

引用格式: LI Rui-jin, ZHANG Li-ming, LI Xin, *et al.* Specular Normal Calibration Technology of Point Source[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(4):0412002

李瑞金,张黎明,李鑫,等.点光源反射镜法向标校技术[J].光子学报,2020,**49**(4):0412002

点光源反射镜法向标校技术

李瑞金^{1,2},张黎明¹,李鑫¹,汪伟^{1,2},李佳伟^{1,2},郝军¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室,合肥 230031)

(2 中国科学技术大学,合肥 230026)

摘 要:针对基于反射式点光源进行在轨辐射定标过程中反射镜法向标校建模不够完善的问题,提出基于反射镜与相机几何模型的反射镜法向标校及矢量控制算法.通过解算模型求解相机与反射镜间的几何误差,建立了太阳图像质心坐标与反射镜法向之间的关系,可实现多点自动化标校反射镜法向,提高镜法向标校及系统指向精度.实验结果表明,利用解算后的几何模型反解不同时刻质心坐标进行多点反射镜法向标校,相机观测太阳像素角分辨率标准误差分别为: X 轴方向 $0.021\ 65^\circ$ 、 Y 轴方向 $0.019\ 82^\circ$,综合角分辨率误差为 $0.029\ 36^\circ$,优于太阳观测器对反射镜法向标校精度.实现了相机观测太阳取代人工借助太阳观测器观测太阳的自动化镜法向标校,扩展了标校灵活度,系统综合指向精度优于 0.1° ,为固定实验场联网自动化集中控制不同能级梯度的点光源阵列在轨辐射定标和调制传递函数检测奠定基础.

关键词:遥感;在轨辐射定标;反射镜法向;标校;几何模型

中图分类号:TH744

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204904.0412002

Specular Normal Calibration Technology of Point Source

LI Rui-jin^{1,2}, ZHANG Li-ming¹, LI Xin¹, WANG Wei^{1,2}, LI Jia-wei^{1,2}, HAO Jun¹

(1 *Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

(2 *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

Abstract: In the process of on-orbit radiation calibration, based on reflective point light sources, the modeling of specular normal calibration is inadequate. Aiming at this problem, a specular normal calibration and vector control algorithm based on reflector and camera geometry model is presented. The geometrical placement error between the camera and the reflector is solved by solving the model. The relationship between the centroid coordinates of the solar image and the normal direction of the reflector is established. The multi-point automatic calibration of the specular normal is realized. The method improves the pointing accuracy of the system and specular normal calibration accuracy. The experiment results show that the geometric model anti-solves the centroid coordinates at different times, which for multi-point specular normal calibration. The standard errors of the angular resolution of the sun pixels observed by the camera are $0.021\ 65^\circ$ in the X -axis direction and $0.019\ 82^\circ$ in the Y -axis direction. The error of the synthetic angle resolution is $0.029\ 36^\circ$. The accuracy of calibration is better than that of the solar observer to the specular normal calibration. The method realizes the automatic calibration process of the camera observing the solar image instead of manually observing, and expands calibration flexibility.

基金项目:国家自然科学基金(No.41601388)

第一作者:李瑞金(1983-),男,博士研究生,主要研究方向为光学遥感器辐射定标及光电检测自动化. Email: liruijinrona@163.com

导师(通讯作者):张黎明(1958-),男,研究员,博导,主要研究方向为光学遥感器辐射定标. Email: lmzhang@aiofm.ac.cn

收稿日期:2019-11-25;录用日期:2020-01-06

Comprehensive pointing accuracy of system is better than 0.1° . It lays the foundation for on-orbit radiation calibration and modulation transfer function detection of point light source array of networking automation of fixed experimental sites centrally control different energy levels gradients.

Key words: Remote sensing; On-orbit radiation calibration; Specular normal; Calibration; Geometry model

OCIS Codes: 120.4630; 280.4788; 150.1488; 120.4640

0 引言

绝对辐射定标是指建立遥感器记录数字信号与对应的辐射能量之间的数量关系^[1].随着遥感信息定量化应用的深入,辐射定标的精度要求也逐渐提高.卫星遥感器发射前虽经过严格的实验室定标,但受发射时和发射后等多因素影响其性能发生不同程度的衰变,因此需要重新进行在轨定标^[2-4].光学遥感卫星在轨辐射定标主要有星上定标和替代定标,业务化的辐射定标主要以场地替代定标为主,场地替代定标主要有大面积均匀场、人工靶标和点源法.由于近年来高空间分辨率卫星的快速发展,小型的点光源法作为一种高效率的在轨辐射定标方法得到了较广泛的应用.点光源凸面镜的口径大小取决于系统指向精度,在保证可靠性的前提下,尽可能地提高指向精度、减小口径尺寸、减少点光源的体积与重量,便于工程实践和应用推广^[5-7],同时可以通过改变反射镜的数量,实现多种高空间分辨率卫星在轨实验.

调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)检测是光学相机成像系统像质评价的重要指标,点光源法的 MTF 检测是通过直接测量系统点扩散函数(Point Spread Function, PSF)计算输入点源脉冲获取系统 MTF,用于评价光学相机正确判断地物的能力,为保证遥感数据的定量化应用与监测光学相机的性能变化,需要在轨进行辐射定标和 MTF 检测^[5-7].

国内外相继开展了以反射式点光源作为检测参照目标的在轨辐射定标和 MTF 检测实验. SCHILLER S J 等开展了基于反射镜阵列辐射定标方法研究^[8-9],其主要采用较大口径的凸面镜和增大凸面镜发散角来保证反射光可靠入射卫星入瞳处;中科院安光所徐伟伟等^[7]相继开展了基于反射镜的 MTF 检测和辐射定标方法研究,主要采用电动经纬仪结合太阳观测器开展实验,但是这种辐射定标方法以基于提高反射式点光源指向精度为前提,保证反射光斑反射至卫星入瞳处;冯浩等^[10]采用平面镜作为反射式点源实现了中高轨卫星的在轨定标检测,利用 CCD 相机获取图像质心法计算太阳在摄像头坐标系下的向量,其指向精度优于 0.1° ;李瑞金等^[11]采用凸面镜作为反射式点光源对点光源系统进行系统几何误差标校建模,利用 CMOS 图像传感器和太阳观测器相结合的方式实现对装置水平度误差和垂直度误差的检校,提高了指向精度,综合指向精度优于 0.0616° .但是,以上方法没有对反射镜法向作更高精度的标校建模,难以在保证指向精度的前提下实现自动化联网集中控制反射镜法向标校,这给工程项目的实施和反射镜阵列镜法向标校带来一定的困难.因此,本文提出了基于反射镜与相机几何模型的反射镜法向标校方法,建立了相机与反射镜之间的几何关系,利用标校后的模型建立太阳图像质心坐标与反射镜法向之间的关系,通过将太阳图像质心坐标代表反射镜法向指向太阳,实现了相机观测太阳代替人工借助太阳观测器观测太阳的自动化标校过程,并通过系统性分析模型解算过程及反射镜法向标校精度,为系统指向精度的提高奠定基础,进而实现高空间分辨率卫星全动态范围内在轨绝对辐射定标和 MTF 检测.

