

文章编号 1004-924X(2014)06-1486-08

激光投线仪的多维校准系统

刘盼盼¹, 许流博², 乐 意¹, 陈少阳¹, 许贤泽^{1*}

(1. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 经济与管理学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 分析了激光投线仪的工作原理及其基准误差的产生原因。基于此, 提出了一种新型的激光投线仪校准系统, 用于弥补传统校准方式占地面积大、精度值难以量化、人为因素影响较大等缺点。研究了一套采用平行光管角度测量与机器视觉测量结合的检测方法, 通过检测激光线的直线度和垂直度来实现仪器的校准。该系统由 8 个采样管构成数据采集平台, 从而达到多维校准的要求。采用 VC++ 与 Matlab 混合编程的方式编写系统软件, 通过调用动态链接库的方式使两种语言相结合。实验测试表明, 该系统操作简单, 效率高; 与传统校准方式相比, 其节约了场地长度, 整个系统的占用空间控制在 8 m^3 以内; 另外, 系统提高了校准精度, 其水平线和铅垂线平均精度可以达到 $\pm 0.2 \text{ mm}/5 \text{ m}$, 正交线精度可以达到 $\pm 23''$ 。

关键词: 激光投线仪; 校准系统; 平行光管; 机器视觉; 混合编程

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142206.1486

Multi-dimensional calibration system for laser demarcation instrument

LIU Pan-pan¹, XU Liu-bo², LE Yi¹, CHEN Shao-yang¹, XU Xian-ze^{1*}

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

* Corresponding author, E-mail: xuxianze@whu.edu.cn

Abstract: The working principles of Laser Demarcation Instruments (LDIs) and their standard errors were analyzed. A new set of Multi-dimensional Calibration System (MDCS) for the LDIs was developed to solve these shortcomings of traditional calibration systems on larger floor spaces, poor accuracy and high influential artificial factors. A solution based on collimator angle measurement and machine vision measurement was designed to calibrate the LDI by measuring the straightness and verticality of laser lines. The data capturing platform of the system consisted of 8 collimators was used to achieve the multi-dimensional calibration. The software was designed by mixed programming of VC++ and Matlab, and they were connected by calling a Dynamic Lined Library (DLL). Experiments show that the new system is easy to operate, and is more efficient and more credible. The space that the whole system takes up is within 8 m^3 , which saves the area of work place. Moreover, the accuracy of horizontal and vertical lines can reach $\pm 0.2 \text{ mm}/5 \text{ m}$, and the orthogonal line is $\pm 23''$, which meets

收稿日期: 2013-08-12; 修订日期: 2013-10-09.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB707904); 武汉市科技局应用基础研究计划资助项目 (No. 2013010501010121)

the requirement of calibration accuracy.

Key words: laser demarcation instrument; calibration system; collimator ; machine vision ; mixed programming

1 引 言

激光投线仪是一种新型的小型化激光类非接触式标线仪器。它可以在工作距离内投射出水平和铅垂激光线,为其他工作提供参考基准,现已广泛应用于建筑装潢、机械加工、家具制作等领域^[1-3]。作为基准类仪器,激光投线仪的精度在整个测量中占有至关重要的地位,因此,在出厂前必须对每一台激光投线仪进行精度校准。校准过程中,在激光线与校准基线角度一定时,激光线偏离校准基线的距离与激光线投射距离成正比。目前,国内外普遍采用的校准方式为将校准靶板放在距离激光投线仪 5 m 远的地方,校准同一条激光线要保证靶板基准线处在同一水平线或铅垂线,以期能够清晰识别激光线相对于校准基线的偏差。同时,要在每个靶板旁边安装监视器实时监视激光线在靶板上的动态,最后通过闭路监视系统将靶板的画面传递到检验员面前的显示器上,由人眼观测显示器画面,并对激光投线仪的误差做出判断。显然,这种方式存在校准系统安装调节复杂、占地面积大、激光投线仪测量精度难以量化,人为误差比较严重、工作强度大等缺点。随着 CCD 数字化检测的普及,科研人员开始尝试利用摄像头来直接检测测量参数。文献[4]和文献[5]各设计了一种采用 CCD 的检测装置,并利用数字图像处理等技术实现了对测量参数的自动获取,但是这种装置仍需要占用很大的空间。

