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2報)*

—液晶動画像を用いた薄層型積層造形—

西野秀昭** 三好隆志*** 高谷裕浩*** 高橋 哲† 林 照剛†† 木村景一†††

Study on Nonlaminar Micro Stereolithography using LCD Mask (2nd report)

— Thin Layer Laminating Fabrication using LCD Live-motion Mask —

Hideaki NISHINO, Takashi MIYOSHI, Yasuhiro TAKAYA, Satoru TAKAHASHI, Terutake HAYASHI and Keiichi KIMURA

This paper presents a new micro stereolithography technique to fabricate a micro 3D structure rapidly and precisely by using LCD live-motion mask. Exposure through the live-motion mask fabricates each thin layer precisely without scanning. The extremely thin layers are continuously solidified by providing liquid resin synchronized with the mask changes. As a result, a 3D object is fabricated by continuous laminations of these thin layers.

In order to verify the feasibility, we developed LCD micro stereolithography system based on 3D-CAD and performed some experiments. The lateral and depth resolutions reached $3\mu\text{m}$ and $1\mu\text{m}$, respectively. It took only about 7 minutes to fabricate a pyramidal shape consisting of 100 layers. A micro two-step gear with shaft was fabricated precisely and rapidly without assembling. The module of this two-step gear is only $20\mu\text{m}$. The number of the tooth is 100 for the large gear and 25 for small one. These results show that our proposed method has possibility of precise micro fabrication in practical use.

Keywords: micro stereolithography, nonlaminar, mask exposure, liquid crystal display, live-motion, photopolymerizable resin

1. 緒 言

近年、大きく注目されている技術の一つにマイクロマシン技術がある。省エネルギー、省スペースといった特徴だけでなく、工業分野や医療分野などに新たな革新をもたらすものとして期待されている。このため、各方面からマイクロマシン技術に関する研究が活発に行われている¹⁾。

その中で、広く用いられているマイクロマシン作製技術は、半導体製造プロセスを応用したものである²⁾。しかしながら、作製可能な形状が2次元的な平面形状に限定されており、有効な3次元マイクロ形状の作製手法は未だ確立されていない。3次元マイクロ形状の作製が可能となれば、マイクロマシン技術とその応用範囲のさらなる発展につながる。その実現を目指し、いくつかの手法³⁾⁴⁾が提案されており、マイクロ光造形法⁵⁾もそれらのうちの一つである。

多くのマイクロ光造形法⁵⁾¹⁰⁾はビーム走査によりマイクロ構造物を造形するもので、基本的には従来の光造形法¹¹⁾¹²⁾と同様の走査型の手法であり、その分解能を高めたものとみなせる。

マイクロ光造形法への異なるアプローチとして、走査型よりも高速な造形が可能な面露光型の手法がある⁸⁾¹³⁾。これまでに

も、液晶ディスプレイ (Liquid Crystal Display: LCD) をマスクとして利用した面露光型のマイクロ光造形法に関する研究が行われている¹⁴⁾¹⁵⁾。その手法は、形状の高さ情報を濃淡の表示階調に変換した濃淡マスクを用い、一回の露光で形状を造形するというものである。しかし、この手法では造形可能な形状に制限があり、多様な3次元マイクロ構造物を高精度に造形することが困難である。

本報では、造形可能な形状の自由度が高く、高精度および高速性が期待できる、液晶動画像を用いた薄層型積層マイクロ光造形法を提案し、その有効性について検討したので報告する。

2. 液晶動画像を用いた薄層型積層光造形法の原理と特長

2.1 従来の光造形法

従来の光造形法の模式図を図1に示す。まず、3D-CADモデルから、形状の高さ方向の断面データを作成する。その断面データに基づき、集光したレーザビームにより液体樹脂の表面を走査することで、一つの断面形状を硬化する。得られた硬化層の上に、新たな液体樹脂の層を供給・硬化し、積層する。この作業を繰り返すことで、3次元形状を造形する。一般的に大きさが数10cm程度までの形状の試作などに使用されることが多く、分解能は0.1mm程度である。