1 反射镜法向标校原理与建模

1.1 反射镜控制系统组成

反射镜控制系统主要由控制器、反射镜、相机、驱动器、伺服电机、传动机构、编码器、电源等部件组成,反射镜控制系统组成结构如图 1.控制器通过无线 WIFI 网络接受上位机指令,对太阳运动轨迹的位置进行解算,并向电机驱动器发送转向控制指令驱动控制伺服电机旋转,进而驱动姿态调控组件的传动机构实现反射镜的俯仰、方位姿态调控,并由编码器实时检测反馈位置信号给控制器,形成闭环控制,从而精确控制反射镜在当地坐标系下的运动,反射镜控制系统指向设计精度优于 0.1° .

相机通过串口和同步并行 DCMI 接口总线与微处理器相连接,对获取的太阳图像进行分析处理以实现反射镜法线方向的标校,为设备初始状态的建立及指向调控提供依据与支撑,实现点光源与卫星光路对准,

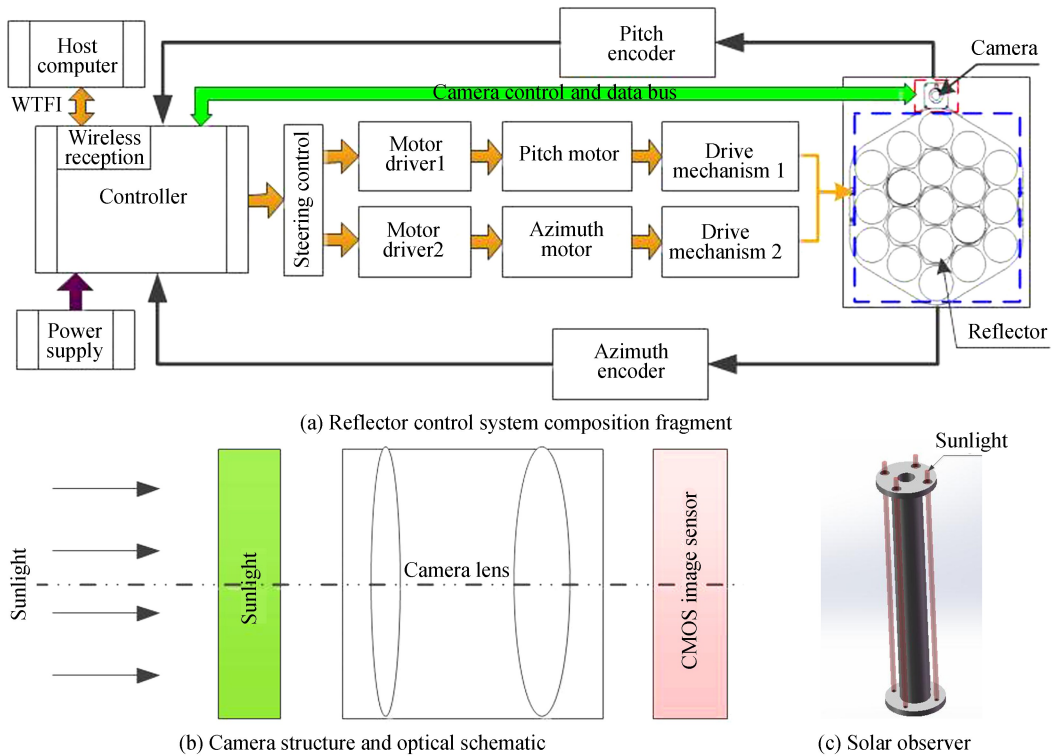


图 1 反射镜控制系统组成
Fig.1 System composition of reflector control

其主要由滤光片与摄像头组成,摄像头由图像传感器与光学镜头组成,图像传感器为 $1\ 280 \times 1\ 024$ 像素的高分辨率 CMOS 数字图像传感器,光学镜头视场角为 $23^\circ \times 17^\circ$,对应的像素角分辨率分别为 0.018° 和 0.016° ,其结构及光学示意如图 1(b).

太阳观测器由两端带有小孔的法兰与长柱构成,如图 1(c).垂直安装于反射镜表面,上下孔连线平行于反射镜中心法线方向,通过调控组件带动反射镜俯仰、方位旋转使太阳光从上端法兰孔入射,从下端法兰孔出射,来表示反射镜法向指向太阳,主要区别在于太阳观测器采用人眼观测,而区别于相机通过获取太阳图像观测代表反射镜法线方向指向太阳.

1.2 反射镜法向标校原理

反射镜法线方向即反射镜中心光轴指向,反射镜法向标校的意义在于提高系统指向精度,使反射镜自动完成对入射太阳光线的反射,实现反射镜反射光线与卫星光路对准,如图 2 所示.

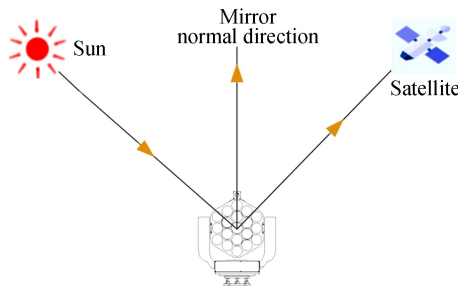


图 2 镜反射光线与卫星光路示意
Fig.2 Mirror reflected light and satellite light path

反射镜法向标校原理为某一时刻利用相机观测太阳图像,经处理获得图像质心坐标,与根据相机与反射镜间几何模型关系得到的图像质心坐标相比较,驱动反射镜姿态调整,将反射镜中心光轴指向至太阳矢量方向,将此刻时间结合经纬度、海拔信息利用天文算法计算太阳的高度角 α_{latitude} 与方位角 α_{azimuth} ;同时通过编码器实时检测反馈反射镜运动变化的计数值,记录此刻俯仰编码器读数 β ,方位编码器读数 α ,调整反射镜法

向俯仰、方位反方向运动 $\beta - a_{\text{latitude}}$, $\alpha - a_{\text{azimuth}}$ 角度, 完成反射镜法向标校过程. 指向目标角度均是依此过程运动, 最终角度作为零点位置计算, 因此, 对反射镜法向进行标校, 是保障系统综合指向精度的前提与基础.

