

文章编号 1004-924X(2015)08-2125-09

## 航空红外相机的装调

宋俊儒\*, 邢 辉, 穆生博, 焦文春, 何徐华  
(北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要:**分析了航空红外相机的结构特点,论证了装调该类相机的关键技术。提出一种针对单相机镜头的装调和验证方法。该方法基于经纬仪测试探测器的线阵方向和视轴方向对相机进行粗调,结合质心亚像元定位算法对相机进行精调。提出了基于大口径平行光管和高精度可控转台覆盖所有镜头完成一次性装调的方案,解决了多个视轴相机组视轴高精度一致性装调的问题。实验表明:提出的方法满足航空红外相机的高精度、小公差的装调要求。单相机视轴与光轴夹角、多角度各组相机之间的视轴夹角的实际装调精度达到 0.052 pixel,比常规方法单像元的装调精度提高近 20 倍。提出的方法为航空红外相机的高精度装调提供了一种精确可行的途径,并可应用于结构类似的航天遥感器的装调。

**关键词:**航空红外相机;扫描镜;单镜头装调;质心亚像元定位;分组装调

**中图分类号:**V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152308.2125

## Alignment of aerial multi-angle infrared camera

Song Jun-ru\*, XING Hui, MU Sheng-bo, JIAO Wen-chun, HE Xu-hua

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

\* Corresponding author, E-mail: sjr1987bit@163.com

**Abstract:** The structural characteristics of aerial infrared cameras were analyzed, and the key technologies of alignment of this type of cameras were validated. A method for adjustment and validation of a single camera was proposed. The method adjusted the camera coarsely based on measuring the line array direction and optical axis direction of a detector by a theodolite, and adjusted the camera finely by combining with the sub-pixel subdivision location algorithm. A scheme to complete a one-time adjustment by covering all lenses was proposed based on a large diameter parallel light pipe and a high precision controlled turntable, by which the grouped alignment and validation for the aerial infrared camera were implemented. The simulation results show that the method meets the demands of aerial infrared camera for high accuracy alignment and small tolerances. The adjustment precision of the angle among the boresights of multi-angle camera has reached 0.57 pixel, which is about 20 times that of the traditional methods. The proposed method provides a practical and feasible way to adjust precisely aerial infrared cameras and can be used in adjustment for other aerial sensors with similar structures.

**Key words:** aerial infrared camera; scanning mirror; lens alignment; sub-pixel subdivision location; grouped alignment

收稿日期:2015-04-14;修订日期:2015-05-15.

基金项目:总装预研基金资助项目(No. 9140A21010114HT05063)

## 1 引言

红外扫描相机是一种空间对地观测遥感器,具有帧频低、成像对应视场范围大的特点,多用于地表生态环境监测、资源调查、灾害监控等。红外扫描相机为一维探测系统,它将垂直于飞行方向的物体一次性成像在线阵 CCD 上,随扫描镜的扫描得到一幅全探测视场图像。扫描系统的装调精度直接影响着红外相机的性能,而扫描镜与相机光轴之间的装调误差会在像面上产生像移,影响像质<sup>[1-2]</sup>。为了进一步扩大观测视场,常将多台红外扫描相机按照多个观测角度集成为一台航空红外相机,因此各相机组之间的高精度视轴装调是保证航空红外相机成像质量的重点工作。

多镜头光轴夹角是多镜头相机高精度工作的一个重要参数,装调过程中需实时对它进行检测,其原理与光电设备光轴一致性的检测原理相近。目前,常用的多光轴一致性的检测方法有投影靶标法、激光光轴仪法、五棱镜法、大口径平行光管法和分光路投射法等<sup>[3-5]</sup>。这些方法操作较为复杂,使用设备昂贵,多用于检测光电设备的光轴一致性,并非专门针对航空相机,检测精度通常在一个像元的水平,很难满足航空相机 10" 级的装调要求。

本文根据红外相机的扫描结构特点,分析了扫描镜和探测器的空间位置关系,通过将目标直后规范地成像在探测器上,建立了扫描镜法线、转轴、探测器线阵方向和视轴方向之间的数学关系。然后使用经纬仪精确测量上述方向,并结合质心亚像元定位算法实现了红外相机单镜头相机的高精度装调。该方法将整台红外相机按照观测视轴分组,通过高精度旋转平台和质心亚像元定位算法计算像点质心在像面上扫过的轨迹,可高精度按组装调航空红外相机。

## 2 航空红外相机

航空红外相机由多个(或多组)镜头组成,每个(或每组)镜头观测一个角度,所有镜头组成一个宽幅视场,如图 1 所示。光机扫描系统是航空红外相机极其重要的组成部分,用以实现大视场扫描观测。它有多种结构形式,这里采用物方扫

