層を行っていく流れをフローチャートで示すと、①シャッターを開く：ビーム光線が、DMDミラー1枚からレンズ1枚へ照射される。②プレパレートガラスをXY方向に移動させる：移動速度と光の強さによる造形条件の設定が必要。プレパレート上の樹脂が、移動に伴う部分について硬化する。③シャッターを閉じる：一端光を遮断する。④プラットフォームを2層分以上上昇させる：テフロンコートをしたプレパレートより、硬化した樹脂を引きはがす。⑤プラットフォームを一層分高い位置に設定する。この後は、積層の階層分だけ①から⑤の動作を繰り返す。

Fig.7 Various size parameters for the light beam focusing optics

Fig.8 Relation between exposure time, the height

2.3 1点固定での造形条件

2.2の①から⑤の順で実際に造形を可能にするために、まず理論的に多点で樹脂を硬化させるための、基礎実験をここで行う。

マイクロレンズアレーの、集光により硬化された造形品の形状を検証するためにXYテーブルを動作させずに照射時間の制御を行って、同時多点の造形を行った。理論的には光が集光する四角錐形状に硬化することができれば、造形物の寸法や角部の精度が判断できる。

図8に光の照射時間と造形品の高さの関係について測定した結果を示す。光の照射時間が長いと造形品の高さが高くなる。

図9は、照射時間0.2秒の時の造形品のSEM画像である。このときの高さは、約4 μmである。

図10は、照射時間0.5秒の時の造形品のSEM画像である。高さは約25 μmである。

図 11 は、照射時間 2 秒の時の造形品の SEM 画像である。このときの高さは、約 60 μm である。

図 12 は、照射時間 3 秒の時の造形品の SEM 画像である。高さが約 75 μm であり、その先端はちょうど焦点の部分であると考えられる。全体造形サイズは、50 (W) μm $\times$ 50 (D) μm $\times$ 75 (H) μm である。

4 秒以上の照射を行うと焦点部から上に細く長く伸びたような形状となるため、測定を打ち切った。

Fig.9 SEM picture of molded sample irradiated for 0.2 s

Fig.10 SEM picture of molded sample irradiated for 0.5 s

Fig.11 SEM picture of molded sample irradiated 2 s

Fig.12 SEM picture of molded sample irradiated 3 s

2.4 画像照度について

造形の硬化の高さは照射時間で調整できることを先に述べたが、より微細な露光量の調整を PC 画像の照度調整によって行うことができる。この照度調整を行う理由として、2.2 の一点固定造形が XY 移動をともなう造形に移行する時、ある程度樹脂の硬化速度を制御する必要がある。硬化速度が速すぎると、XY 移動の切り替えポイントで発生するわずかな停止時間で造形物の厚さに変化が起こるため、露光量を抑えることが必要となる。PC の画像をプロジェクターにて、投影しているために画像の明暗がそのまま出力されることを利用している。PC 上で通常の造形の場合、白の明るさは 100% として、グレースケールで黒は 0% となる。

PC 上の調整範囲は 240 段階を白色として、照度を減少させて変化させて造形を行った。この値を変更することにより、輝度を調整し、光の量を制限することができるため、造形物の高さを調整することができる。

実際は、造形スピードをプログラム上で変更することに比べ、PC 上での照度調整は容易である。造形条件の微調整手段として利用している。

図 13 は、輝度 140/240 で 3 秒間光を照射して造形した例である。したがって、この場合は 58% の輝度となる。このように照度によっても造形物の高さを調整できることが判明した。

2.5 任意形状の一層造形について

任意形状の積層造形を行うためには、任意の断面における一層分の造形を可能にする必要がある。

一点固定での造形が理論的に同時多点で硬化させることが 2.3 で確認できた。次に一点固定の造形から XY 方向に移動させながら固化させる必要がある。まずレーザー光の場合の樹脂の固まり方について述べると、レーザー光の光強度は中心のエネルギー強度が大きなガウス分布していることがわかっており、レーザー光を光硬化性樹脂の液面に照射すると、下側に凸の回転放物体状の硬化物が形成される³⁾。