1.3 反射镜与相机几何模型建立

相机固定安装于反射镜平台上, 以相机为中心建立相机坐标系, 相机视轴方向定义为 Z 轴; X 轴为水平方向, 取向右为正方向; 当视轴方向平行于大地平面时, Y 轴垂直于大地平面; 以反射镜为中心建立反射镜坐标系, 反射镜中心光轴定义为 Z 轴, 指向正北方向, Y 轴垂直于大地平面, 指向地心方向为负方向, X 轴平行于大地平面, 指向东向, 其反射镜与相机之间的坐标系关系, 如图 3. 由图可知反射镜坐标系与相机坐标系原点不重合, 对于任意空间点在不同的坐标系下其空间点坐标值不同, 对此, 可以用坐标旋转变换关系建立反射镜坐标系与相机坐标系间几何模型关系, 表示为

$$\begin{bmatrix} X_{\text{mir}} \\ Y_{\text{mir}} \\ Z_{\text{mir}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{\text{cammir}} \\ y_{\text{cammir}} \\ -f_{\text{cammir}} \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R}_{\text{cam}}^{\text{mir}} \begin{bmatrix} x_{\text{cam}} \\ y_{\text{cam}} \\ -f_{\text{cam}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

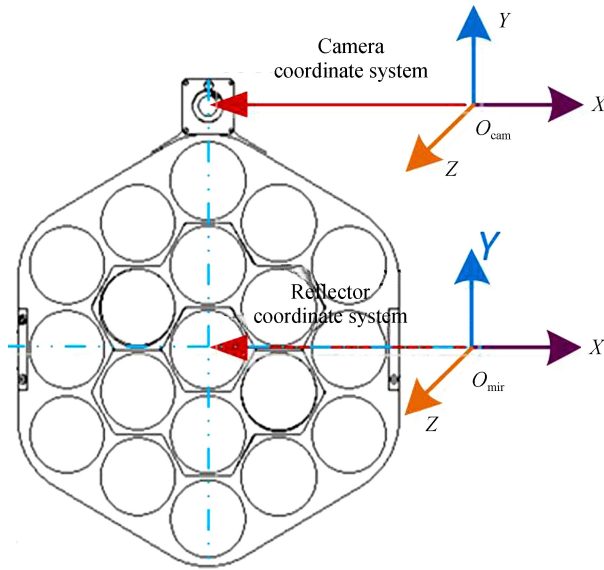


图 3 反射镜与相机坐标系关系图

Fig.3 Reflector and camera coordinate system diagram

式中, $[X_{\text{mir}} \ Y_{\text{mir}} \ Z_{\text{mir}}]^T$ 为太阳矢量在反射镜坐标系下的矢量表示, λ 为成像比例系数系非零常数, $\mathbf{R}_{\text{cam}}^{\text{mir}}$ 为 3 个独立参数的 3×3 坐标旋转矩阵, $x_{\text{cam}}, y_{\text{cam}}$ 为边缘检测法得到的太阳图像在像素坐标系下的质心坐标位置, $[x_{\text{cammir}} \ y_{\text{cammir}} \ -f_{\text{cammir}}]^T$ 为相机坐标系原点在反射镜坐标系下的坐标值. 由于矢量的平移不影响矢量大小与方向, 因此, 太阳矢量在相机坐标系下的表示变换到反射镜坐标系下的坐标表示, 不考虑坐标之间的平移关系, 同时, 由相机成像原理结合相机成像坐标系及实际成像情况的误差因素^[12], 式(1)模型可简化为

$$\begin{bmatrix} X_{\text{mir}} \\ Y_{\text{mir}} \\ Z_{\text{mir}} \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R}_{\text{cam}}^{\text{mir}} \begin{bmatrix} x_{\text{cam}} - x_{0\text{cam}} \\ y_{\text{cam}} - y_{0\text{cam}} \\ -f_{\text{cam}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $x_{0\text{cam}}, y_{0\text{cam}}$ 为透镜将光线会聚后所形成与相平面的焦点为相机的主点, 即在像素坐标系下表示的坐标值, f_{cam} 为焦点到光心的距离为相机的主距, $\mathbf{R}_{\text{cam}}^{\text{mir}}$ 为相机坐标系与反射镜坐标系之间的旋转矩阵, 可用三个独立方向余弦表示. 设两坐标系之间的 X 轴、 Y 轴、 Z 轴间夹角分别为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, 则旋转矩阵可用三个独立方向的余弦表示为

$$\mathbf{R}_{\text{cam}}^{\text{mir}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) \\ 0 & -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & -\sin(\theta_2) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) & 0 \\ -\sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

对式(3)展开后,令 $a_1 = \cos(\theta_2)\cos(\theta_3)$, $a_2 = \cos(\theta_2)\sin(\theta_3)$, $a_3 = -\sin(\theta_2)$, $b_1 = \cos(\theta_3)\sin(\theta_1)$, $\sin(\theta_2) - \cos(\theta_1)\sin(\theta_3)$, $b_2 = \cos(\theta_1)\cos(\theta_3) + \sin(\theta_1)\sin(\theta_2)\sin(\theta_3)$, $b_3 = \cos(\theta_2)\sin(\theta_1)$, $c_1 = \sin(\theta_1)\sin(\theta_3) + \cos(\theta_1)\cos(\theta_3)\sin(\theta_2)$, $c_2 = \cos(\theta_1)\sin(\theta_2)\sin(\theta_3) - \cos(\theta_3)\sin(\theta_1)$, $c_3 = \cos(\theta_1)\cos(\theta_2)$. 则相机坐标系与反射镜坐标系间的旋转矩阵可用方向余弦表示为

$$\mathbf{R}_{\text{cam}}^{\text{mir}} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(2)和式(4)相结合,可削去成像比例系数,得共线条件方程为

$$\begin{cases} x_{\text{cam}} - x_{0\text{cam}} = -f_{\text{cam}} \frac{a_1 X_{\text{mir}} + b_1 Y_{\text{mir}} + c_1 Z_{\text{mir}}}{a_3 X_{\text{mir}} + b_3 Y_{\text{mir}} + c_3 Z_{\text{mir}}} \\ y_{\text{cam}} - y_{0\text{cam}} = -f_{\text{cam}} \frac{a_2 X_{\text{mir}} + b_2 Y_{\text{mir}} + c_2 Z_{\text{mir}}}{a_3 X_{\text{mir}} + b_3 Y_{\text{mir}} + c_3 Z_{\text{mir}}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, X_{mir} 、 Y_{mir} 、 Z_{mir} 为太阳在反射镜坐标系下的 X 、 Y 、 Z 轴方向的分量。

由式(5)结合相机标校后的主点 $x_{0\text{cam}}$ 、 $y_{0\text{cam}}$ 、主距 f_{cam} 作为初始值以及太阳在反射镜坐标系下的矢量 $[X_{\text{mir}} \ Y_{\text{mir}} \ Z_{\text{mir}}]^T$, 则可通过多点观测,以最小二乘法解算旋转矩阵 $\mathbf{R}_{\text{cam}}^{\text{mir}}$ 和主点主距 $x_{0\text{cam}}$ 、 $y_{0\text{cam}}$ 、 f_{cam} 。

2 模型参数求解及矢量控制算法

2.1 相机标校及图像质心提取算法

为了确保相机对反射镜法向的标校精度,其光学系统在使用前需要进行标定矫正镜头畸变。本实验标定方法采用张正友棋盘格标定方法^[13],将标定板放置于距离相机 2 m 远处,通过调节相机镜头焦距使物体清晰成像,再调整标定板或相机的方向拍摄不同方向的图像,利用优化算法进行相机标定,相机标校结果为主点为 $[591.422 \ 543.395]$ (单位为 pixel),焦距为 14.024 mm,径向畸变系数为 $[0.340 \ 7 \ -3.037 \ 5]$,切向畸变系数为 $[0 \ 0]$,同时获取内、外矩阵参数,通过畸变参数模型矫正镜头畸变。

