

基于干涉条纹的光轴平行性校准方法

徐丹慧^{1,2}, 唐霞辉^{1*}, 方国明², 吴东京², 周海蓉²

¹华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

²成都英飞睿技术有限公司, 四川 成都 610213

摘要 光轴的平行性校准在多传感器光电系统中起着重要的作用。为了使被动光学设备的光轴校准满足广泛适用的需求,提出一种基于干涉条纹的光轴平行性校准方法。在平行光管法的基础上建立基准光轴,对接收光学系统反射形成的牛顿环干涉条纹进行拟合,从而计算光轴间的夹角。利用搭建的校准系统平台对激光测距机的发射光轴和接收光轴进行光轴的实际校准。实验结果表明:接收光轴与基准光轴的平行性测量精度优于 $5''$,能够较好地满足校准多传感器光电系统的应用需求,验证该方法的有效性。所提方法的可视化校准过程可以提高校准效率,具有操作简单、实用性强和测量精度高的优点。

关键词 测量; 校准; 光轴平行性; 干涉条纹; 图像处理

中图分类号 TN214

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1712005

Method for Calibration of Optical Axis Parallelism Based on Interference Fringes

Xu Danhui^{1,2}, Tang Xiahui^{1*}, Fang Guoming², Wu Dongjing², Zhou Hairong²

¹School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan, Hubei 430074, China;

²InfiRay Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610213, China

Abstract The calibration of optical axis parallelism plays an important role in multi-sensor photoelectric systems. Herein, a method for calibrating the optical axis parallelism based on interference fringes is proposed for calibrating the optical axes of passive multi-sensor photoelectric devices to meet the general application requirements of optical systems. The reference optical axis is established based on a collimation method. Newton ring interference fringes form by the reflection of the receiving optical system are fitted. Thus, the angle between the optical axis is calculated. The calibration axis of a laser distance-measuring machine is used to calibrate the optical axis of a transmitter and receiver. Experiment results show that the measurement accuracy for the receiving optical axis parallelism and the reference optical axis is better than $5''$, satisfying the application requirements for calibrating multi-sensor photoelectric systems. The results also verify the effectiveness of the proposed method, whose visual calibration process can improve the calibration efficiency of passive optical devices and has the advantages of simple operation, practicability, and high measurement accuracy.

Key words measurement; calibration; optical axis parallelism; interference fringes; image processing

OCIS codes 120.4640; 260.3160; 100.3008

1 引 言

现代化光电武器装备平台一般都包含可见光、红外和激光等多种光电传感器,能够实现全天候制导、侦察、追踪和精确打击。当武器装备实际工作时,目标信息的准确性取决于各光电传感器中光轴

之间的平行性^[1-2]。仪器的加工工艺、安装条件以及外部环境的限制易引起光轴平行性偏差,因此需要操作简单、适用性强、检测精度高且适用于宽光谱多光轴的平行性校准方法对多传感器光电系统的光轴进行检测和校准。

目前,常见的光轴平行性校准方法有平行光管

收稿日期: 2020-04-13; 修回日期: 2020-05-20; 录用日期: 2020-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(61605052)

* E-mail: txh1116@hust.edu.cn

法^[3-5]、激光光轴仪法、投影靶板法、五棱镜法^[6]、惯性测量法^[7]、相交靶法和摄影测量法^[8]等。激光光轴仪法所用的设备装调难度大且专用性强。投影靶板法需要范围足够大的实验场地,易受天气或环境光的影响,远距离的情况下,光斑能量弱且不均匀导致测量存在误差,近距离的情况下,图像的分辨率较低。五棱镜法的测试过程中,移动五棱镜会改变其特征方向而引起光轴平行性偏差^[9-11]。惯性测量法利用陀螺稳定与光路自准直技术可完成大间距机械轴线与光电轴线间的一致性测量,这种方法虽然操作灵活,但是很难将陀螺仪准确地安装在各种类型的被测轴上。以色列 CI 公司展示了一种基于相交靶法的先进武器轴线检测系统(AWBS),通过安装在武器上的电荷耦合器件(CCD)相机来提取合作目标图像,将图像叠加在光学传感器上以计算瞄准轴与射击轴的误差,对被动光学系统的光轴进行可视化操作,但是在提取合作目标图像时容易受到环境的影响^[12]。上述几类方法对于被动光学设备中光轴的校准,一般由测量系统直接向其投射可见光或红外十字划分准直图像,通过被测光学设备中的成像位置来瞄准其方向,但对接收系统有可成像的要求。对于含有非成像探测器的接收系统中光轴的校准,如激光测距机的接收系统,主要判断依据是探测器是否可以接收到回波信号,校准过程不直观、不可视,需依靠摸索和经验对系统进行盲调。罗明星等^[13]提出了一种通过计算可见光在发射、接收系统后端 CCD 相机中成像的中心点坐标偏移距离来快速调节光轴平行性的方法,此方法使用的系统结构简单,调节快速,但在调节完成后需将 CCD 相机分别更换为发射和接收系统,这容易产生测量误差。

