

# 基于图像处理的激光束宽测量方法

王晓真 杨傲雷 王海宽 费敏锐

(上海大学机电工程与自动化学院 上海 200072)

**摘要:** 传统的激光束宽测量方法多采用光学仪器和衍射、干涉等方法,在精度和速度上都存在特定约束,而鲜有采用图像处理的方法对激光束宽检测。通过激光束积分模型获得相应的激光束宽度获取方法,并采用 Sobel 边缘提取高斯滤波获激光束光强特征分布函数,再由 Hough 拟合圆积分区间计算出激光束宽在  $x$  轴和  $y$  轴上的像素宽度。测试结果表明,这种结合了机器视觉的图像处理算法对激光束宽测量的数据实用可靠,测量效果相比于传统测量方法具有直观性和便捷性。

**关键词:** 激光束;高斯滤波;宽度测量

**中图分类号:** TP391; TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Laser beam width measurement method based on image processing

Wang Xiaozhen Yang Aolei Wang Haikuan Fei Minrui

(School of Electromechanical Engineering and Automation,  
Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Traditional laser beam width measurement methods usually adopt optical instruments with diffraction, interference and other methods, which are specific constraints in accuracy and speed. In contrast, there are rarely using image processing methods. The laser beam width acquisition method is obtained by laser beam integration model. The intensity distribution function of laser is obtained by Sobel operator and Gaussian filter, and the pixel width is calculated on the  $x$ -axis and  $y$ -axis by Hough fitting circle integration area. The experimental results show that the image processing algorithm is practical and reliable for measurement of laser beam width, and the measurement effect is intuitive and convenient compared with the traditional measurement methods.

**Keywords:** laser beam; Gaussian filter; width measurement

## 1 引言

通常激光束判定方法很多,包括套孔法、移动刀口法和移动狭缝法<sup>[1-3]</sup>。但是这几种方法通常所采用的光学仪器复杂,测量方法不灵活。而如果在激光束宽度的测量中采用视觉的方法,就可以直观灵活的获得激光束宽,同时引入图像处理的算法,为激光束建模,可以得到更准确的结果。

一直以来,激光束在激光器的制造,激光传感器及激光微细加工等方面都是重要的指标。而激光空域参数是最主要的指标,包括激光光束的宽度、发散角、强度分布、相位分布以及激光光束传输因子  $M^2$ <sup>[4-7]</sup>。而其中激光发散角、激光光束传输因子  $M^2$  等参数的获得,都需要激光束宽度<sup>[8-10]</sup>。所以获得激光束宽度尤为重要。

本文针对激光束沿垂直出射方向打到测量平面,通过工业相机拍摄其测试平面激光束图片,获得相应的激光束宽度信息,如图 1 所示。

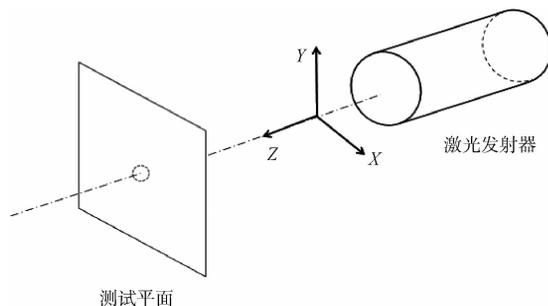


图 1 激光束出射模型

## 2 激光束宽度模型

### 2.1 激光束宽度定义

根据国际标准化组织(ISO)中采用  $4\sigma$  法定义的激光束宽度<sup>[7]</sup>,同时表征了激光束宽在  $x$ 、 $y$  轴上的光束宽度,即:

$$\begin{cases} d_x = 4\sigma_x \\ d_y = 4\sigma_y \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  为激光束光强分布函数  $I(x,y)$  在  $x$  轴和  $y$  轴方向上的二阶距。

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = \frac{\iint I(x,y)(x-\bar{x})^2 dx dy}{\iint I(x,y) dx dy} \\ \sigma_y^2 = \frac{\iint I(x,y)(y-\bar{y})^2 dx dy}{\iint I(x,y) dx dy} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  为激光束强度的一阶距，激光束的中心位置坐标可以用  $(\bar{x}, \bar{y})$  来表示：

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\iint xI(x,y) dx dy}{\iint I(x,y) dx dy} \\ \bar{y} = \frac{\iint yI(x,y) dx dy}{\iint I(x,y) dx dy} \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可以看出，激光束光强分布函数主要影响激光束宽，而在图像处理过程中，通过将彩色图像转换成灰度图像，用每个像素点灰度值作为该点光束的强度，得到了整个激光束在二维平面内的强度分布<sup>[7]</sup>。

