

# 立体成型中扫描误差的分析\*

于殿泓<sup>1,2</sup> 李琳<sup>1</sup> 卢秉恒<sup>2</sup>

(1 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

**摘要** 对立体成型技术中广泛使用的振镜扫描系统进行了理论分析,指出了振镜的二维扫描偏转角和平面坐标之间存在着非线性映射关系.提出了一种实用的校正算法,该算法用理论数据与激光束在相应点的实际数据进行比对,制成校正表,按插值算法校正实际的枕形畸变及其它误差.该算法适用于使用振镜实现二维扫描的系统,能对应用这种原理工作的激光成型设备进行现场校正.

**关键词** 立体成型;振镜;枕形畸变;校正

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

## 0 引言

激光立体制造系统中,激光束作为加工工具,按一定控制规律扫描作用于光敏树脂,实现由点到面、由面到体的的累加成型—快速成型制造.在这一过程中,对激光束实现有效控制是非常重要的<sup>[1,2]</sup>.目前是用二维振镜装置实现对激光束的扫描控制,其中一维是控制 X 方向的扫描,另一维是控制 Y 方向的扫描,任何二维形状的面片的形成都可以通过聚焦激光束在光敏树脂的液面(XY 坐标系)上的扫描而产生<sup>[3,4]</sup>.但是,这种成型制造原理在理论上存在严重的系统误差,一方面是激光束在光敏树脂表面的扫描轨迹会产生严重的枕形畸变<sup>[5]</sup>;另一方面是聚焦点的这种扫描不是真正意义上 XY 坐标系下的平面扫描,而是球面扫描,因而会造成不同扫描点光斑大小的不同.作为系统误差,这些都是影响成型质量的重要因素,因而有必要对其进行分析和论证,寻找合适的解决办法.

## 1 理论枕形畸变分析

二维振镜的工作原理如图 1. 图中,  $d$  为 X 振镜的轴线到像场(树脂液面)的垂直距离,  $\beta$  为 X 振镜的偏转角,  $e$  为两镜轴线之间的垂直距离,  $\alpha$  为 Y 振镜的偏转角. 双振镜按一定规律的偏振扫描形成了 XY 平面内的平面图案(树脂面片), 这种扫描方式决定了扫描角与 XY 坐标系下光点扫描轨迹的对应关系是非线性的<sup>[6]</sup>, 对任何一组二维振镜来讲, X 振镜与 Y 振镜的偏转都会带来对应平面坐标的变形误差.

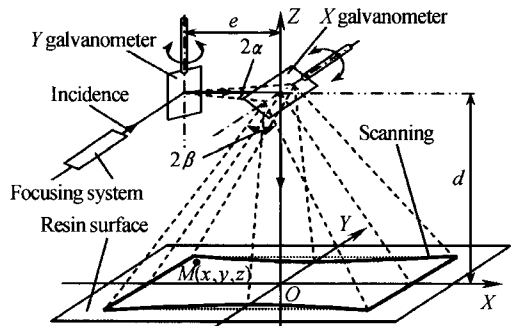


图 1 双振镜扫描原理图  
Fig. 1 Scanning principle of galvanometer system

图 1 中,对于像场内任意位置的点  $M(z$  坐标值为 0),其直角坐标与两振镜的扫描角之间的关系为

$$x = d \cdot \tan \beta \tag{1}$$

$$y = \left( e + \frac{d}{\cos \beta} \right) \tan \alpha \tag{2}$$

这里,光束的扫描角  $2\alpha, 2\beta$  与各自转动轴的偏转角呈倍数关系;根据式(1)、式(2)以及扫描角的范围,可以利用 Matlab 软件仿真绘出平面坐标内扫描的最大轮廓线,如图 2. 该轮廓线呈枕形,而期望的轮廓线是正方形或长方形,所以造成误差,这种误差被称为枕形误差.

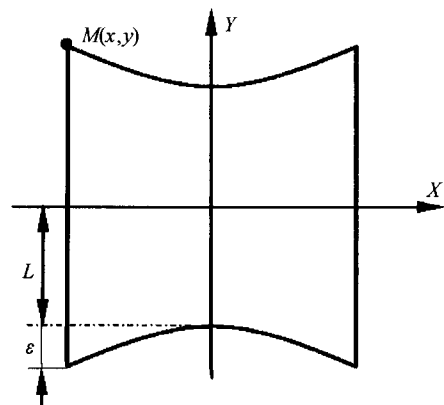


图 2 理论枕形畸变  
Fig. 2 Pillow shaped distortion in theory

\* 中国博士后基金资助项目和西安理工大学博士启动基金资助项目  
Tel: 029-82312311 Email: yudh@xaut.edu.cn  
收稿日期: 2004-11-26

枕形误差是原理误差,双振镜原理的扫描机构不可避免地会带来扫描成型中的系统误差.该系统误差可分解成两部分,即 X 方向误差和 Y 方向误差.Y 方向的误差仅与 Y 振镜有关,这部分误差是扫描角与扫描线长的非线性对应关系所造成的,不会造成扫描线的畸变,Y 方向上的扫描线长与 Y 振镜的扫描角  $\beta$  呈正切关系;而 X 方向的误差是由 X 振镜和 Y 振镜共同引起的,是枕形畸变的主要部分<sup>[7]</sup>.