为了满足自动测量与节约场地的要求,本文设计了一种新型的校准系统。该系统基于平行光管测量微小角度的原理,将传统的激光线偏离基准线的距离测量转换为偏转角度测量,从而使得测量与激光线投射距离无关,减少了占地面积;该系统采用高分辨率 CMOS 工业相机采集数字图像,通过视觉测量技术实现对精度值的量化,由此控制了成本;最后利用专门编写的软件系统实现数据的处理与保存。该系统在江苏某公司的生产线上进行了实际测试,结果表明该系统可以快速准确地校准激光投线仪,并且成本适中,适合批量生产。

2 激光投线仪原理

激光投线仪利用激光束经过特定的光学元件后可单向展宽的性质实现投射扇形激光面,在与物体表面交汇处形成激光线。展宽原理为共轴双球面傍轴成像,即光线经过球面折射后,传播方向会向着球心偏转,偏转的角度与球面的半径和折射率有关。球面半径越小,折射率越大,则偏转角越大,表现为激光的发散角越大。通常使用一根细小的圆柱玻璃棒作为展宽元件,如图 1 所示。激光束经过横向放置的玻璃棒后在竖向展宽,投射到物体上形成一条激光线。同理,激光束经过竖向放置的玻璃棒后会在横向展宽,即展宽方向与玻璃棒的轴向总是垂直的。

由于展宽方向与玻璃棒轴向垂直,激光器中玻璃棒的安放姿态将直接影响投射出的激光线的方向。安放激光器时引入的误差会使投射出的激光线与预结果不符,因此必须对激光投线仪进行校准。

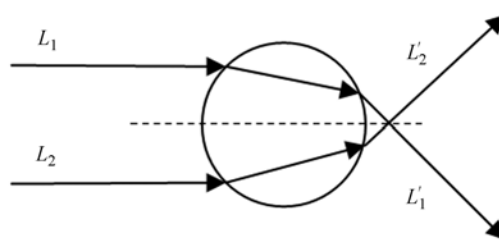


图 1 激光展宽原理

Fig. 1 Principle of laser broadening

3 多维校准系统设计

3.1 多维校准方法

根据激光器的数量,激光投线仪可分为单线、2 线、3 线、4 线、5 线等系列激光投线仪。由于目前还没有相关激光投线仪的国家标准,因此对激光投线仪的校准规范主要采用业界标准。本文采用的校准标准是激光投线仪出厂所标明的精度指标,如表 1 所示。

表 1 激光投线仪校准的精度指标

Tab. 1 Accuracy specifications of calibration for laser demarcation instrument

校准项目	激光投线仪精度
水平方向	$\pm 1 \text{ mm}/5 \text{ m}$
垂直方向	$\pm 1 \text{ mm}/5 \text{ m}$
正交方向	$90^\circ \pm 40''$

传统的校准方法需要在距离激光投线仪 5 m 的地方设置标靶,占地面积非常大。而本文研究的校准系统采用平行光管测量角度,使测量与距离无关。由于发射角度很大,校准激光线的直线度时采用分段采样的方式。考虑误差主要是由激光线倾斜造成的,并且激光线一般不会在中间弯曲,因此在激光线的两端取样,然后比较激光线的最高点与最低点的偏差。

校准正交精度采用与两个标准垂直平面对比的方式,如图 2 所示。激光器实际投射出一个扇形平面,与物体表面交汇处形成激光线。采样管 1 和采样管 2 用于标定相互垂直的两个平面,激光线 1 和激光线 2(图中实线表示)分别被采样管采样后与采样管中的基准线比较。因为两条基准线在两个相互垂直的平面上,因此当激光线平行于基准线时,便可认为两条激光线所在的平面是正交平面。

