

基于 CCD 相机的反射式点光源高精度指向技术

冯浩^{1,2}, 张黎明¹, 李佳伟¹, 徐伟伟¹, 陈洪耀¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 反射式点光源设备可用于光学遥感器的在轨调制传递函数检测和绝对辐射定标等,其高精度指向是确保太阳光反射至传感器入瞳的关键。通过进一步提高指向精度,可以减小现有光源的体积和质量,具有重要的工程意义。通过建立几何误差标校模型和反射镜法向标校模型,去除旋转矩阵参数的相关性;利用阻尼 Gauss-Newton 方法迭代求解标校模型参数,实现了反射式点光源优于 0.1° 的指向精度。该研究为实现光学卫星遥感器的高精度、高频次、全动态范围的定标检测提供了基础。

关键词 遥感; 误差校正模型; 几何误差; 太阳敏感器; 点光源

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0528004

High-Precision Pointing Technology with Reflected Point Light Source Based on CCD Camera

Feng Hao^{1,2}, Zhang Liming¹, Li Jiawei¹, Xu Weiwei¹, Chen Hongyao¹

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Reflected point light source equipment can be applied to on-orbit modulation transfer function detection and absolute radiometric calibration of optical remote sensors. Its high-precision pointing is the key to ensure the sunlight reflect to the entrance pupil of remote sensors, and the improvement of pointing accuracy can reduce the size and weight of current point light source, which has great importance in practice. A geometric error calibration model and a reflector normal calibration model are established, and the dependence among parameters of the rotation matrix is eliminated. Damping Gauss-Newton method is applied to iteratively solve the model parameters. A pointing accuracy better than 0.1° for reflected point light source is obtained. The study will lay the foundation for high accuracy, high frequency, and full dynamic range calibration of optical satellite remote sensors.

Key words remote sensing; error calibration model; geometric error; sun sensor; point light source

OCIS codes 280.4788; 230.4040; 120.0280

1 引 言

随着科技的发展和遥感应用日趋定量化,人们对卫星定量化遥感水平的要求越来越高。在轨绝对辐射定标是遥感信息定量化应用的关键技术之一,调制传递函数^[1-3]可用于评估高分辨率光学卫星传感器的像质,在轨调制传递函数检测对于高分辨率卫星遥感数据的应用和将来卫星遥感器的发展具有重要意义。

反射式点光源设备作为一种新型的定标参照,可用于光学遥感器在轨调制传递函数检测和绝对辐射定标^[4-6]等,具有全动态范围、布设灵活和定标精度高等优点。Schiller 等^[7]利用凸面镜面阵反射式点光源实现了辐射定标。中国科学院合肥物质科学研究所的徐伟伟等^[8-9]利用凸面镜反射式点光源实现了在轨调制传递函数检测和绝对辐射定标。凸面镜将光斑扩散之后,进入遥感器的能量较低,为实现全动态范围的定标检测,需要多反射镜组合或者提

收稿日期: 2017-11-28; 收到修改稿日期: 2017-12-25

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(GFZX04032201)

作者简介: 冯浩(1991—),男,硕士研究生,主要从事几何定标方面的研究。E-mail: fakhri@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 张黎明(1958—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光学遥感器辐射定标与标准传递等方面的研究。

E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn

高凸面反射镜的曲率半径和反射式点源的指向精度,这给光学卫星遥感器外场定标检测以及中高轨遥感器的在轨定标带来了困难。

为了实现中高轨遥感器的在轨定标检测,开展了基于平面反射镜的高精度反射式点光源的研制,点光源的指向精度需优于 0.1° 。为了达到上述研制目标,将摄像头作为系统的输入传感器,利用太阳位置算法^[10-13]精确计算每时每秒太阳在当地东北上坐标系的高度角和方位角,以此位置作为系统的输出标校方位坐标系、俯仰坐标系、摄像机坐标系与当地东北上坐标系的误差,并建立误差模型。该系统中点光源的综合指向精度优于 0.1° 。本文介绍了高精度反射式点光源的系统组成,分析了系统的数学模型,最后对系统的测试数据进行了分析和讨论。

2 高精度指向系统结构

高精度反射式点光源的整体结构如图 1 所示。平面镜上突起的部分为太阳敏感器,下面为平面反射镜和镜托,镜托安置在俯仰电机上,俯仰电机与方位电机由立柱连接,下方由底座支撑,控制柜和电气设备安置在底座上。