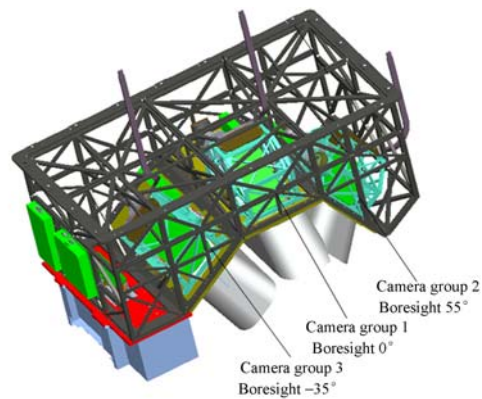


图 1 航空红外相机组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of airborne infrared camera composition

描方式,扫描镜位于物像之间,扫描镜转轴与镜面平行。工作时,扫描镜绕转轴连续转动,扩大有效视场角,收集地物信息,并将地物信息反射给主光学系统。

采用扫描法扩大镜头视场的方式带来的一个技术问题是:为了保证相机的成像质量,扫描镜的装调精度必须很高,扫描镜转轴和镜面也要高精度平行。但实际工作中扫描镜法线与旋转轴不完全垂直,而是存在一定角度,此时扫描镜将成“圆锥式扫描”,物在探测器上的像会出现偏差,造成图像混乱<sup>[6]</sup>。此外,扫描法通常采用线阵成像探测器,线阵方向与扫描镜转轴也需要高精度平行。当扫描镜旋转轴与线阵方向不完全平行而是存在一定角度时,物在探测器上的像会扭曲。上述情况都会使得后期的数据处理与图像配准变得复杂,甚至难以实现。

航空红外相机装调的另一个关键点是各镜头之间视轴的精确装调,以确保各相机视轴夹角(如图 1 所示)的高精度匹配。因为各镜头视轴的不精确匹配会给后续图像拼接配准处理造成极大困扰,从而大幅降低图像的实时处理、合成和显示效率。

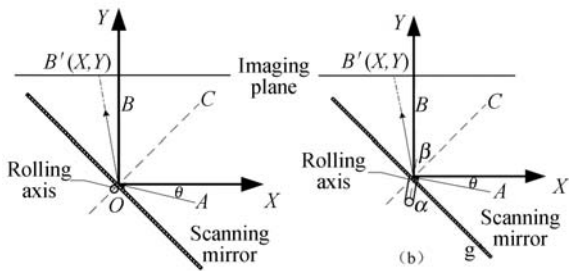
## 3 航空红外相机的装调

针对航空红外相机的结构特点、装调关键点及装配公差,本文制定了先精确装调扫描镜,再将扫描镜与带焦面组件的单镜头进行高精度装配的单镜头装调方案,以及在相机主结构架上对航空红外相机按视轴分组进行高精度装调的整机装调方案。

### 3.1 单镜头相机装调

#### 3.1.1 扫描镜的装调

扫描镜旋转轴方向的调整计算过程比较复杂。扫描镜安装到转轴上后,理论上扫描镜法线与转轴垂直,在扫描过程中扫描镜绕旋转轴转动,其法线应该在一个平面内转动,如图 2(a)所示<sup>[7]</sup>。



(a) 理想的扫描镜工作状态 (b) 实际的扫描镜工作状态  
(a) Ideal working state (b) Actual working state

图 2 扫描镜扫描成像

Fig. 2 Scanning imaging of scanning mirror

扫描镜随旋转轴转动的过程中,反射光线在像面上的像  $B'$  在像面上的运动轨迹为非均匀直线。实际上,扫描镜和旋转轴装调存在误差,扫描镜法线  $OC$  并不是严格地垂直于转轴,如图 2(b)所示。当旋转轴与反射镜的夹角为  $\alpha$  时( $0 < \alpha < 5^\circ$ ),  $OC$  与转轴之间的夹角  $\beta = 90 - \alpha$ ,  $OC$  的运动轨迹为以  $\alpha$  为半顶角的圆锥。假定入射光线与  $X$  轴夹角为  $\theta$ , 像面距离  $X$  轴 5 mm, 像点  $B'$  在像面上的运动轨迹用坐标  $(X, Y)$  表示, 如图 2 所示, 则  $B'$  在像面上的运动轨迹为非均匀弧线, 如图 3 所示。

扫描镜装配时,按照传统工艺将扫描镜与旋转轴组装。假设扫描镜的扫描角度为  $\pm 15^\circ$ , 扫描镜绕旋转轴转动时,镜面法线的运动轨迹理论上形成一个平面  $\Pi$ , 如图 4 所示。