图像质心提取采用太阳图像圆形性判断、有效圆边缘点检测、Zernike 矩亚像素边缘检测与圆拟合法求太阳图像质心的算法流程^[14-15],前两步主要克服太阳图像退化现象的干扰,可有效扩展标校灵活度。后两步采用 Zernike 矩具有积分运算,对噪声不敏感的稳定特征^[15]提取边缘点进行圆拟合求质心,算法流程如图 4。

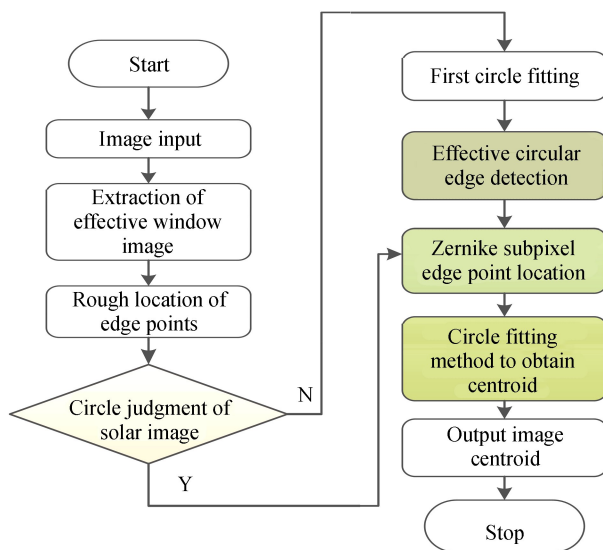


图 4 太阳图像质心提取算法流程

Fig.4 Algorithm flow of sun image centroid extraction

具体图像质心提取流程为:输入图像→提取窗口图像→图像边缘点粗定位→若太阳图像满足圆形判断→Zernike 矩亚像素边缘点检测→圆拟合→获取图像质心;若太阳图像不满足圆形判断→在前步流程中增加有效圆边缘检测,最终圆拟合获取图像质心。其中,太阳图像圆形性判断流程中,令太阳图像圆形性特征量定

义为

$$C = \mu_z / \sigma_z \quad (6)$$

根据定义判断圆形性特征量是否大于门限 C_T , 如果成立采用亚像素边缘检测与圆拟合法求质心, 否则增加一步有效圆边缘点检测处理, 门限 C_T 值为批量图像圆形性特征量的平均值除以标准差.

$$\mu_z = \frac{1}{N_K} \sum_{i=0}^{N_K-1} \| (x_i, y_i) - (\bar{x}, \bar{y}) \| \quad (7)$$

$$\sigma_z = \frac{1}{N_K} \sum_{i=0}^{N_K-1} [\| (x_i, y_i) - (\bar{x}, \bar{y}) \| - \mu_z]^2 \quad (8)$$

式中, μ_z 为从区域重心到轮廓点的平均距离, σ_z 为从区域重心到轮廓点的距离的均方差, 图像区域定义为 $Z(x, y)$, N_K 为边缘点元素个数, (x_i, y_i) 为边缘点各个坐标, (\bar{x}, \bar{y}) 为区域重心坐标.

有效圆边缘点检测是一种循环迭代法, 在迭代的过程中剔除残差值大于平均值的边缘点, 保留有效边缘点, 直至圆心残差收敛为止, 最终有效边缘点组成新有效圆, 再应用 Zernike 矩亚像素边缘检测和圆拟合法精确提取质心, 有效圆边缘检测算法流程如图 5.

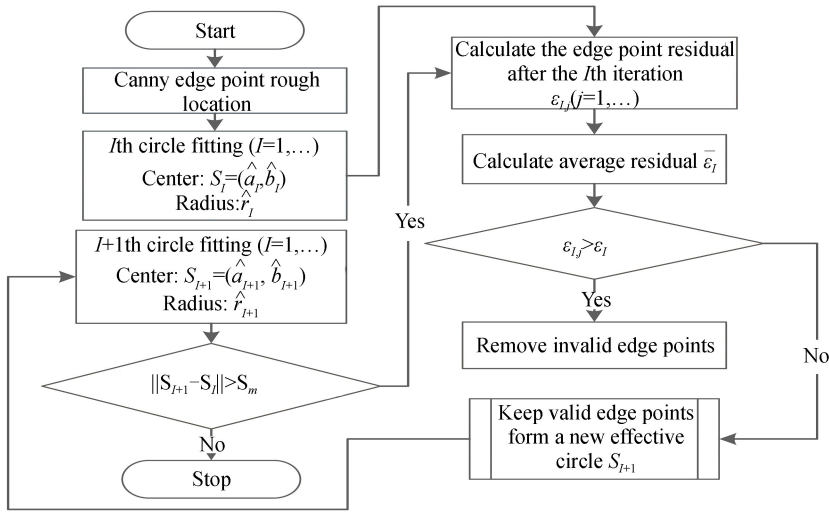


图 5 有效圆边缘检测迭代算法

Fig.5 Iterative algorithm of effective circular edge detection

有效圆边缘检测迭代算法流程中残差计算式为

$$\epsilon_{l,j} = (x_{l,j} - \hat{a}_l)^2 + (y_{l,j} - \hat{b}_l)^2 - \hat{r}_l^2 \quad (9)$$

式中, $(x_{l,j}, y_{l,j})$ 为第 l 次迭代时所有边缘点的边缘点坐标 ($j=0 \dots$), (\hat{a}_l, \hat{b}_l) 、 \hat{r}_l 为拟合圆圆心、半径 ($l=1, \dots$).

平均残差为

$$\bar{\epsilon}_l = \sqrt{\frac{\sum \epsilon_{l,j}^2}{N_E}} \quad (10)$$

式中, N_E 为所有边缘点的元素个数.

有效圆边缘检测迭代算法流程为: 首先检测图形边缘点粗定位, 定位圆心和半径, 记为第 l 次, 圆心记为 S_l , 半径记为 \hat{r}_l , 然后按式(9)计算本次所有边缘点残差, 按式(10)计算平均残差, 比较两者大小, 大于平均残差值, 则剔除此边缘点, 否则保留此边缘点组成新的有效边缘点 S_{l+1} , 对此进行第 $l+1$ 次圆拟合定位圆心和半径, 比较 S_{l+1} 与 S_l 之间的距离, 不大于设定值 S_m 时迭代结束, S_m 为有效圆边缘检测迭代算法循环迭代结束条件, 否则重复上述的计算再比较.

