

双振镜激光扫描加工误差精密校正

郝俊明, 邢 刚, 李江明

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要:主要讨论了用传统的补偿畸变的方法校正振镜二维扫描光学系统中图形畸变后, 为进一步提高精度, 利用图像处理技术, 进行二次闭环误差校正, 使在 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的加工平面内, 校正后的精度优于 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。

关键词:激光加工; 振镜扫描; 加工误差; 图像处理

中图分类号:TN209

文献标识码:A

Precise correction for dual-galvanometric laser scanning manufacturing

HAO Jun-ming, XING Gang, LI Jiang-ming

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: By using traditional method, dual-galvanometric laser scanning manufacturing errors is reduced, but for further precision improving, a new method, which use image processing is introduced. Through the second closed-loop error revision, the precision is better than $3\text{ }\mu\text{m}$ in the area of $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ working face.

Key words: laser manufacturing; galvanometric scanning; manufacturing errors; image processing

1 引 言

激光加工行业中的振镜式光束扫描技术是一种具有广泛应用潜力的激光束调制手段, 具有调制速度快(高达 8 kHz)、精度高(可达 $0.06\text{ }\mu\text{rad}$)及易于控制等特点, 所以在激光精密加工行业应用很广。但由于二维振镜在光路中前后布置的结构等特点, 不可避免地会引入误差。对于系统引入的误差, 同行在以往的研究中已经对各种误差进行了分析, 并进行了误差校正。我们在同行校正的基础上试着提供一种利用图像处理来进行误差的二次校正, 以达到精度的进一步提高。

2 振镜二维扫描光学系统中存在的误差及解决方法

在振镜二维激光扫描加工中图形几何畸变误差主要来自于映射关系非线性, 至于其他一些方面的影响, 在下面介绍的闭环控制中都可以补偿。这里就不再赘述。

针对由于映射非线性产生的图形畸变误差, 可

以采用硬件校正^[1]和软件校正^[2-3]。由于硬件校正成本高, 对于校正的参数不能适时地调整, 而软件校正经济, 还可以灵活调整参数, 所以通常采用的校正方法均为软件补偿校正, 具体可以分为增量补偿^[4]、校正表^[5]、最小二乘拟合^[6]等几种方法。这几种方法校正原理大同小异, 具体选择那种看编程者的习惯和爱好。

在进行了前面校正之后, 从理论上讲, 可以达到几微米的精度, 但实际使用过程中还有因机械装置控制器本身带来的误差, 及透镜的色差、球差、加工系统热漂移、定义点的变化和控制系统的噪声等一些影响, 校正后的误差一般在十几微米以上, 同时由于一般的加工系统都是开环的控制, 校正之后没有一个反馈的量再去修正, 所以误差难再减小。下面介绍一种闭环的控制。

作者简介: 郝俊明(1978-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为激光加工。E-mail: hjmlyy@tom.com

收稿日期: 2009-04-28; 修订日期: 2009-07-09

3 闭环修正系统

3.1 系统介绍

图1为光学系统和图像采集系统图。

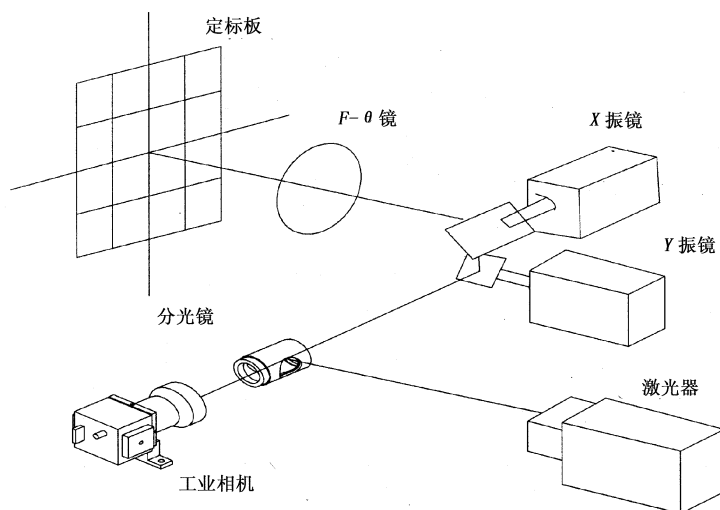


图1 光学系统和图像采集系统图

加在光路上的 CCD 工业摄像机采集工作面的图像,二维振镜按照规定的范围扫描工作面上的定标网格,在振镜扫描的时候,工业相机便采集到了不同振镜位置所对应的不同定标网格位置图像。利用图像处理程序分析采集到的网格位置图像,得到实际振镜扫描后对应的位置。对比实际