平行光管法具有操作简单、误差环节少和校准精度高的优点,为此,本文在平行光管法的基础上提出一种基于干涉条纹的光轴平行性校准方法。该方法采用光学系统镜面反射光产生的牛顿环干涉条纹,并将其作为判断接收光学系统中光轴与平行光管中光轴平行性的依据,将接收光学系统中光轴的校准过程由盲调改为可视化操作,具有校准精度高和效率高的优点,能够广泛适用于被动光学设备中光轴的校准。采用 CCD 相机代替人眼来判断校准的状态,能够减少误差源,提高校准速度。

2 校准原理和系统组成

2.1 基于牛顿环干涉条纹的光轴校准系统

多光轴的平行性校准一般检测各光电传感器中光轴之间是否相互平行或光轴之间的夹角是否满足设计的要求,在不符合要求的情况下对系统进行校准。系统中光轴校准的原理:首先建立基准光轴,再利用基准光轴来检测校准接收光学系统中的光轴,利用牛顿环干涉条纹来检测接收光学系统中光轴与平行光管中光轴的平行性,最后利用基准光轴来校准发射光学系统中的光轴,通过测量和校准发射光学系统所发出的激光在测量系统中图像传感器上的光斑位置来瞄准其方向。

基于干涉条纹的光轴校准系统主要包含大口径平行光管、视觉测量与控制处理计算机系统和调试平台等,如图 1 所示。调试平台用于移动和固定各光电传感器、CCD 和参考光源在水平、方位和高度 6 个维度的位置。大口径平行光管由离轴抛物面(OAP)镜和参考光源组成。OAP 镜基于几何学抛物面的原理,当平行光入射时,OAP 镜将光束聚焦

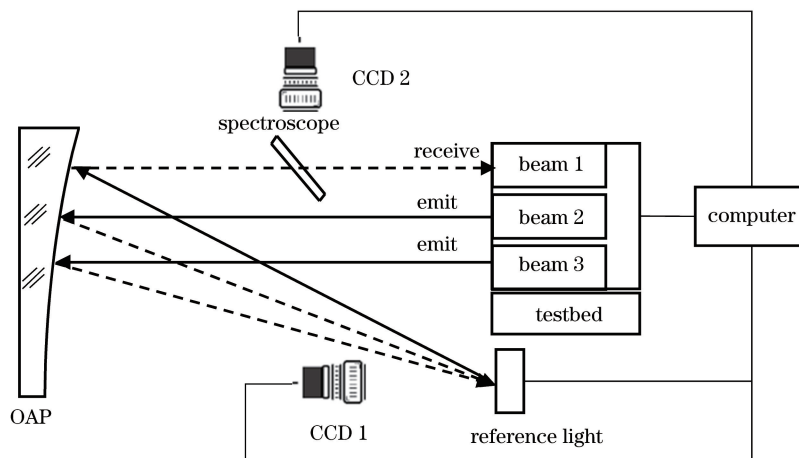


图 1 校准系统的原理示意图

Fig. 1 Schematic of calibration system

到离轴焦点上,也能够将离轴焦点处点光源发出的光束转换为平行传输的光束。参考光源由合束光纤和红外感光材料组成,合束光纤包含可见光和红外光。系统将参考光源置于 OAP 镜的焦点处,该焦点处参考光源发射的光经过 OAP 镜后发生反射,将反射产生的平行光的传播方向作为基准光轴^[14-15]。

视觉测量与控制处理计算机系统由 CCD、分光镜和计算机组成,用于数据的采集和计算,同时控制参考光源的出光。CCD 1 用于采集参考光源的位置信息,当计算机控制参考光源的红外感光材料处于工作状态时,开始拍摄红外感光材料上的光斑,通过测量光斑的位置来计算发射光学系统和基准光轴之间的夹角^[16];再对发射光学系统进行微调,使得拍摄的光斑中心位置与已保存的基准光轴的光源位置重合,则发射光学系统的光轴与基准光轴同轴。CCD 2 用于采集待校准接收光学系统中光轴产生的牛顿环干涉条纹信息,计算机利用算法拟合牛顿环条纹的形状以测量圆心的坐标位置,从而计算接收光学系统和基准光轴之间的夹角,对接收光学系统进行微调以校准平行性。CCD 2 的位置可以通过自准直法来确定,分光镜分出的平行光束通过 CCD 2 镜头在其感光面上形成亮斑,调节 CCD 2 的位置使光斑的中心大致落在探测面的中心,并通过图像处理来计算此时参考光束光斑的位置,将其保存作为参考位置。