2.2 太阳矢量算法

太阳矢量在反射镜坐标系下的参数计算是求解模型的必要参数,以太阳观测器为工具基于太阳矢量的点光源转台高精度标校后,通过反射镜坐标系与当地坐标系之间的坐标变换关系,太阳矢量在反射镜坐标系下的坐标可表示为^[11]

$$\begin{bmatrix} X_{\text{mir}} \\ Y_{\text{mir}} \\ Z_{\text{mir}} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \left(\frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta - \beta_0) & \sin(\beta - \beta_0) \\ 0 & -\sin(\beta - \beta_0) & \cos(\beta - \beta_0) \end{bmatrix} (\mathbf{R}_Y^S)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\alpha - \alpha_0) & -\sin(\alpha - \alpha_0) & 0 \\ \sin(\alpha - \alpha_0) & \cos(\alpha - \alpha_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{R}_X^L \mathbf{R}_Y^L)^{-1} \begin{bmatrix} S_E \\ S_N \\ S_{\text{Up}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, \mathbf{R}_X^L 、 \mathbf{R}_Y^L 表示反射镜坐标系到当地坐标系 X 、 Y 轴的旋转矩阵, \mathbf{R}_Y^S 表示俯仰轴坐标系到方位轴坐标系绕 Y 轴的旋转矩阵, α 、 β 为方位、俯仰编码器实测值, α_0 、 β_0 为方位、俯仰编码器初始状态读数, S_E 为太阳在当地坐标系下正东方向分量, S_N 为太阳在当地坐标系下正北方向分量, S_{Up} 为太阳在当地坐标系下铅直向上方向分量。

按照上述算法流程计算太阳在反射镜坐标系下的各方向分量值,需已知系统标校后的几何误差参数、编码器方位、俯仰初始状态读数 α_0 、 β_0 、按时间序列观测的太阳方位角 α_{zimuth} 、高度角 α_{latitude} ,以及对准太阳时实测编码器方位、俯仰计数值 α 、 β 。按时间序列实际观测的太阳方位角、高度角参数以及实测编码值如图 6 所示。由文献[11]系统几何误差标校模型计算得水平度偏置 X 、 Y 方向的水平度误差为 $[0.019 \ 3 \quad -0.009 \ 8]$ (单位为 rad),垂直度偏置误差为 $-0.001 \ 5$ rad,编码器方位、俯仰初始状态读数 $\alpha_0 = 4.579 \ 4$ rad、 $\beta_0 = 4.031 \ 8$ rad。

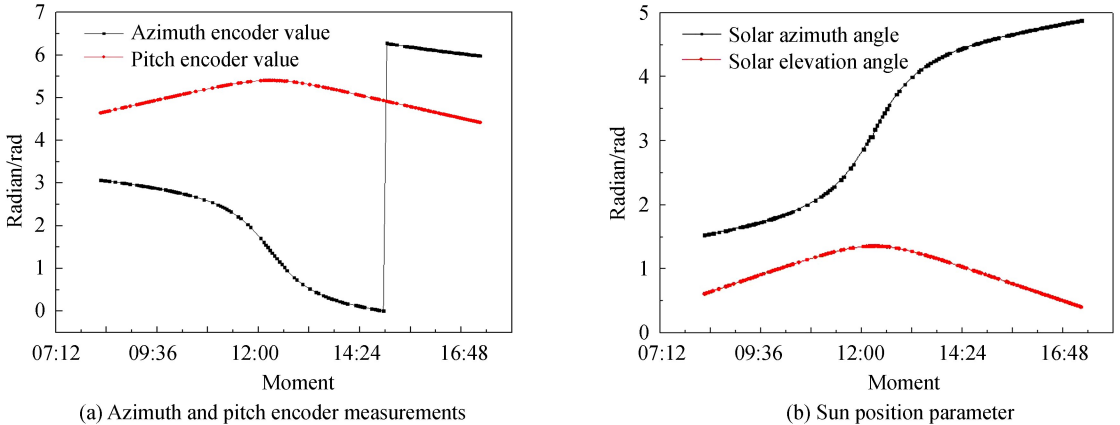


图 6 按时间序列实测编码器值及对应的太阳位置参数

Fig.6 Measure encoder value and corresponding solar position parameters according to time series

根据实测太阳位置参数计算太阳在当地坐标系下正东、正北、铅直向上 S_E 、 S_N 、 S_{Up} 方向分量^[11],再代入式(11)解算 $[X_{\text{mir}} \ Y_{\text{mir}} \ Z_{\text{mir}}]$ 。图 6(a)中方位编码器实测值出现的数据阶跃跳变现象,为绝对值编码器在实际测量时的过零点变化。

2.3 镜法向矢量控制算法

利用标校后的反射镜法向几何模型结合入射光线与镜反射光线,得到反射镜法向在实际应用中的期望指向,从而驱动姿态调控组件传动机构实现反射镜俯仰、方位姿态调控,实现反射镜法向精确指向。根据太阳入射光线与镜反射光线关系可设

反射镜坐标系下的镜反射矢量为

$$\mathbf{S}_{\text{ref}} = [X_{\text{satmir}} \ Y_{\text{satmir}} \ Z_{\text{satmir}}]^T \quad (12)$$

反射镜坐标系下的入射太阳矢量为

$$\mathbf{S}_{\text{sun}} = [X_{\text{mir}} \ Y_{\text{mir}} \ Z_{\text{mir}}]^T \quad (13)$$

镜反射法向为 Z 轴的镜反射矩阵为

$$\mathbf{R}_M = \begin{bmatrix} \cos \pi & -\sin \pi & 0 \\ \sin \pi & \cos \pi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

则入射太阳矢量与镜反射矢量关系可表示为

$$\mathbf{R}_M \begin{bmatrix} X_{\text{mir}} \\ Y_{\text{mir}} \\ Z_{\text{mir}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\text{satmir}} \\ Y_{\text{satmir}} \\ Z_{\text{satmir}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中镜反射矢量根据过顶时刻卫星坐标与当地坐标连线以及标校后的系统几何误差模型确定^[11], 可得镜反射矢量即卫星在反射镜坐标系下的矢量, 可表示为

$$\begin{bmatrix} X_{\text{satmir}} \\ Y_{\text{satmir}} \\ Z_{\text{satmir}} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \left(\frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta - \beta_0) & \sin(\beta - \beta_0) \\ 0 & -\sin(\beta - \beta_0) & \cos(\beta - \beta_0) \end{bmatrix} (\mathbf{R}_Y^S)^{-1} \begin{bmatrix} \cos(\alpha - \alpha_0) & -\sin(\alpha - \alpha_0) & 0 \\ \sin(\alpha - \alpha_0) & \cos(\alpha - \alpha_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot (\mathbf{R}_X^L \mathbf{R}_Y^L)^{-1} \begin{bmatrix} X_{\text{satloc}} \\ Y_{\text{satloc}} \\ Z_{\text{satloc}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, $X_{\text{satloc}}, Y_{\text{satloc}}, Z_{\text{satloc}}$ 分别表示卫星在当地坐标系下 X, Y, Z 轴方向分量, $X_{\text{satmir}}, Y_{\text{satmir}}, Z_{\text{satmir}}$ 分别表示卫星在反射镜坐标系下 X, Y, Z 轴方向分量。