3D-CADモデルに基づき、複雑な3次元構造物を容易に、比較的短時間で造形できることが光造形法の利点である。問題点としては、走査機構に起因する誤差や、厚い層の積層により階段状の誤差が生じることが挙げられる。この階段状の誤差を低減し、高精度な造形を行うには一つの層の厚さを薄くする必要

* 原稿受付 平成15年2月12日

** 学生会員 大阪大学大学院 (吹田市山田丘2-1)

*** 正会員 大阪大学大学院

† 正会員 大阪大学大学院

(現、東京大学大学院; 東京都文京区本郷7-3-1)

†† 正会員 茨城大学 (茨城県日立市中成沢町4-12-1)

††† 正会員 ソニーイーエムシーエス(株)

(東京都港区港南2-15-3 品川インターシティC)

Fig. 1 Schematic diagram of conventional stereolithography process

があり、造形時間が長くなる。つまり高精度化と高速化とがトレードオフの関係にあり、造形する形状のサイズが大きくなると極端に長い造形時間が必要となる。この問題は走査型マイクロ光造形法にも共通であり、mm~サブmm オーダの大きさのマイクロ構造物を高精度かつ高速に造形することは困難であった。

2.2 液晶動画像を用いた薄層型積層光造形法

液晶動画像を用いた薄層型積層光造形法の原理の模式図を図2に示す。まず、造形したい3次元形状を3D-CADで設計する。3D-CADデータから連続的に断面形状データをサンプリングし、連続的に断面形状が変化するマスクを作成する。このマスクが次々にLCDに出力され、動画像マスクとして機能する。このマスクの変化に同期して基板が移動することで、非常に薄い液体樹脂の層が硬化層の上に連続的に供給される。このとき、LCDは均一照明により露光されているので、液体樹脂は露光され連続的に硬化していく。理想的には、硬化層の厚さを限りなく0に近づけることができ、非積層と同等な造形を実現できる。本手法は、厚さが無視できるような薄い層による連続積層造形と、実質的に等価である。また、マスクとしては白黒の二値画像だけでなく、濃淡画像も併用することができる。

本手法の特長を以下に示す。

- ・事実上の非積層造形であり、階段状の誤差を無視できる。
 - ・一つの断面形状を一度の露光で硬化するので、走査型の光造形よりも高速な造形が可能である。
 - ・マスク画像を縮小して樹脂に露光することで、精度よくマイクロ造形が可能である。
 - ・機械的に動く部分がzステージのみであり、機械的な系統誤差が小さい。
 - ・LCDをマスクとして利用しているため、マスクの交換や位置合わせの手間が不要であり、それによる誤差がない。
 - ・白黒の二値画像だけでなく、濃淡画像もマスクとして併用できるので、造形のパラメータを柔軟に設定することができる。
- 本手法は、従来の光造形法の問題点を克服するだけでなく、その利点をさらに伸ばすものである。従って複雑な3次元マイクロ形状を、高速かつ高精度に造形することが可能になる。

3. 液晶マイクロ光造形システム

3.1 液晶マイクロ光造形システムの構成

図3に示すような液晶マイクロ光造形システムを構築した。本システムは大きく分けて、3D-CADモデルに基いたマスク画像作成システムと、造形装置（均一照明、液晶マスク、縮小露光系、造形系、コントローラ）との二つから構成されている。

以下に形状の設計から造形までの手順を述べる。始めに、3D-CADを使用して形状を設計する。3D-CADモデルをスライスし、断面形状データへと変換する。

次に、断面形状データをマスク画像へと変換する。次節において述べるように、マスク画像を0.164倍に縮小し光硬化性樹

Fig. 2 Principle of continuous laminating stereolithography using LCD live-motion mask