2.2 牛顿环干涉条纹校准光轴的平行性原理

牛顿环可以理解为由两个曲率不同的球面构成的薄膜,两个球面反射的平行光束形成的波阵面是从同一个光束的平面波阵面分裂而来,因此形成干涉条纹^[17]。因此,一束平行光在接收光学系统镜头的前表面和后表面相继反射,能够产生具有一定光程差的两束相干光,迭加形成干涉环,在定域面及其附近可看到干涉条纹,如图 2 所示。当平行光的传播方向稍偏离透镜的光轴时,光束经过两个表面反射后将形成两个光斑;当平行光与透镜的光轴逐渐调至同轴时,两个光斑逐渐重合,此时出现牛顿环的干涉图样^[18]。

以平凸透镜为例,将同轴情况下凸透镜的球心作为坐标原点,并建立坐标系,记为 $O-xyz$,如图 3 所示。其中 R 表示球面的曲率半径, d 表示透镜的中心厚度, h 表示楔形平板的厚度。当平行光束垂直入射到镜面时,入射光线与法向量的夹角 $\theta = \arcsin(r/R)$,其中 $r^2 = x^2 + y^2$, (x, y) 为入射点的坐标。作入射点处的切面,在极小范围内可将切面

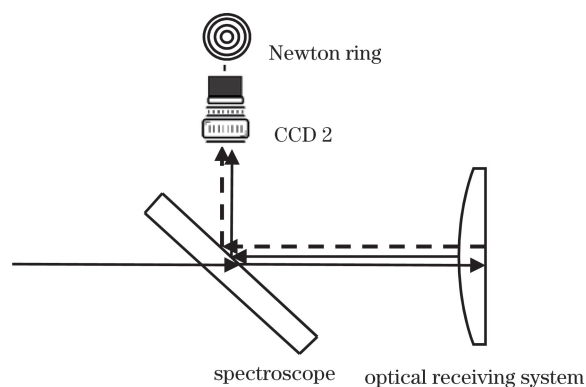


图 2 判断光轴平行性的原理示意图

Fig. 2 Schematic for determining parallelism of optical axis

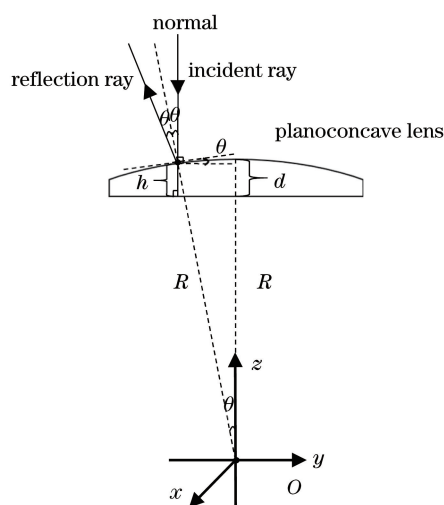


图 3 接收光学系统的坐标系

Fig. 3 Coordinate system of receiving optical system

与平凸透镜的平面看作楔形平板,因此平凸透镜形成的干涉条纹可由无数个入射点在楔形平板形成的干涉条纹叠加而成。楔形平板的光程差 Δ 可表示为

$$\Delta = 2nh \cos(\theta + \gamma) - \lambda/2, \quad (1)$$

式中: n 为透镜的折射率; γ 为 θ 与入射光线在平凸透镜上表面的折射角; λ 为波长。当光束垂直入射时, γ 满足折射定律,当 θ 趋于 0 时, Δ 满足

$$\Delta = 2n(R \cos \theta - R + d) \cos \theta - \lambda/2. \quad (2)$$

由(2)式可知,在选定透镜的实验条件下, Δ 值的大小仅随着 θ 值的变化而变化,在相同 θ 值处, Δ 值也相等。 θ 作为楔形平板的劈尖夹角,其值与入射点到接收镜中光轴的距离有关。在相同 Δ 值处连线成圆,因此圆心与透镜的顶点重合。

当透镜光轴与基准光轴有微小的角度偏差 $\Delta\theta$ 时,相当于平行光斜入射到透镜上,则 Δ 可表示为

$$\Delta = [2n(R \cos \theta - R + d) \cos \theta] \times \cos(\Delta\theta) - \lambda/2. \quad (3)$$

此时透镜的后表面与同轴时的后表面之间有角度偏差,使得透镜所产生的同心干涉环的圆心相对于同轴时的圆心有偏离。由 $\Delta\theta$ 值可计算偏离的距离 Δs ^[19],表达式为

$$\Delta s = (nD/d + 1) \times \Delta\theta \times R, \quad (4)$$

式中: D 为干涉环的观测位置到透镜的距离。因此,由圆心的偏离方向可判断 $\Delta\theta$ 的方向。

利用 MATLAB 软件对透镜表面形成的干涉条纹进行仿真,实验设置 λ 为 635 nm, R 为 30 mm, d 为 10 mm,反射率为 0.2%,透射率为 99.8%,设入射平行光的光强为 1。实验过程中,使用模拟相机对干涉条纹进行观测,当透镜的光轴与平行光的光

