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 ——

萩原 茂** 古川 進*** 清弘智昭† 牧野 洋***

Laser Lithography for Making Jewelry (1st Report)
- An Idea of Diagonal Irradiation -

Shigeru HAGIHARA, Susumu FURUKAWA, Noriaki KIYOHRO and Hiroshi MAKINO

Laser lithography is an optical forming method which heaps up thin layers solidified by laser beam. Since plastic models which are made by laser lithography process have ledges on their surfaces, reducing ledges is required to use them as master models for jewelry. A diagonal irradiation method for reducing ledges is presented. The diagonal irradiation method improves surface roughness by means of heap up diagonal shape solidified by diagonal laser irradiation. Diagonal solidifying behavior was clarified by theoretical calculation. As the result of an experiment, average surface roughness of $10\mu\text{m}$ in steep slope area and improvement of out of roundness was obtained by the diagonal irradiation method.

Key words: rapid prototyping, laser lithography, jewelry, surface roughness

1. 緒 言

レーザリソグラフィ¹⁾は、レーザビームを光硬化性樹脂に照射することによって薄膜を形成し、その薄膜の積層によって樹脂モデルを造形する方法である。それ故、複雑な形状でも一体型として造形することが可能である。

しかし、(1)積層の際に樹脂モデルの表面に段差が生ずる、(2)樹脂の硬化反応に伴う体積変化によって樹脂モデルの変形が起こる、(3)形状によっては、適当な場所に支持を設ける必要がある、(4)造形する立体の体積に比例して造形時間がかかるため、量産品には向かない、という問題もある。

これらの理由によって、レーザリソグラフィは、デザイン検討用モデル²⁾や手術の検討に使用される臓器モデル³⁾などの厳しい表面精度が要求されない、かつ量産品でない製品に使用される場合が多い。

著者らは、レーザリソグラフィを利用した宝飾工芸品のCAD/CAMシステムの開発^{4)~6)}を行ってきた。宝飾工芸品は、本来、大量に生産する必要がなく、サイズが小さいので硬化後の変形は無視できる、支持の付加について大きな問題が起きていない、などの理由により、宝飾工芸品への応用では(2)~(4)の項目も特に問題にはならず、樹脂モデルの表面精度の向上が、緊急を要する重要課題である。

樹脂モデルの表面精度を向上させる手法には、造形の段階で精度を向上させる方法と造形後に処理を施す方法があるが、現状では、造形後に何らかの処理を施して必要な精度を得る方法を採用することが多い。

Reevesら⁷⁾は、樹脂表面を低粘度の樹脂で覆った後に、樹脂を硬化させて、段差を埋めるコーティング処理を提案している。

また、Spencerら⁸⁾も、樹脂モデルを研磨材と共に器の中に入れ、振動を加えることによって研磨する処理の提案をしている。宝飾工芸品の製作においても、ヤスリ掛けやコーティング処理などを施しているのが現状である。

造形の段階で表面精度を向上させる方法は、著者らの知る限り、ほとんど報告されていない。高木ら⁹⁾、榎原ら¹⁰⁾が検討を行ったのみである。

高木らは、マイクロマシンの製作への応用を図るために光吸収率の大きい樹脂を使用し、1回当たりの照射で硬化する樹脂を小さくすることによって、精度の向上を目指した。榎原らは、光硬化性樹脂の「ぬれ」と「流動性」によって段差を埋める硬化形状を作る引き上げ照射法を提案し、部分的に $10\mu\text{m}$ の平均表面粗さを得ている。しかし、宝飾工芸品には、光沢のある美しい表面が得られる精度が要求され、少なくとも $10\mu\text{m}$ 以下の平均表面粗さが必要条件である。それ故、現状の造形時間を確保しつつ、十分な精度を得るためには、新しい方法の開発が必要である。

本論文では、表面精度を向上させるための第一歩として、レーザ光を斜めから照射する方法について検討を行った。具体的には、(1)照射方向やビームの大きさに対する樹脂の硬化形状の変化や積層状態における樹脂の硬化挙動を理論的解析¹¹⁾¹²⁾によって検討を行った。(2)この結果を利用して造形実験を行った。その結果、樹脂表面の勾配が大きいところでは、ほぼ満足のできる表面精度が得られた。また、勾配が緩やかなところでも、垂直に照射する造形方法に比較して段差は小さくなる結果となった。さらに、実験結果は、理論的解析の結果とも定性的に合致しており、硬化状態を理解するだけであれば、理論的解析のみでも十分であることが分かった。