Fig. 3 Schematic diagram of LCD micro stereolithography system

脂に露光するので、断面形状を1/0.164倍に引き伸ばす。その後、形状内部の画素の表示階調を所定の値に設定し、形状外部の画素の表示階調を0とする。この処理を各断面形状データに対して行う。一つの断面に対して一つのマスク画像データが生成され、最終的には断面の総数分のマスク画像データが作成される。このマスク画像データ群が、次節で述べる造形装置のコントローラに送られ、自動的に形状の造形が行われる。

3.2 造形装置の詳細

図4に造形装置の構成図を示す。その詳細は次の通りである。

(1)均一照明

液晶パネルは紫外線を照射されることで損傷する恐れがあるため、光源には波長488nmのAr⁺レーザを使用する。対物レンズによりビーム径を広げ、回転拡散板により光強度を均一化した後、レンズによりコリメートする。

(2)液晶マスク

コリメートされた光は、二枚の偏光板に挟まれた液晶パネルを通過し、マスクの形に整形される。二枚の偏光板は、その透過軸が互いに直交するように配置されている。各画素に印加される電圧の値に応じて、液晶パネルを透過した光は異なる偏光方向となるので、二枚目の偏光板を透過する光の強度が変化し、各画素ごとの濃淡パターン表示が可能となる。

(3)縮小露光系

マスク画像は、二枚のレンズから構成された光学系により0.164倍に縮小・結像され、光硬化性樹脂に露光される。

(4)造形系

造形系は、規制液面法¹¹⁾と樹脂タンク底面からの露光とを組み合わせた機構である。樹脂タンクの底面にガラス基板を設け、そのガラス基板を通して樹脂に露光している。従って、zステージ（移動分解能0.5μm）およびそれに接続された造形物固定用基板は+z方向へと上昇する。縮小露光系の結像面が樹脂タンク底面のガラス基板の上面と一致するように配置する。ガラス基板により液面が強制的に平坦化されているので、液体樹脂の

Fig. 4 Apparatus for LCD micro stereolithography system

Table 1 Properties of LCD and photopolymerizable resin

LCD	Pixel number	1280 × 1024	pixels
	Display size	26.6 × 20.0	mm
	Pixel size	19.5 × 19.5	μm
Photopolymerizable resin : KC1042	Material	Urethane-acrylate	
	Density	1.08	g/cc at 25°C
	Refractive index	1.49 / 1.51	liquid / solid

層をつくるときに、液面が平坦化するまでの待ち時間や、平坦化のための処理が不要となる。規制液面法を採用することで、本手法の特長の一つである高速さを損なうことなく造形することができる。

(5)コントローラ

マスク画像の変更、ステージ移動およびシャッタ開閉を PC で制御しており、自動的に造形可能である。シャッタは露光時間の制御に使用し、最短シャッタスピードは 1/1000s である。

液晶パネルと光硬化性樹脂の特性値を表 1 に示す。液晶パネルの総画素数は 1280×1024、一つの画素サイズは、19.5μm×19.5μm である。また、光硬化性樹脂は KC1042 (JSR(株)製)を使用した。光源の波長が 488nm であることから、500nm 程度の可視域の波長まで感光性を有するように調整されたウレタンアクリレート系の樹脂である。

4. 基礎実験

4.1 横分解能検証実験

高精度な 3 次元造形を行うためには各層の高精度造形が必要不可欠である。そこで、テストパターンがどの程度正確に樹脂に転写されるかを調べ、横分解能を実験的に求めた。

図 5 (a) に白と黒の線分から構成されたテストパターンを示す。最小線幅は LCD の 1 画素であり、LCD 上では 19.5μm に相当する。図 5 (b) に、縮小・結像されたテストパターンを示す。図 (a) のパターンの 0.164 倍に縮小・結像されており、このパターンが樹脂に露光される。露光され硬化した樹脂のパターンを図 5 (c) に示す。最小線幅の部分も含めて、図 5 (b) のパターンのおりに樹脂が硬化していることが確認できる。

