

文章编号: 0258-7025(2003)03-0216-03

振镜扫描系统的枕形畸变校正算法

赵毅¹, 卢秉恒²

(¹上海交通大学塑性成形系, 上海 200030; ²西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要 振镜扫描系统在快速成型系统中被广泛采用。由于扫描镜片的偏转角和平面坐标之间存在着本质的非线性映射关系, 如果用简单的线性对应关系来控制振镜的偏转, 则会产生枕形误差。分析了枕形畸变的产生机理, 并给出了软件校正算法。

关键词 激光技术; 快速成型; 振镜扫描

中图分类号 TN 249; TG 665 文献标识码 A

Pillow-shaped Distortion Correction Algorithm of Galvanometric Scanning System

ZHAO Yi¹, LU Bing-heng

¹Department of Plasticity Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China
²School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shanxi 710049, China

Abstract Galvanometric scanner is widely used in rapid prototyping systems. Due to the intrinsic nonlinear relationship between the deflection angles and the corresponding xy coordinates, the pillow-shaped field distortion would be introduced. In the paper, the aberration mechanism is analyzed and the correction algorithm to compensate for the field distortion is proposed.

Key words laser technique; rapid prototyping; galvanometric scanning

1 振镜扫描系统原理

振镜是一种优良的矢量扫描器件^[1]。它是一种特殊的摆动电机, 基本原理是通电线圈在磁场中产生力矩, 但与旋转电机不同, 其转子上通过机械纽簧或电子的方法加有复位力矩, 大小与转子偏离平衡位置的角度成正比, 当线圈通以一定的电流而转子发生偏转到一定的角度时, 电磁力矩与回复力矩大小相等, 故不能象普通电机一样旋转, 只能偏转, 偏转角与电流成正比, 与电流计一样, 故振镜又叫电流计扫描器(galvanometric scanner)。

扫描系统结构如图 1 所示。由计算机, xy 扫描头, 动态聚焦组件, 驱动器, 物镜等组成, 这种结构称为后物镜平场扫描系统。 xy 扫描镜分别沿 x 和 y 轴

扫描, 受计算机控制协调运动可以扫描出任何二维图形来。扫描原理如图 2 所示。

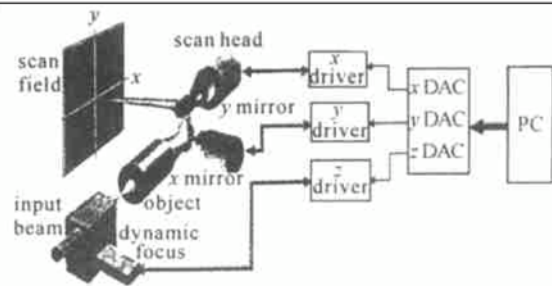


图 1 后物镜平场扫描系统

Fig. 1 Post-object flat field scanning system

设 x 轴和 y 轴反射镜之间的距离为 e , y 振镜的轴线到视场平面坐标原点的距离为 d , 当 x, y 轴的

收稿日期: 2001-11-30; 收到修改稿日期: 2002-01-24

基金项目: 国家“九五”攻关项目: 激光快速成型制造研究开发。

作者简介: 赵毅(1968—), 男, 湖南湘潭人, 博士, 上海交通大学塑性成型系副教授。研究方向为光机电一体化, 激光快速成型。E-mail: zhaoyibs@sina.com

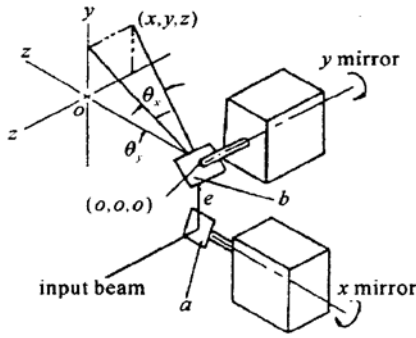


图 2 振镜扫描系统原理结构图

Fig. 2 Block diagram of galvanometric scanning system

光学偏转角分别为 θ_x 和 θ_y 时, 视场平面上相应光点坐标为 (x, y) , 且当 $x = y = 0$ 时, $\theta_x = \theta_y = 0$, 则

$$\begin{cases} y = d \tan \theta_y \\ x = \left[\sqrt{d^2 + y^2 + e} \right] \tan \theta_x \end{cases} \quad (1)$$

或

$$\begin{cases} \theta_y = \arctan \left[\frac{y}{d} \right] \\ \theta_x = \arctan \left[\frac{x}{\sqrt{d^2 + y^2 + e}} \right] \end{cases} \quad (2)$$