2. 硬化形状の理論的考察

光硬化性樹脂にある方向からレーザ光を照射したときに硬化形状がどのような挙動を示すかについて考察する。

* 原稿受付 平成8年4月16日
** 学生会員 山梨県工業技術センター(甲府市大津町2094)
*** 正会員 山梨大学工学部(甲府市武田4-3-11)
† 山梨大学工学部

樹脂表面に対して直交する方向から照射する場合については、中井ら¹³⁾、Nguyenら¹⁴⁾、植原ら¹⁵⁾および中本ら¹⁶⁾が、光の減衰を考慮することによって硬化形状を考察している。

樹脂表面で反射する光は、樹脂の硬化には影響しないので屈折光のみについて考える。但し、樹脂は純粋であり樹脂内部での光の散乱はなく、硬化状態に関わらず樹脂の光学的性質は変化のしないものと仮定した。なぜなら、硬化形状の勾配に対する影響は十分に小さいからである。

樹脂表面では、光線の入射角を θ_i 、屈折光の鉛直方向とのなす角度を θ_t とするとSnelの法則より、

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (1)$$

が成り立つ。ここで、 n_1 、 n_2 は、それぞれ大気屈折率、樹脂の屈折率である。

光線の偏光面が、樹脂液面に対して垂直な成分を p 成分、 p 成分と垂直な成分を s 成分とする。樹脂液面における p 成分についての振幅透過率を t_p とし、 s 成分についての振幅透過率を t_s とすると、それぞれ、Fresnelの公式¹⁷⁾より、

$$t_p = \frac{2 \sin(\theta_t) \cos(\theta_i)}{\sin(\theta_t) \cos(\theta_t) + \sin(\theta_i) \cos(\theta_i)} \quad (2)$$

$$t_s = \frac{2 \sin(\theta_t) \cos(\theta_i)}{\sin(\theta_t) \cos(\theta_i) + \sin(\theta_i) \cos(\theta_t)} \quad (3)$$

となる。

光線の p 成分と s 成分の強度を I_p 、 I_s とすると、屈折光強度 I_t は、

$$I_t = t_p^2 I_p + t_s^2 I_s \quad (4)$$

で表される。

光照射によって樹脂が吸収するエネルギーの分布を求めるために、仮に樹脂が微小な体積の要素の集まりで構成されていると考える。

屈折光は、要素を透過することによって光のエネルギーを要素に放出し、強度が減衰する。ある要素を透過する光の強度は、要素に入る時点での強度を I_{in} 、要素を出る時点での強度を I_{out} 、光が要素を透過する長さを L とすると、Lambert-Beerの法則より、

$$I_{out} = I_{in} \exp(-ZL) \quad (5)$$

が成り立つ。ここで、 Z は、樹脂固有の光吸収係数である。光吸収係数 Z は、硬化状態にかかわらず一定の値をとると仮定した。

T 時間の照射によって屈折光から要素に吸収されるエネルギー E は、

$$E = \int_0^T (I_{in} - I_{out}) dt \quad (6)$$

となる。

要素は、吸収したエネルギーが、硬化の臨界値 E_o に達すると液相から固相へと変化すると考えられる。液相状態の樹脂は、図3(a)でサンプルを載せているテーブルを沈めることによって光の当たらない樹脂と混ざり合い、樹脂が吸収したエネルギーは、分散される。そのため、液相状態にある要素は、テーブルの沈降に伴って吸収したエネルギーを零に戻すと仮定した。

硬化の臨界値 E_o および光吸収係数 Z の間に成り立つ関係は、中井らによって式(7)のように示されている¹³⁾。

$$L_z = \frac{1}{Z} \log_e \left(\frac{I_t T}{E_o} \right) \quad (7)$$

ここで、 I_t は、樹脂表面から内部へ向かう光の強度である。 L_z は、樹脂の硬化深さを表す。樹脂表面が硬化し始める照射時間 $T_o(L_z = 0)$ では、式(7)から、

$$E_o = I_t T_o \quad (8)$$

となる。

光吸収係数 Z および硬化の臨界値 E_o を求めるために、種々の条件下で硬化実験を行ってみた。その結果 $E_o = 3.5 \times 10^{-2} \text{mJ/mm}^2$ 、 $Z = 5.52(1/\text{mm})$ が得られた。なお、使用した樹脂は、サンノブコ製SN5X1641である。光源は、ブルースター窓を持たない縦多モードレーザー(ウシオ電機製PCH-U20RY)を使用したもので、偏光異方性はないものと考えた。以下においては、この実験で使用した樹脂と照射条件を用いることを前提とする。

