

光电成像系统中探测器的精密装调与测试

王潇潇 曾行昌 王志杰 李永锋 黄奕 朱胜伟

Precision assembly and testing for imaging detector in photoelectric imaging system

WANG Xiaoxiao, ZENG Xingchang, WANG Zhijie, LI Yongfeng, HUANG Yi, ZHU Shengwei

引用本文:

王潇潇, 曾行昌, 王志杰, 等. 光电成像系统中探测器的精密装调与测试[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 163–169. DOI: 10.5768/JAO202546.0105001

WANG Xiaoxiao, ZENG Xingchang, WANG Zhijie, et al. Precision assembly and testing for imaging detector in photoelectric imaging system[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 163–169. DOI: 10.5768/JAO202546.0105001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0105001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光电成像系统动态调制传递函数测量装置

Dynamic modulation transfer function measuring device for photoelectric imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 592–596 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401004>

航空光电成像系统像移补偿技术研究

Image motion compensation technology of aerial photoelectric imaging system

应用光学. 2022, 43(3): 424–429 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0302001>

探测器像元尺寸对航空光电系统成像性能影响分析

Influence of detector pixel size on imaging performance of airborne optoelectronic system

应用光学. 2022, 43(4): 583–591 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401001>

基于亚像素和梯度引导的光场图像超分辨率

Light field images super-resolution based on sub-pixel and gradient guide

应用光学. 2024, 45(5): 956–965 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0502003>

高分辨率微线结构光测量系统设计

Design of high-resolution thin line structured light measurement system

应用光学. 2023, 44(5): 1073–1079 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0503003>

MCP成像探测器前端电子学增益补偿

Research on front-end electronics gain compensation of MCP imaging detector

应用光学. 2022, 43(6): 1165–1174 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0604017>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082(2025)01-0163-07

引用格式: 王潇潇, 曾行昌, 王志杰, 等. 光电成像系统中探测器的精密装调与测试[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 163-169.

WANG Xiaoxiao, ZENG Xingchang, WANG Zhijie, et al. Precision assembly and testing for imaging detector in photoelectric imaging system[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 163-169.



在线阅读

光电成像系统中探测器的精密装调与测试

王潇潇¹, 曾行昌^{2,3}, 王志杰¹, 李永锋², 黄奕², 朱胜伟²

(1. 西安石油大学 计算机学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安应用光学研究所 工艺技术研究室, 陕西 西安 710065;
3. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 成像探测器的装配定位状态对光电侦察系统的性能有重要影响, 装调过程中探测器像面的倾斜、平移、旋转、位置等都会带来多维度误差, 导致超视距观测系统成像探测器的像面失调, 造成图像模糊、光轴偏移等现象。本文设计和搭建了一套光学测量系统, 采用灰度梯度的图像清晰度评价方法, 自动判别成像探测器的装调误差。光学测量系统对成像探测器的装调精度可达 0.015 mm, 并且可以根据系统成像的多感兴趣区 (ROI) 灰度梯度值的误差大小, 给出装调的合格性判断。该光学精密装调系统为实现“以机代人”对探测器进行多维精确量化装调奠定了基础。

关键词: 成像探测器; 光学测量系统; 图像清晰度与分辨率; 灰度梯度值; 安装误差

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0105001

Precision assembly and testing for imaging detector in photoelectric imaging system

WANG Xiaoxiao¹, ZENG Xingchang^{2,3}, WANG Zhijie¹, LI Yongfeng², HUANG Yi², ZHU Shengwei²

(1. School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Process Technology Laboratory, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 3. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The positioning state of the imaging detector assembly has an important influence on the performance of the photoelectric reconnaissance system. The tilt, translation, rotation and position of the detector image plane will bring multi-dimensional errors during the installation and adjustment process, leading to the image plane imbalance of the imaging detector in the over-the-horizon observation system, and resulting in image blur and optical axis offset. A set of optical measurement system was designed and built, which adopted the image sharpness evaluation method of gray gradient to automatically judge the installation and adjustment errors of imaging detector. The installation accuracy could reach 0.015 mm, and the qualification judgment of the installation could be given according to the errors of the gray gradient value of the multi-region of interest (ROI) image of the optical measurement system. The optical precision assembly system lays a foundation for the realization of multi-dimensional accurate quantitative assembly of the detector by "mechanical agent".

