

文章编号 1004-924X(2017)08-2244-08

分块非线性加权在车灯检测仪校准器 光轴角测量中的应用

李艳荻, 徐熙平*

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:针对传统光轴角测量系统中人为因素干扰导致的重复性能降低等不足,设计一种基于图像处理技术与高精度电控转台相结合的自动测量方案。分析了照明光斑光强分布特性,提出了一种基于图像区域分割的最优非线性加权的特征点提取算法。该方法根据光强与灰度的线性关系,将光强量化到 3 个区间。然后分析灰度因素在特征点定位中的影响;针对不同区间应用局部最优加权法则以实现局部最优化处理。最后,利用光轴偏转角与特征点在像面上位移的对应关系,计算得到光轴角测量值。开展了光斑特征点重复性实验并分析了光轴角检测精度,结果表明:该系统在不同光强、不同角度条件下重复性好,测角精度优于 $60.18''$ 。与激光光源的光轴角测量实验对比,该算法在光斑光强分布不均的条件下仍能完成稳定且精确的光轴角测量。

关键词:光轴角测量;特征点提取;双阈值分割;非线性加权

中图分类号:V463.65;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172508.2244

Application of block nonlinear weighted in optical angle measurement of headlamp tester calibrator

LI Yan-di, XU Xi-ping*

(Changchun University of Science and Technology Changchun 130022)

* Corresponding author, E-mail: xxp@cust.edu.cn

Abstract: An automatic measurement scheme based on image processing techniques and a high-precision electronic control turntable was designed to improve disadvantages of repetition performance degradation in traditional optic axial angle measurement systems due to human factors. The distribution characters of illumination light spots and light intensity in the system were analyzed. A feature point extraction algorithm for the optimal nonlinear weighting was proposed based on image area segmentation. According to the linear relationship between light intensity and gray level, the light intensity was quantified to three sections. The influences of grey level on feature point location was analyzed. Aiming at different sections, the optimal regional weighting rule was used to implement local optimal processing. Finally, Optic axial angle measurement value was calculated by using the corresponding relationship of displacement between optical axis deflection angle and feature point on image plane. The experiments for optical spot repeatability was performed and the measuring accuracy of optical ax-

收稿日期:2016-10-08;修订日期:2016-12-12.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61605016)

ial angles was analyzed. The result shows in the experiment that the system under different light intensity and different angles has good repeatability and the angle measurement accuracy is superior to $60.18''$. Compared with optic axial angle measurement experiment by lasers, the algorithm can finish stable and accurate optic axial angle measurement under uneven distribution of light spots and light intensity.

Key words: optical angle measurement; feature point extraction; dual-threshold segmentation; nonlinear weighting

1 引 言

机动车前照灯检测仪是测试汽车照明性能和配光性能的重要计量仪器,前照灯检测仪校准器是光轴可以转动的标准光源,用于检测仪的校准。它由光源、直流稳压电源及电压表、光轴角转动及读数机构、水平调整机构和找正机构等部分构成。按 JJG 967—2001 机动车前照灯检测仪校准器检定规程要求^[1],校准器的光轴零位、光轴角、发光强度及水平调节机构应周期性地定期进行计量性能检定,以保证其正常使用。

光轴角检测是校准器性能检测的重点及难点,其中光斑特征点提取的准确程度会直接影响光轴角的测量精度。目前,光斑特征点提取的方法主要分为光电池法^[2-3]和图像处理法。前者由于光电池的光电转换能力不一致会导致测量结果不可靠;而数字图像处理方法具有测量自动化、精度高优点,故备受信赖。传统基于图像处理的光斑重心提取方法主要有轮廓拟合法^[4-5]、灰度重心法^[6-7]、灰度极大值法^[8]和非线性加权法^[9]。轮廓拟合法中图像的分割阈值对照度变化的适应能力较差,导致结果的重复性降低;极大值法对噪声非常敏感,当噪声点的幅度很大时,该方法容易将噪声点的位置误当作特征点位置,另外检测精度也无法达到亚像素级要求;基于线性加权的灰度重心法虽然相对前两者精度较高,但仅适用于光强由中心向边缘线性递减的理想光斑的检测,不具有通用性;非线性加权法通过调节权重因子来调节灰度信息的权重,但由于目标边缘灰度变化不稳定,因此单一权重因子通常不能很好的反应光斑的灰度分布。

