

文章编号: 0253-2239(2010)02-0451-05

# 散射成像法测量激光强度分布中的光斑畸变校正

庞 森<sup>1,2</sup> 袁学文<sup>1</sup> 高学燕<sup>1</sup> 严高师<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; <sup>2</sup> 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘要** 在利用散射成像法测量激光强度分布中, CCD 像面与散射屏平面存在较大角度时, 光斑形状和强度分布都会产生严重畸变, 给强度分布测量带来较大影响。分析了畸变产生的原因, 给出了畸变坐标和理想坐标的数学模型, 提出一种结合 CCD 像素合并的网格法来校正这种畸变。“网格法”利用自制标准网格成像, 通过识别网格像边界来确定标准网格和畸变网格的对应关系, 利用此对应关系在输出图像时恢复光斑; 利用均匀光源成像来校正系统光强分布畸变。结果表明, 该方法能够较好地校正光斑的形状畸变; 能够实时恢复光斑的真实光强分布, 单元强度畸变恢复误差小于 1%。该校正方法在激光强度分布散射成像测量中非常实用。

**关键词** 光学测量; 畸变校正; 网格法; 激光强度分布; 散射成像; 漫反射

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0451

## Spot Distortion Calibration in Measurement of Laser Intensity Distribution Based on Imaging by Scattering

Pang Miao<sup>1,2</sup> Yuan Xuewen<sup>1</sup> Gao Xueyan<sup>1</sup> Yan Gaoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Applied electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China  
<sup>2</sup> School of Optoelectric Information, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

**Abstract** The tilt between CCD and diffusion screen will result in the spot geometry and intensity distortion, which will worsen the measurement result of spot distribution. The reason for distortion is analyzed, and the position relation between distorted grids and ideal grids is established by polynomial model. A grid method of rectifying distortion based on uniting pixels is presented. The distorted image of the self-designed and fabricated “standard grid target board” corresponds the standard grid through distinguishing from the borders of the grids. The corresponding relation can help to recover the spot geometry. It can rectify intensity distortion through the image of uniform light. Experiments prove that the means can not only calibrate the spot geometry but also rectify intensity distortion. The calibrating precision is within 1%. The method is very practical in measuring laser intensity distribution.

**Key words** optical measurement; distortion calibration; grid method; laser intensity distribution; imaging by scattering; diffuse reflection

## 1 引 言

在激光强度分布和功率能量测量中, 散射成像法由于具有分辨率高、设备简单与成本低等优点而得到广泛应用。胡渝等<sup>[1]</sup>基于漫反射方法建立了一套激光二维光强分布实时测量系统, 用以研究大气随机信道对激光通信的影响; 田海雷等<sup>[2]</sup>利用漫反

射成像法设计了一套激光远场功率密度测试系统, 用于测量激光远场功率密度; 美国 HAFB 空军基地<sup>[3]</sup>采用漫反射方法测量激光指示器的远场光束扩展和漂移; 叶征宇<sup>[4]</sup>、陆耀东等<sup>[5]</sup>利用漫反射成像法来进行激光参数测量。漫反射成像中, 由于入射光一般垂直散射屏, 因而测量中 CCD 光敏面与散射屏

收稿日期: 2009-04-01; 收到修改稿日期: 2009-04-30

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 庞 森(1977—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事激光参数诊断方面的研究。E-mail: pangmiao@sina.com

导师简介: 高学燕(1972—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事激光参数诊断方面的研究。E-mail: gao\_xueyan@sina.com

平面会有一夹角,如果夹角较小,可以忽略光斑的形状畸变。但在某些应用场合中,此夹角很大(如  $30^\circ$  甚至更大),此时成像有严重的形状畸变,必须校正。同时,无论 CCD 光敏面与散射屏平面是零夹角或是一大夹角,像元的光强随都是视场角变化的<sup>[6,7]</sup>,为了得到准确的激光强度分布,必须对强度畸变也进行校正。余俊等<sup>[8]</sup>提出“一靶测试法”,该方法能够较好地校正光斑的形状畸变,但未对光强畸变做校正,本文提出一种“网格法”,它能够同时校正光斑的形状畸变和强度畸变。