当扫描镜绕旋转轴转动到  $+15^\circ$  位置时,用 TM6100A 经纬仪(测试精度为  $0.5''$ )测量扫描镜的法线方向,在经纬仪中的读数为  $(HA, VA)$ , 由公式(1)可得此时扫描镜的镜面法线在测量坐标系  $\Sigma_0$  下的单位向量  $\mathbf{A}$ <sup>[8-9]</sup>, 同理可得扫描镜转动到  $-15^\circ$  时的法线在测量坐标系  $\Sigma_0$  下的单位向量  $\mathbf{B}$ 。单位向量  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$  构成平面  $\Pi$ , 平面  $\Pi$  的法线向

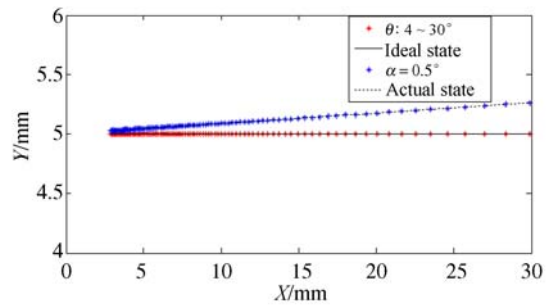


图 3 理想和非理想状态下像点在像面上的扫描轨迹  
Fig. 3 Scanning tracks of image points on imaging plane in ideal and actual states

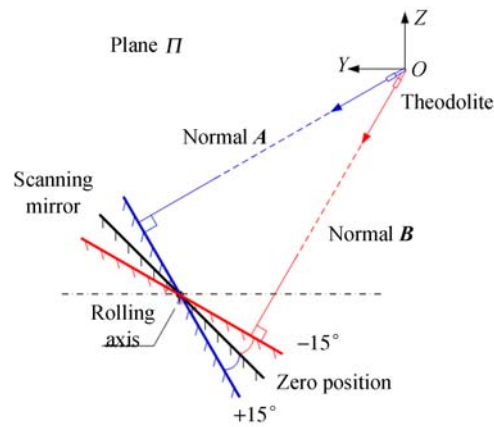


图 4 扫描镜的扫描法线轨迹

Fig. 4 Normal tracks of scanning mirror

量  $\mathbf{n}$  可由公式(2)求得。法向量  $\mathbf{n}$  即为扫描镜的转轴方向。

$$\begin{cases} x = \sin V \cos H \\ y = -\sin V \sin H, \\ z = \cos V \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{A} \times \mathbf{B}. \quad (2)$$

装调时通过螺钉调节扫描镜与旋转轴, 每调一个位置, 利用经纬仪测得一组扫描镜绕旋转轴转动过程中镜面法线向量的角度  $(H_1, V_2), (H_2, V_2), (H_3, V_3), \dots, (H_n, V_n)$ , 通过公式(1)转换为一组法线向量  $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3), \dots, (x_n, y_n, z_n)$ , 利用最小二乘法拟合得到平面  $\Pi$  方程及其法线向量  $\mathbf{n}$ <sup>[5]</sup>。计算单点位置法线向量  $(x_1, y_1, z_1), \dots, (x_n, y_n, z_n)$  与平面  $\Pi$  法线之间的夹角  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ , 见公式(3)。调节螺钉, 直至最大夹角  $\max\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$  满足设计精度要求, 即图 3(彩图见期刊电子版)中蓝线与红线的

最大夹角满足设计要求,扫描镜装调完成。

$$\theta_i = (x_i, y_i, z_i) \cdot n (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

### 3.1.2 单镜头相机装调

航空红外相机扫描镜、红外镜头以及探测器均通过螺钉安装在底板上。装调时,先按直装法将红外镜头、扫描镜以及焦面组件分别安装在底板上,在平行光管焦面处放置镜头的奈频矩形条纹靶标,靶标成像在探测器上。测试条纹靶标像的对比度传递函数并换算为调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF),调整探测器位置直至镜头 MTF 满足要求。测试光路如图 5 所示。

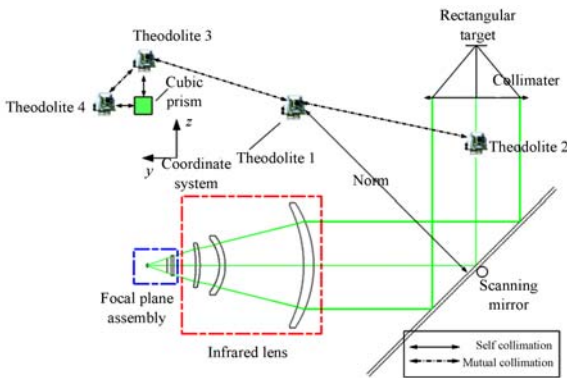
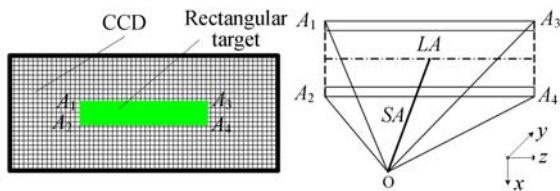