本実験で使用している光源はランプであり、一般のプロジェクター用光源のためレーザーのように平行光ではないが、光強度は均一であると推測できる。

図 14 は、XY テーブルの送り速度に対する造形物幅の関係について測定した結果を示す。造形物の幅寸法は設定した集光幅より大きくなる傾向があり、照射時間が長い、すなわち走査速度が遅いと造形幅は太くなる。造形物の幅寸法は、XY テーブル送り速度、すなわち走査速度によって変化する。走査速度が遅い

Fig.13 SEM picture of molded parts under the illumination of 58 % in brightness.

Fig.14 Graph to illustrate relation between molded line width and traveling speed of exposure light

Fig.15 SEM picture of molded films of 4 μm thickness fabricated by square scanning of the exposure light (2000 μm/s)

と幅は太くなる。図15の集光幅の設定寸法は、30 μmであるが、テーブル送り速度が、2000 μm/sの時、造形物の幅寸法は35 μmとなった。

図15は、この集光した光を用いて、二次元平面上にXYテーブルを四角形状に動作させて、硬化した樹脂1層の厚みと幅の関係について実験を行った結果のSEM画像である。短い照射時間で集光された光の場合、薄く平面に近い形状に形成される。

光エネルギーが小さいとき、中央と隅とのエネルギーの差も小さいために起こる現象である。規制液面法によって、オーバーハング形状を造形する場合には、造形物の厚さを制御しなければならないため、このように薄い物が造形できることが重要である。この実験において最少の厚みでできた造形形状厚さは、約4 μm、造形時間は0.2秒であった。

2.6 積層造形について

図16は、基礎実験によって得られた露光時間や走査速度などのデータに基づき、積層造形を行った。

Zピッチは30 μm、集光部のサイズは30 μm、積層は5段で造形した例である。

この造形品の造形ピッチは400 μmである。マイクロレンズアレーのピッチは200 μmであり、画像処理PC上での表示を一つおきの表示としたため、400 μmピッチの造形も可能である。

造形品の外径寸法が200 μm以内におさまらない場合など、画像処理PC上の表示の仕方によって造形物を作る数や場所を自由に変更できる特徴を有する。

Fig.16 SEM picture of 5 layers fabrication

Fig.17 Overhang shape

2.7 オーバーハング形状の造形について

オーバーハング形状の造形は、さまざまな三次元形状部品を実現するために必要な要素である。

造形物のオーバーハング形状は、図17左に示すように、つづみ形の造形事例はあるが、本研究ではより造形することが困難な非対称形状である「く」の字の形状とした。この形状は同時に外側と内側のオーバーハング形状を有していることを特徴としている。

図17右は、くの字形状19段造形品の概要図である。

プレパレート上の集光部の幅を約30 μmに合わせX、Yの移動量をそれぞれ30 μmとし、四角形状に移動させ、そのまま垂直方向に5段の造形を行い、その上にくの字形状の14段、合計19段の積層を行った。1層当りの厚さを20 μm、造形物の高さは380 μmである。実際に造形を行うと硬化太さは35 μmとなるため、四角部の造形寸法は図の様に65 μmとなった。

このモデルの造形を行うために必要なポイントは、先に述べたように、1層あたりの造形物の厚さを制御することである。

このオーバーハング形状の積層造形を行うためには、2.2で述べたように一層ごとにシャッターにて光の遮断を行う必要がある。積層造形の場合のシャッターの役割は、一層ごとの光の遮断である。造形品の厚さは造形スピードの調整と画像の輝度調整にて制御する必要がある。

造形スピードの調整と画像の輝度調整を行ってはいじめてオーバーハング形状の造形が可能となった。

Table4 Fabrication parameter

XY table speed	2000 $\mu\text{m}/\text{sec}$
XY table distance	X:30 μm Y:30 μm
Z pitch	20 μm
number of layers	19 layers
fabrication time	2 min 54 sec
brightness adjustment	60%