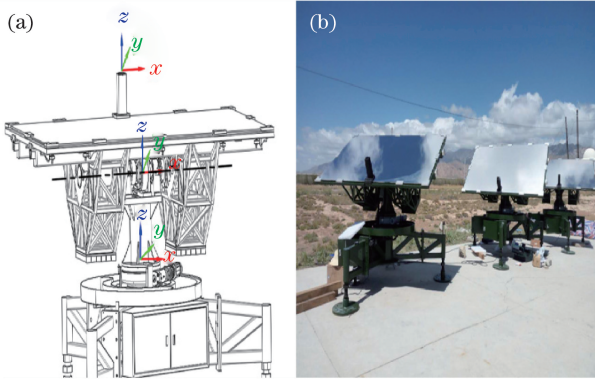


图 1 高精度点光源系统。(a)结构示意图;(b)实物图

Fig. 1 High-precision point light source system.

(a) Structural diagram; (b) physical map

高精度反射式点光源系统中,基于 CCD 相机的太阳敏感器是由 CCD 相机和太阳敏感器所构成的组件,是整个系统的输入传感器和反射镜法向标校传感器。CCD 相机的分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,选用镜头的视场角约为 30° ,对应的角分辨率约为 0.03° 。太阳敏感器示意图如图 2 所示。蓝色区域用来观测太阳,在蓝色区域增加滤光片以使太阳光衰减,利用质心算法计算太阳在摄像头坐标系下的向量。红色的小圆孔用来将镜面法向调整至与太阳光的入射方向一致,利用此时太阳光的矢

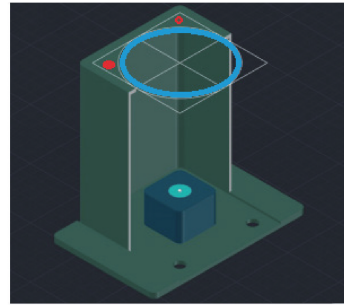


图 2 太阳敏感器

Fig. 2 Sun sensor

量来标校反射镜坐标系和摄像机坐标系。

俯仰电机控制平面反射镜的俯仰运动,方位电机控制平面反射镜的方位运动。底座用来调整装置水平。将装置调至大致水平,后期对参数进行初始化时可以将参数的初始化为 0,便于求解。

3 原 理

点光源可以看作带有反射镜的二维旋转平台,通过太阳位置算法计算太阳在当地东北上坐标系的位置,将这一位置传递给方位坐标系、俯仰坐标系、摄像机坐标系和反射镜坐标系,计算出各个坐标系之间的关系,从而控制镜子在东北上坐标系下的运动。各个坐标系之间的关系如图 3 所示。

3.1 建立相机观测结果与太阳角度之间的关系

在右手直角坐标系下,规定绕轴顺时针旋转为正,下文所有的坐标系都按此规定。其中,俯仰坐标系的旋转轴为 X 轴,方位坐标系的旋转轴为 Z 轴。设绕 X、Y、Z 轴旋转 θ 的旋转矩阵分别为 $\mathbf{R}_x(\theta)$ 、 $\mathbf{R}_y(\theta)$ 、 $\mathbf{R}_z(\theta)$,即

$$\mathbf{R}_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

设相机坐标系到俯仰坐标系、俯仰坐标系到方位坐标系、方位坐标系到当地东北上坐标系的旋转矩阵分别为 $\mathbf{R}_{\text{cam}}^{\text{pit}}$ 、 $\mathbf{R}_{\text{pit}}^{\text{AZ}}$ 、 $\mathbf{R}_{\text{AZ}}^{\text{local}}$,且旋转矩阵的旋转顺序依次为 X 轴、Y 轴和 Z 轴。由于矢量的平移不影响矢量的大小和方向,因此可以忽略各个坐标系之间的平移关系,只考虑旋转关系。将相机所观测的