## 2 畸变分析

### 2.1 形状畸变

根据相机成像原理,一个不垂直于光轴的平面经过镜头成的像还是一个不垂直于光轴的平面,但它只能在垂直于光轴的 CCD 光敏面上进行光电转换,因而造成了图像失真,如图 1 所示。

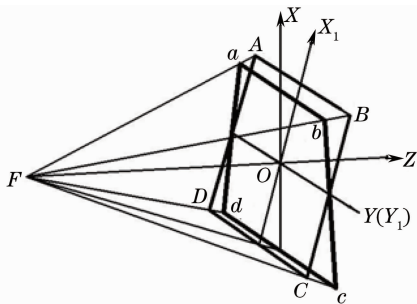


图 1 倾斜实像在 CCD 上成像示意图

Fig. 1 Sketch of oblique real image on CCD

不考虑相机镜头的非线性畸变,倾斜的矩形目标成像后形成的实像  $ABCD$ (设其坐标系为  $X_1OY_1$ ) 也是一个矩形,但只能在位于垂直于光轴  $OZ$  的平面  $XOY$ (像面) 上形成四边形图像  $abcd$ (由于相机有一定的焦深,图像  $abcd$  仍然可以是清晰的)。由于四边形  $abcd$  是矩形  $ABCD$  关于点(镜头的光学中心)在平面  $XOY$  上的中心投影,因而四边形  $abcd$  已不是一个矩形。上述方式也可以这样理解,当 CCD 光敏面与物平面有较大角度时,由于物平面上各点物距不同,从而导致对应像点的放大率不一致,物距越远,放大率越小,所以成像呈现出压缩变形的趋势,如图 2 所示。

图 2 是 CCD 光敏面与物平面在两个方向上都有较大角度时成像的情况,当原物为一个矩形网格时,其像素点的分布如图 2(a) 所示,在所成像图 2(b) 中,对应的像素点随着畸变的情况改变其坐标位置,在两个方向上都发生了位移,从而产生了畸

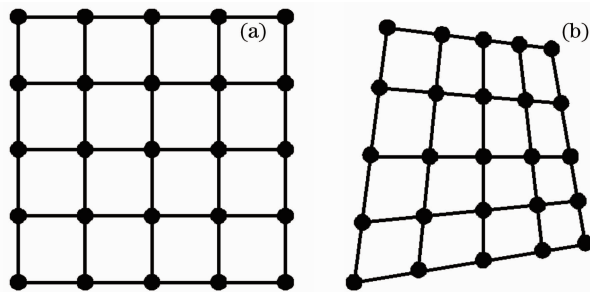


图 2 倾斜畸变示意图。(a) 标准网格;(b) 畸变网格

Fig. 2 Sketch of oblique distortion. (a) Ideal grid; (b) distorted grid

变的图象。

在几何畸变图像校正中常用一幅基准图像去校正畸变图像,设基准图像坐标为  $(x, y)$ ,畸变图像坐标为  $(u, v)$ ,则有如下的二维多项式数学模型为<sup>[9]</sup>

$$\begin{aligned} u &= F_u(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} a_{ij} x^i y^j, \\ v &= F_v(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} b_{ij} x^i y^j, \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $N$  为多项式次数,由畸变的具体情况来确定。 $a_{ij}$  和  $b_{ij}$  为各项系数,图像畸变校正的思想是通过一些已知的正确像素点和畸变点间的对应关系,拟合出  $a_{ij}$  和  $b_{ij}$ 。存在非线性畸变时, $N$  可能达到 3 次甚至 4, 5 次,一般来说,次数越高,校准精度越高,但计算量也越大。(1) 式可简化为如下的双线性方程:

$$\begin{aligned} u &= F_u(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy, \\ v &= F_v(x, y) = b_{00} + b_{10}x + b_{01}y + b_{11}xy. \end{aligned} \quad (2)$$

将 4 个有代表性的点畸变坐标  $(u, v)$  与其在基准图像中对应的坐标  $(x, y)$  分别代入(2)式,解方程组得出  $a_{i,j}$  和  $b_{i,j}$  的值,作为复原其他畸变点的变换基础。这样,基准图像和畸变图像中像素坐标便建立了一一对应的关系。