轴同轴时,结果如图 4(a)和图 5(a)所示。从图 4(a)和图 5(a)可以看到,干涉条纹是以透镜中心轴为圆心的中央疏、边缘密的明暗相间的同心圆环,圆心位置处在视野的正中心,此时明暗条纹呈中心对称。当透镜的光轴与平行光的光轴在方位角有 0.5 mrad 和 1.5 mrad 的偏差时,结果如图 4(b)和图 4(c)所示。从图 4(b)和图 4(c)可以看到,圆心位置与视野的正中心有偏离,圆心左右两边的亮条纹数不相等,视野内半径大的条纹是不完整的圆环。从图 5(b)和图 5(c)归一化光强分布曲线可以明显看到圆心的位置以及偏离值的大小,偏离值分别为 0.015 mm 和 0.045 mm,与(4)式的计算结果一致。

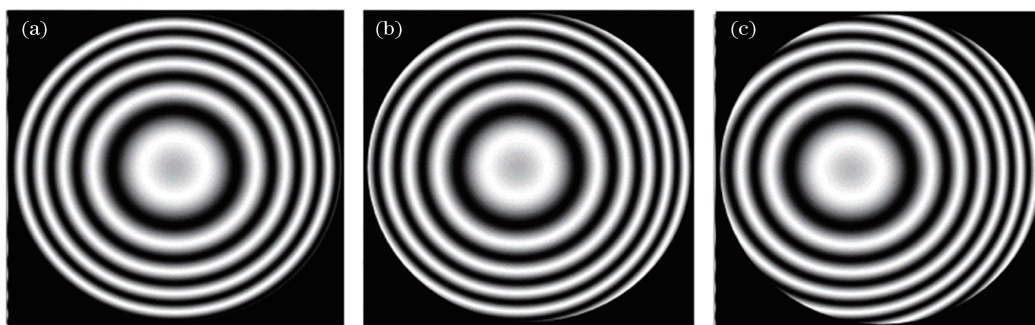


图 4 不同角度偏差的 MATLAB 仿真干涉图样。(a) 0 mrad; (b) 0.5 mrad; (c) 1.5 mrad

Fig. 4 MATLAB simulation interference patterns with different angle deviations. (a) 0 mrad; (b) 0.5 mrad; (c) 1.5 mrad

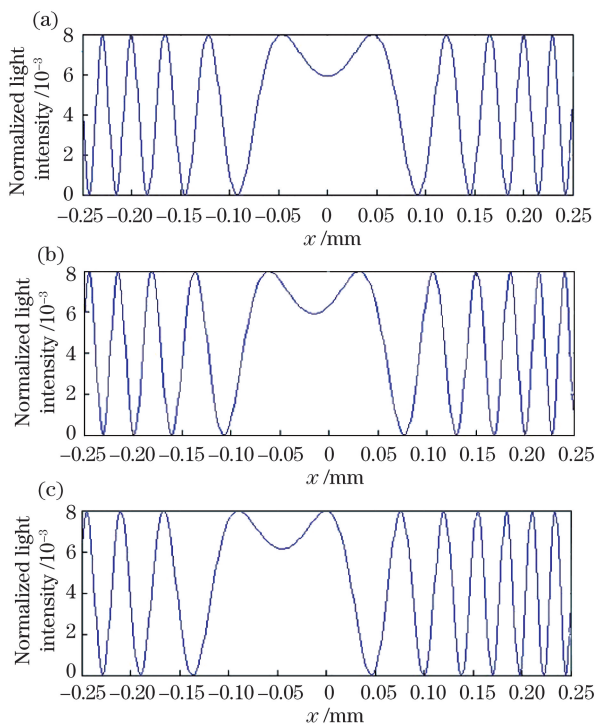


图 5 不同角度偏差的光强分布曲线。(a) 0 mrad; (b) 0.5 mrad; (c) 1.5 mrad

Fig. 5 Light intensity distribution curves with different angle deviations. (a) 0 mrad; (b) 0.5 mrad; (c) 1.5 mrad

3 实 验

3.1 校准实验的构建

采用所提的校准系统,对同一型号的两台激光测距机的接收光轴与发射光轴的平行性进行多次校准测试。激光测距机在设计时,结构上通常保证发射、接收的光轴近似同轴。装调测距机的过程中,结构件的加工误差会导致实际光轴方向与设计的理想光轴方向产生偏差,该偏差会降低测距机的测距能力。利用所提的校准系统可精确校准激光发射与接收的光轴。首先将待装调的测距机安装在已搭建好的校准系统的调试平台上,利用校准系统的基准光轴来检测校准接收光学系统的光轴。在俯仰方向和方位方向微调激光测距机的接收光学系统,利用 CCD 2 实时采集干涉条纹。采集的干涉图像质量受到光照的影响较大,当光线强时成像清晰,圆环的边缘清晰且对比度较高;当光线弱时成像模糊,大量噪声导致环线边缘不清晰。为了拟合牛顿环干涉条纹的圆心且保证拟合精度,计算机对采集的图像进行处理^[20],处理流程如图 6 所示。