直观来看,照明图像中灰度越大的像素,对光斑中心定位的贡献也越大,但是像素位置与其灰度两者之间的比例关系很难通过单一的表达方式

很好地描述。为提高特征点的提取精度,本文提出一种基于图像区域分割^[10]的局部最优非线性加权算法,并且将图像处理技术同高精度转台结合起来,建立一套高准确度、高效率的车灯检测仪校准器的光轴角测量装置。该测量方法对光斑的对称性及边缘的灰度稳定性要求不高,在光斑光强分布不均的条件下,特征点提取的准确性和重复性依然很好且能够达到亚像素精度。文章最后通过各类算法及点光源对比实验,证明了该自动化检测系统方案的可行性及优越性。

2 光轴角测量系统总体方案

机动车前照灯检测仪校准器光轴角测量系统主要由校准器光源、CCD 成像系统、CCD 相机调整架、四维高精度电控转台、二维高精度电控转台和受光屏 6 部分组成,总体结构如图 1 所示。其中不同的校准器光源会产生不同形状的光斑,多数为激光光斑和椭圆形光斑。

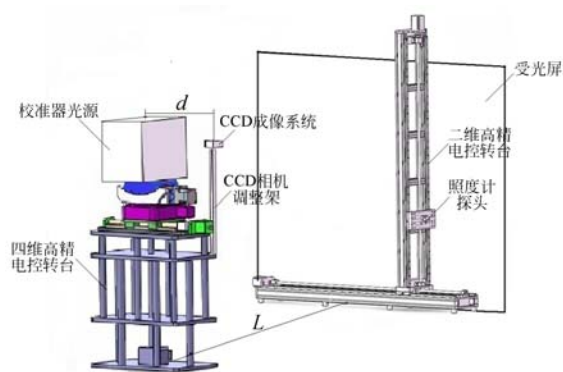


图 1 系统总体结构示意图

Fig. 1 Overall layout of system

2.1 光轴角零位校准

为保证后续测量数据的可靠性,在光轴角测量之前,首先对光轴角零位进行校准。在恒温密闭的环境下,将校准器紧固在定位精度为 $1''$ 的四

维高精度转台上,并调平使校准器的水泡位于圆环中心位置。CCD 相机固定在转台紧靠校准器且等高的位置,保证 CCD 相机的光轴与校准器光源的光轴平行。依据检定规程要求,光轴零位点位于光斑光强分布的中心位置。由于激光亮度高,具有极强的方向性,因此激光光源的零位可认为是光斑中心。首先对激光光斑图像进行阈值化处理(通常选取较高阈值),提取分割后的轮廓圆心作为光斑零位点,具有较强的鲁棒性。而对于椭圆形的光斑而言,其零位校准较为复杂。首先对采集得到的图像进行滤波处理以消除噪声干扰,遍历整幅图像,提取灰度最大的点作为光斑最亮点,通常图像由于过曝现象会产生多个最亮点,此时将最大灰度作为阈值对图像进行分割,并对分割结果进行轮廓拟合,提取轮廓质心作为光斑最亮点;然后利用上位机控制载有照度计的二维电动转台将照度计的探头中心平移至最亮点位置,完成照度计的初始粗定位;最后在光斑覆盖区域分别在上、下 1° ,左、右 2° 的位置附近搜索照度对称的特征点对,认为其重合的对称中心即为光斑零位。

2.2 光轴角测量

根据光学系统成像原理,校准器光轴偏移角与受光屏上光斑的位移量成正比关系。利用 CCD 相机对受光屏上的照明图像进行空间采样,结合对电动转台的控制及数字化图像处理,实现对校准器光轴角的测量。