### 2.2 强度畸变

CCD 像面的照度与  $\cos^4 \omega$  ( $\omega$  为视场角) 成正比关系,当正入射视场角为  $20^\circ$  时,像元边缘和中心强度差别达到 22%<sup>[6,7,10]</sup>,镜头渐晕、杂光和透射率等都会影响像面照度。如果 CCD 像面与物平面有较大角度时,像面的光强分布情况更复杂,与入射光相比有很大畸变,因此为了得到准确的激光强度分布,必须进行强度校准。

## 3 网格法

网格法就是把散射屏和 CCD 像敏面划分成若干单元网格来校正光斑畸变的方法。从前面的畸变分析中知道,矩形网格物在像中是呈四边形,物点与

像点是一一对应的,因而,可以将物面划分成若干网格,在像面的网格与物网格是一一对应的。

复畸变光斑的形状;二是光斑强度畸变校准,以恢复入射光的真实光强分布。校正流程如图 3 所示。

整个过程主要分两步,一是光斑形状校正,以恢

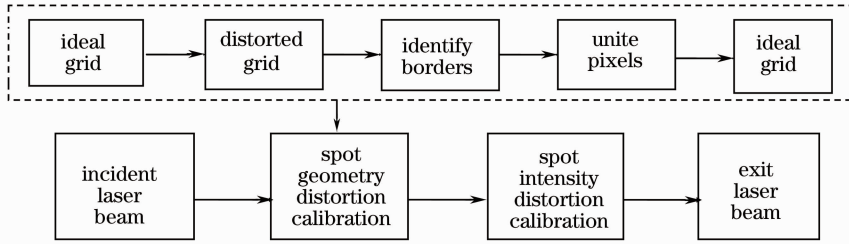


图 3 光斑校正流程

Fig. 3 Block diagram of spot calibration

### 3.1 形状畸变校正

形状畸变校正的核心是建立物像单元网格的映射关系,合并像素。根据测量分辨率的要求,将散射屏划分成若干标准正方形网格或在屏表面贴上绘有标准正方形网格的白纸,将标准物网格成像,像网格是变形的四边形,将在同一像网格内的所有 CCD 像元合并成一个新的单元,存入数据处理软件,此单元的像素与标准物网格的理想像网格(输出网格)相对

应。当入射光照射到某一标准物网格时,所成的像网格虽有变形,但所有标准网格内的光强信息都保存在对应的畸变像网格中,将这些像元的光强值赋给输出图像的对应网格,这样就完成了一个单元的畸变校正。输出图像时,建立与标准物网格一样的网格图,使物标准网格-像网格-输出网格一一对应,这样可以确保输出光斑与入射光斑的完全一致性。图 4 是上述方法的示意图。

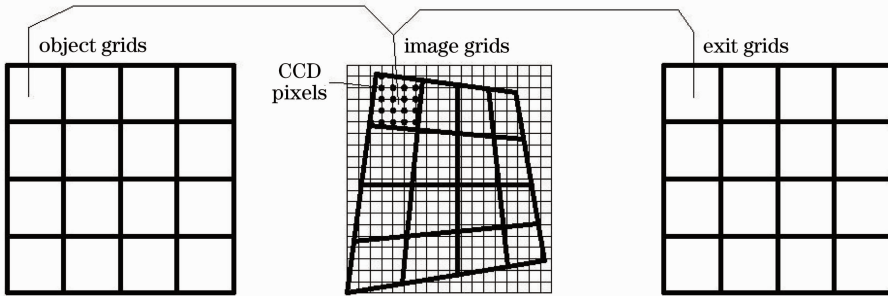


图 4 网格法校正畸变示意图

Fig. 4 Sketch of "grid method" for distortion calibration

像素合并的关键是要准确合并标准网格所对应的像网格内的像元,如果错误合并,将得不到正确的光强分布图,在合并中采用域值法识别网格边界时,将边界内的像元合并成一个新的单元。与传统图像校正的方法相比,本方法不需要计算每个单元对应像面的确切位置,少了大量繁冗的计算,便于实时显示光斑。