利用计算机来拟合牛顿环干涉条纹中完整的环,当半径最大的圆环外没有亮条纹时,明暗条纹呈

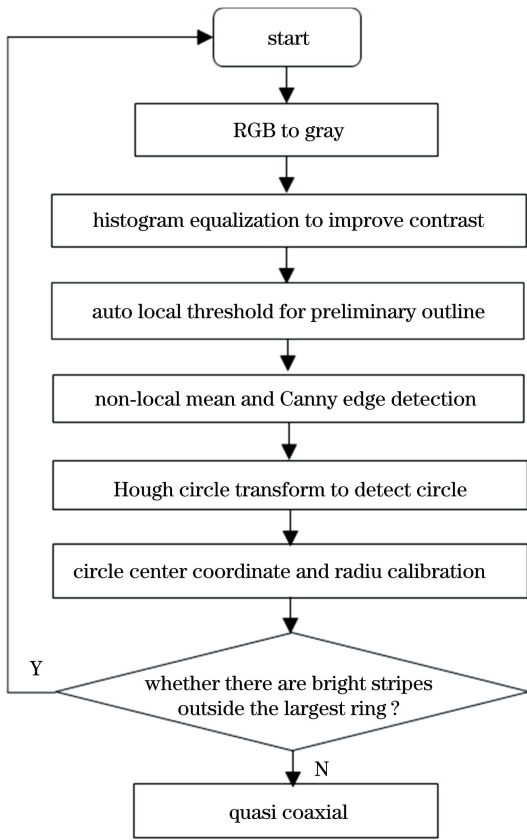


图 6 干涉条纹图像处理的流程

Fig. 6 Flow chart of interference fringe image processing
中心对称,此时判定为同轴。微调接收光学系统的过程中,利用计算机来测量对应干涉条纹圆心的坐标位置,并记录接收光学系统所在位移台的坐标。计算圆心坐标位置 O_{xy} 与同轴时的圆心坐标位置的偏差,通过(4)式来计算接收光学系统和基准光轴之间的夹角 $\Delta\theta_1$ 。接收光学系统和基准光轴之间的实际夹角 $\Delta\theta_R$,可表示为

$$\Delta\theta_R = \Delta l / R_{ro}, \quad (5)$$

式中: R_{ro} 为旋转半径,实验中设为 100 mm; Δl 为位移台的位置变化,由接收光学系统所在位移台的位置 l_{or} 与同轴时的位移台的位置偏差得到。

接收光学系统的光轴校准完毕后,再启动探测器数据采集程序对探测器的电路板进行微调,使得接收系统探测器的位置处于最佳。最后通过测量发射光学系统发射的激光在测量系统中红外感光材料上的光斑位置来瞄准其方向,校准发射光学系统的光轴与基准光轴同轴。利用计算机来标定 CCD 1 拍摄的光斑的中心位置 (x_1, y_1) , 并与已保存的基准光轴的光源位置 (x_0, y_0) 进行对比,发射光学系统和基准光轴之间的夹角 $\Delta\theta_2$ 为

$$\Delta\theta_2 = \arctan[\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} / f], \quad (6)$$

式中: f 为 OAP 镜的焦距。当两位置重合时,发射光学系统的光轴校准完毕,则激光测距机的收发光轴同轴校准完成。

3.2 误差分析

由于校准光轴的平行性,采用 OAP 镜、CCD、调试平台、参考光源和分光镜等关键部件,因此测量误差主要从以下几个方面进行分析。

1) 由 OAP 镜引入的测量误差。OAP 镜的口径为 200 mm,焦距为 2000 mm,离轴量为 150 mm。抛物面形加工的允许误差为 $\lambda/6$, $\lambda = 1535 \text{ nm}$ 。OAP 镜引入的测量误差主要与面形加工误差有关^[21],根据最大熵原理,可将该误差设定为在最大误差范围内服从均匀分布,则由 OAP 镜引入的测量误差 $u_{OPA1} \approx 0.015''$ 。

2) 由牛顿环干涉条纹的圆心定位引入的测量误差。圆心的定位精度主要与圆心检测算法以及 CCD 2 像素尺寸有关。实验采用的圆拟合算法可以达到亚像素精度,运算精度高,因此圆心的定位误差主要与利用 CCD 2 测量圆心的最大定位误差有关,此时为 0.5 pixel。实验采用的 CCD 2 像素尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$,根据最大熵原理,对于 2000 mm 的焦距系统由圆心定位误差引入的测量误差 $u_{CCD2} \approx 0.1''$ 。

