

要旨

光造形法においてレーザビームのパワー密度分布は感光性樹脂の硬化単位形状を規定する重要な因子のひとつであり、その密度分布の理論的解析は、硬化単位形状を正確に予測する上で重要である。本報告においては、2波長レーザビームを使用した場合の光学系の解析を行った。その結果、各波長のビームウエストが異なる位置に収束し、ずれた2つのガウシアンビームの重ね合わせで密度分布が与えられることがわかった。

1. 緒論

光造形装置による立体モデルの製造は、形状の複雑さに左右されない製造プロセスという点が注目される大きな理由であるが、模型の造形精度に関する要望は依然高い。レーザ光のパワー密度分布は、感光性樹脂の硬化単位形状を規定する一つの重要な因子である。光造形法では、あるパワー密度分布を持つレーザを、平行に微小間隔離しながら走査して一層分の平面状の硬化物を構成する。レーザが部分的に重ねあわされるために、単一のパワー密度分布の重なりから2次元硬化物が生成される。そのためパワー密度分布を正確に把握することが2次元、3次元硬化物の形成原理を解明する上で必要となる。

本論文はKogelnik, Selfらの薄肉レンズ系によるガウシアンビームの変換理論を基に、光造形法に用いられている光学系の解析を行った。

2. レンズによるビーム変換理論の概要

高精度な模型の製作には、レーザビームをレンズ系で絞りスポット径を小さくする。ガウシアンレーザビームは一点に収束することはなくビームウエストと呼ばれる位置でビーム半径を最小にレーザが絞られる。このレンズ系によるビーム径の変換は、レーザビームパラメータの変換式として記述できる。z軸方向に伝搬するレーザビームは、波面の曲率半径R(z)、ビーム半径w(z)を用いてレーザビームの電界分布は以下で表される。

$$E(r, z) = \frac{w_0}{w} \exp\left\{-j(kz - \Phi) - r^2 \left(\frac{1}{w^2} + \frac{jk}{2R}\right)\right\} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Phi = \arctan(\lambda z/w_0^2) \\ w^2(z) = w_0^2 \left[1 + (\lambda z/\pi w_0^2)^2\right] \\ R(z) = z \left[1 + (\pi w_0^2/\lambda z)^2\right] \end{cases}$$

ビームパラメータqは以下の式で定義される。

$$1/q = 1/R - j(\lambda/\pi w^2) \quad (2)$$

レンズ等の光学系による光の波面の変換は、光線移行行列を用いて次の式で統一的に記述できる。光線の位置xと方向余弦x'=n sin α ≈ nαを用いて、入力光線[x1 x1']

と出力光線[x2 x2']の関係は、

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} \quad (3)$$

で表される。上記レーザパラメータqもこの光線移行行列に基づいた変換が行なわれq1, q2には以下の関係が成立する。

$$q_2 = \frac{(Aq_1 + B)}{(Cq_1 + D)} \quad (4)$$

3. 1波長レーザのスキヤナ光学系の解析

組合せレンズによる光学系は、焦点距離fと主平面h1, h2を用いて簡素化して記述することができる。2レンズ系を考えた場合、レンズ1, 2からの距離s1, s2の光学系は[A B C D]=[1-d2/f d1+d2-d2d2/ff -1/f 1-d1/f]となる。ただしd1=s1+h1, d2=s2+h2である(図2)。

光学系からd1離れた距離からレーザのビームウエストw1で出射した光線が、光学系を通過してd2の位置にビームウエストw2で結像した場合、(2)式で、ビームウエストではz=0であり、(4)式の虚部と実部との比較から、入力と出力のビーム径w1, w2に関して、また距離d1, d2に関して以下の関係が成立する。

$$m = \frac{w_2}{w_1} = \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{1/2} = \frac{1}{\left((1-d_1/f)^2 + (b_1/2f)^2\right)^{1/2}} \quad (5)$$

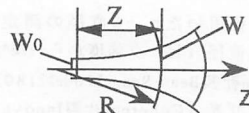


図1 ビームの伝搬

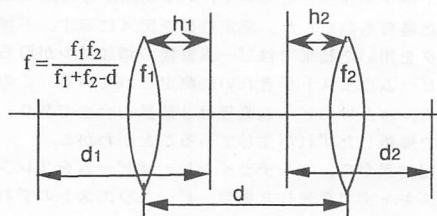


図2 組合せレンズの光学系

$$1 - d_2/f = \frac{1 - d_1/f}{(1 - d_1/f)^2 + (b_1/2f)^2} \quad (6)$$

$$b_1 = 2\pi w_1^2/\lambda, \quad b_2 = 2\pi w_2^2/\lambda \quad (7)$$

例題：2 レンズ系の一例として図2の構成で $\lambda=351.1$ nm, $w_1=0.8$ mm, $s_1=1000$, $f_1=420$, $f_2=-250$, $d=206$ (単位はmm)の場合、結像位置は $s_2=772$ mmとなる。