令

$$\mathbf{R}_{\text{loc}}^{\text{mir}} = \mathbf{R} \left(\frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta - \beta_0) & \sin(\beta - \beta_0) \\ 0 & -\sin(\beta - \beta_0) & \cos(\beta - \beta_0) \end{bmatrix} (\mathbf{R}_Y^S)^{-1} \begin{bmatrix} \cos(\alpha - \alpha_0) & -\sin(\alpha - \alpha_0) & 0 \\ \sin(\alpha - \alpha_0) & \cos(\alpha - \alpha_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{R}_X^L \mathbf{R}_Y^L)^{-1} \quad (17)$$

将式(11)、(16)、(17)代入式(15)可得过顶时刻入射太阳矢量与过顶时刻卫星矢量关系, 可表示为

$$\begin{bmatrix} S_E \\ S_N \\ S_{\text{Up}} \end{bmatrix} = (\mathbf{R}_{\text{loc}}^{\text{mir}})^{-1} \mathbf{R}_M \mathbf{R}_{\text{loc}}^{\text{mir}} \begin{bmatrix} X_{\text{satloc}} \\ Y_{\text{satloc}} \\ Z_{\text{satloc}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

由式(18)可求解出反射镜法向期望的空间位置指向 α, β 值, 从而可以控制反射镜法向方位、俯仰运动 α, β 角度, 驱动反射镜法向指向期望方位, 实现镜反射光路与卫星光路对准。

3 实验数据处理与结果分析

3.1 实验数据处理分析

实验之前首先将点光源设备调整水平, 反射镜调整至初始位置状态, 然后通过自动调控组件利用太阳

表 1 太阳观测器指向太阳时设备部分测试数据

Table 1 Partial test data of device when sun observer points to sun

Sun centroid/pixel		Sun position/(°)		Encoder angle value/(°)		Encoder original angle value/(°)	
Pixel x	Pixel y	Altitude	Azimuth	Pitch	Azimuth	Pitch	Azimuth
598.689	491.998	34.776	87.289	266.221	175.979	231.218	262.321
598.200	494.719	39.159	89.945	268.198	174.727	231.218	262.321
601.967	489.821	41.203	91.237	268.835	174.485	231.218	262.321
599.194	491.019	45.664	94.226	277.251	169.321	231.218	262.321
599.194	491.019	46.369	94.724	277.954	168.860	231.218	262.321
598.515	493.374	60.179	107.138	292.017	156.907	231.218	262.321
600.229	491.095	70.686	125.934	302.827	138.428	231.218	262.321
598.257	491.113	72.225	130.792	304.431	133.440	231.218	262.321
596.128	486.338	77.390	168.972	309.792	92.527	231.218	262.321
594.519	485.796	57.839	255.398	288.523	5.361	231.218	262.321

观测器和相机采集不同时刻不同位置指向太阳时的图像,同时记录指向太阳时俯仰、方位编码器数值和太阳在当地坐标系下的高度角和方位角.从采集的 125 组数据中抽取 109 组数据用于求解转台系统几何误差及反射镜与相机几何模型,限于篇幅,表 1 仅列出了 10 组数据,解算后的转台系统几何误差参数为 $[0.019\ 3\ -0.009\ 8\ -0.001\ 5\ 4.579\ 4\ 4.031\ 8]$ (单位为 rad)^[11].根据解算后系统几何误差参数利用式(11)解算太阳在反射镜坐标系下的各分量值,解算数据如图 7.结合太阳图像质心坐标及标校后相机主点主距^[13],以最小二乘法解算反射镜与相机几何模型参数为 $\theta_1=0.002\ 34\ \text{rad}$, $\theta_2=0.002\ 38\ \text{rad}$, $\theta_3=-0.016\ 73\ \text{rad}$, $x_{\text{ocam}}=599.86\ \text{pixel}$, $y_{\text{ocam}}=489.34\ \text{pixel}$, $f_{\text{cam}}=14.024\ \text{mm}$.

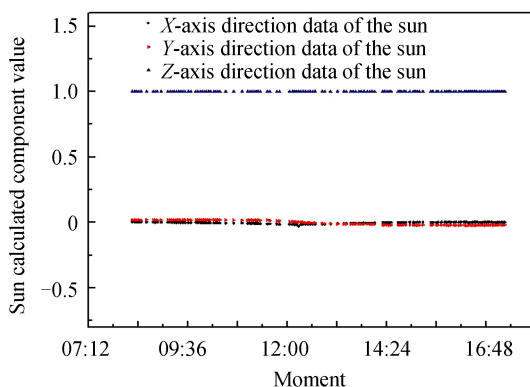


图 7 太阳在反射镜坐标系下 X、Y、Z 轴方向分量计算结果

Fig.7 Calculation results of the X, Y, Z axis components of the sun in the reflector coordinate system

为了验证求解模型参数的可靠性,分别对用于求解模型参数的图像数据及太阳矢量值进行可靠性分析.相机对太阳成像,入射太阳光的发散角为 0.5° ^[10].根据相机镜头视场角参数,在 $1\ 280 \times 1\ 024$ 像素的图像中,理论计算 0.5° 的太阳图像大小所对应水平、垂直方向像素数约为 28 和 31 个像素;实际对 125 组太阳图像统计分析计算得水平、垂直方向像素数均值为 31 和 30 个像素,如图 8(b)所示,通过比对分析,实测与理论计算值基本一致.由于采集过程中受图像退化噪声干扰、太阳图像质心提取算法精度、相机自适应增益调节阈值范围的影响,采集的太阳图像大小与理论计算值存在一定差距,其相对标准偏差为 3.08% 和 3.20%,在一定程度上保证了采集图像数据的可靠性.图像质心的提取在获取图像数据的基础上,采用上述图像质心算法获得,计算数据如图 9.相机实际采集太阳图像大小如图 8(a)实线框中所示,虚线框内为相机拍摄的整幅图像.

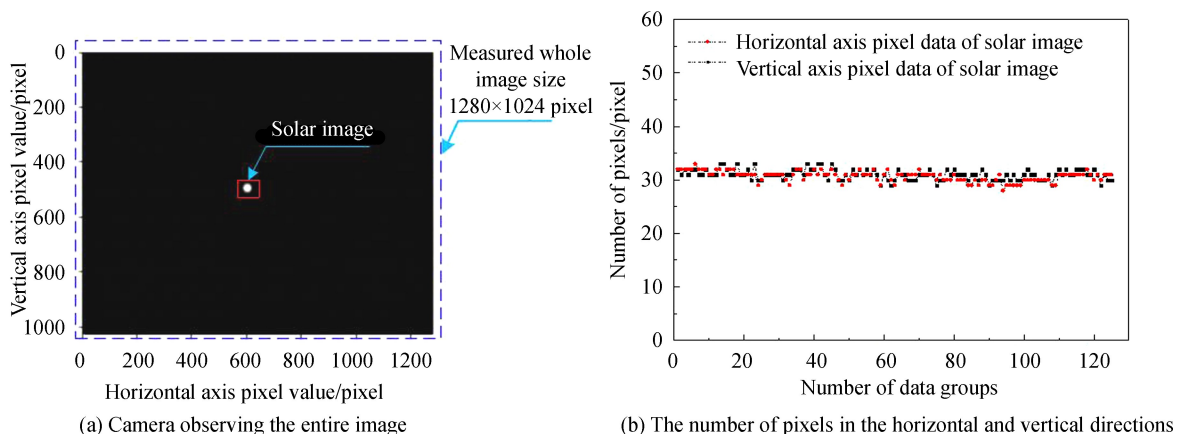


图 8 相机实际观测的太阳图像

Fig.8 Sun image actually observed by camera

由于相机与反射镜间固连,太阳在相机坐标系下与在反射镜坐标系下 X、Y 轴方向分量数值趋势应保持一致.由实际计算数据可得,两组数据趋势一致,如图 7 和图 9 所示,从而保证太阳矢量计算数据的正确性及求解模型参数的可靠性.采用上述质心提取算法流程计算图像质心坐标,其 X、Y 轴质心相对标准偏差分别为 0.418 2%、0.725 4%,与方位轴相比,质心坐标俯仰轴方向相对标准偏差较大,其原因可能为转台同轴度