3) 由激光光斑的中心定位引入的测量误差。利用 CCD 1 测量光斑中心的最大定位误差为 0.5 pixel,实验采用的 CCD 1 像素尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$,由激光光斑的中心定位误差引入的测量误差 $u_{CCD1} \approx 0.1''$ 。

4) 由调试平台的位移台仪器测量引入的测量误差。根据位移台生产厂商提供的技术说明书,多维位移台的方位角和俯仰角的精度小于 $2''$ 。二维位移台在水平方向和垂直方向的定位精度可达 $5 \mu\text{m}$,根据最大熵原理,测量误差服从均匀分布,则二维位移台引入的测量误差 $u_{pl} \approx 0.3''$ 。实验主要对 CCD 1、CCD 2 和参考光源进行二维位移台承载,对测距机发射系统、接收光学系统和探测器进行多维位移台承载。

5) 分光镜的安装误差最大为 $0.2''$ 。

6) 所提系统主要应用在实验室光轴的平行性校准,良好的实验室环境可以保证其校准的可靠性和稳定性。实验环境变化会引起测量误差,周围环境的温度、湿度、气压、振动和照明等变化会影响测量系统中各个组成部分的工作状态和几何尺寸,也会给最终的测量结果带来误差^[22],该误差属于附加误差。

综上所述,接收光轴与基准光轴的平行性测量 合成误差约为

$$u_{\text{rec}} = \sqrt{u_{\text{OPA}}^2 + u_{\text{CCD}2}^2 + 8 \times u_{\text{pl}}^2 + 4 \times 2^2 + 0.2^2} \approx 4'' \quad (7)$$

发射光轴与基准光轴的平行性测量合成误差约为

$$u_{\text{emi}} = \sqrt{u_{\text{OPA}}^2 + u_{\text{CCD}1}^2 + 6 \times u_{\text{pl}}^2 + 2 \times 2^2 + 0.2^2} \approx 3'' \quad (8)$$

校准后接收光轴与发射光轴的平行度误差约为

$$u = \sqrt{u_{\text{OPA}}^2 + u_{\text{CCD}1}^2 + u_{\text{CCD}2}^2 + 12 \times u_{\text{pl}}^2 + 6 \times 2^2 + 0.2^2} \approx 5'' \quad (9)$$

由(7)~(9)式可知,光轴平行性校准的精度优于 $10''$ 。

3.3 测试结果分析

实验主要利用牛顿环干涉条纹来验证校准光轴平行性的准确性,因此主要对接收光学系统的光轴与基准光轴的夹角进行测量,对发射光学系统仅进行光斑重合的校准。

为了提高测量精度,减小随机误差的影响,记录

150组原始测量数据,其中表1为接收光学系统的光轴与基准光轴同轴时的测量数据,对部分数据进行处理,结果如表2和图7所示(实验中 $R=60\text{ mm}$)。其中 u_1 为 $\Delta\theta_1$ 与 $\Delta\theta_R$ 的误差值,即利用所提系统对接收光学系统光轴与基准光轴平行性测量的误差。表2选取的14组数据是在已校准好方位角并固定好方位角的情况下,仅微调接收光学系统的俯仰角时的数据采集结果,其中 N 为样本数量。

表1 接收光学系统的光轴与基准光轴同轴的测量数据

Table 1 Measurement data of coaxial between optical axis of receiving optical system and reference optical axis

N	l_{or}/mm	$\Delta\theta_R/\text{mrad}$	$(O_{xy}/3.45)/\mu\text{m}$	$\Delta\theta_1/\text{mrad}$	$u_1/('')$
10	12.00	0	(1019.9,763.8)	0	0

表2 接收光学系统的光轴与基准光轴的夹角测量数据

Table 2 Measurement data of angle between optical axis of receiving optical system and reference optical axis

No.	l_{or}/mm	$\Delta l/\text{mm}$	$\Delta\theta_R/\text{mrad}$	$(O_{xy}/3.45)/\mu\text{m}$	$\Delta s/\text{mm}$	$\Delta\theta_1/\text{mrad}$	$u_1/('')$
1	12.350	0.350	3.500000	(1018.6,703.6)	0.207738	3.462307	7.78
2	12.300	0.300	3.000000	(1019.4,711.4)	0.180783	3.013049	2.69
3	12.250	0.250	2.500000	(1019.4,720.0)	0.151120	2.518664	3.85
4	12.200	0.200	2.000000	(1020.0,728.8)	0.120751	2.012508	2.58
5	12.150	0.150	1.500000	(1019.7,736.8)	0.093153	1.552543	10.84
6	12.100	0.100	1.000000	(1019.4,746.7)	0.059020	0.983670	3.37
7	12.050	0.050	0.500000	(1020.5,755.0)	0.030431	0.507175	1.48
8	11.950	-0.050	0.500000	(1021.1,772.7)	0.056597	0.516381	3.38
9	11.900	-0.100	1.000000	(1020.3,780.2)	0.053148	0.943280	11.70
10	11.850	-0.150	1.500000	(1021.8,789.6)	0.089251	1.487517	2.57
11	11.800	-0.200	2.000000	(1022.3,798.0)	0.118280	1.971336	5.91
12	11.750	-0.250	2.500000	(1021.7,807.3)	0.150203	2.503391	0.70
13	11.700	-0.300	3.000000	(1022.9,815.6)	0.179009	2.983491	3.41
14	11.650	-0.350	3.500000	(1022.3,824.8)	0.210613	3.510214	2.11