硬化部分の最小線幅の測定値は 3μm であった。従って、横分解能は 3μm であることがわかった。この値は LCD の 1 画素の大きさと縮小露光系の縮小倍率から求まる理想的な横分解能の

Fig. 5 Lateral resolution

Fig. 6 Relation between exposure energy and cured depth

値 3.2μm とよく一致している。このことから、横分解能は LCD の画素サイズと縮小露光系の縮小倍率とによって決定されることがわかる。

4.2 露光エネルギーと硬化深さとの関係

各層を造形するには、所定の厚さの液体樹脂の層を硬化することのできる光エネルギーを樹脂に与える必要がある。そこで、KC1042 の露光エネルギーと硬化深さとの関係を調べた。硬化深さとは、露光によって得られた硬化層の厚さを指すものとする。

露光エネルギーと硬化深さとの関係は、一般的に式(1)で表現される¹²⁾。

$$C_d = D_p \ln(E_0 / E_c) \quad (1)$$

C_d は硬化深さ、 E_0 は樹脂表面での露光エネルギーをあらわす。 D_p 、 E_c はそれぞれ透過深度、臨界露光エネルギーと呼ばれ、樹脂に固有の値である。

C_d と E_0 との関係は、以下のように求めた。正方形型のマスクを使用し、露光エネルギーを変化させて樹脂に露光を行い、各露光エネルギーごとに硬化層のサンプルを作製する。その厚さを分解能 1μm のマイクロメータで測定した。

図 6 に、KC1042 の硬化深さと露光エネルギーとの関係の測定結果を示す。図 6 中の実線は測定値に対して式(1)を最小自乗法によりフィッティングした曲線である。この曲線から、 E_c は 5.0mJ/cm²、 D_p は 473μm であることがわかった。 $C_d \cdot E_0$ の関係は式(1)によく従っていることから、各層に対する露光条件を式(1)に基づいて決定することができる。

5. 造形基本特性検証実験

5.1 基本形状の造形

いくつかの比較的単純な形状を造形することで、本手法によるマイクロ光造形の基本特性を検証した。造形した形状は(1)ピラミッド形状、(2)かさ歯車形状、である。(1)は最下部の正方形

Table 2 Fabrication conditions

Shape	Layer thickness μm	Exposure energy mJ/cm ²	Layer number
Pyramid	5	5.1	100
Bevel gear	5	5.1	50
Triangular wave	1	5.0	14

Fig. 7 One of the mask images

の大きさが約 1.5×1.5mm であり、直線のみで構成された単純な形状である。(2)は直線と曲線とで構成されており、最下部の歯先円直径が約 1.5mm、歯厚が約 100μm、歯数は 12 である。

造形の手順を以下に述べる。ステージを積層厚さ分だけ上昇させ、樹脂タンク底面のガラス基板と造形物固定用基板との間に液体樹脂の層を作る。マスク画像を表示（変更）し、露光することで樹脂を硬化する。これらの作業を繰り返し、3 次元形状を造形する。造形終了後、造形物をエタノールで洗浄し、付着している未硬化樹脂を取り除く。金蒸着した後、走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope: SEM）により観察する。

造形条件を表 2 に、使用したマスクの一例を図 7(a), (b)に示す。各硬化層に対する露光条件は、一つの硬化層の厚さ（積層厚さ）を C_d とみなし、式(1)から硬化に必要な露光エネルギー E_0 を計算することで、決定した。

造形された形状を図 8 に示す。図 8(a), (b)はそれぞれ、ピラミッド形状およびかさ歯車形状の SEM 画像である。図 8(a)のピラミッド形状では、エッジ部分がシャープに造形されている。かさ歯車の歯形も精度よく造形されているものと思われる。図 8(c)にかさ歯車の歯の拡大図を示す。歯と歯の間の曲線部分が滑らかに造形されている。このことは、LCD の画素数が十分に多ければ曲線を精度よく表現でき、画素による凹凸を軽減できることを示している。マスク画像変更・液体樹脂層の形成・露光・硬化に要した時間は、約 4s/layer と極めて短い。ピラミッド形状全体の造形に要した時間は、mm オーダの大きさであるにもかかわらず 7 分程度であった。