由图 1 和图 2 可知枕形误差  $\epsilon$  的表达式

$$\epsilon = L \cdot (1/\cos \beta - 1) \tag{3}$$

式中:  $L$  是 X 轴上的最大单边扫描距离,  $L = (d + e) \cdot \tan \alpha$ , 代入式(3)得

$$\epsilon = (d + e) \cdot \tan \alpha (1/\cos \beta - 1) \tag{4}$$

根据泰勒级数展开式,取

$$\tan \alpha \approx \alpha + \alpha^3/3, 1/\cos \beta \approx 1 + \beta^2/2$$

得

$$\epsilon \approx (d + e) \cdot (\alpha + \frac{\alpha^3}{3}) \cdot \frac{\beta^2}{2} \approx \frac{(d + e)\alpha\beta^2}{2} \tag{5}$$

式中  $(d + e)$  是常量,在激光快速成型系统中,  $d \gg e$ , 所以在扫描区域一定时,振镜的最大扫描角基本由  $d$  值决定,  $d$  越大,最大扫描角越小.因此可得出结论:枕形畸变引起的误差受  $d$  值的影响,与二维振镜系统的 Y 振镜的扫描角  $\alpha$  成正比,与 X 振镜的扫描角  $\beta$  的平方成正比,当偏角最大时,误差  $\epsilon$  的值也达到最大,要减小误差  $\epsilon$ , 应尽可能加大  $d$  值.

根据理论公式,可以由软件计算出枕形误差  $\epsilon$ ,

$$\begin{aligned} x_2 &= -\cos \theta \sin 2\alpha \cdot [\cos (45^\circ + \beta)e - \sin (45^\circ + \beta) \cdot x_0 \tan \theta] / [\cos (45^\circ + \beta) \cos \theta \cos 2\alpha + \sin (45^\circ + \beta) \sin \theta] \\ y_2 &= \cos \theta \cos 2\alpha \cdot [\cos (45^\circ + \beta)e - \sin (45^\circ + \beta) \cdot x_0 \tan \theta] / [\cos (45^\circ + \beta) \cos \theta \cos 2\alpha + \sin (45^\circ + \beta) \sin \theta] - e = [-\cos \theta \cos 2\alpha \sin (45^\circ + \beta) \cdot x_0 \tan \theta - \sin (45^\circ + \beta) \sin \theta \cdot e] / \\ & \quad [\cos (45^\circ + \beta) \cos \theta \cos 2\alpha + \sin (45^\circ + \beta) \sin \theta] = -[\sin (45^\circ + \beta) \cdot \sin \theta (\cos 2\alpha \cdot x_0 + e)] / \\ & \quad [\cos (45^\circ + \beta) \cos \theta \cos 2\alpha + \sin (45^\circ + \beta) \sin \theta] \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} z_2 &= \sin \theta \cdot [\cos (45^\circ + \beta)e - \sin (45^\circ + \beta) \cdot x_0 \tan \theta] / [\cos (45^\circ + \beta) \cos \theta \cos 2\alpha + \sin (45^\circ + \beta) \sin \theta] + d + x_0 \tan \theta = [\sin \theta \cos (45^\circ + \beta)e + \cos (45^\circ + \beta) \cos \theta \cos 2\alpha \cdot x_0 \tan \theta] / \\ & \quad [\cos (45^\circ + \beta) \cos \theta \cos 2\alpha + \sin (45^\circ + \beta) \sin \theta] = [\sin \theta \cos (45^\circ + \beta) (e + x_0 \cos 2\alpha)] / \\ & \quad [\cos (45^\circ + \beta) \cos \theta \cos 2\alpha + \sin (45^\circ + \beta) \sin \theta] \end{aligned}$$

$$t = \frac{z_2}{\cos \theta \cos 2\alpha \cos 2\beta + \sin \theta \sin 2\beta} \tag{8}$$

扫描仿真图见图 3. 可以看出,整个图案在 X 轴方向发生了平移;原来与 Y 轴平行的两条直线边已经曲线化了,图形的顶点坐标不再对称.所以此时的枕形误差比理想情况下的枕形误差更复杂、更严重,校正起来也更加困难.另外,从设备本身特点及其装调而言,一方面,在装配工艺和设备调试方

并实时加以修正.目前,应用于激光快速成型设备的校正算法是基于这一理论枕形畸变公式得到的,这种算法对于理论枕形畸变的校正是行之有效的.