图 5 单镜头装调示意图

Fig. 5 Schematic of single camera lens alignment

旋转矩形靶标使靶标在像面上呈对称图像,即矩形靶标的一边  $A_1 A_2$  与线阵方向平行,另一边  $A_1 A_3$  与线阵方向垂直,对准精度为一个像元,如图 6(a)所示。



(a) 矩形靶标在探测器上的成像 (b) 探测器线阵方向和视轴方向的测试  
(a) Target image on CCD (b) Linear array and boresight testing of CCD

图 6 探测器靶标示意图

Fig. 6 Schematic of CCD target

通过经纬仪 2 测得红外镜头的线阵方向和视轴方向(由于红外镜头不透可见光,测试时以平行光管的矩形靶标代替探测器阵列),测试方法如图

6(a)所示。O 为经纬仪的位置,线阵  $A_1, A_2, A_3, A_4$  4 个角点在经纬仪 2 中的读数分别为  $(h_1, \nu_1), (h_2, \nu_2), (h_3, \nu_3), (h_4, \nu_4)$ 。如果线阵在水平方向,那么可以把  $A_1$  和  $A_2$  两个端点合成一个左端点,  $A_3$  和  $A_4$  点合成右端点。左、右端点的向量分别为:

$$\begin{aligned} L_l &= OA_1 + OA_2 \\ L_r &= OA_3 + OA_4 \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $OA_1, OA_2, OA_3, OA_4$  可通过式(1)求得。

探测器线阵方向向量  $LA$  和视轴方向向量  $SA$  分别为:

$$\begin{aligned} LA &= L_r - L_l \\ SA &= L_r + L_l \end{aligned} \quad (5)$$

如果线阵为竖直方向,那么则可以将  $A_1$  和  $A_3$  合成上端点,  $A_2$  和  $A_4$  合成线阵下端点,处理方法与上述过程类似。

在图 5 所示的测试光路中,立方棱镜与探测器的视轴方向和线阵方向以及扫描镜的转轴均正交。经纬仪 2 与经纬仪 1 对瞄,经纬仪 2 和经纬仪 3 对瞄,经纬仪 3 和经纬仪 4 对瞄,将探测器线阵方向和视轴方向过渡到基准经纬仪 1 的测量坐标系  $\Sigma_0$  下<sup>[10]</sup>。

单镜头装调时,调整扫描镜的俯仰角和倾斜角,直至公式(2)计算得到的  $n$  与公式(5)计算得到的探测器线阵方向平行,与视轴方向垂直,即满足  $n \perp LA, n // SA$  时,单镜头装调完成。

### 3.2 航空红外相机分组装调

单镜头相机装调完成后进行多角度相机组的装调。装调时各相机光轴之间的夹角有着高精度的要求,如图 1 所示。引入质心亚像元定位算法计算圆形物在像面上成像点的准确位置,根据文献[11]所述,位置计算的理论精度可达 0.01 pixel。

#### 3.2.1 质心亚像元定位

由于衍射及像差的存在,圆孔状物经相机光学系统后在像面上成弥散的像点光斑,如图 7 所示。

由于探测器像元具有一定的尺寸并且像元之间有一定的间隙,故对探测器采集的光斑数据进行 cubic 插值,得到较为密集的光斑数据点以提高质心计算的准确性和稳定度。此外,也有研究

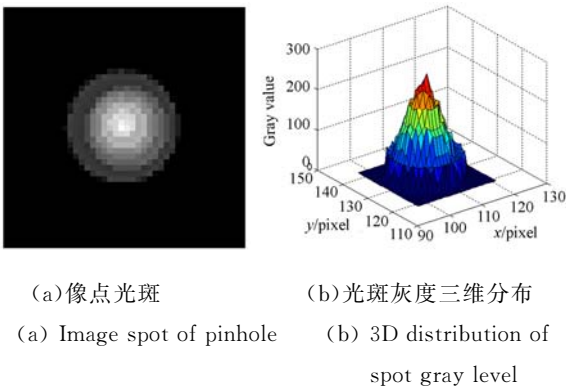


图 7 圆孔状物的成像光斑  
Fig. 7 Image point of pinhole

表明, 利用能量累加窗口选择法判定目标的有效区域, 也能够提高质心的定位稳定性和精度<sup>[12-13]</sup>。计算窗口光斑的能量集中度并选择有效光斑计算区域, 结果如图 8 所示。