### 3.2 强度畸变校准

在光斑形状校正中,输出光强分布与激光进入 CCD 时具有一致性,当系统光路布局确定后,所带来的光强分布畸变情况就固定了,因此,可以用均匀光源(如太阳光等)正入射散射屏来进行强度畸变校正,原理图如图 5 所示。

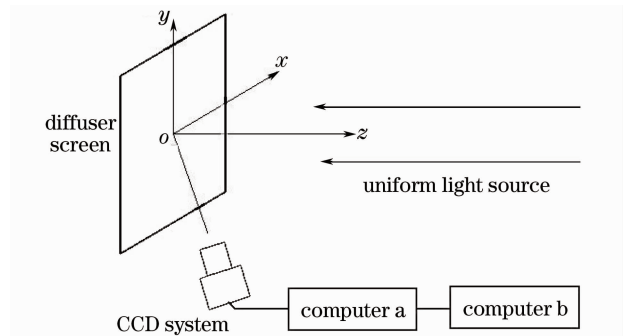


图 5 强度畸变校正原理框图

Fig. 5 Sketch of intensity distortion calibration

图 5 中,散射屏为专门定做的白色漫反射屏,用于对入射光斑进行漫反射;CCD 系统包括 CCD、镜

头、滤光片、衰减片等,用于对入射光成像,CCD 系统与散射屏的角度一般不大于 60°,调整好 CCD 摄像系统,使其对散射屏各部分清晰聚焦;入射均匀光

源尺寸要大于散射屏的有效口径;计算机 a 接受 CCD 系统采集到的光斑灰度数据,对光斑进行形状畸变校正并显示畸变光斑图像;计算机 b 接受计算机 a 处理后的光强数据,对光斑进行强度畸变校正,强度校正过程如下:

CCD 采集均匀光斑在散射屏上的像,计算机 b 得到散射屏上每个单元的响应值  $i_m$ ,在没有光强畸变的情况下,各单元的值应该是相等的。因此,求出所有单元响应值的平均值  $\overline{i_m}$ ,利用

$$k_m = \overline{i_m} / i_m, \quad (3)$$

得到每个单元的光强校准系数  $k_m$ ,将其存入计算机 b 的数据处理软件中,当入射光照射到某单元时,便调入相应单元的系数与其光强值相乘,从而实时再现入射光斑的真实光强分布。

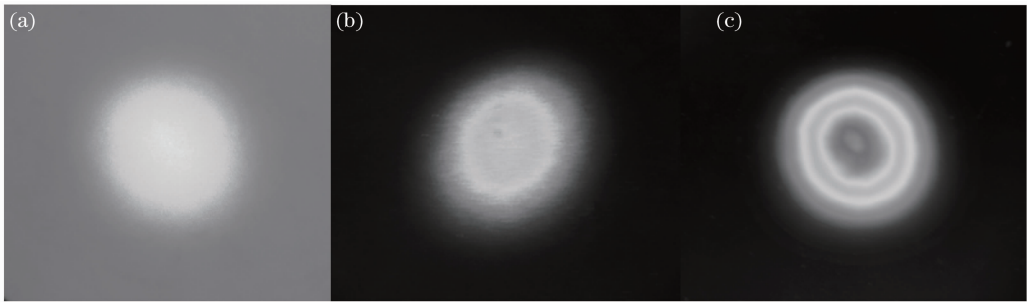


图 6 形状畸变校正前后对比。(a)入射光斑;(b)畸变光斑;(c)校正后光斑

Fig. 6 Results of geometry distortion calibration. (a) Incident spot; (b) distorted spot; (c) calibrated spot

表 1 是利用均匀光成像,校正前像面光强转化为光电流的数字量(ADU)的非均匀性达 10%,峰值强度与平均强度差别达 22.5%,校正后,再对均匀光成像,此时,像面非均匀性为 0.5%,峰值强度与平均强度差别甚微,为 0.8%。可见,强度畸变校正效果理想。

表 1 强度畸变校正前后对比

Table 1 Results of intensity distortion calibration

	Before calibration	After calibration
Ununiformity / %	10	0.5
Peak ADU	2450	2025
Average ADU	2000	2009