Fig.18 Mass Production of Overhanging Structures

Fig.19 Magnified SEM picture of overhanging shape shown in Fig.18

最終的に表 4 に示した造形条件により、くの字を造形した。

図 18 は、くの字形状の造形物の SEM 画像である。ここに示したように同時にオーバーハング形状で、19 段の大量の造形を行うことができた。

図 19 は、図 18 を一部拡大した SEM 画像である。くの字形状が 100 個程度造型されている。XY テーブルの移動速度は 2000 $\mu\text{m}/\text{sec}$ であり、画像の輝度調整は輝度 140/240 である。造形時間は 2 分 54 秒であった。

3. 実験結果

3.1 多点での造形品の厚さ制御

規制液面法による造形において、オーバーハング形状を造形するためには、造形物の厚さを制御しなければならない。

目的は、多数同時に大量生産することであり、厚さの制御も多数同時でなければならない。その問題を解決するために、マイクロレンズアレーと DMD を組み合わせた造形手法を採用したことにより、多数同時の造形を可能とし、光の照射時間制御による高さ制御も同時にできることが確認できた。

3.2 オーバーハング形状の造形

規制液面法による造形において、1 層ごとの厚さの管理を行うことが、必要である。PC 上で、画像の明暗および造形スピードを制御することにより、層の厚さを制御し、オーバーハング形状の造形物を、多数同時に造形することが確認できた。

また造形物は、大きさによって、作る数や場所を自由に変更することも、確認できた。

4. 結 言

本研究では、PC、DLP プロジェクター、マイクロレンズアレーを用いた光造形機構に、ロータリーシャッターと X、Y、Z テーブルを設置した安価なマイクロ多点光造形装置の開発を行った。この装置を用いて、100 個程度の大量マイクロ部品の同時造形を行った。

本研究で得られた結果をまとめると以下になる。

- (1) 市販の DLP プロジェクターおよびマイクロレンズアレーを使用することにより、同時に多点で光造形を行うことができた。
- (2) 光の照射時間を変化させることにより、四角錐形状の造形物の高さを調整することができた。また、テーブル固定条件で造形物は四角形状のフラットに近い物が得られた。
- (3) 走査速度が遅い場合には、集光した光の幅より造形物の幅寸法は太く造形されてしまうことが確認できた。
- (4) PC 上の画像の輝度調整により、四角錐形状の造形物の高さを調整することができた。
- (5) PC 上の画像・画素の選択により、造形可能な範囲をレンズピッチより大きくできることを例示した。
- (6) 以上 (1) ~ (4) の機能を利用し、さらに、X、Y 及び Z 方向のテーブル動作とシャッターの自動開閉動作を組み合わせることにより、20 μm ならびに 30 μm ピッチでの積層造形を行い、100 程度のオーバーハング形状の同時造形が可能であることを例示した

今後は、マイクロレンズアレーのピッチや積層ピッチをさらに微細化することにより、さらに微細な造形品を安価に大量に生産する装置を実現していきたい。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、文部省ハイテクリサーチセンター整備事業の研究設備の一部を利用させて頂きました。この場を借りて、お礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 林照剛, 三好隆志, 高谷裕浩, 高橋 哲: 液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法に関する研究第 1 報濃淡画像による非積層造形. 精密工学会誌. 67, 4 (2001) 628.
- 2) 三好隆志: マイクロ加工の最前線光造形法によるマイクロ加工液晶マイクロ光造形法. 精密工学会誌. 68, 2 (2002) 189.
- 3) 丸谷洋二: マイクロマシン技術総覧. (2003) 6 章 374.
- 4) 安部新一他: マイクロレンズアレーを利用したマイクロ光造形に関する研究, 2004 年精密工学会秋季期大会学術講演会, (2004) 585.
- 5) 古賀律生: ウシオ技術情報誌ライトエッジ 第 19 号 (2000) 第三章 3.2.4.
- 6) 丸谷洋二, 生田幸士, 丸尾昭二: マイクロマシン技術総覧 (2003) 372.