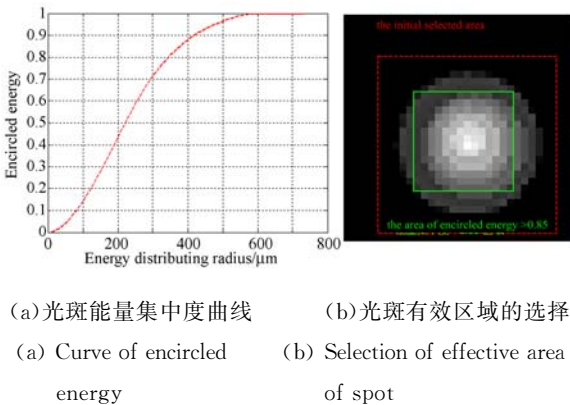


图 8 光斑有效区域选择  
Fig. 8 Selection of effective area of spot

选定光斑的有效区域后, 采用高斯曲面拟合算法拟合光斑分布, 用高斯拟合函数的极值点作为光点的定位点。

二维高斯方程表示为:

$$f(x, y) = A \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x-x_0}{\sigma_x} \right)^2 + \left( \frac{y-y_0}{\sigma_y} \right)^2 \right] \right\}, \quad (6)$$

取对数有:

$$\ln f(x, y) = \left[ \ln A - \frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y_0^2}{2\sigma_y^2} \right] + \frac{xx_0}{\sigma_x^2} + \frac{yy_0}{\sigma_y^2} - \frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}. \quad (7)$$

写成矩阵形式

$$\mathbf{F} = \mathbf{B}\mathbf{C}, \quad (8)$$

其中:  $\mathbf{F} = \ln f_i$ ,  $\mathbf{B} = [1, x, y, x^2, y^2]$ ,

$$\mathbf{C} = \left[ \ln A - \frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y_0^2}{2\sigma_y^2}, \frac{x_0}{\sigma_x^2}, \frac{y_0}{\sigma_y^2}, -\frac{1}{2\sigma_x^2}, -\frac{1}{2\sigma_y^2} \right]^T.$$

矛盾方程一般不存在通常意义下的解, 得到的解是最小二乘解。在实际应用中, 特别是在所处理的数据量较大时, 上述方法直接构造的方程组往往是严重病态的, 造成计算误差, 使得拟合失败。为改善方程组的条件, 从矛盾方程入手, 应用 Householder 变换把系数正交三角化, 直接求解拟合系数<sup>[14-16]</sup>:

$$\mathbf{C} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Q}^T \mathbf{F}, \quad (9)$$

其中  $\mathbf{R}^{-1}$  为  $\mathbf{R}$  的广义逆矩阵。

根据求得的拟合系数  $C_{5 \times 1}$  可得:

$$\begin{cases} \sigma_x = \sqrt{-\frac{1}{2C_4}}, x_0 = C_2 \sigma_x^2 \\ \sigma_y = \sqrt{-\frac{1}{2C_5}}, y_0 = C_3 \sigma_y^2 \end{cases}. \quad (10)$$

二维高斯曲面极值点  $(x_0, y_0)$  即为质心, 如图 9 所示。根据上述算法编写程序, 用于装调过程中光斑质心的实时计算, 装调结果实时可测。

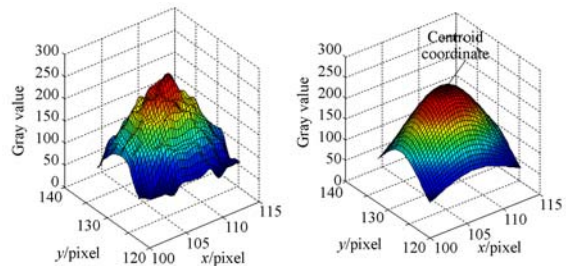


图 9 有效光斑及其高斯曲面拟合  
Fig. 9 Effective spot and Gauss-surface fitting

### 3.2.2 航空红外相机分组装调

将航空红外相机直接装在结构架上, 放置在可与平行光管对接的可旋转平台上, 旋转平台为美国 OPTIKOS 传函仪使用的高精密转台。将 0° 视轴相机组对准平行光管, 如图 10 所示。平行光管选用圆孔靶标, 靶标在相机组 2 探测器上呈弥散像点。

转动旋转台, 像点在探测器上的运动轨迹为一直线。假设相机视场角为  $\pm 5^\circ$ , 探测器阵列大

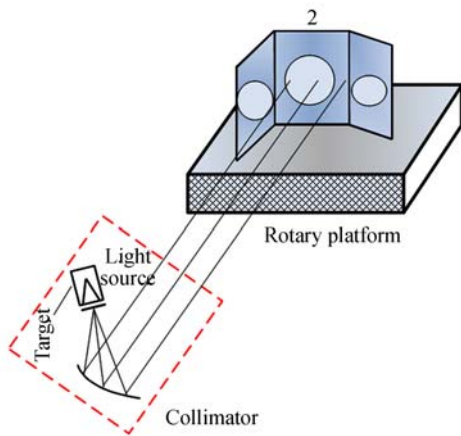


图 10 多角度相机装调测试光路

Fig. 10 Light path of multi-angle camera alignment testing

小为  $640 \times 480$ , 将旋转台转动到  $+5^\circ$  位置, 利用质心亚像素定位算法计算像点位置  $(x_1, y_1)$ ,  $x_1, y_1$  分别为像点在探测器上的行位置和列位置; 将