Key words: imaging detector; optical measurement system; image sharpness and resolution; gray gradient value; installation errors

收稿日期: 2024-03-04; 修回日期: 2024-05-06

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2023-JC-QN-0777); 陕西省重点研发计划 (2022GY-035); 结冰与防除冰重点实验室开放课题项目 (IADL20230405)

作者简介: 王潇潇 (1975—), 女, 博士, 副教授, 主要从事计算智能及其工业应用技术研究。E-mail: xxwang@xsyu.edu.cn

引言

成像探测器是光电武器系统中超视距电视观瞄系统的重要组成原件^[1-3],通过与光学镜头组合,构成了定焦或多视场连续变焦^[4]可见光探测系统。入射光通过入射瞳进入光学镜头的多级透射光路系统中,最终将光线投射和聚焦到位于焦距位置上的成像探测器上,成像探测器将光学信号转换为电信号,传输到后端的信号采集和处理系统。光电武器系统与超视距电视及光路示意图如图1所示。投射到成像探测器靶面上的光为非平行光,因此成像探测器中心与光轴的重合度及靶面与光轴的垂直度,都会影响电视观瞄系统的性能指标,包括分辨率、视场、光轴一致性等。成像探测器的装配定位状态对电视观瞄系统的性能指

标具有决定性影响,具体来说,成像探测器的轴向定位精度将影响图像清晰度与分辨率,径向定位精度将影响光轴一致性,这些指标最终都会对成像质量有较大影响^[5]。目前,光电侦察系统中成像探测器的装调,是在实验室环境内对照光具座分化目标,对探测器的安装位置进行调整,然后将产品运输到室外环境,通过远距离实景测试,对成像探测器的位置进行二次调整,最终由经验丰富的装调人员对系统是否装调到位进行评判。现有的装调方法,严重依赖人眼观察的经验,缺乏量化指标,误差较大,并且手工对准装调定位精度不足,需反复性试错,效率极低。因此,亟需发展一种电视观瞄系统成像探测器的参数化计算机辅助装调技术及方法。

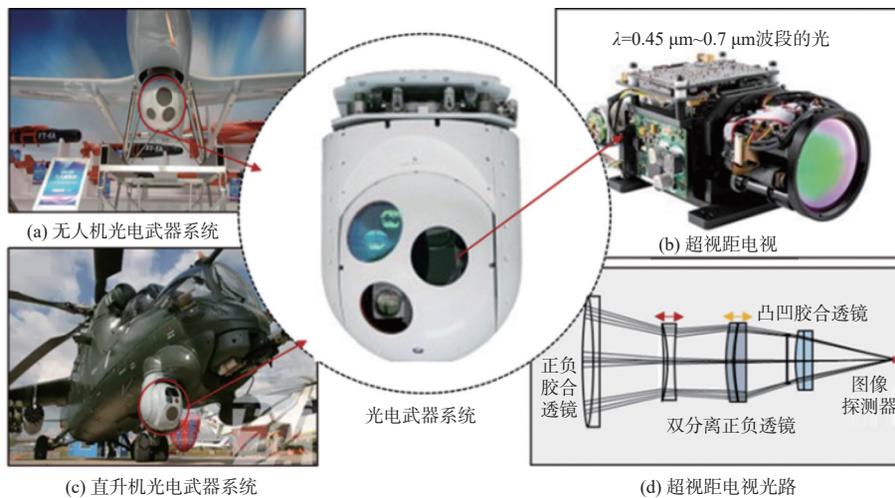


图1 光电武器系统与超视距电视及光路示意图

Fig.1 Schematic diagram of photoelectric weapon system with over-the-horizon television and optical path

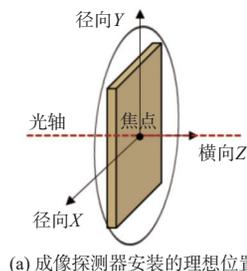
本文基于灰度梯度的图像清晰度评价方法^[6-7],通过搭建光学测量系统,研究成像探测器像面位置失调对成像质量的影响规律,构建了光轴偏移与像倾斜的解算模型,为成像探测器在空间六维失调的分析计算提供依据,可实现电视观瞄系统成像探测器的精密装调,并且可以根据该光学测量系统成像的多感兴趣区(ROI)灰度梯度值的误差大小,给出装调的合格性判断。本研究实现了电视观瞄系统成像探测器装调过程的量化和直观化,为实现“机械代人”对探测器的多维精确量化装调奠定了基础。