### 2.2 激光束图像噪声干扰

在激光束拍摄过程中，由于工业相机的分辨率和拍摄工业环境光照等因素的干扰，总会在拍摄的图片中存在噪声的影响。包括随机白噪声和激光束光栅效应带来的无序噪点。此时的激光束光强分布函数可以认为是：

$$I(x,y) = I_0(x,y) + M(x,y) \quad (4)$$

式中：引入  $M(x,y)$  模拟噪声分布的函数，考虑该函数的引入对于激光束光强分布函数的影响<sup>[5]</sup>。可以看出，噪声分布函数会影响积分结果，出现激光中点的偏移和  $x$  轴、 $y$  轴长度的变动。而在图像处理中直观理解为噪声点的干扰图像灰度分布，对图像算法寻找的激光束中心和其覆盖区域造成干扰，导致寻找结果不准确。所以激光束图片中的噪声干扰是激光束宽检测前必须通过图像方法处理的过程。

考虑到噪声的种类为高频随机噪声<sup>[6]</sup>，且激光束是垂直出射轴打到测量平面，所以噪声会依据激光产生的特点呈高斯分布，故利用高斯滤波的方法可以对激光束图像做出很好的去噪效果。高频随机噪声为统计误差，同样可以通过多次测量取平均值。但考虑到快速性，本文采用高斯滤波方法去除噪声。

## 3 激光束宽测量的算法实现

### 3.1 激光束灰度值的提取

由于激光的颜色特性，可以采用 RGB 模型转化为灰度图，考虑到灰度值将作为激光束光强分布函数的参数，所以

明显的强光点(白色)像素值接近 255，相对较弱的投射点其像素点值越小，其表现的光强的信息更加明显。

如图 2 所示，可以看出激光光点的中部白色像素点更加密集，越向激光束边缘白色像素点越稀疏。可以看出激光束光强是接近高斯分布的函数，其光强点也是从圆心向边缘逐渐散落的。

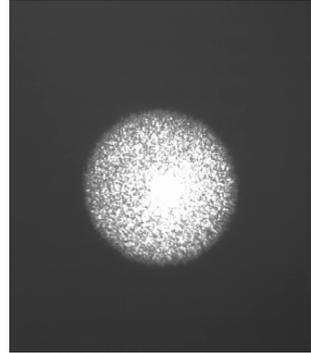


图 2 像素点光强分布灰度图

### 3.2 图像信息提取算法

获得灰度图像信息后，考虑到工业相机成像中本身产生噪声的影响，以及工业现场存在的干扰，采用高斯滤波去除掉高频随机噪点。

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

式中： $x,y$  就是当前点到对应点的距离，可以看出高斯滤波对高频信号通过像素邻域的加权均值来代替该点的像素值，而每一邻域像素点权值是随该点与中心点的距离单调增减的。

在本文中分别采用  $3 \times 3$  和  $5 \times 5$  的整数模板作为处理，其模板可以通过高斯函数窗口和方差计算得出，如图 3 所示。

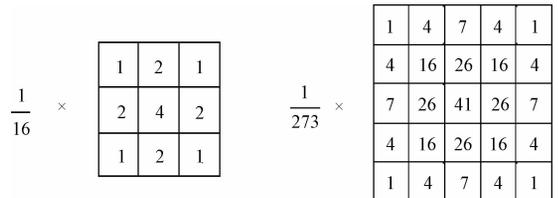


图 3 高斯滤波模板

### 3.3 确定积分区域

积分计算所涉及的灰度值点需要一个范围才能准确得到激光束宽度像素点，如果选取全图的积分难免有无关背景点影响结果，不仅产生噪点干扰，还有可能本身不是激光束可能发散的区域点也进入计算，影像测量结果<sup>[11-12]</sup>。

本文采用 Sobel 算子边缘检测激光束边缘，在利用 Hough 变换拟合圆，选取圆半径的 1.25 倍区域作为积分区间。Sobel 算子如图 4 所示。

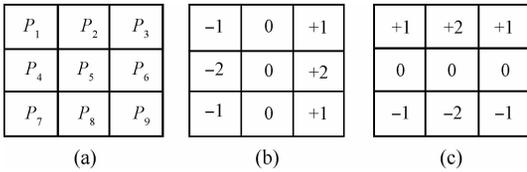


图4 (a)Sobel邻域窗口;(b)X方向;(c)Y方向

根据像素点的8邻域,确定当前像素点的值,采用离散性差分算子,用来运算图像光强度函数的灰度值近似值。

$$|G| = |(P_1 + 2 \times P_2 + P_3) - (P_7 + 2 \times P_8 + P_9)| + |(P_3 + 2 \times P_6 + P_9) - (P_1 + 2 \times P_4 + P_7)| \quad (6)$$