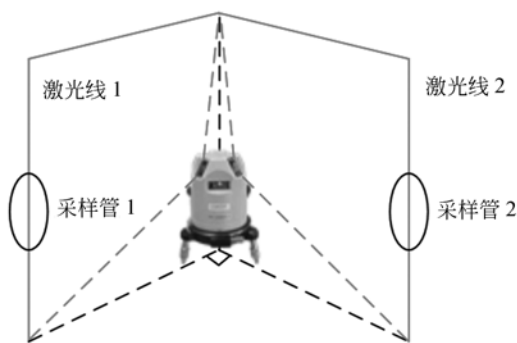


图 2 垂直度校准示意图

Fig. 2 Schematic diagram for verticality calibration

如图 3 所示,实线表示激光线,点划线表示采样管基准线, x_i 为激光线 i 与采样管 i 基准线间的距离 ($i=1,2$)。当偏离方向相同且 x_1 与 x_2 的差值在误差范围内时,便可认为达到了垂直度要求。

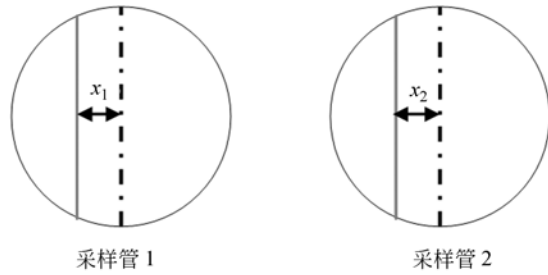


图 3 垂直度校准光管采样图

Fig. 3 Sampling diagram in verticality calibration

3.2 多维校准系统平台设计

目前,市场上的激光投线仪多为 2 线、3 线、4 线、5 线系列。理论上,为了满足测量要求,每一条激光线都要用 3 根采样管在激光线的中间和两端采样,以检测直线度等精度指标。但实际应用中,处于两条激光线交点处的采样管可以复用,同时对激光线采样时大多数情况下可以忽略中间点,因此采用 4 根采样管检测 2 线系列的激光投线仪,5 根检测 3 线系列,6 根检测 4 线系列,7 根检测 5 线系列。但是为了能够检测激光线中间凸起或弯曲的情况,还要在水平方向和铅垂方向各添加 1 根采样管。为了兼容全系列的激光投线仪,同时兼顾校准系统的成本与校准效率,本文以 4 线系列激光投线仪为参考,采用 8 根采样管设计出一种校准平台,如图 4 所示。

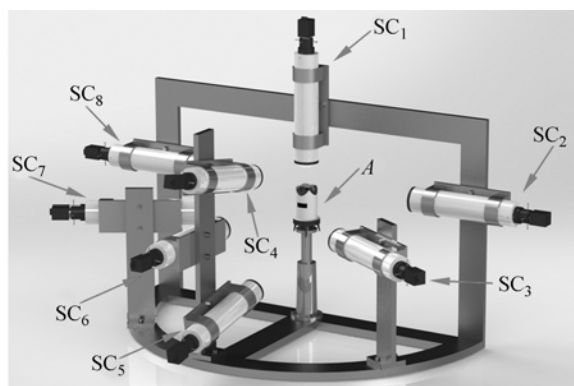


图 4 多维校准平台

Fig. 4 Platform of Multi-dimensional Calibration System(MDCS)

该校准平台可以一次测量校准 4 线及以下系列的激光投线仪,同时通过两次测量可以校准

5 线系列。多维校准平台主要由 8 根采样管和支架组成。其中采样管按照采样类别可分为水平光管组和铅锤光管组。图 4 中,采样管 SC₃, SC₆, SC₇ 构成水平光管组; SC₁, SC₄, SC₅ 构成铅锤光管组 A; SC₁, SC₂ 构成铅锤光管组 B; SC₁, SC₈ 构成铅锤光管组 C。铅锤光管组标定的平面与水平光管组标定的平面是相互垂直的;铅锤光管组 A 标定的平面分别与铅锤光管组 B、铅锤光管组 C 所标定的平面相互垂直;铅锤光管组 B 与铅锤光管组 C 所标定的平面共面。