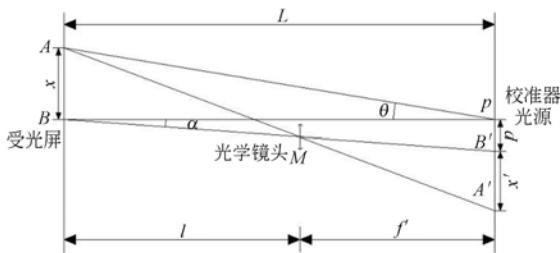


图 2 光轴偏移角的测量示意图

Fig. 2 Diagram optic axial angle measurement

光轴偏移角测量原理如图 2 所示,光学镜头 M 的几何中心与校准器光源中心距离 d 约为 120 mm,工作距离 L 为 10 000 mm。反射光线与入射光线的夹角为 α ,经计算可得 $\tan \alpha \approx \alpha = d/L = 0.012$,由于这个值非常小,故角度 α 可忽略不计,即光轴 PB 与 BB' 反射光线近似重合。当校准器的光轴偏转角度为 θ 时,光斑特征点在受光屏上

的位移为 x 。经透镜成像后,在透镜像方焦平面(其焦距为 f')上引起的像点的位移 x' ,可由 CCD 获得的数字化图像分析求出,进而推算出光轴的偏转角度 θ 。由牛顿公式的垂轴放大倍率公式^[11]:

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}, \quad (1)$$

可以得到校准器光轴偏转角度与特征点在像面上移动距离的对应关系,如公式(2)所示:

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{x}{L} = \frac{lx'}{Lf'}. \quad (2)$$

如此通过下一节中图像处理算法提取照明图像中光斑特征点坐标,将位移偏移量代入式(2)即可求出光轴偏转角度。

3 光斑图像特征点提取

激光光斑的特征点提取较为简单,即光斑圆心,其方法同零位点提取。理想状态下的椭圆光斑光强分布均匀,类似二维高斯曲面,如图 3 所示,对光斑特征点定位的贡献大小直接取决于光斑图像中的各点像素灰度值^[12]。但是在光源的曲面设计或生产过程中,存在一定制造误差会导致光斑光强分布并不均匀,因此提出一种基于区域分割^[13]的非线性加权^[14]的特征点提取算法,根据照度分布情况,首先采取多阈值分割方法^[15]将光斑图像的光强量化为三个区间,然后对每个区域应用不同的加权法则,从而提高了算法的灵活性,有效地保证了特征点提取的重复性。

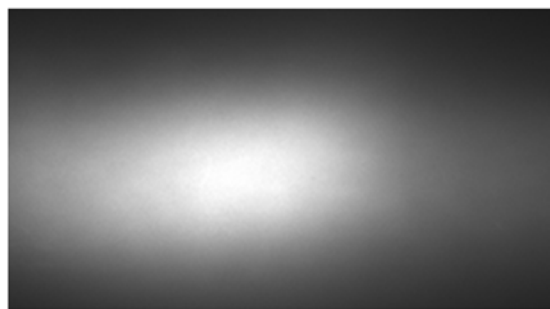


图 3 光斑图像($L=10\ 000$ mm)

Fig. 3 Light spot image

观察不同电压下的光斑图像,根据图 4 中光斑形变趋势及各部分灰度值对位置信息的贡献,可设定两个阈值对光斑图像进行区域划分,实现

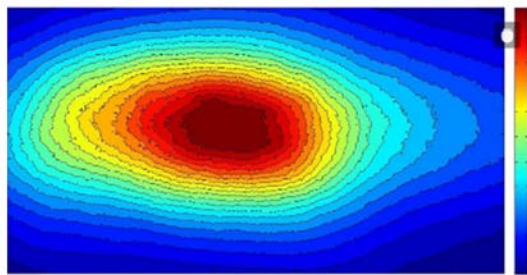


图 4 光斑等照度曲线图(L=10 000 mm)
Fig. 4 Light intensity of illumination graph

局部最优处理。区域 $S_i(x, y)$ 的分割函数如下:

$$S_i(x, y) = \begin{cases} (x, y) \in S_1(x, y) & g(x, y) \geq T_1 \\ (x, y) \in S_2(x, y) & T_2 \leq g(x, y) < T_1 \\ (x, y) \in S_3(x, y) & g(x, y) < T_2 \end{cases} \quad (3)$$