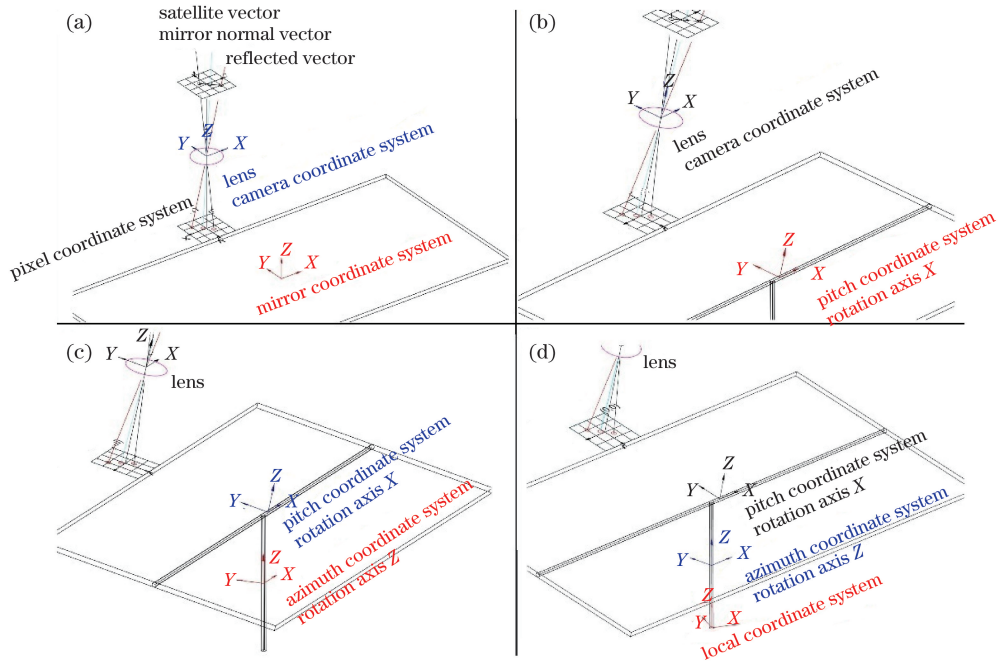


图 3 点光源系统坐标系之间的关系。(a)相机坐标系与反射镜坐标系的关系;(b)相机坐标系与俯仰坐标系的关系;

(c)俯仰坐标系与方位坐标系的关系;(d)方位坐标系与当地坐标系的关系

Fig. 3 Relationships among coordinate systems of point light source systems.

(a) Relationship between camera coordinate system and reflector coordinate system;

(b) relationship between camera coordinate system and pitch coordinate system;

(c) relationship between pitch coordinate system and azimuth coordinate system;

(d) relationship between azimuth coordinate system and local coordinate system

太阳矢量依次转换至俯仰坐标系、方位坐标系和当地东北上坐标系,同时利用太阳位置算法计算出太阳在当地东北上坐标系下的向量,相机观测结果与太阳位置算法计算结果应该相等,于是可得

$$\mathbf{R}_{AZ}^{local} \mathbf{R}_{pit}^{AZ}(\varphi - \varphi^{AZ}) \mathbf{R}_{cam}^{pit}(\theta - \theta^{pit}) \lambda \mathbf{S}^{cam} = \mathbf{S}^{local}, \quad (4)$$

式中: λ 为相机坐标系下太阳矢量的模长的倒数; $\mathbf{R}_{pit}^{AZ}(\varphi - \varphi^{AZ})$ 和 $\mathbf{R}_{cam}^{pit}(\theta - \theta^{pit})$ 为带编码器参数的旋转矩阵; φ^{AZ} 和 θ^{pit} 分别为方位轴和俯仰轴电机的零位误差; φ 和 θ 分别为俯仰方位电机旋转的方位角和俯仰角; \mathbf{S}^{cam} 和 \mathbf{S}^{local} 分别为太阳在相机坐标系和当地东北上坐标系下的向量。

3.2 重新定义旋转矩阵旋转方式以减少相关变量

定义 \mathbf{R}_{cam}^{pit} 的旋转顺序为Z轴、Y轴和X轴, \mathbf{R}_{pit}^{AZ} 的旋转顺序为X轴、Y轴和Z轴, \mathbf{R}_{AZ}^{local} 的旋转顺序为Z轴、X轴和Y轴,将(4)式展开可得

$$\begin{aligned} & \mathbf{R}_z(\alpha) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_x(\lambda) \mathbf{R}_x(\theta - \theta^{pit}) \mathbf{R}_x(\gamma) \times \\ & \mathbf{R}_y(\vartheta) \mathbf{R}_z(f) \cdots \mathbf{R}_z(\varphi - \varphi^{AZ}) \mathbf{R}_z(\omega) \times \\ & \mathbf{R}_x(\iota) \mathbf{R}_y(\eta) \mathbf{S}^{local} = \lambda \mathbf{S}^{cam}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\alpha, \beta, \lambda, \gamma, \vartheta, f, \omega, \iota, \eta$ 为对应的旋转角度。