为了避免激光直射 CMOS 传感器引发光斑阴影现象,即对 CMOS 产生损伤并造成图像失真,该平台的所有光管的光轴延长线都不经过激光投线仪的激光发射点^[6]。

如图 5 所示,采样管由光管、镜头和相机 3 部分构成。镜头部分主要由两个套筒构成,套筒 1 左端有 4 个长螺钉,用来连接固定相机,并且内部装有一对可以旋转的偏振片;套筒 2 用来连接光管与套筒 1,并且内部装有相机物镜。通过调节两个套筒的相对位置达到调节镜头物距的目的。相机左端通过 USB 连接到电脑,右端通过接口转换部件连接镜头部分。



图 5 采样管结构图

Fig. 5 Structure of sampling collimator

3.3 校准系统光路设计

光路设计主要是针对采样管的各项参数进行的。平行光管主要由物镜和置于物镜焦平面的分划板组成,其测角原理如图 6 所示。

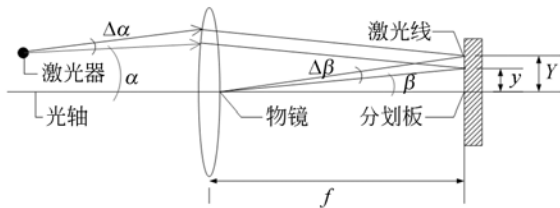


图 6 平行光管测角原理图

Fig. 6 Principle for collimator angle measurement

激光线以与光轴成 α 角进入平行光管,在分

划板上投射出的激光线与光轴的夹角为 β 。根据和光轴成一定夹角的平行光束,通过光学系统后,必相交于像方焦平面上同一点的性质,可得:

$$\alpha = \beta \quad (1)$$

当夹角 α 偏转 $\Delta\alpha$ 时,夹角 β 偏转 $\Delta\beta$, 可知:

$$\Delta\alpha = \Delta\beta \quad (2)$$

由于激光线的直线精度为 $\pm 1 \text{ mm}/5 \text{ m}$, 其允许的角度偏差为:

$$\delta_- = \arctan \frac{2}{5 \times 1000} \approx 0.0229^\circ \quad (3)$$

由于激光投线仪的正交精度为 $90^\circ \pm 40''$, 其允许的角度误差为:

$$\delta_+ = 80'' \approx 0.0222^\circ \quad (4)$$

由此该系统选用物镜焦距为 550 mm, 相对孔径为 1/8 的平行光管, 角度分划刻线间隔为 0.2 mm 的分划板。由于角度非常小, 可认为分划板上每一线对间距所表示的角度值都是相等的, 即每一线对表示的角度为:

$$\theta = \arctan \frac{0.2}{550} \approx 0.0208^\circ \quad (5)$$

由式(5)可以看出, θ 略小于 δ_- 与 δ_+ , 以方便校准和保证精度。当激光线的直线度误差或垂直度误差超过一个线对间距时, 便需要进行校准; 而其误差在一个线对间距范围内时, 该项指标是合格的。例如一条水平激光线被水平光管组采样后, 激光线相对于每一个光管的分划板中心线的距离分别为 Y_1, Y_2, Y_3 , 当其中最大差值小于线对间距 y 时, 激光线的直线度误差是符合要求的; 反之, 则需要调整激光投线仪, 使之达到预期的精度。

同时, 偏差值与线对间距值的比与角度的比相等。由此得到:

$$\Delta = 5000\theta \frac{\Delta Y_{\max}}{y} \quad (6)$$

其中: Δ 为激光线投射 5 m 后的误差。

CMOS 相机用来获取分划板上激光线的图像。为了得到高质量的图像, 还需要在分划板与相机之间添加一些光学器件, 本文使用了镜头与偏振片。其中, 偏振片的作用是调节进入到相机的光强, 因为光强太强或太弱都会对图像产生很大的干扰。