位置等多种、多维度的误差^[8-10],导致系统像面位置失调,造成图像模糊、光轴偏移等现象。这些误差往往相互交联,产生的问题也会相互叠加,成像探测器安装过程中的位置类型如图2所示。由图2可知,探测器靶面实际焦面与理想焦面的偏差有位置偏差和旋转偏差,位置偏差为X/Y/Z轴的位移偏差,分别表示为 $\Delta X/\Delta Y/\Delta Z$,旋转偏差为绕X/Y/Z轴的角度偏差,分别表示为 $\Delta\beta/\Delta\alpha/\Delta\gamma$ 。

1 理论分析

1.1 成像探测器装配调整误差

成像探测器装调过程中有倾斜、平移、旋转、



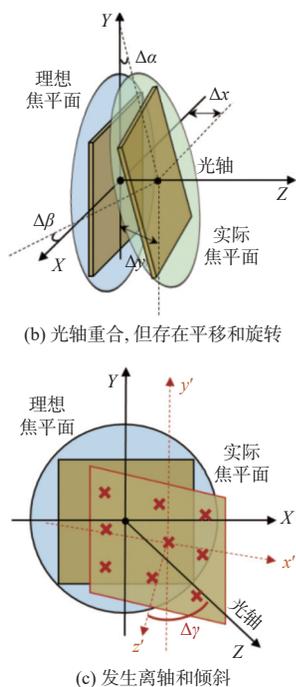


图2 成像探测器安装过程中的位置类型

Fig. 2 Type of imaging detector position in process of installation

1.2 成像探测器焦面位置失调的计算

成像探测器焦面位置的失调量, 是表征成像探测器的焦面中心与电视像焦面中心沿光轴的偏离量。本文通过搭建如图3所示成像探测器像面装调测试系统, 进行成像探测器焦面的装配误差测量及装调。从图3可以看出, 待调的超视距电视探测器放置于目标发生装置前方, 目标发生装置中的靶标位于平行光管物镜的后焦面处, 靶标经物镜后形成无穷远目标像, 并进入电视系统, 经电视物镜成像于位于焦面的 CCD 成像探测器上。如果将平行光管物镜与电视物镜看成一套光学系统, 那么靶标与探测器上所成的像具有物像共轭关系。根据高斯公式^[11-13], 靶标相对于平行光管物镜焦平面的离焦量与 CCD 探测器的失调量之间存在明确的计算关系, 即:

$$\frac{b}{\Delta a} = \left(\frac{f'_{Cl}}{f'_{TV}} \right)^2 \quad (1)$$

式中: b 为靶面的离焦量; Δa 为探测器的失调量; f'_{Cl} 为平行光管物镜的焦距; f'_{TV} 为待调电视物镜的焦距。

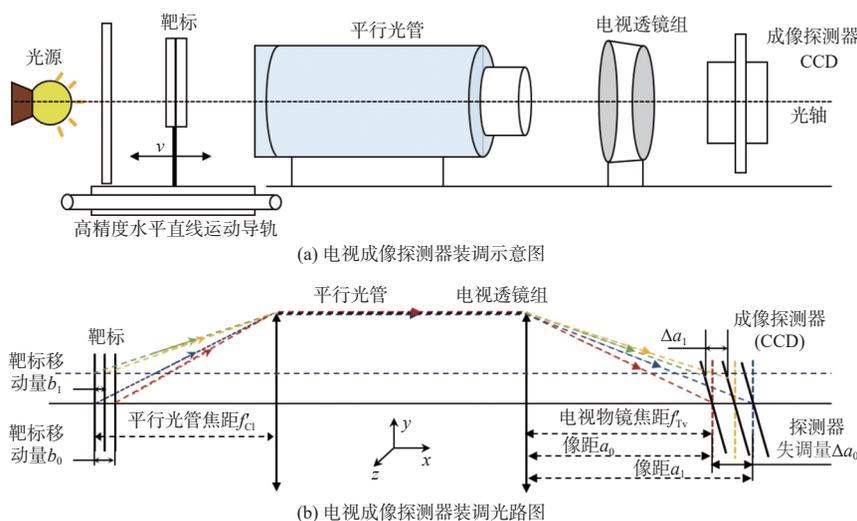


图3 成像探测器像面的装调

Fig. 3 Installation and adjustment of image surface of imaging detector

因此, 由式(1)可获得成像探测器焦面中心位置的失调量:

$$\Delta a = b \left(\frac{f'_{TV}}{f'_{Cl}} \right)^2 \quad (2)$$

1.3 成像探测器像面旋转失调的计算

成像探测器像面旋转失调量, 是表征成像探测器焦面中心与电视像焦面中心重合的前提下, 成像探测器的焦面绕 X/Y/Z 轴的角度偏差。本文在

测量和计算成像探测器像面旋转失调量时, 仍然基于图3所示的成像探测器像面装调测试系统及光学成像模型进行。在经过光学系统光轴对准后, 移动靶标, 实时处理获得的图像, 由清晰度评价算法分别计算如图4所示 $A_1 \sim A_4$ 4个区域图像的清晰度变化情况, 记录下各区域清晰时对应的靶标位置 $b_1 \sim b_4$, 进一步根据 $A_1 \sim A_4$ 4个区域的位置失调量计算出探测器像面绕 Y 轴倾斜度 $\Delta\alpha$ 、

绕 X 轴倾斜度 $\Delta\beta$ 。具体计算公式为

$$\Delta\beta = \sin^{-1} \left(\frac{a_1 - a_2}{d_1 - d_2} \right) \approx \left(\frac{a_1 - a_2}{d_1 - d_2} \right) \quad (3)$$

$$\Delta\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{a_3 - a_4}{d_3 - d_4} \right) \approx \left(\frac{a_3 - a_4}{d_3 - d_4} \right) \quad (4)$$

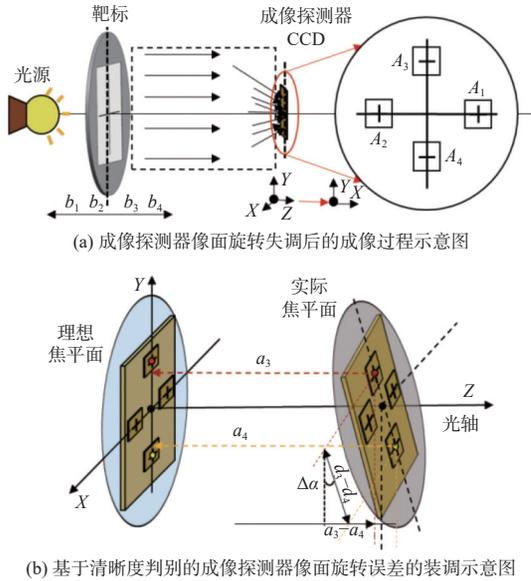


图4 成像探测器像面的旋转失调成像

Fig. 4 Focal plane rotation misalignment of imaging detector

将式(2)带入式(3)和式(4), 获得成像探测器沿 X 轴及倾 Y 轴的旋转倾斜失调量, 即:

$$\Delta\beta = \sin^{-1} \left(\frac{a_1 - a_2}{d_1 - d_2} \right) \approx \frac{|(b_1 - b_2)(f'_{TV}/f'_{Cl})^2|}{u|d_1 - d_2|} \times 206\ 265 \quad (5)$$

$$\Delta\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{a_3 - a_4}{d_3 - d_4} \right) \approx \frac{|(b_3 - b_4)(f'_{TV}/f'_{Cl})^2|}{u|d_3 - d_4|} \times 206\ 265 \quad (6)$$

式中: f'_{Cl} 为平行光管物镜的焦距; f'_{TV} 为待调电视物镜的焦距; u 为成像探测器 CCD 像元尺寸; d_n 为 $A_1 \sim A_4$ 4 个区域中心位置对应的像素坐标。

1.4 基于灰度梯度的图像清晰度评价算法

将图像视为一个二维离散函数, 灰度梯度实际上是这个二维离散函数的导数, 图像的灰度梯度是用差分而不是微分得到的^[14-16]。对于数字图像 $f(x, y)$, 其梯度计算公式如下:

$$\Delta f(x, y) = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \quad (7)$$