从表2可以看到,计算得到 u_1 的平均值 $\Delta u_1 = 4.455''$;圆心坐标位置 O_{xy} 的横坐标在微调的过程中有变动,当微调俯仰角时方位角产生联动变化并被CCD2记录,该过程引入附加误差。

通过以上方法可实现两台激光测距机中收发光

轴的同轴调节,其测距能力为3000 m,然后分别在外场对这两台测距机进行测试,分别记录1000组原始连续测量数据,部分测试结果如表3所示,其中 D 为平均测量距离, u_D 为测量误差绝对值的均值, N 为样本数量。从表3可以看到,两台测距机能够较

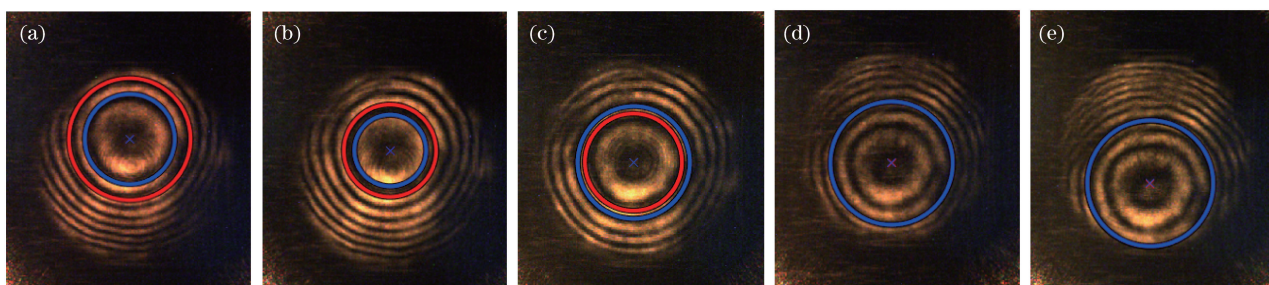


图 7 圆心坐标的标定。(a) No. 4; (b) No. 5; (c) No. 7; (d) No. 11; (e) No. 12

Fig. 7 Calibration of center coordinates. (a) No. 4; (b) No. 5; (c) No. 7; (d) No. 11; (e) No. 12

好地测出在 3000 m 左右的目标距离信息,测量误差小于 0.5 m,达到其测距能力的极限并且精度高,说明利用牛顿环干涉条纹校准光轴平行性的方法满足测距机的校准要求。

表 3 激光测距机的测量结果

Table 3 Measurement results of laser rangefinder

Laser rangefinder	N	D / m	u_D / m
1	219	3271.88	0.48
2	222	3270.98	0.43

4 结 论

针对当前已有的宽光谱多光轴的平行性校准方法,存在对含探测器的非成像接收系统的光轴校准不适用问题,提出一套可视化的基于牛顿环干涉条纹的光轴平行性校准方法。该方法通过大口径平行光管来建立基准光轴,根据光学系统镜面反射光产生牛顿环干涉条纹的原理,通过拟合牛顿环条纹的形状和测量圆心的坐标位置,来计算被测光学系统光轴与基准光轴的夹角并进行校准。该方法操作简单,实用性强,测量精度高,在校准过程中采用 CCD 相机代替人眼来判断校准的状态,避免由人眼观察带来的偏差,极大地提高装调精度和效率,光轴平行性校准的精度优于 $10''$ 。实验证明,接收光轴与基准光轴的平行性测量误差优于 $5''$,能够较好地满足校准宽光谱多光轴的光电产品和光电武器装备平台的应用需求。