首先对图像灰度值进行归一化处理,即 $g(x, y) \in [0, 1]$, 分别以经验值 0.8 和 0.4 为阈值进行分割,分割效果如图 5 所示。

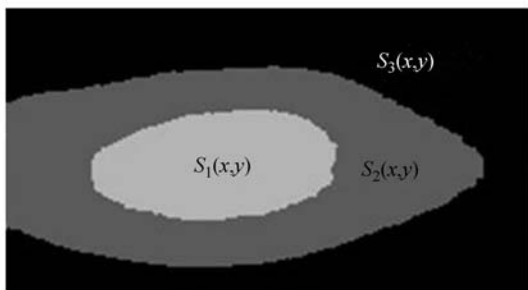
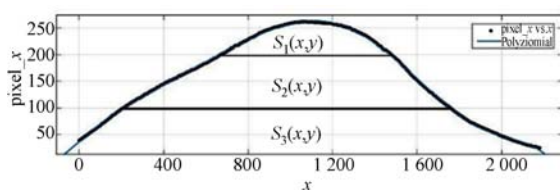


图 5 双阈值区域分割示意图
Fig. 5 Dual threshold

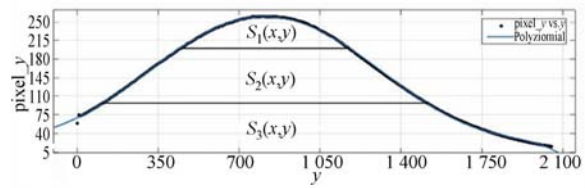
光斑图像的灰度信息可看成二维矩阵,提取每行及每列像素的灰度平均值,如图 6 所示。可见 S_1 区域的灰度平均值最大,对特征点的位置影响也最为显著, S_2 、 S_3 区域的灰度影响依次降低,且 S_3 区域灰度对特征点位置的影响可忽略不计。

设函数 $f[g(x, y), t]$ 为灰度 $g(x, y)$ 对特征点 (x, y) 位置的加权,其中 t 为权重因子,用来表



(a) 各列灰度平均值拟合曲线

(a) Fitting curve of column gray scales on average



(b) 各行灰度平均值拟合曲线

(b) Fitting curve of row gray scales on average

图 6 光斑灰度分布曲线

Fig. 6 Curves of gray distribution

示贡献的程度。分别对区域 S_1 、 S_2 、 S_3 应用不同的加权法则,来体现光斑形状不对称以及光强分布不均匀的特点。设区域 S_1 、 S_2 、 S_3 内部点集分别为 D_1 、 D_2 、 D_3 , 像素个数分别为 n_1 、 n_2 、 n_3 , 对应的权重因子分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 , 则加权后的灰度重心目标函数^[16]可表示为:

$$J' = \sum_{i=1}^{n_1} [(x_{i \in S_1} - x'c)^2 + (y_{i \in S_1} - y'c)^2] \times f_1[g(x_{i \in S_1}, y_{i \in S_1}), t_1] + \sum_{j=1}^{n_2} [(x_{j \in S_2} - x'c)^2 + (y_{j \in S_2} - y'c)^2] \times f_2[g(x_{j \in S_2}, y_{j \in S_2}), t_2] + \sum_{k=1}^{n_3} [(x_{k \in S_3} - x'c)^2 + (y_{k \in S_3} - y'c)^2] \times f_3[g(x_{k \in S_3}, y_{k \in S_3}), t_3]. \quad (4)$$

图 7 为函数 $f = g^t$ 的图形表示,当 $t > 1$ 时,曲线呈凸函数形式,灰度较大的像素能够被赋予更大的权重;当 $t < 1$ 时,曲线呈凹函数形式,灰度较大的像素在特征点定位中的贡献会得到抑制。

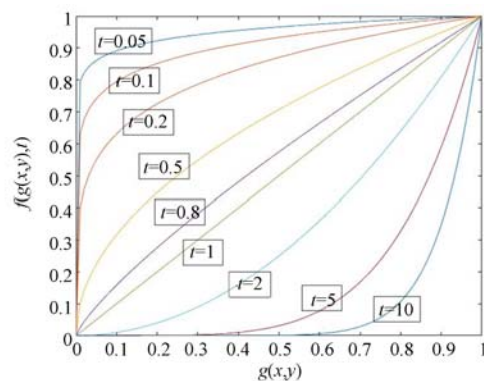


图 7 基于函数 $f = g^t$ 的非线性加权示意图

Fig. 7 Schematic diagram based on nonlinear weighting function $f = g^t$

由于求解目标函数的最优值 t 并不容易^[17], 因此在确保能够有效利用各区域光强分布特点, 同时能够抑制边缘区域噪声影响的前提下, 为简化运算, 量化 t 的取值。各区域的加权法则定义如下:

$$f_v[g(x_{i,j,k \in D_v}, y_{i,j,k \in D_v}), t_v] = \begin{cases} g^2(x_{i \in D_v}, y_{i \in D_v}) & v=1 \\ g(x_{j \in D_v}, y_{j \in D_v}) & v=2 \\ g^{1/2}(x_{k \in D_v}, y_{k \in D_v}) & v=3 \end{cases}, \quad (5)$$

将其分别代入公式(4), 得改进后的目标函数为:

$$\begin{cases} x_C' = \frac{\sum_{i,j,k=1}^{n_1+n_2+n_3} x_i g^2(x_{i \in S_1}, y_{i \in S_1}) + x_j g(x_{j \in S_2}, y_{j \in S_2}) + x_k g^{1/2}(x_{k \in S_3}, y_{k \in S_3})}{[\sum_{i,j=1}^{n_1+n_2} g^2(x_i, y_i) + g(x_j, y_j)] + n_3 g^{1/2}(x_k, y_k)} \\ y_C' = \frac{\sum_{i,j,k=1}^{n_1+n_2+n_3} y_i g^2(x_{i \in S_1}, y_{i \in S_1}) + y_j g(x_{j \in S_2}, y_{j \in S_2}) + y_k g^{1/2}(x_{k \in S_3}, y_{k \in S_3})}{[\sum_{i,j=1}^{n_1+n_2} g^2(x_i, y_i) + g(x_j, y_j)] + n_3 g^{1/2}(x_k, y_k)} \end{cases}. \quad (7)$$

4 光轴角测量实验及精度分析

4.1 光斑特征点的重复性实验

表 1 本文算法在不同光强、角度条件下特征点提取结果比较

Tab. 1 Comparison of measuring results under different light intensity and angles

光强	特征点坐标						
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6	位置 7
较暗 (679. 3, 853. 7)	(862. 8, 853. 4)	(1 047. 2, 853. 2)	(1 227. 8, 853. 1)	(1 411. 9, 853. 5)	(1 046. 1, 670. 4)	(1 044. 7, 1037. 1)	
中等 (678. 9, 851. 8)	(865. 1, 852. 7)	(1 046. 1, 852. 8)	(1 227. 5, 850. 9)	(1 414. 2, 851. 8)	(1 046. 6, 672. 3)	(1 044. 6, 1036. 3)	
较亮 (679. 1, 851. 6)	(862. 8, 851. 0)	(1 046. 7, 853. 2)	(1 228. 9, 853. 1)	(1 412. 2, 853. 4)	(1 044. 8, 670. 5)	(1 046. 0, 1035. 8)	

由表 1 数据可以看出, 基于区域分割的最优非线性加权的特征点提取算法, 在不同角度、不同光照条件下重复性依然很好, 并且可以精确到亚像素, 可以保证后续光轴角的测量精度。本文分别针

$$J' = \sum_{i=1}^{n_1} [(x_{i \in S_1} - x'_C)^2 + (y_{i \in S_1} - y'_C)^2] g^2(x_{i \in S_1}, y_{i \in S_1}) + \sum_{j=1}^{n_2} [(x_{j \in S_2} - x'_C)^2 + (y_{j \in S_2} - y'_C)^2] g(x_{j \in S_2}, y_{j \in S_2}) + \sum_{k=1}^{n_3} [(x_{k \in S_3} - x'_C)^2 + (y_{k \in S_3} - y'_C)^2] g^{1/2}(x_{k \in S_3}, y_{k \in S_3}). \quad (6)$$

分别对 x_C 和 y_C 求导, 并令导数为零。得灰度重心 (x_C', y_C') 如式(7)。

在三种不同的发光强度(较暗、中等、较亮)下, 多角度采集图像, 得到不同角度、不同光强条件下光斑特征点的定位。经过对 21 幅图像进行处理, 分别得出特征点坐标如表 1 所示。