2 枕形畸变分析

激光扫描系统工作时, 实际上是通过控制 θ_x, θ_y 来实现 xoy 平面内二维图形的扫描的。由式(1)可知, 当 θ_x 变化, θ_y 不变时, 仅 x 发生变化; 而当 θ_x 不变(设为 θ_0), θ_y 变化时, x, y 都发生变化, 通过对式(1)进行变换得

$$(x/\tan \theta_0 - e^2) - y^2 = d^2 \quad (3)$$

式(3)描述的曲线是双曲线。由此可见, $x-y$ 双振镜的二维平场扫描在原理上存在着畸变。 $\theta_x \theta_y$ 平面到 xoy 平面的映射关系如图 3 所示。

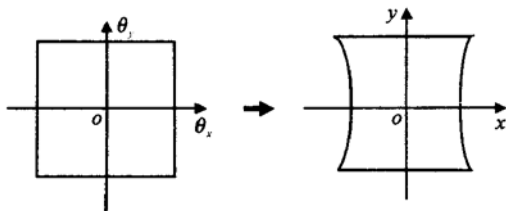


图 3 枕形畸变示意图

Fig. 3 "Pillow-shaped" field distortion

上述这种畸变, 光学上称为单轴枕形畸变^[2]。用双曲线的弦高来定义枕形误差 ε , 即当 θ_x 不变(θ_0), θ_y 从 0 变到 $-\theta_y$ 时, x 的变化值为

$$\varepsilon = x - x_0 = d \tan \theta_0 \left[\frac{1}{\cos \theta_y} - 1 \right] \quad (4)$$

从上式可看出, 当 d 一定时, 枕形误差与 θ_x 和 θ_y 有关, 它随 θ_x, θ_y 的增大而增大, 所以在扫描平面的中心附近枕形误差较小, 而边缘的畸变较大。设扫描角度范围为 $\pm 20^\circ$, 平面扫描范围为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$, 当 θ_x 和 θ_y 为 20° 时, 相对枕形误差(ε 与视场尺寸 500 mm 之比)约为 3%; 而当 θ_x 和 θ_y 降至 10° 时, 相对枕形误差降至约 0.36%, 此时, 扫描畸变用肉眼难以看出。

扫描系统的聚焦误差^[2]如图 2 所示, 以 y 轴反射镜的中心为光程计算起点, 则这点到视场平面上的任意点 $P(x, y)$ 的光程为

$$L = \sqrt{(\sqrt{d^2 + y^2 + e})^2 + x^2} \quad (5)$$

以到视场平面中心 o 的光程为基准, 则视场平面上 $P(x, y)$ 点的聚焦误差为

$$\Delta L = \sqrt{(\sqrt{d^2 + y^2 + e})^2 + x^2} - (e + d) \quad (6)$$

聚焦误差会引起光斑直径的变化。

3 枕形畸变的软件校正和扫描控制算法

由于在振镜的偏转角与平面坐标之间存在着非线性对应关系, 所以如果用简单的线性对应关系来控制振镜的偏转, 则扫描的形状会产生枕形畸变, 因而必须把指令的平面坐标值先转换成相应的角度, 也即进行校正。矢量扫描系统中, 扫描的基本单位是矢量段, 固然不能仅校正矢量的起点和端点, 中间的点也应进行校正, 若根据系统分辨率逐点进行校正, 如果采用离线进行, 计算量和数据量惊人; 如果实时在线校正的话, 则不能满足高速实时扫描的要求。

我们用查找表分段线性插值的方法来保证速度和精度要求。理论校正表由式(2)离散化并根据硬件电路参数计算得出。

3.1 原理校正表的生成

根据振镜原理, 两面扫描镜的光学偏转角与各自的控制电压成正比

$$\begin{cases} \theta_x = k_x V_x \\ \theta_y = k_y V_y \end{cases} \quad (7)$$

计算机进行控制时, V_x 和 V_y 是通过 16 位 DA 转换器得到的, V_x 和 V_y 从 -5 V 变到 $+5 \text{ V}$ 时, 相应的数字量理论值 D_x^T, D_y^T 从 0 变到 65535, 即

$$\begin{cases} D_{0x}^T = (V_x/10 + 0.5) \times 65535 \\ D_{0y}^T = (V_y/10 + 0.5) \times 65535 \end{cases} \quad (8)$$

综合式(2), (7), (8)得

$$\begin{cases} D_{0x}^T = f_1(x, y) = \\ \left[\frac{\arctan\left[\frac{x}{(\sqrt{d^2 + y^2 + e})} \right]}{10k_x} + 0.5 \right] \times 65535 \\ D_{0y}^T = f_2(y) = \\ \left[\frac{\arctan\left[\frac{y}{d} \right]}{10k_y} + 0.5 \right] \times 65535 \end{cases} \quad (9)$$

