2本レーザを用いた光造形の形状精度向上 (第1報) *

— 造形システムの開発と簡易造形 —

曾根順治** 田添丈仁*** 渡邊栄克† 久米祐一郎†† 陳 軍†† 山田勝実††

Shape Accuracy Improvement of Laser Lithography by Two Laser Beams (First Report)
— Development of Laser Lithography System and Trial —

Junji SONE, Jouji TAZOE, Shigekatsu WATANABE, Yuichiro KUME, Jun CHEN and Katsumi YAMADA

One laser beam, which has Gaussian power distribution, is usually used for laser lithography. The solidification area is also a hyperbolic shape in this system. Thus, the surface of built parts is not smooth and a post-process to reduce surface roughness, using sandpaper and other methods, is required. In this research, we propose a laser lithography method using two laser beams. The second laser beam is used for complimenting the subtracted area from the CAD model and the solidification area of the first laser beam. From the experiment, we verified surface roughness for building truncated pyramid shapes was reduced using our system.

Key words: Laser lithography, Two laser beam, solidification shape

1. 緒 言

光造形法¹⁾²⁾は、レーザ光を液体状の光硬化性樹脂に走査させることにより一層の固化層を作り、これを順次積層して3次元立体形状を創成する方法である。現在、光造形は金型の入れ子製作やデザインモデル及び機能部品などの試作に使われている。光造形法の問題点の一つは、固化した層の上に液状の樹脂を塗布しレーザ照射により固化させるために、下層と造形層の間にレーザの走査方法に依存した歪が形成され、造形物が変形してしまうことである。もう一つは、集光点のエネルギーがガウス分布のレーザビームを1本用いて造形しているために、硬化形状も放物線形となり、造形モデル外側表面に凹凸が出来ることが挙げられる。ここで、造形モデルを意匠形状確認の目的に使用する際には、凹凸が形状確認の妨げとなったり、2次加工を行うことにより3次元CADモデル形状と異なることもある。一番目の問題については、レーザ光の走査方法を改良することにより、変形量を小さくすることが可能となっている。二番目の問題について製造現場においては、側面をヤスリなどで削り滑らかにする2次処理が必要となっていることが現状である。また、植原らは³⁾、造形断面の下層と造形層の接合部を再度レーザ光を走査させて固化させる引き上げ照射法を提案している。この方法は2回輪郭部を走査する必要がある。また、萩原らは⁴⁾、レーザ光の入射角度を変えることにより、宝飾品の表面精度を

改善する研究を行っている。本研究においては、これらの研究開発成果をふまえ、2本のレーザ光を用いた場合に、レーザ強度分布を制御してどの程度まで造形品の表面精度を向上させることができるかを検討することを目的とする。また、本報告では、開発した造形システムの構成と簡単な形状についての造形結果について報告する。

2章では2本レーザによる硬化領域を説明し、3章では造形システム、4章では本装置の有効性確認実験、5章は本研究のまとめを述べる。

2. 2本レーザによる硬化領域

植原らは、単位硬化形状とレーザ光強度の関係を研究している⁴⁾。その研究によると、硬化領域はレーザのエネルギー分布に従って決定される。これは、レーザ光によって与えられるエネルギーがある閾値を超えた領域が硬化を始める特性を光硬化性樹脂が持つからである。また、レーザ光は樹脂内を通過すると減衰することから、1本のレーザを用いて造形を行う場合は、集光点のレーザ強度分布がガウス分布であれば、その形に比例した領域が硬化する。そのため、輪郭形状部においては、その硬化領域形状が表面に現れるため、表面粗さおよび、形状精度が悪化する要因となる。そこで、本研究は2本のレーザ光を用いて集光点のエネルギー分布形状を制御することにより、硬化形状を任意に変化させることを検討する。2本のレーザ光によるエネルギー分布の合成は、各レーザのエネルギー強度と向きに依存する。また、造形品の輪郭形状は、3次元モデルの形状に適合して変化させる必要がある。図1はその硬化領域の概要を示す。図の場合は、レーザ光①の硬化領域を基本として、レーザ光②により硬化領域を補うことにより、硬化領域を3次元モデル形状に近づける。この方法においては、3次元データの

* 原稿受付 平成14年1月29日

** 正会員 東京工芸大学 工学部光工学科 (厚木市飯山1583)

*** (株) エー・エス・エル (東京都港区新橋2-5-6)

† 玉川電気 (株) (川崎市中原区中丸子1228)

†† 東京工芸大学 工学部光工学科

Fig.1 Scheme of laser lithography using 2 laser beam.