振镜扫描的位置和设定振镜扫描的位置,确定需要二次补偿的值,最终达到实际扫描位置和设定扫描位置一致为止。

3.2 工业相机和工业镜头的选取

工业镜头和 $F-\theta$ 镜组成了一个光学系统,这个光学系统的光路图如图2所示。

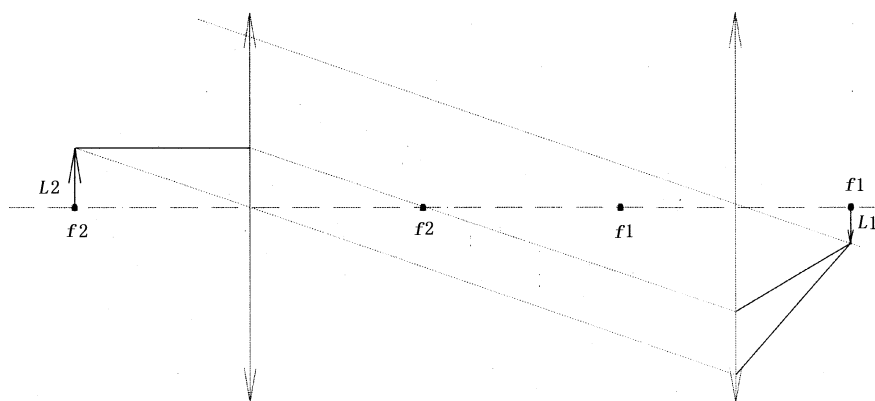


图2 工业镜头和 $F-\theta$ 镜组成的光学系统光路图

图中, L_2 为物体高度(物高), L_1 为在 CCD 上的成像高度(像高), f_2 为物体前面的 $F-\theta$ 镜焦距, f_1 为 CCD 前面的工业镜头焦距。由图可知:像高比物高为 $L_1/L_2 = f_1/f_2$ 。要使定位精度优于 $2\ \mu\text{m}$, 就要求做图像处理的图片像素点最小能表示的宽度不能大于 $2\ \mu\text{m}$ 。现在我们以像素点代表 $2\ \mu\text{m}$ (也就是物高)计算,选用 $1/3\ \text{in}$ ($1\ \text{in} = 2.54\ \text{cm}$) 的 200 万像素 (1600×1200) 的 CCD, 那么每个像元尺寸为 $3\ \mu\text{m}$

(也就是像高), 这样如果现在选用的 $F-\theta$ 镜焦距 f_2 为 $100\ \text{mm}$, 那么工业镜头的焦距 $f_1 = L_1 \times f_2 / L_2 = 3 \times 100 / 2 = 150\ \text{mm}$ 。

由此,只要选择合适的工业相机和合适的工业镜头就可以达到所要求的精度。

3.3 定标网格的选取

定标网格在相机视场内看到的图像如图3所示。

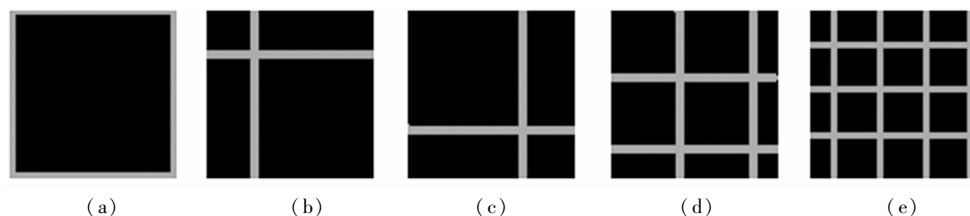


图3 定标网格选取视图

定标网格主要分为两部分,一个为定标网格间距,一个为定标网格线宽。定标网格间距主要满足两个问题,一个是确保在振镜动不同的位置时,工业相机的视场内总能找到一个定标的“+”,这样就不能选用图3(a)的情况。同时视场中也不是出现定标“+”越多越好,例如图3(d)、图3(e)的情况。因为要确保在没有二次校正前,误差不能超过一个定标网格宽度的一半,不然无法确定以哪个“+”来做定标点。例如用图4所示的实际的情况说明。