(5)式横线下的旋转变量都是连续朝同一个方向旋转,将(5)式横线下的旋转变量进行合并可得

$$\mathbf{R}_z(\alpha) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_x(\theta - \theta^{pit}) \mathbf{R}_y(\vartheta) \mathbf{R}_z(\varphi - \varphi^{AZ}) \times \mathbf{R}_x(\iota) \mathbf{R}_y(\eta) \mathbf{S}^{local} = \lambda \mathbf{S}^{cam}. \quad (6)$$

减少相关变量后,变量数由14减少为10。

3.3 建立镜子法向与相机观测结果之间的关系

建立了相机观测结果与太阳角度之间的关系,对相机进行相对辐射定标以及主点、主距、像面畸变检校之后,即可利用太阳敏感器建立镜子法向与相机观测结果之间的关系。当太阳光垂直入射至平面反射镜时,太阳在平面镜坐标系下的单位向量 $\mathbf{I}_d = [0 \ 0 \ 1]^T$;此时太阳在摄像头坐标系下的向量为

$$\mathbf{N}_S^{cam} = [x_m - x_0 \ y_m - y_0 \ -f], \quad (7)$$

式中 (x_m, y_m) 为此时太阳在相机的图像坐标系下的坐标, f 为相机的焦距, x_0 与 y_0 为相机的主点。对于反射镜坐标系而言,由于反射镜绕着Z轴的旋转不影响指向,所以X、Y轴根据摄像机坐标系的X、Y轴进行设定。设摄像机坐标系到反射镜坐标系的左乘旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_{cam}^{mirror} = \mathbf{R}_x(\psi) \mathbf{R}_y(\zeta), \quad (8)$$

式中 ϕ, ζ 分别为绕 X, Y 轴旋转的角度。反射镜坐标系与摄像机坐标系的关系可表示为

$$\mathbf{R}_{\text{cam}}^{\text{mirror}} \mathbf{N}_S^{\text{cam}} = \sqrt{(x_m - x_0)^2 + (y_m - y_0)^2 + f^2} \mathbf{I}_d. \quad (9)$$

3.4 建立最小二乘数学模型

受摄像头测量误差等因素的影响,方程的左右两边不相等,为了求解出以上参数,将方程转化为无约束优化问题,即

$$\mathbf{V} = \mathbf{R}_z(\alpha) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_x(\theta - \theta^{\text{pit}}) \mathbf{R}_y(\vartheta) \mathbf{R}_z(\varphi - \varphi^{\text{AZ}}) \times \mathbf{R}_x(\iota) \mathbf{R}_y(\eta) \mathbf{S}^{\text{local}} - \lambda \mathbf{S}^{\text{cam}}, \quad (10)$$

将(10)转化为求解

$$\min: \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \mathbf{V}^T \mathbf{V}, \quad (11)$$

式中 $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ 为需要优化的目标函数。

3.5 利用阻尼 Gauss-Newton 方法迭代求解

利用非线性最小二乘问题求解算法,即用阻尼 Gauss-Newton 方法对 (11) 式进行求解,阻尼 Gauss-Newton 方法是增加了一维搜索之后的 Gauss-Newton 方法。该方法共涉及 10 个参数,将这 10 个参数分为两组,一组为 7 个旋转参数,另一组为摄像头的 3 个主点主距参数。利用张正友^[14]的标定算法标出摄像头的主点主距,将这 3 个参数当作已知量,利用阻尼 Gauss-Newton 方法计算 7 个旋转参数;当 7 个旋转参数计算完毕后,将摄像头的 3 个参数当作未知量,利用已经求解出的 7 个参数去求解摄像头参数。如此反复迭代,可以较精确地求解出两组未知数。算法流程图如图 4 所示。