CMOS 相机获得的图像分辨率为 640×480 , 像元尺寸为 $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$, 镜头有效孔径 $D = 25 \text{ mm}$, 焦距 $f' = 100 \text{ mm}$, 视场角 $2\omega = 60^\circ$ 。按照

经验公式,系统分辨率为:

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_r} + \frac{1}{N_o}, \quad (7)$$

其中: $N_r = 192.3 \text{ mm}^{-1}$ 为相机传感器的分辨率, $N_o = 322.7 \text{ mm}^{-1}$ 为入射光波长 $\lambda = 635 \text{ nm}$ (激光波长) 时根据瑞利判据得到的镜头分辨率。由此得到系统的理论分辨率 $N = 120.4963 \text{ mm}^{-1}$ 。像差和衍射效应会使实际分辨率比理论分辨率低一些,但是足够分辨分划板上最小分辨率为 $N_{\min} = 5 \text{ mm}^{-1}$ 的线对。实际测试捕获的图像细节丰富清晰,表明该系统的光路采集部分达到了预期要求。

3.4 多维校准系统软件设计

软件流程如图 7 所示。软件系统可分为操作界面部分和图像处理部分。操作界面采用 VC++ 编写,图像处理函数则使用 Matlab 编写,最后通过调用动态链接库的方式将两者结合起来。

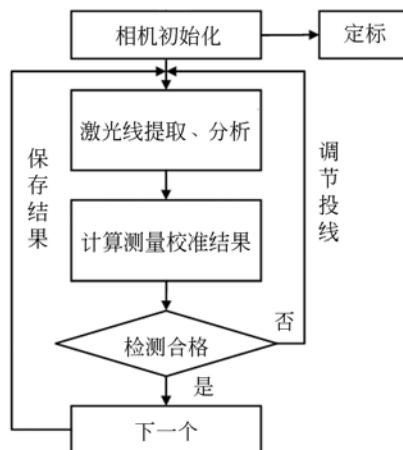


图 7 软件流程图

Fig. 7 Software process

Matlab 中提供的 Compiler 工具箱可以将 M 文件编译为 C++ Shared Library^[7],然后将生成的后缀为 dll, lib 和 h 的 3 个文件添加到 C++ 工程中。然后在 C++ 工程中配置属性,具体步骤为:在包含目录中添加 \\%%\Matlab\extern\include,在库目录中添加 \\%%\Matlab\extern\lib\win32\microsoft(\\%%\表示 Matlab 安装路径),在附加依赖库中添加 mcrmlrrt.lib 和 Compiler 生成的 lib,以逗号隔开。编译与运行时都需要相应版本的 Matlab 运行库的支持,即 MATLAB COMPILER RUNTIME^[8]。一般在安装

Matlab 时,运行库也随之安装了,在没有安装 Matlab 的电脑上运行时,需要单独运行安装程序 MCRInstaller.exe。校准结果以及各项精度值都会以 Excel 文件保存,方便建立数据库管理。

定时时要关闭激光投线仪,并用均匀温和的光线照亮分划板。其目的是提取分划板图像中的线对,以便确定每一个采样管采集的图像中分划板线对的间距(像素值表示)以及中心线的坐标值,标定每一根采样管的初始值。采用了自适应二值化、腐蚀、直线霍夫变换等^[9-11]图像处理方法。处理结果如图 8 和图 9 所示,其中黄线为识别的刻度线,红点和蓝点为识别的线段端点(彩图见期刊电子版)。