再通过随机 Hough 变换拟合圆,通过 Sobel 获得的像素点进行坐标变换,如下式:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + r \cos\theta \\ y &= y_0 + r \sin\theta \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $x, y$  为原始坐标,转换为极坐标后圆中心点像素点为  $(x_0, y_0)$ 。

其算法原理是在知道图像上像素点前提下,通过旋转  $360^\circ$  扫描,通过一系列的点累加,坐标值出现次数最多的点必定是圆中心点处,该点坐标就确定为圆心坐标,从而确定圆的位置。如图5所示,积分区间确定在拟合圆半径1.25倍的大圆范围内,积分区间选择圆形也是基于高斯分布和激光束模型都呈圆形,使积分的  $x$  方向和  $y$  方向结果不会因为积分区间造成误差。

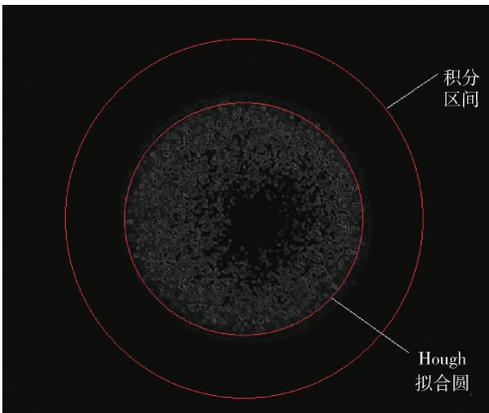


图5 确定积分区间

#### 4 实验与方法对比

针对上述实现算法,采用软件平台对激光束在测量平面图像进行处理。得到在灰度图像中激光束一系列像素的灰度值分布如图6所示。

由图6看出激光束在测量平面内的像素点分布有明显的高低,体现出该像素点在其位置的灰度值大小,即在激光束光强分布函数中的权重。与图2比较可以看出,大量白色像素点集中在中部,即图6中800~950分布位置呈现接近水平直线。而远离激光束中心向边缘的像素点呈现灰白

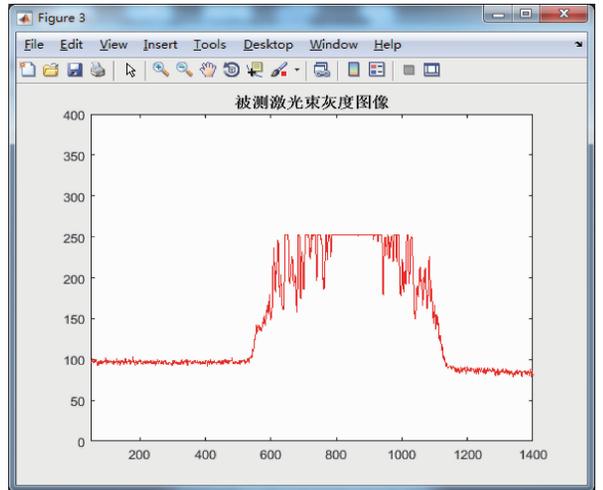


图6 被测激光束灰度图一系列像素分布

交错,在图6中明显看出凹陷部分随着距离中心点的距离加大而逐渐增多加深。但是还有一些距离中心较近的位置存在灰度值突变的情况,且非激光束的背景区域存在大量的灰度值波动,说明图像背景存在噪声,需要滤除相应的噪点。

在经过高斯滤波后得到的一系列灰度像素值分布如图7所示,激光束以外区域的图像背景灰度值波动明显平滑,说明高斯滤波将部分随机噪声有效滤除,同时激光束内部灰度值的波动有所平缓,同时保留了有效的边缘信息,对激光束宽度的测量未产生更多干扰。图8被测激光束三维强度图可以更直观的看出其灰度值分布。

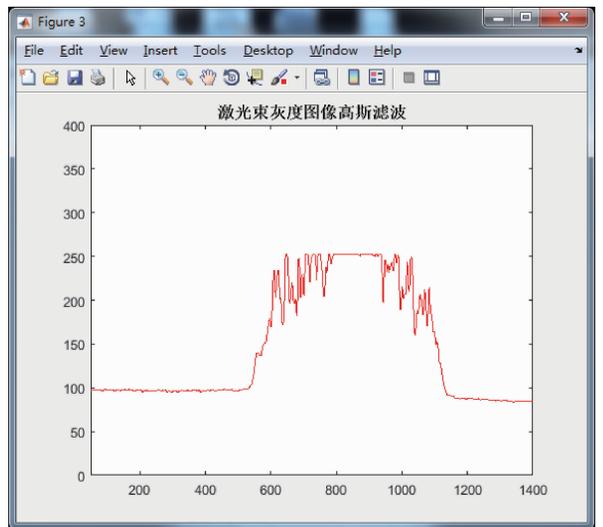


图7 被测激光束高斯滤波

相比于传统狭缝扫描法和双狭缝扫描法测量方法<sup>[8]</sup>,需要狭缝在微米级别(5~25  $\mu\text{m}$ ),且精度大多依赖于 A/D 转换器和采集过程中的扫描频率(2~18 Hz)。文献中对狭缝扫描得到的参数模型还原成 3D 图像也出现了严重失