原理上 D_{0y}^T 只是 y 的函数, 而 D_{0x}^T 却是 x, y 的函数, D_{0x}^T, D_{0y}^T 均为整数。

把视场平面均匀分成 $(n - 1) \times (n - 1)$ 个方

格, 由(9)可计算出 $n \times n$ 个格线交点上的扫描器的数字控制量, 生成理论校正表格 $\text{Grid}x(i, j)$ 和 $\text{Grid}y(i, j)$ 。通过 64×64 的校正表, 直线性可达 0.0125%。

3.2 矢量段的校正与扫描控制算法

3.2.1 查表校正

对 P_0P_1 查表分段线性插值生成由一系列角度坐标微矢量段组成的折线 $\overline{P_0'P_1'}$, $\overline{P_1'P_2'}$, ..., $\overline{P_{N-1}'P_N'}$ 。如图 4 所示, 插值位置为直线 P_0P_1 与 x_i 或 y_i 格线的交点, 具体选 x_i 还是 y_i 由直线的斜率来决定, 如果斜率大于 1 则选 y_i 格线, 否则选 x_i 格线。两个端点一般不在格线上, 以线段起点 $P_0(x_s, y_s)$ 为例, 假设它位于图 5 所示的方格内。

设格线间隔为 g , 则有

$$\begin{cases} D\theta_{x_s} = \frac{d_x}{g} [\text{Grid}x(i + 1, j) - \text{Grid}x(i, j)] + \frac{d_y}{g} [\text{Grid}x(i, j + 1) - \text{Grid}x(i, j)] \\ D\theta_{y_s} = \frac{d_x}{g} [\text{Grid}y(i + 1, j) - \text{Grid}y(i, j)] + \frac{d_y}{g} [\text{Grid}y(i, j + 1) - \text{Grid}y(i, j)] \end{cases} \quad (10)$$

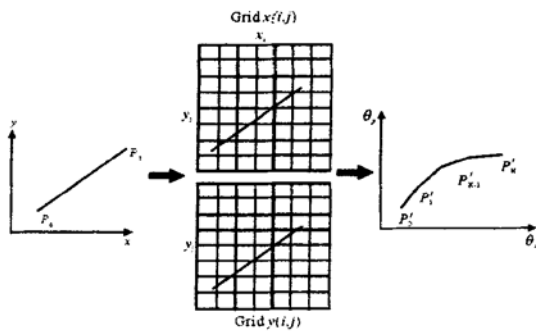


图 4 矢量查表校正示意图

Fig. 4 Principle of the look up table vector correction method

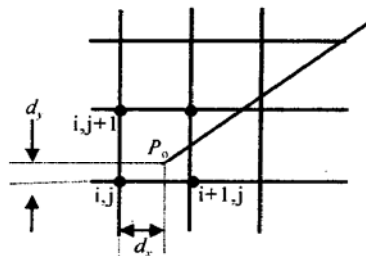


图 5 二维插值校正原理图

Fig. 5 Principle of the 2D interpolation correction

3.2.2 微矢量依次插补

用直线插补依次对各微矢量进行实时插补。采用软件插补来实现, 在微机的时钟中断程序中进行直线插补。通过设置适当的时间常数来控制中断周

期和扫描速度。

当每步进给量为 $10 \mu\text{m}$ 时, 可实现约 4 m/s 的扫描速度, 如果要进一步提高扫描速度, 可增加单步进给量。

通过 3.2.1 和 3.2.2 两步, 即完成了一条矢量的扫描过程。

聚焦误差通过控制动态聚焦镜来校正, 其基本原理与上面类似, 只是校正表格不同^[3], 且是单轴插补, 但动态聚焦镜的运动应与 x - y 振镜联动。

4 结 论

通过软件校正和插补算法实现了振镜的扫描控制, 在研制的激光快速成型机上成功应用^[4], 代替昂贵的进口扫描器, 大大降低了成型机的成本。

参 考 文 献

- 1 D. P. Jablonowski, J. Raamot. Beam deflection at high accuracy and precision [C]. *SPIE*, 1976, **84**: 69~ 76
- 2 Wang Ben, Shen Shuqun. Laser Scanning and Compact Disk Techniques [M]. Beijing: Beijing Posts and Telecommunications Publishing Company, 1990. 91~ 113 (in Chinese)
- 3 Jonathan S. Ehrmann. Optics for vector scanning [C]. *SPIE*, 1991, **1454**: 245~ 254
- 4 Zhao Yi. Research on the Control of Laser Scanning and the Stereolithography Process [D]. Doctoral dissertation, Xi'an Jiaotong Univ., 1997 (in Chinese)