由于数字图像是一个离散的二维图像, 微分被差分取代, 即:

$$\Delta f(x, y) = dx(x, y) + dy(x, y) \quad (8)$$

$$dx(x, y) = f(x, y) - f(x + 1, y) \quad (9)$$

$$dy(x, y) = f(x, y) - f(x, y + 1) \quad (10)$$

因此, 灰度梯度模式表示为

$$|\nabla f(x, y)| = \sqrt{[f(x, y) - f(x + 1, y)]^2 + [f(x, y) - f(x, y + 1)]^2} \quad (11)$$

式中: x 和 y 分别表示感兴趣区域像素的横坐标和纵坐标。本文将该方法用于图像位置评估的计算。

2 测试及方法

2.1 测试系统的构建

该成像探测器装调误差的光学测量系统如图5和图6所示, 系统主要由四部分组成: 遮光罩、光学成像系统、运动控制系统和图像处理系统。光学成像系统包含积分球(合肥星月夜光技术研究所 JF-1000 mm)、靶标、平行光管(自主设计)、超视距电视(GJ-2)、成像探测器(CY-DB100C)等; 运动控制系统由导轨(Zolix KSA400-11-X)及控制箱构成; 图像处理系统包含调试计算机、图像采集卡和图像处理软件(自主设计)。其中均值光源(积分球)提供了一种均匀亮度的光源, 平行光管将靶

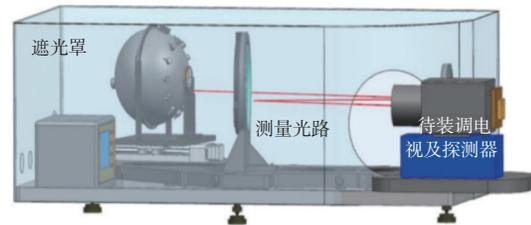


图5 成像探测器精密装调光学测量装置

Fig. 5 Optical measuring device precisely configured for imaging detectors

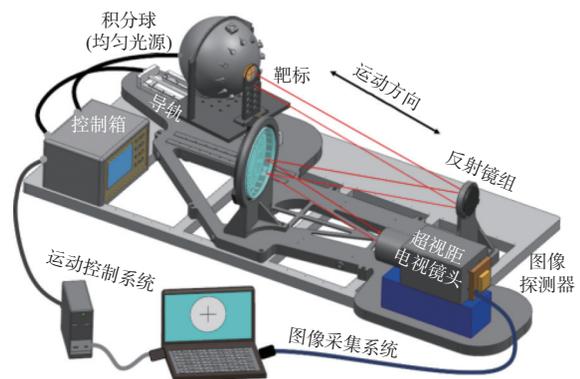


图6 成像探测器精密装调系统光路及装置组成

Fig. 6 Optical path and device composition of imaging detector precision installation and adjustment system

标转换成无穷远的目标, 运动控制系统控制导轨(带动光源和靶标一起移动)水平运动, 改变靶标的离焦量 b (见图 3 所示), 图像处理系统将成像探测器所成的像进行图像采集和处理。

2.2 测试系统的测量精度分析

由测量系统的测量光路图 1(b) 及式 (2)、式 (5) 和式 (6) 可知, 系统在进行不同 ROI 区域失调量及探测器靶面旋转倾斜角度的测量和计算时, 靶标的离焦量是引入测量的唯一误差, 靶标的离焦量由导轨带动光源和靶标一起做水平运动产生。因此, 导轨的运动及重复定位误差是影响系统测量精度的唯一因素。

文中运动控制系统所用导轨为卓立汉光的 Zolix KSA400-11-X, 传动机构为高精度滚珠丝杠, 行程为 400 mm, 导程为 5 mm, 电机为二相 57 步进电机, 光栅尺为 Fagor 的 MX 系列, 运动系统闭环分辨率为 $1 \mu\text{m}$, 重复定位精度 $\leq 3 \mu\text{m}$ 。

由上述分析可知, 测试系统测量精度由离焦量的最大重复定位精度决定, 取离焦量的最大误差 Δb 为最大的重复定位误差, 即 $\Delta b = 3 \mu\text{m}$ 。由式 (2) 获得成像探测器焦面中心位置失调量的最大误差为

$$\Delta a_{\max} = \Delta b \left(\frac{f'_{TV}}{f_{CI}} \right)^2 = 3 \times \left(\frac{358}{3500} \right)^2 = 0.3107 \mu\text{m} \quad (12)$$