## 2 实际扫描误差

目前使用的校正软件主要侧重于对理想扫描情况下的枕形畸变从理论上进行校正,也就是说,这种校正必须满足:1)两振镜的轴线理想正交;2)激光束与 Y 振镜的轴线(或其延长线)垂直相交;3)经由 Y 振镜反射后的激光束时时与 X 振镜的轴线相交;4)每台激光快速成型设备的光程严格一致等.实际上这些条件是无法实现的,因而按式(5)进行校正的算法仅仅是理论上的校正,在实际应用中存在较大的局限性.

本文对实际入射激光束与 Y 振镜的轴线相交但不垂直,而是与理想的水平入射激光束呈一个微小的角度  $\theta$  的情况进行简要分析.

根据解析几何理论及光束反射定律的矢量表达式,可以求得该情况下扫描光束在 XOY 平面坐标系内的坐标解析值,其表达式为

$$\begin{aligned} x &= -\cos \theta \sin 2\alpha \cdot \frac{z_2}{\cos \theta \cos 2\alpha \cos 2\beta + \sin \theta \sin 2\beta} + x_2 \\ y &= \frac{(\cos \theta \cos 2\alpha \sin 2\beta - \sin \theta \cos 2\beta) \cdot z_2}{\cos \theta \cos 2\alpha \cos 2\beta + \sin \theta \sin 2\beta} t + y_2 \end{aligned} \tag{6}$$

$$z = 0$$

式中,变量  $x_2, y_2, z_2, t$  的表达式为

面,两振镜的枢轴夹角和间隙,以及光束的调整的不确定性等均属于随机误差,这种误差与枕形畸变相迭加,其结果导致了更严重的枕形失真,进而造成了实际畸变与理论畸变的差异.由于该差异无法用理论公式描述,所以理论算法难以对此进行修正.另一方面,由于设备本身的特点,使得扫描光程是一个

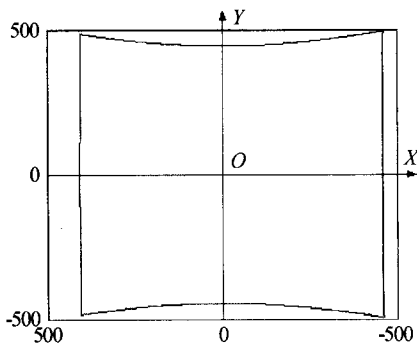


图3 实际情况扫描图形仿真

Fig. 3 Simulation of the scanning rectangle

变量, 如果用一个普通透镜聚焦激光束, 扫描时, 其焦点位于一个球面上, 造成了激光束的聚焦焦点与像场平面(XY 平面)相分离, 那么, 在平面扫描区域, 聚焦光斑的尺寸是变化的, 进而影响激光成型准确度.

可以从理论上对这种误差进行分析. 设 Y 振镜到像场中心的光程为  $S_1$ , 到像场内任意点 M 的光程为  $S_2$ , 那么, 根据图 1 和图 2 可得

$$S_1 = d + e \quad (9)$$

$$S_2 = \sqrt{(\sqrt{d^2 + x^2} + e)^2 + y^2} \quad (10)$$

二者的光程差为

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \sqrt{(\sqrt{d^2 + x^2} + e)^2 + y^2} - (d + e) \quad (11)$$

将式(1)和式(2)代入式(11), 得到

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \left(\frac{d}{\cos \beta} + e\right) \cdot \frac{1}{\cos \alpha} - (d + e) \quad (12)$$

根据泰勒级数展开式, 取

$$1/\cos \alpha \approx 1 + \alpha^2/2, 1/\cos \beta \approx 1 + \beta^2/2$$

得

$$\Delta S = S_2 - S_1 \approx \frac{1}{2}(\alpha^2 + \beta^2)d + \frac{1}{2}\alpha^2 \cdot e + \frac{\alpha^2 \beta^2}{4}d \quad (13)$$

光程差  $\Delta S$  即代表二维振镜系统的聚焦误差.