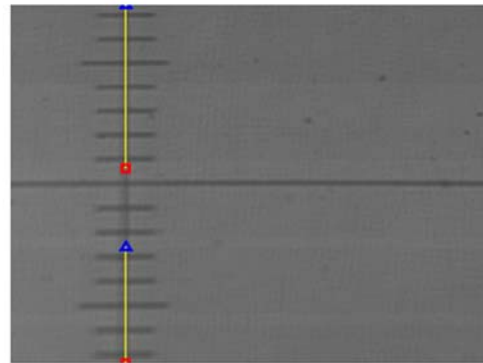


图 8 分划板中心线提取

Fig. 8 Extraction of reticle centerline

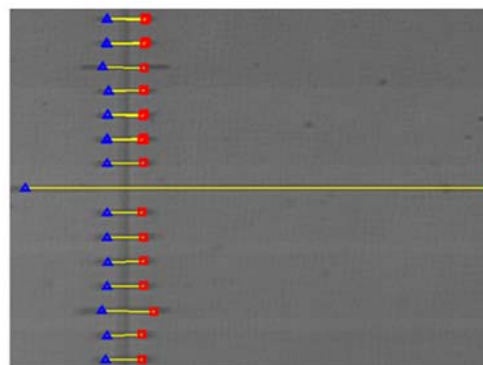


图 9 分划板中心线和刻度线提取

Fig. 9 Extraction of reticle centerline and scale line

激光线提取时得到了每一采样图像中激光线的中心线位置坐标,以此与对应的采样管的初始值做比较便可得到激光线的偏差值。采用自适应二值化,孔洞填充,开操作闭操作,边缘检测与直

线拟合等方法处理图像,结果如图 10 和图 11 所示(彩图见期刊电子版)。其中红线为提取的激光线边缘,绿线为识别的激光线中心线。

软件的人机交互部分采用 VC++ 编写。图 12 为系统的校准操作界面,共有 8 个显示区域可以实时显示分刻板图像。

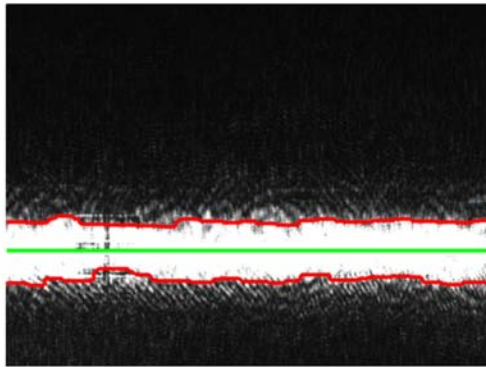


图 10 单一激光线处理
Fig. 10 Single laser line

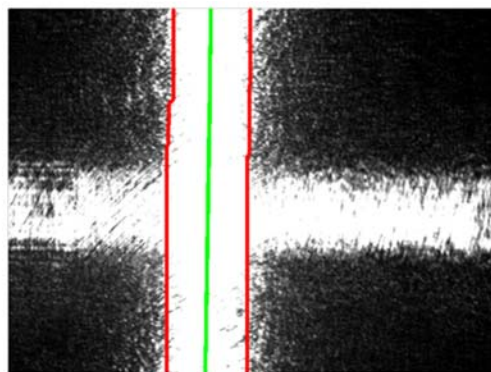


图 11 正交激光线处理
Fig. 11 Orthogonal laser line



图 12 软件界面局部
Fig. 12 Part of software interface

4 多维校准过程及精度比较

在首次使用该系统快速校准激光投线仪时,需要标记每根采样管的基准线,并将基准线数据保存在参数文件中。这样每次打开软件时就可以直接从文件中读取各个基准值,不用再进行初始化操作。

在校准 2 线系列到 4 线系列的激光投线仪时,将激光投线仪放到图 4 中的 A 位置,通过观察图 12 画面区中的实时图像来调整好激光投线仪,使得激光线都经过相应的采样管。然后点击图 12 功能区中的“拍照”按钮,系统便会计算出每条激光线的直线度以及相互间的垂直关系等参数,并判断当前激光投线仪是否合格,由此得到哪条激光线需要调整,这些信息显示在图 12 所示的参数区。如果激光线合格,就进行下一个检测;否则,根据反馈的信息对其进行调整后重新检测。