輪郭形状が変化すると2本のレーザ強度を変化させる必要がある。そのために、代表的な形状については、あらかじめ硬化領域と2本のレーザ光の強度の適切な関係をシミュレーションにより計算しておく必要がある。

2. 1 硬化領域の推定

前節で述べた輪郭部の硬化形状の補正をおこなうために、2本のレーザ光を使用した際のエネルギー分布を求め、硬化領域をシミュレーションする。

波面上でのレーザ光のエネルギー分布は式(1)で表される。

$$F(y) = u_0 \exp\left(\frac{-2y^2}{w^2}\right) \quad (1)$$

ここで、 $F(y)$ ：ある波面上の中心から y 離れた点のレーザ光のエネルギー、 u_0 ：エネルギー分布のピーク値、 w ：ビーム半径：0.01mmである。

また、樹脂にレーザが照射されたときに、進行深さに応じて光強度が式(2)に示すように減衰する。

$$I(L, y) = F(y) \exp(-AL) \quad (2)$$

ここで、 $I(L, y)$ ：深さ L 点でのレーザ光のエネルギー、 A ：樹脂固有の光吸収係数、 L ：光が要素を通過する長さである。

ここで、レーザ光出口端のレンズの仕様はf18.4、 $Na=0.06$ であり、集光点から0.02mmの深さのビーム半径広がり小さい。また、樹脂の不透明性から、周辺部の光強度が弱い部分は減衰が大きいかを考慮すると、レーザ光の広がりの影響は省略しているが、大坪⁹⁾らは光学系の影響を検討しているため、詳細な検討は今後の課題とする。

式(1)(2)を用いて2本のレーザ光を同時に垂直と45度斜めから照射した時の合成エネルギー分布を計算する。硬化領域は0.001mm間隔で0.05×0.05mm範囲内の合成光強度と、硬化しきい値を比較しながら、樹脂の硬化可否を判別し、全体の外側輪郭を求める。ここで開発した計算プログラムのアルゴリズムを図2に示す。

3. 造形システム

本章は、開発した2本レーザによる光造形システムについて説明する。

3. 1 造形装置

本実験で使用した光造形機を図3に示す。光造形機はX、Y、Z、 θ の各軸をステッピングモータ駆動の精密テーブル（シグマ光機SGSP26-50、SGSP26-150、SKIDS-60YAW）で構成し、光源やテーブルはパーソナルコンピュータからプログラムにより制御

Fig.2 Algorithm of computing the solidification area.

する。X軸とY軸の可動範囲は50mm、Z軸は150mmである。光源①は下から垂直に、光源②は垂直方向から45度に固定している。樹脂槽の底面に硬化した樹脂が付着するのを防ぐため、フッ素樹脂フィルムを樹脂槽底面に貼り付けている。レーザは波長670nmの赤色半導体レーザ（シグマ光機LD-33）を使用し、集光点の半径は0.01mmである。光学系は、半径0.025mmファイバーを用いてテーブル上にレーザ光を導き、f6.1レンズ、f18.4レンズの2段階で半径0.01mmに集光させている。レーザパワーの制御は、ACOUSTO-OPTIC MODULATOR（以降AOM）にパーソナルコンピュータから12bitDAコンバーターを通しアナログ制御電圧を供給しておこなう。造形制御は、次節で述べる制御データを用いて、1層ごとに内部走査、輪郭走査、エレベータの上昇を繰り返して実行する。造形樹脂はアクリレート樹脂[KAYARAD DF-200N、日本化薬（株）製造]を用いる。

3. 2 造形制御データ作成方法

2章で述べたように、3次元モデルの形状に応じて集光点のエネルギー分布やレーザ照射方向を制御する必要がある。そのため、3次元モデルから造形制御データを作成する手順を述べる。光造形を行う3次元モデルは、3次元ソリッドモデラ（DESIGNBASE）⁷⁾⁸⁾により製作し、このモデルから下記に示す方法により造形制御データを作成する。この機能は、DESIGNBASEの形状演算関数を用いてプログラムを開発している。ここでは、ソリッドモデルである3次元モデルを各Z軸刻みごとにX-Y平面で切断し、その形状から造形物の内部を硬化させる内部走査データと、造形物の輪郭部を硬化させる輪郭走査データの2種類を作成する。図4は内部走査データの作成方法を示し、その手順を下記に示す。

- (1) 3次元モデルとX-Y平面の干渉線を計算する。
- (2) 干渉線からXY平面の閉じた2次元輪郭線を抽出する。
- (3) 立体とXY平面の干渉線を0.02mm間隔に2次元の点に変換する。
- (4) 片側に走査するために③で作成された点からY軸方向の特徴点を抽出する。

Fig.3 Mechanism of laser lithography.

Fig.4 Calculation method of internal scan data.

Fig.5 Calculation method of outside scan data.

- (5) (4)で生成された点をY軸方向に、始点と終点で結ぶことにより内部走査線を求める。ここで、樹脂の収縮を考慮して、走査線は1本おきに並び替えるインタレース方式とする。

また、輪郭走査データの作成方法を図5に示し、その手順を以下に説明する。

- (1) 立体とXY平面の干涉線を0.02mm間隔に2次元の点に変換する。
- (2) 各点の法線を求め、その法線の基準方向からの角度 θ を求める。ここで、円錐を造形する場合を考えると、輪郭形状の法線方向から光源②を照射しないと正確なZ方向の傾斜が形成できない。その法線方向パラメータとして θ を定める。
- (3) 上部断面の輪郭曲線の最近点を求め、鉛直方向の角度 ϕ を求める。