レーザービームで樹脂液面に断面形状を描くためには、XYスキャンミラーを回転させレーザー反射角を変化させる。しかしミラー直下よりも液面の周辺部では光路長が長くなるために、ビームウエストの位置 d_2 が大きくなるように光学系を変化させなければならない。いま図2における光学系では、第1のレンズを移動させる。dの距離を196 mm($s_1=1010$ mm)にした場合、ビームウエストの位置 s_2 は1156 mm、と求められる。

4. 2波長の場合のビームウエスト解析

光造形法では、その造形時間を短縮する方法として、大出力のレーザー光源を用い、高速にスキャンする方法がとられる。紫外線レーザーは最大出力が小さく1 Watt程度であり、大出力を得るために、紫外線2波長が同時に発振しているマルチラインレーザーを採用する場合がある。

2波長レーザーの場合、各波長の d_2 間の位置ずれの程度は、各波長の式(6)の差を求めて以下の式で評価できる。

$$\Delta d = d_{2b} - d_{2a} = \frac{(1 - d_1/f)(b_{1a}^2 - b_{1b}^2)}{4f K_a K_b} \quad (8)$$

$$K_a = (1 - d_1/f)^2 + (b_{1a}/2f)^2$$

$$K_b = (1 - d_1/f)^2 + (b_{1b}/2f)^2$$

これを $w_1=0.8$ mm, $\lambda_1=351.1$ nm, $\lambda_2=363.8$ nmとして横軸を $1-d_1/f$ 縦軸を $\Delta d/f$ としてプロットしたものを図3に示す。例題では、 $d=206$ ($d_1/f=-0.48$, $b_1/2f=1.96$, $f=2917$)で $\Delta d=32.6$ mmのずれが生じる。

5. 干渉フィルタを用いたビーム直径の測定実験

レーザービーム直径(ピーク強度から $1/e^2$ の値)の測定装置(Photon社製Beam Scan Model2180)を用いて光造形装置のレーザー光(Coherent社製Innova Model 300)のビームウエスト前後のビーム直径の測定を行った。同時に干渉フィルタを用いて、363.8 nmだけの光を通過させた場合も測定した。測定結果を図4に示す。干渉フィルタを用いた結果ではビーム直径の増加減少が滑らかで、ビームウエストがきれいに測定されている。この実験から、みかけのビーム直径は2波長の合成であり、本論文で解析したずれが生じていることがわかる。

上記結果から、マルチラインレーザービームを2レンズ系のスキャナで集光した場合、ビームウエストのずれが起こり、そのパワー密度分布は2種類のガウス分布の合成となる。実験データよりビームウエスト $w_2=3.5$ μ m,

ずれを $\Delta d=30$ mmとした場合、 $\lambda_1=351.1$ nmのビームウエスト位置でのパワー密度分布の変化を、2波長の密度ピーク値の比の違いを与えて計算した結果を図5に示す。

6. 結論

光造形法で硬化単位形状を規定する紫外発振Arレーザーのビーム形状解析を行い、以下の結果が得られた。

1. 現在光造形法で用いられている2レンズ系によるスキャナ光学系は、マルチラインレーザーの各波長のビームウエストを異なった位置に結像させる。
2. 紫外発振マルチラインArレーザーのパワー密度分布は、波長の異なるガウスビームの重ね合わせとして理論的にとり扱うことができる。

参考文献

1. H.Kogelnik: Applied Optics and Optical Engineering, VII, Academic Press, (1979)155.
2. S.Self: Applied Optics, 22[5], (1983)658.

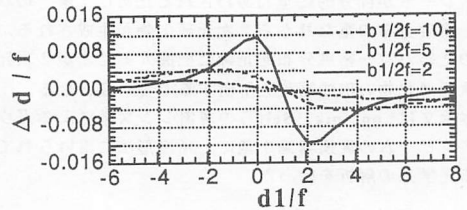


図3 d_1/f と Δd の関係

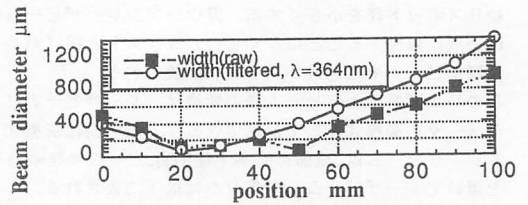


図4 レーザービーム径の測定結果

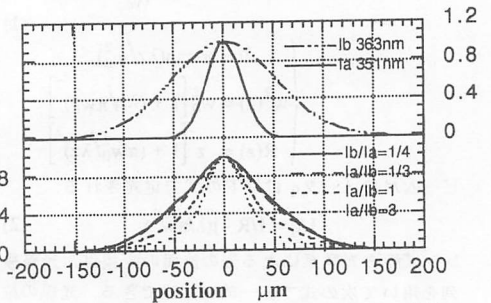


図5 波長の強度比によるパワー密度分布の変化