表 2 激光光斑与椭圆光斑的光轴角测量实验结果比较

Tab. 2 Comparison of optical axis measuring results of laser spots and ellipse spots

光强	光源	光轴角测量结果						
		L2°00'	L1°00'	00°00'	R1°00'	R2°00'	D1°00'	U1°00'
较暗	激光光斑	-2°00'23"	-1°00'12"	0°00'13"	0°59'49"	2°00'16"	-1°00'03"	1°00'15"
	椭圆光斑	-2°00'58"	-1°00'59"	0°00'49"	0°59'52"	2°00'57"	-1°59'56"	1°00'49"
中等	激光光斑	-2°01'03"	-1°00'12"	0°00'18"	1°00'07"	2°00'37"	-1°00'09"	1°00'11"
	椭圆光斑	-2°01'48"	-1°01'39"	0°00'51"	1°00'52"	2°00'39"	-1°00'36"	1°00'09"
较亮	激光光斑	-2°01'09"	-1°00'09"	0°00'03"	0°59'58"	2°00'20"	-1°00'16"	1°00'10"
	椭圆光斑	-2°01'57"	-1°00'54"	0°00'55"	1°00'44"	2°00'57"	-1°00'45"	1°00'21"

对椭圆光斑及激光光斑两种不同光源进行光轴偏转角测量的对比实验。测量数据如表 2 所示。可以看出, 本文算法适用于不同光源的光轴角测量, 其结果的一致性较好。

4.2 光轴角误差检测的精度分析

光轴角误差来源主要有4个方面:(1)光轴角零位误差对光轴角测量的影响;(2)受光屏与CCD之间的距离在定标时由激光测距仪引入的误差;(3)特征点提取过程由图像处理算法引入的误差;(4)转台及相机透镜的固有误差。

4.2.1 光轴角零位误差

通常情况下,校准器光源投影在受光屏上会形成一个清晰且对称的椭圆型光斑,光轴角零位可近似为该椭圆的几何中心。当光轴角零位与几何中心不重合时,必然会引起光轴角测量值的变化。图8所示,分别针对光轴零位左偏及右偏情况对光轴角测量的影响进行了分析。

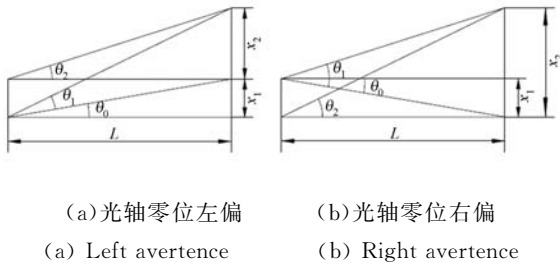


图8 光轴零位误差示意图

Fig. 8 Diagram of optical axis zero error

其中 θ_0 为光轴角零位偏差, θ_1 为光轴角真值, θ_2 为光轴角测量值, x_1 为光轴角零位偏差在屏上引起的位移, x_2 为 θ_1 对应屏上的位移, L 为光源到屏的距离。由几何关系可得: $\tan \theta_2 = x_2 / L$, $\tan(\theta_1 + \theta_0) = (x_1 + x_2) / L$, 光轴角测量误差表示如下:

$$\tan(\theta_2 - \theta_1) = \frac{x_1 x_2 \cdot \tan \theta_0 + x_2^2 \tan \theta_0 - L x_1 + L^2 \tan \theta_0}{x_1 x_2 + x_2^2 + L x_1 \cdot \tan \theta_0 + L^2} \quad (8)$$

经多次零位检测实验得到 $\theta_0 \leq 3'$, 以偏转角 1° 为例, 当 $L = 10\ 000$ mm 时, $x_1 = 8.72$ mm, $x_2 = 174$ mm, 将其带入公式(9)得 $\tan(\theta_2 - \theta_1) \leq 0.000\ 000\ 276$ 。同理, 如图8(b), 当光轴角零位右偏时, $\tan \theta_2 = x_2 / L$, $\tan(\theta_1 - \theta_0) = (x_2 - x_1) / L$, 光轴角测量误差可表示为:

$$\tan(\theta_2 - \theta_1) = \frac{L x_1 + x_1 x_2 \cdot \tan \theta_0 - x_2^2 \tan \theta_0 - L^2 \tan \theta_0}{x_2^2 - x_1 x_2 + L x_1 \cdot \tan \theta_0 + L^2} \quad (9)$$