旋转台转动到  $0^\circ$  位置, 计算像点位置  $(x_0, y_0)$ ; 将旋转台转动到  $-5^\circ$  位置, 计算像点位置  $(x_2, y_2)$ 。调节相机结构架旋转或直接转动转台, 使得  $x_0 = 320.5, y_0 = 240.5$ , 则该方向为相机  $0^\circ$  视场, 将相机结构架紧固在旋转台上。调节相机结构架俯仰、旋转, 使得  $x_1 = x_2 = 320.5, y_1 = y_2 = 240.5$ , 即水平调节相机探测器, 将相机 2 紧固在相机结构架上。

以相机 2 作为基准, 顺时针转动转台  $35^\circ$ , 使得相机组 1 对准平行光管, 如图 11 所示。计算像点位置  $(x_3, y_3)$ , 调节相机俯仰、旋转, 使得  $x_3 = 320.5, y_3 = 240.5$ 。转动旋转台并计算在  $+5^\circ$  和  $-5^\circ$  位置时的像点位置  $(x_4, y_4), (x_5, y_5)$ , 调节相机结构架俯仰、旋转, 使得  $x_1 = x_2 = 320.5, y_1 = y_2 = 240.5$ , 即水平调节相机探测器, 将相机 1 紧固在相机结构架上。

同理将相机组 3 调节到相应位置, 并紧固在结构架上。多角度相机装调完成。

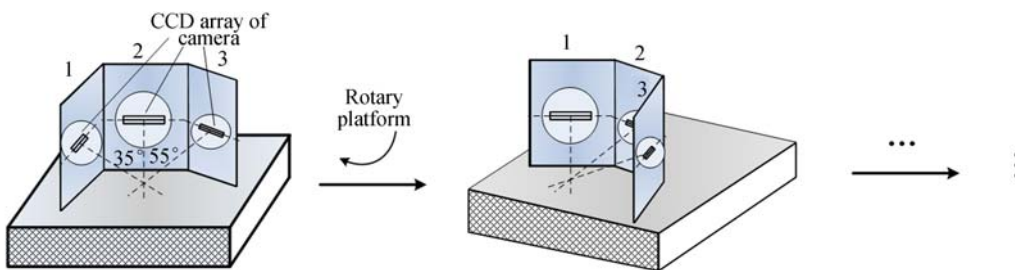


图 11 多组相机装调示意图

Fig. 11 Schematic of multi-angle camera alignment

## 4 测试和分析

### 4.1 扫描镜法线测试

如图 4 所示, 用经纬仪测量扫描镜法线方向。以  $1^\circ$  为间隔旋转扫描镜从  $-15^\circ \sim +15^\circ$ , 每次电机转动到位后, 用经纬仪测量扫描镜法线方向所在的空间角度。根据式(1)和式(3), 结合最小二乘法拟合扫描镜转动过程中法线的最佳拟合平面, 计算扫描镜在转动过程中某一位置法线方向偏离最佳拟合平面的角度, 结果如图 12 所示。扫描镜安装满足公差, 最大偏离度为  $3 \times 10^{-4}$ 。

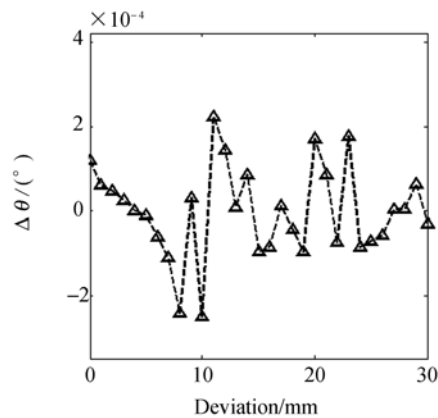


图 12 扫描镜法线方向偏离程度曲线

Fig. 12 Curve of deviation from scanning mirror normal

4.2 红外相机分组视轴测试

分别测试每组相机中心视场下星点目标的质心,其中某相机的测试结果如表 1 所示,最大误差为 0.034 pixel,如图 13 所示。多次测量求平均值或用最小二乘法处理可得到更高的精度。