入射角をいろいろ変えてレーザー光を照射した場合に硬化形状がどのように変化するか調べるために、式(6)で得られる要素のエネルギーを計算し、液相と固相の境界を求めた。その結果

(a) Simulated profiles by different incident angles of laser beam

(b) Incident angle: 40°

Fig. 1 Solidified profiles

Fig. 2 Heap up diagonal shape solidified by diagonal irradiation

の一例を図1(a)に示す。図1(b)は、樹脂にレーザー光を照射して硬化した形状の一例である。計算の結果と一致した傾き角度が得られた。

円筒の造形を行う場合の計算法について考察する。図2(a)に示されるように円弧の外側を積層する場合では、硬化形状の計算結果を利用して、硬化形状が点Aおよび点Bを通るようなレーザー光の入射角と照射位置を一意に決めることができる。図2(a)は、この方法で第*i*層まで繰り返して積層したものである。

図2(b)に示されるように円弧の内側を積層する場合では、図2(a)の方法では第*i-1*層の形状に影響を与えてしまう場合がある。この場合には単位面積あたりの光強度を弱くして硬化形状の点Bでの傾きを線分BCの傾きと同じになるような入射角と照射位置を求めて、積層を行う。

一般に樹脂の屈折率 n_2 は、大気屈折率 n_1 よりも大きい。この条件下では、緩やかな勾配の硬化形状が生成できないために、滑らかな表面を得る方法は得られない。そのため、図2(c)に示されるように硬化形状の勾配が非常に小さいところでは、生成

し得る硬化形状の最も勾配の緩やかな硬化形状によって積層を行うことにする。今回の実験では実施していないが、引き上げ照射法¹⁰⁾や層の厚さを部分的に小さくする方法を併用することによって精度の向上が可能と考えられる。

3. 造形実験

前節に述べた方法を実験するために装置を試作した。装置の構成を図3に示す。レーザーにより発生する光は、XY移動装置先端の照射ヘッドにミラーによって導かれる。照射角度は、照射ヘッドの Θ 軸で制御される。樹脂液面の照射位置は、照射ヘッドの中心軸上になるように Θ 軸とC軸は常に連動して動作する。レンズから樹脂液面までの光路長は、B軸によって調整した。

実験の主な条件を表1に示す。

円筒の造形例を図4に示す。図4(b), (c), (d)は、液面に対して垂直な照射角によって積層する従来の造形方法で得られた結果である。図4(e), (f), (g)は、図2の方法（以下、斜め照射法という。）で積層した結果である。図の右上には、円筒の拡大位置を太線で囲んだ部分で示した。また、理論的考察の結果を図中の余白に示した。従来の造形方法では、ほぼ全体に階段状の

(a) Construction of experimental system

(b) Scheme of irradiation head

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

Table 1	Experimental condition
Light source	PCH-U20RY (Ushio Inc.)
Scanning velocity	5.0 mm/s
Light intensity	8.7 mW
Wave length	325 nm
Focal length of lens	220 mm
Resin	SN5X1641 (San Nopco Ltd.)

left side:conventional method
right side:diagonal irradiation method
(a) View of cylinders

(b) Outside of cylinder (conventional method)

(e) Outside of cylinder (diagonal irradiation method)

(c) Inside of cylinder (conventional method)

(f) Inside of cylinder (diagonal irradiation method)

(d) Top of cylinder (conventional method)

(g) Top of cylinder (diagonal irradiation method)

Layer thickness=250μm

Fig. 4 Cylinder models

段差が見られる。斜め照射法では、理論的解析で得られた結果と定性的に一致した表面が得られた。

円筒の外径の真円度を測定した。その結果を図5に示す。従来法では、表面の段差が精度の低下の主な原因となっている。従来法に比較して、斜め照射法では表面の段差が小さくなることによって精度の向上が見られた。