计算显示两种情况误差均在 $0.001\ 7'$ 以下, 对测角系统精度影响不大, 可忽略不计。

4.2.2 测量距离定标误差

按检定规程要求校准器光源需要位于受光屏 10 m 处, 该距离可由激光测距仪直接测得, 此时测距误差 $\Delta s \approx 0.125$ mm。光轴角偏转为 $[-2^\circ, 2^\circ]$, 光斑特征点在物面上一次性最大位移 $\Delta y_1 \approx 350$ mm, 带入公式 $\Delta \beta = \arctan\left(\frac{\Delta y_1}{s + \Delta s}\right) - \arctan\left(\frac{\Delta y_1}{s}\right)$, 经计算该误差在 $0.003'$ 以下, 对测角系统精度影响不大, 可忽略不计。

4.2.3 图像处理算法误差

根据光轴角计算公式(3), 着重对特征点在像面的位移的误差进行分析, 以图1的初始结构, 光斑特征点坐标随光轴偏转角变化, 根据对表2中理想位点(激光光斑中心)与特征点的变化分析可以看出, 随着偏转角 θ 绝对值的增加, 特征点坐标的重复性略有降低, 但最大误差不超过3个像素。特征点的像面位移偏差表示为:

$\Delta y_2 = 3 \times 0.966\ 1 = 2.898\ 3$ mm (其中 0.966 1 为物像比例系数)。

4.2.4 转台及相机透镜的固有误差

四维高精度转台的固有误差为 $2'$, 特征点在物面上的位移误差 $\Delta y_3 = 0.097$ mm, $\Delta f'$ 为透镜的制造误差, 一般焦距的相对公差为 1% ^[18], 相机镜头 $f' = 64.76$ mm, 则 $\Delta f' = 0.647\ 6$ mm, 相对于 $10\ 000$ mm 可忽略不计。将 $\Delta y_1, \Delta y_2$ 带入公式(10), 得到 $\Delta \theta = 60.18''$ 。

$$\Delta \theta = \arctan\left\{\frac{\Delta y_2 + \Delta y_3}{L}\right\} \quad (10)$$

综合以上各因素影响, 经计算得出在水平方向 $\theta \in [-2^\circ, 2^\circ]$ 及竖直方向 $\theta \in [-1^\circ, 1^\circ]$ 区间内偏转角精度均优于 $60.18''$ 。

5 结 论

本文结合计算机视觉检测技术, 配合高精度转台, 实现了对机动车前照灯检测仪校准器光轴角的自动测量。通过对光轴零位进行校准, 确保了后续测量结果的可靠性。提出了一种基于区域分割的局部最优非线性加权的特征点提取算法。通过 CCD 相机采集校准器光斑图像, 根据光斑的光强分布特点, 设置双阈值将光斑分割为三个区域, 并对每一区域应用不同的加权法则, 实现了局部最优化处理, 该方法能够快速准确地提取光斑特征点坐