表 1 单相机中心视场的质心坐标

Tab.1 Centroid coordinates of single camera at center field

Number	Real coordinate X	Error $\Delta x$	Real coordinate Y	Error $\Delta y$
1	320.5199 1	0.019 91	240.466 42	-0.033 58
2	320.519 25	0.019 25	240.508 50	0.008 50
3	320.531 24	0.031 24	240.531 44	0.031 44
4	320.513 73	0.013 73	240.487 01	-0.012 99
5	320.491 28	-0.008 72	240.482 56	-0.017 44
6	320.486 00	-0.014 00	240.496 23	-0.003 77
7	320.489 90	-0.010 10	240.514 91	0.014 91
8	320.510 64	0.010 64	240.524 53	0.024 53
9	320.493 82	-0.006 18	240.527 84	0.027 84
10	320.513 69	0.013 69	240.521 22	0.021 22
11	320.479 18	-0.020 82	240.460 08	-0.039 92
12	320.546 43	0.046 43	240.477 67	-0.022 33
13	320.518 41	0.018 41	240.529 88	0.029 88
14	320.509 11	0.009 11	240.504 95	0.004 95
15	320.486 26	-0.013 74	240.511 93	0.011 93

将整机放置在水平旋转台上,如图 14 所示,平行光管矩形靶标成像在探测器上。调整相机和平行光管,直至相机结构架上基准立方镜的两个面竖直,且靶标中心成像在视轴 0°探测器中心。测量相机结构架上基准立方镜的坐标系  $\Sigma_0$ ,精确控制旋转台的旋转角度,分别测量靶标在三个视轴下相机探测器上的线阵方向 **LA** 和视轴方向 **SA**,并换算到坐标系  $\Sigma_0$  下,测量结果如表 2 所示。

表 2 多角度相机测量结果

Tab.2 Result for multi-angle camera testing

Boresight /( $^{\circ}$ )	Angle with 0° camera/( $^{\circ}$ )	Alignment precision of boresight/pixel	Alignment precision of boresight /( $''$ )
0	—	—	—
55	$\theta_{5-0}=55.0008$	0.048	5.9
-35	$\theta_{-35-0}=35.001$	0.052	6.4

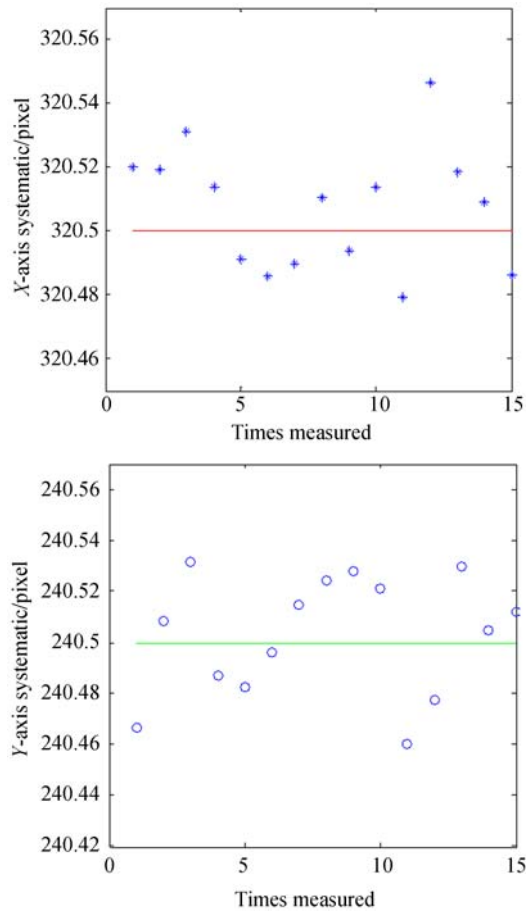


图 13 实测质心坐标分布

Fig.13 Distribution of measured centroid coordinates

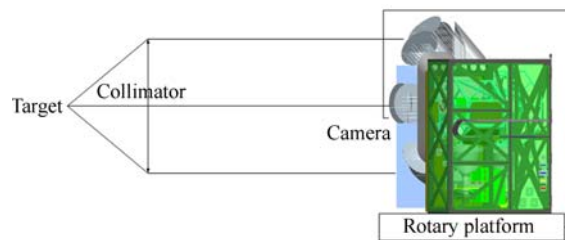


图 14 相机分组视轴测试

Fig.14 Grouping test of camera boresight

探测器的单个像元尺寸为  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ ,相机焦距为 50 mm,平行光管焦距为 1 000 mm,矩形靶标尺寸为  $5\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$ 。探测器单像元对应的视场为  $123.76''$ 。由于受水平转台的控制精度、调节工装和调节方法精度等的限制,实际相机视轴的对准精度为 0.052 pixel,即  $6.4''$ 。

## 5 结 论

本文在分析航空红外相机结构特点的基础上,提出并验证了一种基于经纬仪测试探测器线阵方向和视轴方向,结合质心亚像元定位算法对

单镜头相机以及整体红外相机进行分组装调的方法。装调试验结果表明,该方法可将多镜头相机光轴夹角的装调精度提高到 0.052 pixel,为航空红外相机的高精度装调提供了一种精确可行的途径,并可推广到结构类似的航天遥感器的装调中。