偏差所致,但是,这部分的偏差通过相机与反射镜之间的几何模型求解后成为常量,不影响后期进行多点标校反射镜法向精度.

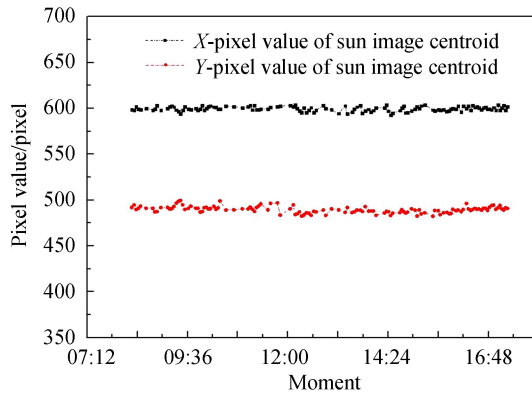


图9 太阳图像质心提取结果

Fig.9 Results of sun image centroid extraction

为了更进一步验证几何模型求解参数的正确性,利用反解模型得到的不同时刻图像质心坐标作为目标值与实际测量不同时刻对准太阳时的图像质心坐标之间的差异,再借助太阳观测器实际观测对准太阳时的差异,来综合验证模型求解参数的正确性,实验结果如图10.

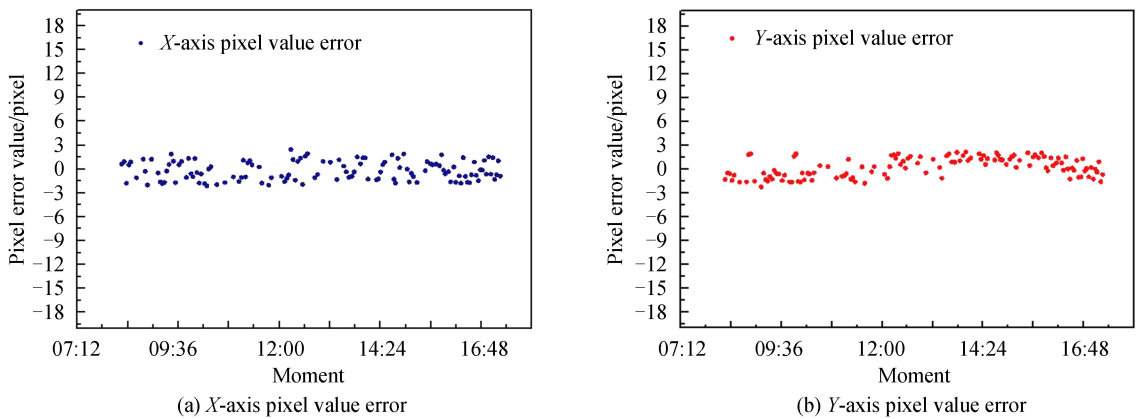


图10 实测不同时刻对准太阳图像质心与模型计算值误差分布

Fig.10 Error distributions of the centroid of the sun image and the calculated values of the model at different times

统计分析得, X 轴方向标准误差为1.204 95 pixel、 Y 轴方向标准误差为1.239 01 pixel,对应的像素角分辨率误差为 $0.021\ 65^\circ$ 、 $0.019\ 82^\circ$,综合角分辨率误差为 $0.029\ 36^\circ$.

3.2 法向标校精度及系统误差分析

反射镜与相机几何模型参数确定后,利用解算后的几何模型对反射镜法向进行标校,由3.1节分析可知,相机观测误差主要表现在利用模型计算不同时刻对准太阳时的图像质心坐标与实际测量不同时刻对准太阳时的图像质心坐标之间的差异,分别为 X 轴方向标准误差为1.204 95 pixel、 Y 轴方向标准误差为1.239 01 pixel.其次,利用相机观测使反射镜中心光轴指向太阳矢量一致方向后,记录此时参数,反方向驱动电机带动反射镜法向俯仰、方位运动到 $\beta - a_{\text{latitude}}$ 、 $\alpha - (360 - a_{\text{azimuth}})$ 角度,完成反射镜法向的标校,编码器实际检测与标校模型计算的俯仰、方位误差角度标准偏差分别为 $0.004\ 3^\circ$ 、 $0.002\ 99^\circ$ ^[11].由此可知,反射镜法向标校误差主要由相机观测使反射镜中心光轴指向太阳时误差与编码器实际检测误差因素综合决定,反射镜法向标校精度为 $0.029\ 8^\circ$,优于太阳观测器对反射镜法向标校精度 0.03° ^[11],实现了反射镜法向自动化标校,同时节省了人力、物力,提高了工作效率.

标校后的反射镜法向自动化集中控制系统综合指向精度主要为镜法向矢量标校精度 $0.029\ 8^\circ$ 及考虑系统几何误差在内镜法向矢量控制精度.镜法向矢量控制精度主要由天文算法计算太阳位置误差 $0.000\ 3^\circ$ 、光电编码器实际检测误差 0.04° 、电机驱动控制精度 $0.000\ 01^\circ$ 、机械传动及齿轮回差等因素综合决定,机械

传动误差由终端编码器检测修正,其最终精度由编码器精度决定.因此,实现自动集中控制点光源阵列系统综合指向精度优于 0.1° ,满足系统指向精度要求.

通过上述分析可知,反射镜法向标校误差主要是在系统几何误差模型标校的基础上,力求提高太阳图像质心提取算法精度和编码器检测误差精度,但是,相机实际采集图像存在光学系统像差与渐晕、CMOS探测器响应均匀性以及成像畸变等影响图像质心提取的问题.本文为了便于应用需求,从调试相机成像电路,筛选不良光学镜头和CMOS探测器芯片使其清晰成像,然后对相机进行标定的实验角度进行分析,以满足本文应用需求.为了进一步提升标校精度,可量化分析光学系统、CMOS探测器响应均匀性等对图像质心提取精度的影响,优化反射镜法向指向精度,减小凸面镜口径尺寸,减少点光源设备体积与重量,便于工程实践,实现在轨MTF检测和辐射定标应用的目的^[16-20].