图4 定标“+”选择图

如果最大误差超过了定标网格宽度的一半,那么现在就不知道是选用图4中所标的1,2,3,4哪个点来定标,各点定标的值是不一样的,就会出现错误。

第二个需要考虑的是定标网格的线宽。由图4可以看出,一条定标直的网格线在放大的视场内不是绝对平直的一条线,这是由于光照、工业镜头景深、透镜的球差等几个原因综合作用,是不可避免的。为有效地识别和定位网格线组成的定标“+”,必须有一个条件是要“看到”(也就是说CCD能呈现出来)线宽,所以这条线宽不能太窄。但同时也不能太宽,太宽的话,用于识别的“+”由于所占的像素点太多,所以精度就会受影响。实际中取线宽为 $9\mu\text{m}$ 。

4 算法实现

我们使用VC去做图像处理。

4.1 构造直方图、二值化处理

通过构造直方图选择合适的二值化处理的阈

值,从图像中提取几何特征将像素进行划分,划分后只有两种像素。

通过图像可以看到,经过二值化处理之后,发现各条线不再均匀,也就是像素划分有形状上有歪曲,如图5所示。这种歪曲不能避免。原因:①噪声普遍存在;②光照不能绝对均匀;③CCD本身有误差。为了提高目标系统精度,采用几何对称和统计方法抵消随机误差。

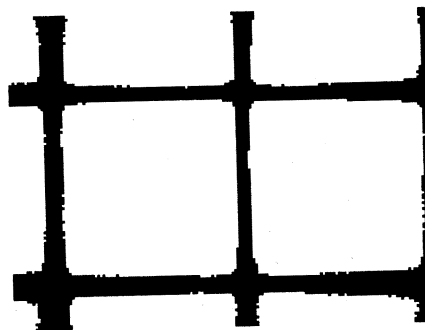


图5 经过二值化处理的图

4.2 “+”定位

我们使用图像处理的模式识别技术,识别“+”,从图中可以看到一共有四个“+”,具体要选用哪个“+”,需做一个判断,因为镜头景深的问题,在图像的中间部位,图像的光照和清晰度较强,图像质量好,所以选用靠近中间的“+”作为定位的标点。在选用到合适的“+”之后,使用求切线的方法,也就是在找纵向切线的时候,横向查找最后一个“黑”(像素值为0)的像素点,然后划一条纵向的切线,同样在黑线的另一端找到另一条纵向切线。这样找到两条切线之后,利用数学的均值,方差得到黑线的中线。同样的方法可以找到横向线的中线。这样“+”的位置就可以定位了。

4.3 误差修正算法

得到精确表示振镜动作情况的“+”位置点之后,补偿一定的值到振镜控制级。再看“+”位置是否和所要设计到达的位置一致。一致之后,得到补偿量 ΔA ,振镜动作另一个位置之后得到另一个补偿量 ΔB ,依次类推得到不同位置的补偿量,建立一个

查询表。这种也就是所谓的内插值法。得到这些补偿量之后,在两个相邻位置内的补偿量做线性处理得到。例如: A 点补偿量 ΔA , 和 A 点相邻的 B 点补偿量 ΔB , 则在 A, B 两点之间的 x 点的补偿量是 $\Delta A + (\Delta B - \Delta A) \times (x - A) / (B - A)$ 。把这些补偿量反馈加到振镜控制级即可。

5 试验结果

经过上面的初步校正和二次闭环校正之后,二维振镜的加工精度可以优于 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。在本系统中,用

16 位 DA 输出控制信号控制振镜动作,在所使用的工业镜头焦距 f_1 为 200 mm , $F - \theta$ 镜焦距 f_2 为 80 mm , CCD 像素元尺寸(像高 L_1)为 $3\text{ }\mu\text{m}$, 所以据公式 $L_1/L_2 = f_1/f_2$ 可以得到物高 $L_2 = L_1 \times f_2/f_1 = 3 \times 80/200 = 1.2\text{ }\mu\text{m}$, 也就是每个像素点代表实际中的 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 。