表面粗さの測定例を図6に示す。斜め照射法では、硬化表面の勾配が、 50° 以上では平均表面粗さ(Ra)は、 $10\mu\text{m}$ 以下であった。

表面の勾配が、 40° 以下では、緩やかな勾配の硬化形状が生成できないが、従来の造形方法より段差が小さくなり表面の精度が向上した。

Fig. 5 Results of out of roundness

Fig. 6 Average surface roughness of resin models

4. 結 言

斜め照射法による造形方法を提案し、理論的解析と実験の結果から以下のことが明らかになった。

- (1) 勾配が 50° 以上の硬化表面では、 $10\mu\text{m}$ 以下の平均表面粗さ (Ra) が得られた。
- (2) 円筒の造形実験により、従来法に比較して真円度の向上が見られた。
- (3) 実験結果は、理論的解析の結果と定性的に合致しており硬化状態を理解するだけであれば、理論的解析のみでも十分であることが分かった。

斜め照射法によって、さらに高い表面精度を得るためには、樹脂中でのレーザ光の傾斜角度を大きくする必要があり、今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) 中井 孝, 丸谷洋二: レーザリソグラフィによる立体モデル創生, 電子

情報通信学会論文誌, J71-D, 2 (1988) 416.

- 2) 古川 進, 伊藤 誠, 山田 晋, 萩原 茂: 意匠用 CAD/CAM システムの試作, 日本機械学会論文誌 (C 編) 56, 526 (1990) 288.
- 3) 中井 孝, 丸谷洋二: CT 画像に基づく 3 次元樹脂モデルの作成, 情報処理学会論文誌, 30, 11 (1989) 1441.
- 4) 清水誠司, 阿部正人, 萩原 茂, 中島 俊, 古川 進, 伊藤 誠: 宝飾工芸品の CAD/CAM システム, 第 6 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集 (1990) 298.
- 5) 阿部正人, 清水誠司, 萩原 茂, 宮川和幸, 古川 進, 伊藤 誠: 宝飾工芸品の CAD/CAM システム (第 2 報) —— 複雑曲面の生成と加工, 第 7 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集 (1991) 232.
- 6) 萩原 茂, 阿部正人, 清水誠司, 古川 進, 伊藤 誠: 宝飾工芸品の CAD/CAM システム (第 3 報) —— 自由曲面の処理アルゴリズム, 第 9 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集 (1993) 67.
- 7) P. E. Reeves and R. C. Cobb: The Finishing of Stereolithography Models Using Resin Based Coatings, Proc. Solid Freeform Fabrication Symp., USA, (1995) 96.
- 8) J. D. Spencer, R. C. Cobb and P. M. Dickens: Vibratory Finishing of Stereolithography Parts, Proc. Solid Freeform Fabrication Symp., USA, (1993) 27.
- 9) 高木太郎, 中島尚正: 光造形法による微細加工の可能性, 日本機械学会論文誌 (C 編) 59, 560 (1993) 287.
- 10) 植原弘之, 斎藤勝政: 光造形法による複合立体模型の面精度向上に関する研究 (第 1 報) —— 引上げ照射法の提案, 精密工学会誌, 61, 2 (1995) 233.
- 11) 萩原 茂, 清水 透, 佐野利男: レーザリソグラフィの加工制御に関する研究 (第 2 報) —— 単位硬化形状の能動的制御について, 1993 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1993) 645.
- 12) S. Hagihara, M. Hihara, S. Furukawa, H. Makino, T. Shimizu, T. Sano and K. Matsuno: LASER Solidification Process of Photocurable Monomers, Proc. Int. Conf. on Mechanics of Solids and Materials Eng., Singapore, (1995) 218.
- 13) 中井 孝, 丸谷洋二: 紫外線レーザ露光による光硬化樹脂の硬化特性, レーザ研究, 16, 1 (1988) 14.
- 14) H. Nguyen, J. Richter and P. F. Jacobs: On Windowpanes and Christmas-Trees: Diagnostic Techniques for Improved Part Accuracy, Proc. Third Int. Conf. on Rapid Prototyping, Dayton, (1992) 41.
- 15) 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) —— 硬化単位形状の検討, 精密工学会誌, 61, 1 (1995) 117.
- 16) 中本 剛, 山口勝美, Petros Abrahams ABBAY, 松田義基, Karyawan: 紫外線感光性樹脂を使ったマイクロストラクチャの製造 (第 2 報) —— 描画法におけるビーム形状と硬化特性, 日本機械学会論文誌 (C 編) 60, 575 (1994) 2407.
- 17) 鈴木範人, 小塩高文: 応用光学 2, 朝倉書店, (1982) 164.