これらの結果から、本手法を用いることで、大きさが mm オーダの形状を高速かつ高精度に造形できる可能性が極めて高いことがわかる。

5.2 深さ分解能の検討

5.1 では積層厚さを 5μm として造形を行った。しかし、傾斜の緩やかな斜面などを精度よく造形するためには、さらに薄い積層厚さ、つまり高い深さ分解能が必要となる。そこで深さ分解能について実験的に検討した。

深さ分解能を決める要因としては、z ステージの移動分解能と、光硬化性樹脂の性質、特に粘性の二つが考えられる。使用している z ステージの移動分解能が 0.5μm であるので、積層厚さ 1μm での造形を試みた。なお、今回は粘性を一定とした。

造形する形状の概略を図 9(a)に示す。フレネルレンズを模した三角波形状であり、設計波形の波長は 300μm、高さは 14μm である。5.2 において述べた、ピラミッド形状やかさ歯車形状と

(a) SEM image of pyramidal shape

(b) SEM image of bevel gear shape

(c) Detail of a tooth

Fig. 8 Fabricated objects

同様の手順で造形を行った。造形条件を表 2 に、マスク画像の一例を図 7(c)に示す。波の山から谷までの部分を積層厚さ 1μm として造形した。図 9(b)に造形結果の SEM 画像を示す。設計通りに三つの三角波形が造形されている。図 9(c)は中央の波形の横からの拡大図である。わかりやすくするために稜線を実線で強調した。SEM による観察では、波の山から谷までの高さは 12~16μm と推測され、積層厚さ 1μm の薄膜造形が行われているものと考えられる。このことから、厚さ 1μm の液体樹脂層の形成に対して光硬化性樹脂の性質は大きく影響せず、z ステージの移動分解能のみによって、深さ分解能が決定されることがわ

かる。最も緩い斜面の傾斜は 3° 程度であるが、積層による段差はほとんど確認されず、事実上の非積層造形が実現されているといえる。

6. 微細形状の造形

6.1 設計形状

本手法の実用的な有効性を検証するため、より微細であり、実際の機械部品と同様の形状である、マイクロ軸付二段歯車の造形を試みた。図 10(a)に 3D-CAD により設計した形状を示す。大歯車および小歯車のモジュールは共に世界最小級の $20\mu\text{m}$ であり、歯形は円弧である。大歯車のピッチ円直径は $2000\mu\text{m}$ 、歯数は 100 であり、小歯車はこの $1/4$ の大きさである。mm オ

ーダの比較的大きな形状の端面に、数 $10\mu\text{m}$ の微細な構造（歯）が多数配置された 3 次元立体形状といえる。

6.2 造形結果

造形手順は、5.2 において述べた、ピラミッド形状やかさ歯車形状の場合と同様である。歯車の造形条件を、積層厚さ $10\mu\text{m}$ 、一層あたりの露光エネルギー $5.1\text{mJ}/\text{cm}^2$ とした。

造形結果を図 10 に示す。図 10(b)は造形された形状全体の SEM 画像である。図 10(a)と比較すると、形状全体がほぼ設計通りに造形されていることがわかる。

図 10(c), (d)はそれぞれ、小歯車と大歯車の拡大図である。高さ方向のどの位置においても、歯形は設計通りに造形されているように見える。軸-小歯車、小歯車-大歯車の接続部分は、多少の丸みが見られる部分があるものの、階段状に造形されて

いる。以上から、図 10(a)に示したマイクロ軸付二段歯車は本手法により、精度よく造形されているものと考えられる。

この結果は本手法が、3D-CAD に基づき作成したデータから、微細な複数の形状を、組み立てることなく一体で、しかも精度よく造形することができる、実用性の高いマイクロ光造形法であることを示している。