表 1 是实际应用当中所测到的部分实际数据和得到的补偿量。表中以 x 轴向左、 y 轴向下移动为负。

表 1 试验数据

移动距离,以 $X = ; Y =$ 表示 (单位: μm)	定位“+”像素点坐标位置,以 $x = , y =$ 表示	误差值(实际移动距离 - 设定移动距离),以 $\Delta h = , \Delta v =$ 表示 (单位: μm)	对应的实际移动距离,以 $H = , V =$ 表示 (单位: μm)	补偿量(16 位 DA 的输出量表示,横向用 HAD = , 纵向用 VDA = 表示)
$X = 0; Y = 0$	$x = 402, y = 200$	$\Delta h = 0, \Delta v = 0$	$H = 0, V = 0$	HAD = 0, VDA = 0
$X = 0; Y = 1000$	$x = 400, y = 200$	$\Delta h = -2.4, \Delta v = 0$	$H = -2.4, V = 1000$	HAD = 3, VDA = 0
$X = 0; Y = 2000$	$x = 385, y = 202$	$\Delta h = -20.4, \Delta v = 2.4$	$H = -20.4, V = 2002.4$	HAD = 25, VDA = -3
$X = 0; Y = 3000$	$x = 370, y = 205$	$\Delta h = -32.6, \Delta v = 6$	$H = -32.6, V = 3006$	HAD = 37, VDA = -9
$X = 0; Y = 4000$	$x = 349, y = 215$	$\Delta h = -63.6, \Delta v = 18$	$H = -63.6, V = 4018$	HAD = 72, VDA = -22
$X = 0; Y = 5000$	$x = 321, y = 225$	$\Delta h = -97.2, \Delta v = 30$	$H = -97.2, V = 5030$	HAD = 110, VDA = -39
$X = 0; Y = 6000$	$x = 300, y = 236$	$\Delta h = -122.4, \Delta v = 43$	$H = -122.4, V = 6043$	HAD = 150, VDA = -52
$X = 0; Y = 7000$	$x = 277, y = 246$	$\Delta h = -150, \Delta v = 55.2$	$H = -150, V = 7055.2$	HAD = 187, VDA = -69
$X = 1000; Y = 0$	$x = 401, y = 202$	$\Delta h = -1.2, \Delta v = 2.4$	$H = 998.8, V = 2.4$	HAD = 2, VDA = -3
$X = 2000; Y = 0$	$x = 400, y = 218$	$\Delta h = -2.4, \Delta v = 21.6$	$H = 1997.6, V = 21.6$	HAD = 3, VDA = -27
$X = 3000; Y = 0$	$x = 398, y = 236$	$\Delta h = -4.8, \Delta v = 43.2$	$H = 2995.2, V = 43.2$	HAD = 7, VDA = -53
$X = 4000; Y = 0$	$x = 396, y = 254$	$\Delta h = -7.2, \Delta v = 64.8$	$H = 3992.8, V = 64.8$	HAD = 11, VDA = -73
$X = 5000; Y = 0$	$x = 396, y = 273$	$\Delta h = -7.2, \Delta v = 87.6$	$H = 4992.8, V = 87.6$	HAD = 11, VDA = -95
$X = 6000; Y = 0$	$x = 395, y = 312$	$\Delta h = -8.4, \Delta v = 134.4$	$H = 5991.6, V = 134.4$	HAD = 13, VDA = -145
$X = 7000; Y = 0$	$x = 393, y = 332$	$\Delta h = -10.8, \Delta v = 158.4$	$H = 6989.2, V = 158.4$	HAD = 16, VDA = -193

6 总 结

通过试验数据可以看到,经过二次闭环校正之后可以大大地提高精度,同时可以分析到,在选用“+”定位时,由于定位起始点的不同,会引起补偿量的不同,给程序会带来麻烦。所以在选用定位起始点时,选用定标板的中心,这样参数就可以固定。

参考文献:

[1] 郭飞,胡兵,应花山,等. 双振镜扫描几何失真的硬件校正[J]. 激光技术,2003,27(4):337-338.

[2] 孙会来,林树忠. 双振镜激光扫描加工误差原因分析[J]. 激光与红外,2005,35(3):161-163.
[3] 朱林泉. 双振镜二维扫描系统的误差分析和校正技术[J]. 应用激光,2001,21(5):325-327.
[4] 虞孝舜. 双振镜扫描几何畸变的校正[J]. 激光与红外,1998,28(1):45-47.
[5] 赵毅,卢秉恒. 振镜扫描系统的枕形畸变校正算法[J]. 中国激光,2003,30(3):216-218.
[6] 万志,杜温锡. 振镜两维的扫描图形畸变校正和曝光量的补偿[J]. 光学·精密工程,2000,8(2):115-119.