标,并且能够到亚像素精度。通过与点光源提取特征点实验对比可以看出,该算法在不同光强、不同角度下重复性较好,大大降低了测角实验对光强的

要求,有效提高了光轴角的测量精度及检测效率。通过计算表明,系统的测角精度优于 $60.18''$,满足 JJG967—2001《校准器定规程》的要求。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. JJG 967—2001 机动车前照灯检测仪校准器检定规程 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (AQSIQ). JJG 967—2001 Verification regulation of calibrators for headlamp tester of motor vehicle [S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [2] 杨春生, 刘美生, 张涛, 等. 汽车前照灯检测仪校准器检定系统的设计[J]. 中国测试技术, 2003, 29(4): 5-7.
YANG CH S, LIU M S, ZHANG T, *et al.*. Design of measuring system for calibrators of headlamp tester for motor vehicle [J]. *China Measurement Technology*, 2003, 29(4): 5-7. (in Chinese)
- [3] 闵永军, 翟羽健. 基于图像处理技术的汽车前照灯全自动检测[J]. 汽车技术, 2001(11): 17-20.
MIN Y J, ZHAI Y J. Full automatic inspection of automotive headlamp based on image processing technology [J]. *Automobile Technology*, 2001(11): 17-20. (in Chinese)
- [4] 王静, 王海亮, 向茂生, 等. 基于非极大值抑制的圆目标亚像素中心定位[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1460-1468.
WANG J, WANG H L, XIANG M SH, *et al.*. Subpixel accuracy central location of circle target based on nonmaximum suppression [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(7): 1460-1468. (in Chinese)
- [5] 黄继鹏, 王延杰, 孙宏海, 等. 激光光斑位置精确测量系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 841-848.
HUANG J P, WANG Y J, SUN H M, *et al.*. Precise position measuring system for laser spots [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 841-848. (in Chinese)
- [6] 贾振元, 樊超楠, 刘巍, 等. 双目视觉测量中等匹配点的光条中心提取[J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1582-1591.
JIA ZH Y, FAN CH N, LIU W, *et al.*. Extraction of laser stripe centers based on equal matching points for binocular vision measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1582-1591. (in Chinese)
- [7] VAN ASSEN H C, EGMONT-PETERSEN M, REIBER J H C. Accurate object localization in gray level images using the center of gravity measure: accuracy versus precision [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(12): 1379-1384.
- [8] 刘震, 尚砚娜. 多尺度光点图像中心的高精度定位[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1586-1591.
LIU ZH, SHANG Y N. High precision location for multi-scale light spot center [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1586-1591. (in Chinese)
- [9] 唐圣金, 郭晓松, 周召发, 等. 星点亚像元定位中系统误差的改进补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1502-1507.
TANG SH J, GUO X S, ZHOU ZH F, *et al.*. Modified systematic error compensation algorithm for star centroid sub-pixel detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1502-1507. (in Chinese)
- [10] 梁光明, 唐朝京, 刘东华, 等. 基于分割评价的多层次自适应双阈值分割算法[J]. 电子学报, 2009, 37(4): 750-752, 763.
LIANG G M, TANG CH J, LIU D H, *et al.*. A multi-level and adaptive dual threshold segmentation algorithm base on evaluation [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(4): 750-752, 763. (in Chinese)
- [11] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [12] 王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1672-1677.
WANG H Y, FEI ZH H, WANG X L. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1672-1677. (in Chinese)
- [13] PEDNEKAR A S, KAKADIARIS I A. Image

- segmentation based on fuzzy connectedness using dynamic weights[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(6): 1555-1562.
- [14] 黄丽莉, 皋军. 基于局部加权的非线性特征提取方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(S1): 153-156.
HUANG L L, GAO J. Locally weighted based nonlinear feature extraction method[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2013, 41(S1): 153-156. (in Chinese)
- [15] 袁小翠, 吴禄慎, 陈华伟. 基于 Otsu 方法的钢轨图像分割[J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1772-1781.
YUAN X C, WU L S, CHEN H W. Rail image segmentation based on Otsu threshold method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1772-1781. (in Chinese)
- [16] 郭晓松, 唐圣金, 周召发, 等. 重心法中的非线性加权系数研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(1): 109-111.
GUO X S, TANG SH J, ZHOU ZH F, et al.. Study on optimal nonlinear weighting coefficient of barycenter algorithm [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(7): 109-111. (in Chinese)
- [17] 张维存. 参数不确定离散随机系统的加权多模型自适应控制[J]. 自动化学报, 2015, 41(3): 541-550.
ZHANG W C. Weighted multiple model adaptive control of discrete-time stochastic system with uncertain parameters[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(3): 541-550. (in Chinese)
- [18] 马宏, 王金波. 仪器精度理论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
MA H, WANG J B. *Instrument Precision Theory* [M]. Beijing: Beijing University Press, 2009. (in Chinese)

作者简介:



李艳荻(1991—),女,博士研究生,2013年于长春理工大学光电工程学院获得学士学位,主要研究方向为图像处理及模式识别。E-mail: 15948314713@163.com

导师简介:



徐熙平(1969—),男,教授,博士生导师,1993年于长春理工大学获得学士学位,1999年于长春光学精密机械学院获得硕士学位,2004年于长春理工大学获得博士学位,主要研究方向为光电检测技术及质量控制。E-mail: xxp@cust.edu.cn