### 参考文献:

- [1] 付芸. 航空相机扫描反射镜系统研究与设计[J]. 北京:中国科学院硕士学位论文,2003.  
FU Y. *Research on Design of the Scanning Mirror System of Aerial Camera* [J]. Beijing: Academic Master Degree Thesis of Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [2] 张健,张玲花,刘立国,等. 全景式航空遥感器 TDI CCD 精密装调必要性分析及实现方法[J]. 中国光学, 2014,7(6): 996-1002.  
ZHANG J, ZHANG L H, LIU L G, *et al.*. Necessity and implement method of precise assembling of TDI CCD in sweep aerial remote sensor[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6):996-1002. (in Chinese)
- [3] 凌军,刘秉琦,赵熙林. 几种光轴平行性测试方法的比较与探讨[J]. 应用光学, 2003, 24(1):43-45.  
LING J, LIU B Q, ZHAO X T. The comparison and discussion of several testing methods about optical-axis parallelism[J]. *Applied Optics*, 2003, 24(1):43-45. (in Chinese)
- [4] 禹滨,刘朝晖,侯年仓. 多光学测试设备光轴不一致性测量计算的研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(21):5539-5543.  
GE B, LIU ZH H, HOU N C. Calculation of the inconsistent optics axis for several optics-measurement instrument[J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(21):5539-5543. (in Chinese)
- [5] 金伟其,王霞,张其扬,等. 多光轴一致性检测技术进展及其分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 3(39): 526-531.  
JIN W Q, WANG X, ZHANG Q Y, *et al.*. Technical progress and its analysis in detecting of multi-axes parallelism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 3(39):526-531. (in Chinese)
- [6] 张萍,易东云,吴翊. 红外扫描相机的测量误差分析与建模[J]. 红外技术, 2003, 25(6):14-16.  
ZHANG P, YI D Y, WU Y. The measured error analysis and modeling of infrared scan camera[J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(6):14-16. (in Chinese)
- [7] 罗渠,袁立,杨磊,等. 一种驱动扫描镜扫描运动的方法[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(1):36-41.  
LUO Q, YUAN L, YANG L, *et al.*. A method for driving scan mirror[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(1):36-41. (in Chinese)
- [8] 吴国栋,宋丹. 测绘相机坐标系与立方镜转换矩阵的标定[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(11):1727-1730.  
WU G D, SONG D. Calibration of mapping camera and cubic prism coordinate system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(11):1727-1730. (in Chinese)
- [9] XING H, JIAO W CH, WANG Y. Method to elicit the boresight of infrared cryogenic camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33:0112008-1-0112008-7
- [10] 官云兰,程效军,施贵刚. 一种稳健的点云数据平面拟合方法[J]. 同济大学学报, 2008, 36(7):981-984.  
GUAN Y L, CHENG X J, SHI G G. A robust method for fitting a plane to point clouds [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2008, 36(7):981-984. (in Chinese)
- [11] 杨君,张涛,宋靖雁,等. 星点质心亚像元定位的高精度误差补偿法[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(4): 1002-1010.  
YANG J, ZHANG T, SONG J Y, *et al.*. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):1002-1010. (in Chinese)
- [12] 孙瑾秋,周军,张臻. 基于能量累加的空间目标星像质心定位[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(12): 3043-3048.  
SUN J Q, ZHOU J, ZHANG ZH. Centroid location for space targets based on energy accumulation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):3043-3048. (in Chinese)
- [13] 潘波,杨根庆,刘勇. 星点质心定位算法最优门限研究[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(9):1787-1792.

- PAN B, YANG G Q, LIU Y. Study on optimization threshold of centroid algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(9):1787-1792. (in Chinese)
- [14] 李为民,俞巧云,胡红专. 光点定位中的曲面拟合迭代算法[J]. *光学技术*,2004,30(1):33-35.
- LI W M, YU Q Y, HU H ZH. Iteration algorithm of surface fitting in the detection of light-spot position[J]. *Optical Technique*, 2004,30(1):33-35. (in Chinese)
- [15] 史少龙,尹达一. 改进型灰度质心实时算法研究[J]. *光电工程*,2013,40(12):18-24.
- SHI SH L, YIN D Y. Improved real-time grayscale centroid algorithm[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013,40(12):18-24. (in Chinese)
- [16] 李玉峰,郝志航. 星点图像超精度亚像元细分定位算法的研究[J]. *光学技术*,2005,31(5):666-671.
- LI Y F, HAO ZH H. Research of hyper accuracy sub pixel subdivision location algorithm for star image[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(5): 666-671. (in Chinese)

#### 作者简介:



宋俊儒(1987—),男,河南安阳人,硕士,工程师,2010年,2013年于北京理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事遥感器光学装调与测试方面的研究。E-mail:sjr1987bit@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)