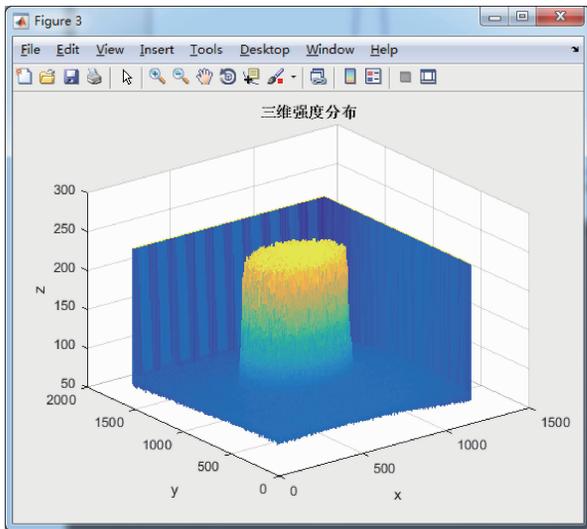


图 8 被测激光束三维强度分布

真,在实验条件下得到的结果存在误差,都限制了传统光学方法对激光束宽度的测量。而本文采用的机器视觉图像处理方法在选定工业相机参数和环境的情况下,利用一次拍摄获得的图像就可以获得相应结果,相比传统方法测量更便捷。同时激光颜色不同导致传统方法需要用物理公式换算波长频率,没有一般化的处理方法,而视觉更加直观的从图像角度出发,通过色度通道转换直接测量,无需繁琐的光学公式计算。

表 1 多次测量的激光束宽度 (像素点)

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8
$d_x$	574	570	571	576	577	574	574	568
$d_y$	567	565	564	562	560	556	565	564

本实验采用 Visual Studio 2012 平台,通过 C# 实现算法,相机采用 300 万彩色工业相机。多次测量得出的激光束在  $x$  轴和  $y$  轴方向上的像素点数如表 1 所示。

## 5 结 论

本文设计并提出了一种基于图像处理的激光束宽度测量方法。改变了传统激光束依靠光学方法,并引入机器视觉算法的方式获取激光束图像的信息,获得激光束在  $x$  轴和  $y$  轴方向上的像素点宽度,再通过相机标定方法确定真实宽度。方法切实可行且获得实验数据与测量结果相符。

## 参考文献

- [1] 李蕾,臧景峰. 双狭缝扫描法测量激光光束质量[J]. 激光技术, 2015, 39(6): 845-849.
- [2] 黄代政,陈海清,向晓燕,等. 采用 CCD 成像装置测量激光引信发射激光束束宽的方法研究[J]. 航天控制, 2009, 27(2):96-99.
- [3] WANG Y, WANG Q. Optimized laser beam widths meter calibration system: precisely positioning of detector measurement plane [C]. International Conference on Optical Instruments and Technology (OIT2013), International Society for Optics and Photonics, 2013:90461F-90461F-6.
- [4] 谭凯,程效军. 双阈值法地面激光点云强度图像边缘提取[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2015, 43(9): 1425-1431.
- [5] 李洁. 激光光斑能量分布及中心定位的分析与研究[D]. 太原:中北大学, 2015.
- [6] 张小刚,唐美玲,陈华,等. 一种结合双区域滤波和图像融合的单幅图像去雾算法[J]. 自动化学报, 2014, 40(8): 1733-1739.
- [7] ISO, ISO11146-1. Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios-part1: Stigmatic and simple astigmatic beams[S]. 2004.
- [8] 李蕾,臧景峰. 双狭缝扫描法测量激光光束质量[J]. 激光技术, 2015, 39(6):845-849.
- [9] 于永爱,张玲玲,唐前进,等. 激光束质量实时测量技术[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 255-258.
- [10] 赵雁,王志乾,耿天文. 激光光斑边缘提取算法应用研究[J]. 电子测量技术, 2011, 34(1):55-58.
- [11] 陈健,郑绍华,余轮,等. 基于方向的多阈值自适应中值滤波改进算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(2):156-161.
- [12] 宋晓宇,袁帅,郭寒冰,等. 基于自适应阈值区间的广义 Hough 变换图形识别算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5):1109-1117.

## 作者简介

王晓真,1992 年出生,工学硕士,主要研究方向为机器视觉算法研究。

E-mail:wangxiaozhen\_shu@163.com