## 5 结 论

通过试验验证,“网格法”能够使光斑的形状畸变和强度畸变同时得到较好的校正,利用此方法,由于 CCD 与物面角度没有限制,因此可以将散射屏和 CCD 摄像系统集成于一体,减小测量设备体积,便于各种场合使用;同时强度校正实现了准确定量测量激光光斑的强度分布,进而可以得到光斑质心、抖

## 4 试验结果

利用上面的“网格法”,通过搭建的试验装置(如图 5 所示)进行了验证试验。试验中,确保散射屏和 CCD 系统相对位置与形状畸变和强度畸变校正时的相对位置保持不变。

图 6(a)是相机拍摄的激光(直径约  $\phi 100$  mm)在散射屏上的像;图 6(b)是畸变光斑图像,可以看出,光斑存在严重的形状畸变;通过本方法校正后,输出光斑[图 6(c)]与入射光斑基本一致,右图中的环是经过处理过的等强度线(在输出图像中,为了便于观察,使用伪彩色来表示光强,不同的颜色代表不同的强度等级,转换为黑白图时不同颜色的区域便构成了灰度不等的环带)。

动和半径等参数,改进了以往直接使用 CCD 像面的照度分布来分析光斑强度分布的不科学的缺点。因而在激光强度分布测量应用场合如激光测距、激光大气传输和光束质量测量等领域具有重要意义。

## 参 考 文 献

- Hu Yu, Xu Changwu. The realtime two-dimensional testing system for the far laser beam through atmosphere[J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(6): 330~331  
胡 渝, 许昌武. 激光通过大气随机信道远场二维强度分布实时测试系统[J]. *激光与红外*, 2001, **31**(6): 330~331
- Tian Hailei, Wang Yuefeng, Zhang Wei. Design of laser far field power density test system [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2007, **22**(6): 24~26  
田海雷, 汪岳峰, 张 伟等. 激光远场功率密度测试系统的设计[J]. *光电技术应用*, 2007, **22**(6): 24~26
- R. P. Fernando, R. W. Wendell, B. C. Samuel *et al.*. Helicopter-mounted laser beam characterization test 2[R]. ARL-TR-825, 1996
- Ye Zhengyu, Song Haiping, Wang Long *et al.*. Laser parameter measurement mechanism[P]. CN: 101101199. 2008-01-09  
叶征宇, 宋海平, 王 龙等. 激光参数测量装置[P]. 中国: 101101199. 2008-01-09
- Lu Yaodong, Wang Wu, Shi Hongmin. A measurement system and method of laser far field energy/power[P]. CN: 1621787. 2005-06-01  
陆耀东, 王 吴, 史红民. 一种远场激光能量/功率的测量系统

- 及其测量方法[P]. 中国:1621787. 2005-06-01
- 6 Tian Qian, Liao Yanbiao, Sun Liqun. Engineering Optics[M]. Bei Jing: Tsinghua University Press. 2006, 92~93
- 田 芊, 廖延彪, 孙利群. 工程光学[M]. 北京:清华大学出版社,2006, 92~93
- 7 Qu Enshi, Zhang Hengjin, Cao Jianzhong *et al.*. Discussion of illuminance formula in optical design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1364~1368
- 屈恩世, 张恒金, 曹剑中等. 对光学设计中照度计算公式的讨论[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1364~1368
- 8 Yu Jun, Lin Jiaming, Yang Jianyu *et al.*. Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1440~1443
- 余 俊, 林家明, 杨建宇等. 基于新型靶的 CCD 摄像系统畸变测量与校正[J]. 光学学报, 2007, **27**(8): 1440~1443
- 9 Liu Wenyao. Digital Image Collect and Dispose [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. 208~209
- 刘文耀. 数字图像采集与处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2007. 208~209
- 10 Zhang Baodong, Qin Shiqiao, Jia Hongjin *et al.*. Measurement model and uncertainty analysis of pulsed laser far field energy density based on CCD imaging [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(9): 1417~1420
- 张宝东, 秦石乔, 贾宏进等. 成像法测量脉冲激光远场能量密度的模型及不确定度分析[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(9): 1417~1420