上記の内部走査データ、輪郭操作データ作成操作を、立体下部よりZ軸正方向に0.02mm間隔で生成し、制御データとする。

4. 本装置の有効性確認実験

本章においては、本装置の有効性を確認するために、輪郭部の角度 ϕ が45度斜めの3次元モデルを対象として、3.2節の方法により2本のレーザ強度を求め、造形実験を行う。

4.1 造形領域のシミュレーション

輪郭部の角度 ϕ が斜め45度の場合において、必要とする領域を硬化させるためには、2本の光源の適切な強度を求める必要がある。本節では、3.2節で述べたシミュレーションプログラムを用いて2本のレーザ光からの硬化領域を求め、必要な3次元モデルの側面形状に近い条件を試行錯誤により求める。実験の条件として適切と考えられる光源強度を表1に示す。ここで、硬化閾値は光源の強度を変えて樹脂に照射し、硬化体を観察しながら求めている。また、樹脂の吸収係数は、エレベータなし時の造形物の高さを式(2)に代入して求めている。その時の3層分の硬化領域形状を図6に示す。シミュレーションにおいて、第2光源の硬化領域がZ軸の刻み[0.02mm]より大きくなるが、エレベータや前レイヤーにより遮られるため、硬化は制限されると考える。

4.2 造形実験

造形物の内部走査は光源①だけを用いてインタレースに走査する。レーザ強度は、一辺0.02mm立方体領域が80%程度硬化する0.39mWを用いる。輪郭部は前節のシミュレーションから求めた値を用いて光源①②で走査する。また光源の走査速度は4.8mm/sである。以上の条件で、上面の一辺が1.0mm、底面の一辺が2mm、高さ0.5mmの角錐台を造形する。

図7は比較のために、輪郭部を光源①0.39mWのみで走査した場合の、造形モデルの表面形状を示す。表面粗さの測定には、レーザ顕微鏡（KEYENCE VF-7510 PROFILE MICROMETER）を用い、角錐台の側面を上部から測定する。倍率は1250倍である。図より、ノイズはあるが積層1ピッチの間隔の階段状段差が観察される。

図8は、輪郭部を光源①0.14mW、光源②0.45mWの強度により、走査して造形したモデルの表面粗さである。図より、表面粗さは図7と比較して減少しており、階段状の特徴はほぼ消えていることがわかる。

Fig.6 Simulation result of solidification area.

Table 1 Condition of simulation.

Item	Value
Energy peak of laser ①	0.14mW
Energy peak of laser ②	0.45mW
Solidification critical value	0.35mW・s/mm ²
Absorption coefficient	5.5mm ⁻¹

Fig.7 Surface roughness (one laser is used for outer scan).

Fig.8 Surface roughness (two laser is used for outer scan).

5. 結 言

本研究では、2本光源方式による光造形法ならびにデータ作成、造形制御システムを開発した。このシステムを用いて、0.02mmピッチスライスで3次元モデルデータから造形モデルを作製できることを確認した。また、側面形状が45度傾斜した角錐台を2本光源方式により造形することにより、本手法が輪郭部の表面粗さを減少させることができることを確認した。この際の光源強度は、理論式を用いてあらかじめ決定することができる。

今回は、単純な形状を対象として、比較的狭い領域のパラメータで実験を行っているため、今後は複雑な形状やパラメータ条件を広く検討する必要がある。また、2本光源を用いた場合の単位硬化形状の理論と実験からの解明を詳しく行う必要もある。

謝 辞

樹脂を提供頂いたデンケンエンジニアリング(株)、装置の開発に協力頂いたシグマ光機(株)、造形データ作成ソフトの開発にご協力頂いた(株)リコー DESIGNBASE開発チームの皆様に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 丸谷洋二, 大川和夫, 早野誠治, 斎藤直一朗, 中井孝: 光造形法, 日刊工業新聞社, (1990).
- 2) R. F. Jacobs: Rapid Prototyping & Manufacturing Fundamentals of Stereo Lithography, Soc. Manuf. Eng., Dearborn, M. I., (1992)59.
- 3) 植原弘之, 斎藤勝政: 光造形法における複合立体模型の面精度向上に関する研究, 精密工学会誌, 61, 2, (1995)233.
- 4) 植原弘之, 小島真一, 五十嵐悟, 斎藤勝政: 光造形法の立体形成機構に関する研究(第1報), 精密工学会誌, 61, 1, (1995)117.
- 5) 萩原茂, 古川進, 清弘智昭, 牧野洋: 宝飾工芸品製作のためのレーザリソグラフィ(第1報)斜め照射の提案, 精密工学会誌, 62, 11, (1996)1587.
- 6) 大坪義一, 山本昌彦, 田所諭, 高森年: 光造形法を用いた微小立体構造物の製作(第1報), 精密工学会誌, 64, 8, (1998)1181.
- 7) H. Toriya, T. Takamura, T. Satoh, and H. Chiyokura: Undo and redo operation for solid modeling, IEEE Computer Graphics and Application, 6, 4, (1986)35.
- 8) 鳥谷浩志, 千代倉弘明: 3次元CADの基礎と応用, 共立出版, (1991).