该系统的导轨运动增加了光栅尺的位移测量作为闭环运动控制回路, 因此, 离焦量的误差为运动系统闭环分辨率, 即 $\Delta b_{\text{实际}} = 1 \mu\text{m}$ 。由式 (12) 可得实际成像探测器焦面中心位置失调量的最大误差为

$$\Delta a_{\max \text{实际}} = 0.103 \mu\text{m} \quad (13)$$

因此, 本测量系统的位移测量精度可达 $0.001 \mu\text{m}$ 。

由式 (5) 和式 (6) 可知, 绕 X 和 Y 轴像倾斜角测量精度均由位移测量精度决定, 因此, 依照式 (5) 和式 (6) 计算可得绕 X 轴和 Y 轴像倾斜角测量精度可达 1×10^{-7} (')。

2.3 测试过程

根据图 6 进行光学测试系统搭建及各部分功能试调。首先, 粗调电视及成像探测器的位置, 使目标(靶标)在成像探测器上成像, 即靶标图像视场出现在显示器上, 并使靶标成像的十字中心与上位机界面预设“十”字中心重合; 调整导轨的工作原点(光栅尺显示 100 mm), 设置光学系统及导轨运动参数, 包括平行光管焦距 $f_{CI} = 3500 \text{ mm}$, 待装调电视系统焦距 $f'_{TV} = 358 \text{ mm}$, 成像探测器 CCD

像元尺寸 $u = 5.5 \mu\text{m}$ 。

其次, 控制导轨(带动积分球和靶标)从几何零点(光栅尺显示 0 mm)单向连续运动到导轨工作原点(光栅尺显示 100 mm)+20 mm 处。在导轨运动过程中, 图像采集系统实时采集成像探测器所成的像, 并对图像中 $A_1 \sim A_4$ 4 个 ROI 区域的平均灰度梯度值进行计算和处理, 同时获得 $X/Y/Z$ 轴的位移偏差 $\Delta X/\Delta Y/\Delta Z$, 以及绕 $X/Y/Z$ 轴的角度偏差 $\Delta \beta/\Delta \alpha/\Delta \gamma$ 。

最后, 判断 $X/Y/Z$ 和 $\Delta \beta/\Delta \alpha/\Delta \gamma$ 是否满足允许误差(即安装误差小于 0.015 mm, 旋转误差小于 $0.015'$)。若超过误差, 按照计算的 $\Delta X/\Delta Y/\Delta Z$ 和 $\Delta \beta/\Delta \alpha/\Delta \gamma$ 进行第一次探测器位置调整, 探测器位置调整完成后, 再重复调试过程, 最终确保 $\Delta X/\Delta Y/\Delta Z$ 均小于 0.015 mm, $\Delta \beta/\Delta \alpha/\Delta \gamma$ 小于 $0.015'$ 。

3 结果及分析

完成上述装调过程后, 对超视距电视(GJ-2)及成像探测器(CY-DB100C)进行装配和测量, 上位机的实际测量结果显示界面如图 7 所示。图 8 为精密装调过程 ROI 对应的灰度梯度和靶标位置关系图。由图 8 可看出, 成像探测器在初始位置(未经精密装配和调试)时, 4 个 ROI 区域的灰度值方差较分散, 分布范围为 8.45~8.91, 对应离焦量 b 值变化范围(99.31 mm~102.05 mm)也较大。经过精密装配和调试后, 每个 ROI 对应灰度梯度值均小于精密装调前的灰度梯度, 并且均集中在 8.45 ± 0.06 , 对应离焦量 b 值集中在 $101.22 \pm 0.08 \text{ mm}$ 。表明像面所成的图像灰度均匀, 像面与光轴的垂直度较好, 即沿 X 轴和 Y 轴无旋转和倾斜。

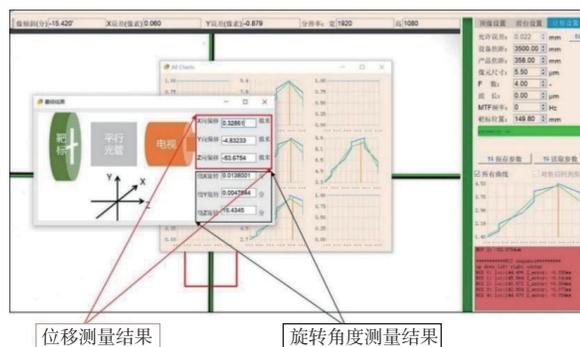


图 7 上位机实际精密装调测量过程结果显示界面

Fig. 7 Upper computer display interface diagram of actual precision installation and adjustment measurement results