7. 結 言

本研究から得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 液晶動画像を用いた薄層型積層マイクロ光造形法を提案し、3D-CAD モデルに基き造形を行う実験システムを構築した。
- (2) 高精細な LCD と結像光学系による縮小とを組み合わせることで、横分解能が $3\mu\text{m}$ に達することを実験的に確認した。
- (3) ピラミッド形状やかさ歯車形状を積層厚さ $5\mu\text{m}$ で、しかも約 $4\text{s}/\text{layer}$ という短時間で造形することができた。造形された形状は、シャープなエッジを有することを確認した。
- (4) 三角波形状の造形において、深さ分解能（積層厚さ）が $1\mu\text{m}$ に達することができた。本手法により事実上の非積層造形が実現できることを示した。
- (5) 実用的な機械部品であるモジュール $20\mu\text{m}$ のマイクロ軸付二段歯車を高精度に造形できたことから、本手法が実用性の高いマイクロ光造形法であることが示された。

今後の課題の一つにオーバハング形状の造形手法の確立がある。白黒の二値画像だけでなく濃淡画像を併用し薄層型積層を行い、オーバハング部分の深さ方向の硬化量を局所的に変化させることで、高精度な造形を行う予定である。

謝 辞

本研究は、平成 12 年度～平成 14 年度文部省研究費補助金（基盤研究(B)(2)）の助成を受けて行われたことを付記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 特集・マイクロ加工の最前線, 精密工学会誌, 68, 2 (2002), 161.
- 2) V. K. Varadan et al.: Microstereolithography and other Fabrication Techniques for 3D MEMS, John Wiley & Sons, West Sussex, (2001).
- 3) 松井真二, 皆藤 孝, 藤田淳一, 石田真彦, 落合幸徳: 収束イオンビームによる超微細立体構造形成技術, 精密工学会誌, 67, 9, (2000), 1412.
- 4) 山口勝美, 夏目康男, 酒井克彦: メタルジェットによる三次元構造体の造形 (第3報), 精密工学会誌, 66, 11, (2000), 1771.
- 5) T. Tanaka, Hong-Bo Sun and S. Kawata: Rapid sub-diffraction-limit laser micro/nanoprocessing in a threshold material system, Applied Physics Letters, 80, 2, (2002), 14.
- 6) S. Maruo and K. Ikuta: Submicron stereolithography for the production of freely movable mechanisms by using single-photon polymerization, Sensors and Actuators, A100, (2002), 70.
- 7) X. Zhang, X. N. Jiang and C. Sun: Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures, Sensors and Actuators, A77, (1999), 149.
- 8) 村上 存: 冷却固化式光造形法, 砥粒加工学会誌, 46, 3, (2002), 124.
- 9) 浮田宏生, 富村明彦: DVD 光ヘッドによる卓上型光造形装置と高分解能硬化特性, 精密工学会誌, 65, 9, (1999), 1360.
- 10) K. Yamaguchi and T. Nakamoto: Manufacturing of unidirectional whisker reinforced plastic microstructures, Proc. of 8th International Conference on Production Engineering, (1997), 159.
- 11) 丸谷洋二ほか: 光造形法, 日刊工業新聞社, (1990).
- 12) P. F. Jacobs (T. H. Pang, 島田 洋 訳): 高速三次元形成の基礎, 日経 BP 社, (1993).
- 13) T. Hayashi, T. Miyoshi, Y. Takaya and S. Takahashi: Nonlaminar micro stereolithography using TFT LCD, Proc of 1st Euspen Topical Conference on Fabrication and Metrology in Nanotechnology, vol1, (2000), 98.
- 14) T. Hayashi, T. Miyoshi, Y. Takaya and S. Takahashi: Direct 3D Forming using TFT LCD Mask, Proc of the 8th International Conference on Rapid Prototyping, (2000), 172.
- 15) 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), 精密工学会誌, 67, 4, (2001), 632.