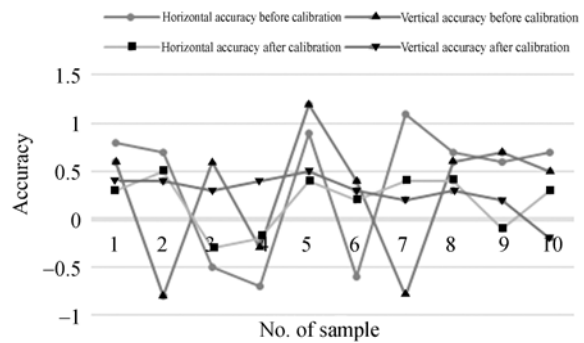


图 13 水平精度和铅垂精度
Fig. 13 Horizontal and vertical accuracies

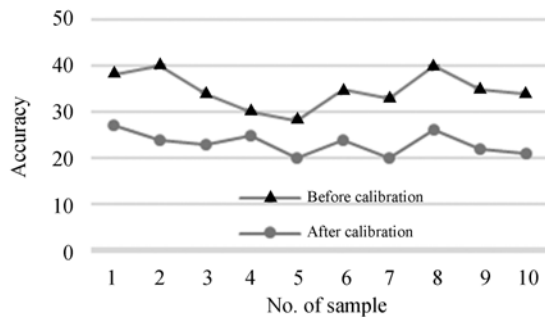


图 14 正交精度
Fig. 14 Orthogonal accuracy

5 线系列激光投线仪的校准方法与 2 线到 4 线系列的类似,但由于 5 线系列的激光投线仪有 4 条铅垂激光线,而该校准系统一次最多可以检测 3 条铅垂线,因此 5 线系列的激光投线仪按照上述方式检测后还要旋转 90° 或 180° 再检测一次。通过合并分析两次的检测结果给出激光投线仪的校准信息。

在江苏某公司风场选用 10 台激光投线仪进

行了对比校准测试。多次检测的精度平均值如表 2 所示。表中数据以采样管基准线为 0 坐标线,水平方向定义高于基准线为正,铅垂方向定义在基准线右方为正。水平精度与铅垂精度的折线图如图 13 所示,正交精度的折线图如图 14 所示。从图 13 和图 14 中可以看出,经过该系统校准过的激光投线仪,不仅精度有明显的提高,其稳定性也有所改善。

表 2 系统校准前后的精度对比

Tab. 2 Comparison of accuracies before and after calibrations

样机编号	使用前			水平精度 (mm/5 m)	使用后	
	水平精度 (mm/5 m)	铅垂精度 (mm/5 m)	正交精度 ($''/90^\circ$)		铅垂精度 (mm/5 m)	正交精度 ($''/90^\circ$)
1	0.8	0.6	38	0.3	0.4	27
2	0.7	-0.8	40	0.5	0.4	24
3	-0.5	0.6	34	-0.3	0.3	23
4	-0.7	-0.3	30	-0.2	0.4	25
5	0.9	1.2	28	0.4	0.5	20
6	-0.6	0.4	35	0.2	0.3	24
7	1.1	-0.8	33	0.4	0.2	20
8	0.7	0.6	40	0.4	0.3	26
9	0.6	0.7	35	-0.1	0.2	22
10	0.7	0.5	34	0.3	-0.2	21

5 结 论

本文利用平行光管角度测量原理和机器视觉测量等方法设计了一种激光投线仪多维校准系统,很好地解决了传统校准方式存在的占地面积大、精度值难以量化以及人为因素影响大等问题。现场测试结果显示,该系统校准水平线和铅垂线

的平均精度可以达到 ± 0.2 mm/5 m,正交线精度可以达到 $\pm 23''$,并且产品精度值的稳定性得到改善,符合出厂要求。

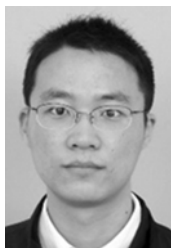
实际测试表明,该系统具有操作简单、效率高、精度高等优点,且安装、调试较简单,成本较低。此外,该系统的硬件对于激光投线仪的校准具有普遍适用性,系统的升级改造由软件实现,因此后续维护成本较低,适合批量装备。