4 结论

基于点光源的反射镜法向标校技术,通过反射镜坐标系与相机坐标系间几何模型的构建,分析了模型参数的求解算法,建立了太阳图像质心坐标与反射镜法向之间的关系.实验表明,可实现相机观测太阳取代人工借助太阳观测器观测太阳的镜阵列法向自动化标校,能够解决固定场远程网络化集中控制不同能级梯度的点光源阵列反射镜法向自动化标校的问题.同时克服了人工标校反射镜法向存在人为误差因素的影响,进一步提高了反射镜法向标校精度和系统综合指向精度,为系统指向精度的进一步提高以及实现自动化联网集中控制不同能级梯度的点光源阵列奠定了坚实的基础.节省了人力、物力,提高了工作效率,扩展了标校灵活度,减少了点光源设备体积与重量,便于工程实践,从而有利于实现多种高空间分辨率光学遥感卫星的高精度、高频次、高时效、业务化、全动态范围的在轨MTF检测和绝对辐射定标.

参考文献

- [1] GU Xing-fa, TIAN Guo-liang, YU Tao, *et al.* Principle and method of radiometric calibration for aerospace optical remote sensor[M]. Beijing: Science Press, 2013: 1-68.
顾行发, 田国良, 余涛, 等. 航天光学传感器辐射定标原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-68.
- [2] ZHENG Xiao-bing. Some respects for development of radiometric calibration techniques for optical remote sensing satellite[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, **9**(1):2-8.
郑小兵. 发展光学遥感卫星辐射定标技术的几点思考[J]. 大气与环境光学期刊, 2014, **9**(1):2-8.
- [3] MYERS J, THOME K, LEISSO N. Radiometric calibration of earth-observing sensors using an automated test site at Railroad Valley, Nevada[J].*Canadian Journal of Remote Sensing*, 2010, **36**(5): 474-487.
- [4] LIANG Shun-lin. Quantitative remote sensing of land surfaces[M]. FAN Wen-jie, Transl. Beijing: Science Press, 2009.
梁顺林. 定量遥感[M]. 范闻捷 译. 北京:科学出版社,2009.
- [5] THOME K, MARKHAM B, BARKER J, *et al.* Radiometric Calibration of Landsat[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, **63**(7): 853-858.
- [6] GAO Hai-liang, GU Xing-fa, YU Tao, *et al.* The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of space-borne optical remote sensors[J].*Remote Sensing Information*, 2010, **4**:117-128.
高海亮,顾行发,余涛,等. 星载光学遥感器可见近红外通道辐射定标研究进展[J]. 遥感信息,2010, **4**:117-128.
- [7] XU Wei-wei, ZHANG Li-ming, CHEN Hong-yao, *et al.* In-flight radiometric calibration of high resolution optical satellite sensor using reflected point sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(3): 0328001.
徐伟伟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 基于反射点源的高分辨率光学卫星传感器在轨辐射定标方法[J]. 光学学报, 2017, **37**(3): 0328001.
- [8] SCHILLER S J. Application of the specular array radiometric calibration (sparc) method for the vicarious calibration of landsat sensors [C]Proceedings of ASPRS 2016 Annual Conference and co-located JACIE Workshop, 2016, 581: 2-3.
- [9] SCHILLER S J, SILNY J. The specular array radiometric calibration (sparc) method: a new approach for absolute vicarious calibration in the solar reflective spectrum[C]. SPIE, 2010, **7813**: 78130E.
- [10] FENG Hao, ZHANG Li-ming, LI Jia-wei, *et al.* High-precision pointing technology with reflected point light source based on CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(5): 0528004.
冯浩, 张黎明, 李佳伟, 等. 基于 CCD 相机的反射式点光源高精度指向技术[J]. 光学学报, 2018, **38**(5): 0528004.
- [11] Li Rui-jin, ZHANG Li-ming, XU Wei-wei, *et al.* High-precision calibration modeling of point-light-source turntable based on solar vector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(11): 1128001.
李瑞金, 张黎明, 徐伟伟, 等. 基于太阳矢量的点光源转台高精度标校建模研究[J]. 光学学报, 2019, **39**(11): 1128001.
- [12] LI Xiu-ju. Research on methods for on-orbit geometric calibration of high resolution remote sensing satellite [D]. Hefei: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 14-34.

- 李秀举. 高分辨率遥感卫星在轨几何定标方法研究[D]. 合肥:中国科学院研究生院, 2013: 14-34.
- [13] ZHANG Zheng-you. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11):1330-1334.
- [14] GAO Shi-yi, ZHAO Ming-yang, ZHANG Lei, *et al.* Improved algorithm about subpixel edge detection of image based on zernike orthogonal moments[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(9): 1163-1168.
高世一, 赵明扬, 张雷, 等. 基于 Zernike 正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进 [J]. 自动化学报, 2008, **34**(9): 1163-1168.
- [15] YANG Peng, XIE Li, LIU Ji-lin, *et al.* Zernike moment based high-accuracy sun image centroid algorithm[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, **32**(9): 1963-1969.
杨鹏, 谢立, 刘济林, 等. 基于 Zernike 矩的高精度太阳图像质心提取算法[J]. 宇航学报, 2011, **32**(9): 1963-1969.
- [16] ZHAN Yin-hu, ZHENG Yong, ZHANG Chao, *et al.* Image centroid algorithms for sun sensors with super wide field of view[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, **44**(10): 1078-1084.
詹银虎, 郑勇, 张超, 等. 超大视场太阳敏感器图像质心提取算法[J]. 测绘学报, 2015, **44**(10): 1078-1084.
- [17] CHEN Yun-jin, FENG Ying, WEI Li-an, *et al.* Experiment research on subpixel location error of the facula centroid [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(2): 80-84.
陈运锦, 冯莹, 魏立安, 等. 光斑质心亚像素定位误差的实验研究[J]. 光电工程, 2010, **37**(2): 80-84.
- [18] TU Bing-jie, HAN Ke, WANG Hao, *et al.* Design of digital sun sensor with large field [J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2011, **24**(3): 336-341.
屠斌杰, 韩柯, 王昊, 等. 大视场数字式太阳敏感器设计[J]. 传感技术学报, 2011, **24**(3): 336-341.
- [19] XU Wei-wei, ZHANG Li-ming, SI Xiao-long, *et al.* On-orbit modulation transfer function detection of high resolution optical satellite sensor based on reflected point sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(7): 0728001.
徐伟伟, 张黎明, 司孝龙, 等. 基于反射点源的高分辨率光学卫星传感器在轨调制传递函数检测[J]. 光学学报, 2017, **37**(7): 0728001.
- [20] ZHAO Chun-yan, ZHANG Yan-na, WEI Wei, *et al.* Absolute radiometric calibration method based on surface hyperspectral BRDF model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(5): 0528001.
赵春艳, 张艳娜, 韦玮, 等. 基于场地高光谱 BRDF 模型的绝对辐射定标方法[J]. 光子学报, 2019, **48**(5): 0528001.