对于一般的激光快速成型设备,  $e$  约为 20 mm 左右,  $d$  约为 1000 mm 左右, 最大扫描角小于 0.3 rad, 所以根据式(13)可得结论: 振镜系统的聚焦误差主要取决于  $d$  值的大小及扫描角的平方, 当偏角最大时, 聚焦误差  $\Delta S$  的值也达到最大, 要减小误差  $\Delta S$ , 应尽可能加大  $d$  值, 使最大扫描角尽可能小.

在设备运行过程中, 一般最大聚焦误差  $\Delta S_{\max}$  可达几十毫米, 对成型质量有较大影响, 因而必须采用动态聚焦技术进行动态修正, 使激光束的聚焦焦点始终与像场平面重合. 然而动态聚焦又产生了新的光学畸变—桶形畸变问题, 这种桶形畸变与前面提及的枕形畸变及其它随机误差, 共同决定了像场平面的扫描轨迹误差, 所以仅根据枕形畸变的理论公式来校正这种综合误差, 当然是有局限性的.

### 3 枕形误差校正展望

在双振镜激光快速成型系统中, 无论是枕形畸变、桶形畸变, 还是其它各种误差, 最终都集中反映在像场平面上. 由于双振镜的结构特点以及动态聚焦系统的特点, 当规划扫描一方形时, 实际扫描轨迹并非一个标准方形, 而是存在枕形畸变、桶形畸变以及其它各种误差的方形, 所以对这种综合误差进行修正时, 必须获取激光成型装置的实际扫描数据, 根据实际扫描数据与理论数据的偏差, 制成校正表, 实现动态修正.

要获取这种偏差, 就需要一个基准, 该基准包括一系列理论点的数据. 校正时使实际扫描数据与理论数据逐点比较, 进而获得误差修正表, 这样, 就实现了对激光成型装置综合误差的有效修正. 这种校正思路克服了枕形畸变理论校正方法的不足, 可以实现对各种因素造成的综合误差进行精确校正, 并能获得满意的结果, 对于提高激光快速成型技术的制造准确度和成型质量具有重要意义.

#### 参考文献

- 李洪滨, 王晓鸥, 赵树民, 等. 激光自差探测实时成像及消除枕形误差的研究. *红外与激光工程*, 1998, **27**(2): 43~46
- Li H B, Wang X O, Zhao S M, et al. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, **27**(2): 43~46
- Duan Y G, Wang S Q, Tang Y P, et al. The effect of optical characteristics of photosensitive resin on the building of SL parts. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2): 250~254
- Xiang J Y, Wu Z, Zhang P, et al. The precision improvement of the scanner in optical scanning imaging system. *Optics & Laser Technology*, 1998, **30**(8): 109~112
- 胡晓冬, 赵万华, 许超, 等. 基于 CCD 的金属直接成型过程监控系统. *光子学报*, 2003, **32**(3): 375~377
- Hu X D, Zhao W H, Xu C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 375~377
- Liu Chao, Lawrence Y. Optimal process planning for laser forming of doubly curved shapes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, **126**(2): 1~9
- 刘金根. 一种基于现场定标的光电图像校正的方法. *光子学报*, 2004, **33**(6): 732~735
- Liu J G. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 732~735
- 赵毅, 卢秉恒. 振镜扫描系统的枕形畸变校正算法. *中国激光*, 2003, **30**(3): 216~218
- Zhao Y, Lu B H. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(3): 216~218

## Analysis for the Scanning Distortion in the Stereo-lithography

Yu Dianhong<sup>1,2</sup>, Li Lin<sup>1</sup>, Lu Bingheng<sup>2</sup>

1 School of Mechanical & Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048

2 School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Received date: 2004-11-26

**Abstract** The theoretical analysis of galvanometer scanning system widely using in the technology is described. It's shown that the relationship between the deflection angles of the 2-D galvanometer scanner and the corresponding X-Y coordinates value is nonlinear. A practical method is put forward in the research. Its basic principle is that a correction table is done through comparing the theoretical data with the corresponding data in laser scanning, then the distortion and the others errors are corrected according to a interpolating algorithm. The correction technology is suitable for all 2-D scanning system using two galvanometer scanner, and can correct any laser Rapid Prototyping equipment applying the principle of two galvanometer scanner.

**Keywords** Stereo-lithography; Galvanometer scanner; Pillow-shaped distortion; Correction



**Yu Dianhong** received his B. Sc. and M. Sc. degree from Shannxi Institute of Mechanical Engineering, China, in 1985 and 1988, respectively, and his Ph. D. degree from Xi'an University of Technology, China, in 2001. He is an Associate Professor in the School of Mechanical and Instrumental Engineering at Xi'an University of Technology. Currently, he is engaging the postdoctoral study in the School of Mechanical Engineering at Xi'an Jiaotong University. His current research interests include stereolithography, MEMS and photoelectric detection.