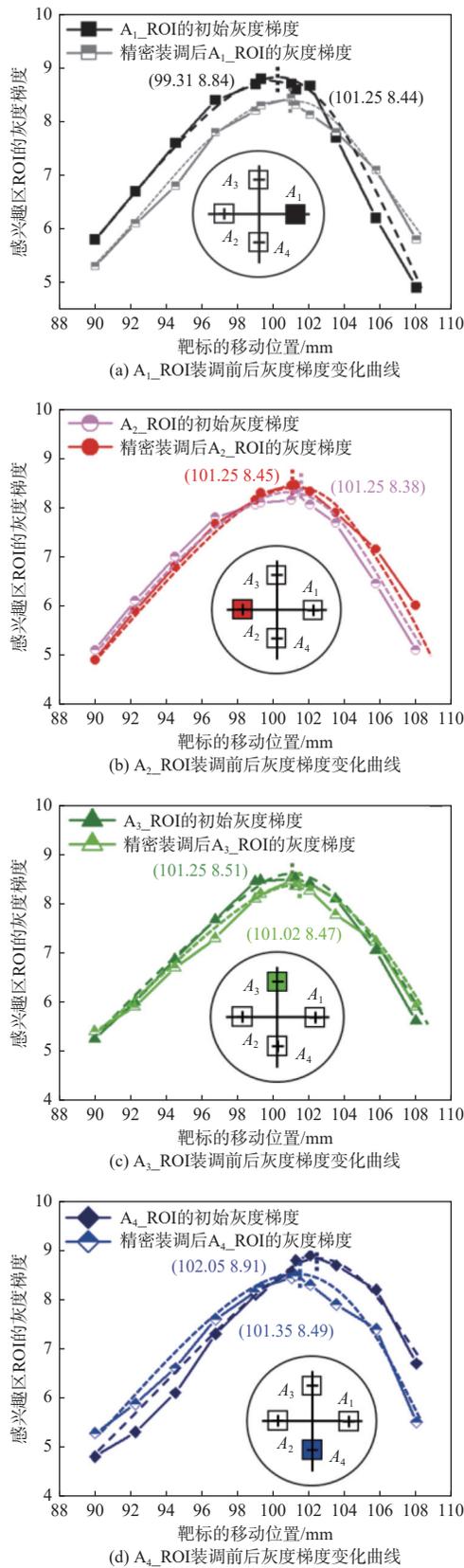


图8 ROI灰度梯度值和目标连续运动位置关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between variance of grayscale gradient value of ROI region with target continuous movement

利用本文研制的成像探测器高精度安装光学测量系统,对成像探测器进行精密装配调试,结果如表1所示。由表1可知,经精密安装调试后,成像探测器的位移偏差小于0.015 mm,旋转倾斜误差小于0.015'。

表1 成像探测器精密装配调试前后的测量结果

Table 1 Measurement results of imaging detector before and after precision assembly and debugging

坐标轴	初始位移偏差/ μm	初始角度偏差/ $^{\circ}$	精密装调后位移偏差/ μm	精密装调后旋转角度偏差/ $^{\circ}$
X	-25.499	0.021 71	11.301	-0.018 44
Y	18.803	0.006 38	14.741	0.004 44
Z	17.513	0.043 58	9.805	0.004 27

4 结论

本文设计和搭建了一套能够自动识别成像探测器安装误差并辅助成像探测器安装的光学测量系统,构建了光学测试系统中物体(目标)离焦量与成像探测器感兴趣区域图像焦距关系的数学模型,并结合图像灰度梯度评价方法,高精度地测量出了成像探测器的平移和旋转偏转角。本研究创新了探测器精密装调的测量手段,开发的光学测量系统和测试方法,实现了成像检测,平移安装误差小于0.015 mm,旋转偏转误差小于0.015'。因此,本研究为“以机代人”实现探测器的多维度精确定量安装奠定了基础。

参考文献:

[1] 梁燕熙. 光电总体集成技术和光电系统的研发[J]. 应用光学, 2005, 26(1): 1-3.
LIANG Yanxi. Development analysis of ptoelectronic integer integrated technology and optoelectronic system[J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(1): 1-3.