参 考 文 献

- [1] Ma S B, Yang H, Yang Z J, et al. Multi-spectral axes parallelism calibration of electro-optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(5): 917-921. 马世帮, 杨红, 杨照金, 等. 光电系统多光轴平行性校准方法的研究[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 917-921.
- [2] Zhang Y, Wu H, Niu G. Consistency detection method for large spacing axis based on non-cooperative target image processing technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051203. 张勇, 吴浩, 牛刚. 基于非合作目标图像处理技术的大间距轴线一致性检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051203.
- [3] Gorshkov V A, Churilin V A. Multispectral apparatus based on an off-axis mirror collimator for monitoring the quality of optical systems [J]. Journal of Optical Technology, 2015, 82(9): 646-648.
- [4] Xiao Z J, Guo X X, Xia Y, et al. Research on detection system of optical sights triaxial parallelism [J]. Optik, 2014, 125(16): 4427-4430.
- [5] Chen D C. Portable alignment device for an off-axis parabolic mirror optical axis adjustment [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(1): 33-37.
- [6] Zhang X M, Zhang J L, Wang Y Y, et al. Key technology of adjustment for multi-axes calibration device [J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(4): 0401007. 张向明, 张锦亮, 王养云, 等. 多光轴校轴仪调校关键技术研究 [J]. 应用光学, 2014, 35(4): 0401007.
- [7] Chen Z B, Xiao W J, Ma D X, et al. A method for large distance multi-optical axis parallelism online detection [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0112006. 陈志斌, 肖文健, 马东玺, 等. 大间距多光轴一致性野外在线检测方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0112006.
- [8] METRONOR. Military boresight solutions [EB/OL]. [2020-04-12]. <https://metronor.com/military-boresight-solutions/>.
- [9] Xiao W J, Ma D X, Chen Z B, et al. Research on a detection system for a large distance multi-axis boresight [J]. Journal of Optical Technology, 2016, 83(10): 622.
- [10] Huang F Y, Li G, Shi Y S, et al. Design and error analysis of multi-spectral and multi-axis parallelism

- testing scheme[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(2): 180219.
- 黄富瑜, 李刚, 史云胜, 等. 多光谱多光轴平行性检测方案设计与误差分析[J]. 光电工程, 2019, 46(2): 180219.
- [11] Li Y C, Qiu L R, Zhang P S, et al. Development of portable multi-optical axes parallelism calibration system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1008002.
- 李雅灿, 邱丽荣, 张鹏嵩, 等. 便携式多光轴平行性检校系统的研制[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1008002.
- [12] CI systems. Advanced weapon boresight system (O-AWBS)[EB/OL]. [2020-04-12]. <https://www.ci-systems.com/Advanced-Weapon-Boresight-AWBS>.
- [13] Luo M X, Li S, Gao M G, et al. Optical-axis collimation of biaxial laser ceilometer based on CCD[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(8): 1002-1005.
- 罗明星, 李胜, 高闽光, 等. 基于 CCD 的双轴激光云高仪光轴平行调节方法[J]. 激光与红外, 2017, 47(8): 1002-1005.
- [14] Wang T, Tian L D, Zhao J K, et al. Research on space target attitude simulation based on collimator[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0612003.
- 王涛, 田留德, 赵建科, 等. 基于平行光管的空间目标姿态模拟研究[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0612003.
- [15] Lee Y H. Alignment of an off-axis parabolic mirror with two parallel He-Ne laser beams[J]. Optical Engineering, 1992, 31(11): 2287-2292.
- [16] Luo X X, Liu B Q, Sun D P, et al. Opto-axes parallelism detection method for laser-range-finder based on CCD[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(3): 460-463.
- 骆新新, 刘秉琦, 孙东平, 等. 基于 CCD 的激光测距机光轴平行性检测[J]. 半导体光电, 2009, 30(3): 460-463.
- [17] Luo Y J. Experimental observation of non-fixed Frontier Newtonian rings[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition), 1996, 13(S1): 42-44.
- 罗於静. 非定域牛顿环的实验观察[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 1996, 13(S1): 42-44.
- [18] Huang S J. On the display of Newton's ring by He-Ne laser[J]. Laboratory Research and Exploration, 1994, 13(1): 99-100.
- 黄曙江. 浅谈由氦氖激光显示牛顿环[J]. 实验室研究与探索, 1994, 13(1): 99-100.
- [19] Mu G G, Zhan Y L. Optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009: 169-189.
- 母国光, 战元龄. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 169-189.
- [20] An P. Processing and analysis of regular interference fringe pattern[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2017: 22-34.
- 安平. 规则干涉条纹图像的处理与分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2017: 22-34.
- [21] Liu Y C, Zhang X L, Gao Y, et al. Study for multi-spectral axes parallelism calibration of photoelectric tracking and aiming system[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2015, 35(4): 5-8, 23.
- 刘亚辰, 张新磊, 高扬, 等. 光电跟踪瞄准系统的多光轴平行度校准方法研究[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(4): 5-8, 23.
- [22] Wang L, Li Y H. Research on calibration method of photoelectric system optical axis parallelism[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2013, 34(3): 72-75.
- 王雷, 李永恒. 光电系统光轴平行度校准方法研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2013, 34(3): 72-75.