参考文献:

- [1] 赵岩,李建双. 激光投线仪及其校准[J]. 计量学报, 2006(z1):195-196.
ZHAO Y, LI J SH. Calibration of laser line[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2006(z1):195-196. (in Chinese)
- [2] 周昌鹤,曹正东. 激光标线仪原理探讨[J]. 物理与工程, 2007(5):31-32.
ZHOU CH H, CAO ZH D. Principle of laser marking-off equipment [J]. *Physics and Engineering*, 2007(5):31-32. (in Chinese)
- [3] 徐逢秋,许贤泽,乐意,等. 基于模糊控制的快速自动安平激光扫平仪[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(8):1870-1876.
XU F Q, XU X Z, LE Y, et al.. Fast automatic rotating laser construction based on fuzzy control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1870-

1876. (in Chinese)
- [4] 路杰,杨博雄.基于多线阵 CCD 的激光投线仪数字化检测[J]. 计量技术,2010(12):50-53.
LU J, YANG B X. Laser line instrument digital detection based on CCD [J]. *Measurement Technique*, 2010(12):50-53. (in Chinese)
- [5] 刘海波,贾敏强,杨博雄,等.基于 CCD 对激光投线仪进行校准的方法和装置的研究[C]. 2006 年全国测绘仪器综合学术年会论文集,2006:121-123.
LIU H B, JIA M Q, YANG B X, *et al.*. Calibration method and equipment on laser liner basing on CCD[C]. *Proceedings of Nationwide Instrument of Surveying and Mapping Annual Conference in 2006*,2006:121-123.
- [6] 张震,周孟莲,张检民,等. CCD 中的激光光斑阴影现象及机理[J]. 光学精密工程,2013,21(5):275-281.
ZHANG ZH, ZHOU M L, ZHANG J M, *et al.*. Shadows of laser spots in CCD and their mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(5):275-281.
- [7] ALEKSI I, KRAUS D, HOCENSKI Z. Multi-language programming environment for C++ implementation of sonar signal processing by linking with matlab external interface and fftw [C]. *Elmar.*, 2011 *Proceedings*, 2011:195-200.
- [8] 潘大夫,汪渤,周志强. Matlab 与 C/C++ 混合编程技术研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(2): 465-468.
- PAN D F, WANG B, ZHOU ZH Q. Research on mixed programming technology of Matlab and C/C++ [J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, 30(2):465-468. (in Chinese)
- [9] 米曾真,谢志江,陈涛,等.重轨图像增强与边缘提取的关键技术[J]. 光学精密工程,2012,20(7): 237-244.
MI Z Z, XIE ZH J, CHEN T, *et al.*. Key technology of image enhancement and edge extraction for heavy rail [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(7): 237-244. (in Chinese)
- [10] 姜黎,吴伟仁,张之敬,等.微小型结构件显微图像边缘的自动识别[J]. 光学精密工程,2013,21(1): 228-236.
JIANG L, WU W R, ZHANG ZH J, *et al.*. Automatic detection of micro image edges for micro accessories [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):228-236. (in Chinese)
- [11] 唐永龙,张之敬,张晓峰,等.微装配正交精确对准系统的设计[J]. 光学精密工程,2012,20(7):134-142.
TANG Y L, ZHANG ZH J, ZHANG X F, *et al.*. Design of precise alignment orthogonal system used in micro-assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(7):134-142. (in Chinese)

作者简介:



刘盼盼(1991—),男,河北安平人,博士研究生,2013 年于武汉大学获得学士学位,主要研究方向为精密仪器及机械、数字图像处理。E-mail: lpp777@whu.edu.cn

导师简介:



许贤泽(1967—),男,湖北京山人,博士,教授,博士生导师,主要从事精密仪器及机械、光谱仪器研制方面的研究工作。E-mail: xuxianze@whu.edu.cn