[2] TANG Ning, CHEN Yu, YUAN Zhe. Reliability and failure behavior model of optoelectronic devices[C]//2016 International Conference on Industrial Engineering, Management Science and Application (ICIMSA). New York: IEEE, 2016.

[3] 白钊, 贺峻峰, 迟圣威, 等. 小型化多视场电视摄像系统光机设计研究[J]. 应用光学, 2016, 37(2): 157-161.
BAI Zhao, HE Junfeng, CHI Shengwei, et al. Opto-mechanical design of miniature multiple field TV camera system[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(2): 157-161.

- [4] 夏元杰, 段红建, 石欣, 等. 多视场定焦距 CCD 摄像系统结构设计及调校[J]. 应用光学, 2012, 33(2): 240-244.
XIA Yuanjie, DUAN Hongjian, SHI Xin, et al. Structure design and adjustment of multiple-field-of-view fixed-focal-length CCD camera system[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(2): 240-244.
- [5] ZENG Xingchang, GUAN Wei, ZHAO Jin, et al. An optical measurement system for high precision alignment of imaging detectors[J]. [s.n], 2023, 12765(21): 1276521-1276527.
- [6] 潘宏亮, 孙金霞, 韩希珍. 图像清晰度评价与变步长融合调焦方法[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(1): 20220342.
PAN Hongliang, SUN Jinxia, HAN Xizhen. Image sharpness evaluation and variable-step fusion focusing method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(1): 20220342.
- [7] 洪裕珍, 任国强, 孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3401-3408.
HONG Yuzhen, REN Guoqiang, SUN Jian. Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3401-3408.
- [8] 李响, 张晓辉. 基于五棱镜的大型平行光管焦面监测技术及误差修正方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2251-2256.
LI Xiang, ZHANG Xiaohui. Monitoring technique of focal plane position for large scale collimator based on pentaprisms and its error compensation method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2251-2256.
- [9] 徐春梅, 刘秉琦, 黄富瑜, 等. 考虑像差影响的透射式光学系统失调校正方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3020-3024.
XU Chunmei, LIU Bingqi, HUANG Fuyu, et al. New correction method for transmission-type misalignment optical system based on aberration theory[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10): 3020-3024.
- [10] 宋岩峰, 孙卫平, 王国力. 一种高分辨率电视制导连续变焦光学系统[J]. 应用光学, 2013, 34(2): 203-208.
SONG Yanfeng, SUN Weiping, WANG Guoli, et al. One kind of high resolution TV guided optical zoom system[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(2): 203-208.
- [11] 李远洋, 刘立生, 王挺峰, 等. 应用 Collins 公式和像差的 Zernike 展开分析激光光束在实际光学系统传输特性[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 857-862.
LI Yuanyang, LIU Lisheng, WANG Tingfeng, et al. Analysis of laser beam propagation through optical system using Collins formula and Zernike polynomials[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3): 857-862.
- [12] XIAO Zuojiang, CHEN Xuan, ZHU Haibin, et al. The research of the multi-axis consistency assembly adjustment of optical collimator[J]. Key Engineering Materials, 2013, 552: 298-304.
- [13] CAI Yangjian, LANG Qiang. Fractional Fourier transform for elliptical Gaussian beam in spatial-frequency domain[J]. Optik International Journal for Light & Electron Optics, 2003, 13(7): 1025-1032.
- [14] 冯精武, 喻擎苍, 芦宁, 等. 调焦系统中数字图像清晰度评价函数的研究[J]. 机电工程, 2011, 28(3): 354-356.
FENG Jingwu, YU Qingcang, LU Ning, et al. Definition evaluation function of digital image in auto-focusing system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(3): 354-356.
- [15] 莫春红, 刘波, 丁璐, 等. 一种梯度阈值自动调焦算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 323-327.
MO Chunhong, LIU Bo, DING Lu, et al. A gradient threshold auto-focus algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(1): 323-327.
- [16] 曹茂永, 孙衣亮, 郁道银, 等. 基于灰度梯度的数字图像评价方法[J]. 光电工程, 2003, 30(4): 69-72.
CAO Maoyong, SUN Nongliang, YU Daoyin, et al. Digital image evaluation function based on gray gradient[J]. Opto-electronic Engineering, 2003, 30(4): 69-72.