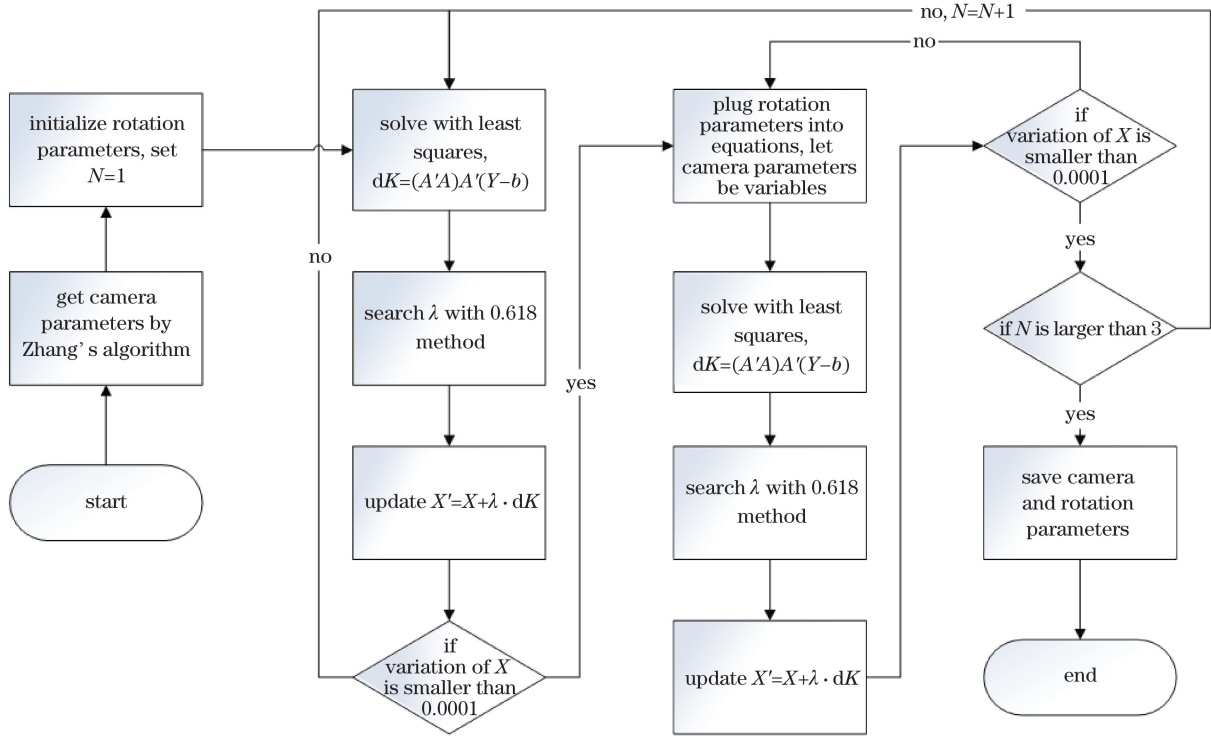


图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of algorithm

3.6 标校后工作模型

标校好误差参数之后,可以得到与摄像机坐标系向量相对应的东北上坐标系向量,同时,利用基于 CCD 相机的太阳敏感器标校出平面反射镜法向在摄像机坐标系下的向量,则可以得到东北上坐标系下镜子的法向,从而可以控制镜子指向所期望的方向。利用表达式

$$\mathbf{R}_{\text{AZ}}^{\text{local}} \mathbf{R}_{\text{pit}}^{\text{AZ}}(\varphi^{\text{AZ}}) \mathbf{R}_{\text{cam}}^{\text{pit}}(\theta^{\text{pit}}) \lambda \begin{bmatrix} x_m - x_0 \\ y_m - y_0 \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\text{DirLocal}} \\ y_{\text{DirLocal}} \\ z_{\text{DirLocal}} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

可以确定所期望转动的方向,其中 $x_{\text{DirLocal}}, y_{\text{DirLocal}}, z_{\text{DirLocal}}$ 为所期望的指向在东北上坐标系下的坐标。通过求解(12)式便可以得出 φ^{AZ} 和 θ^{pit} ,即俯仰方位电机期望旋转的方位角和俯仰角,当电机旋转到此位置时镜子的法向即指向所期望的方向。

4 验证结果与讨论

利用三台实验仪器的测试数据进行验证实验。以下选取一号机的数据进行分析,一共采集了 91 组测试数据,表 1 只展示了前 9 组和后 2 组数据。从

91 组数据中每隔 2 组数据抽选出 1 组数据,一共抽选出 31 组数据,将其作为求解数据组,剩下的数据作为验证数据组。根据求解数据组的数据求得 7 个旋转参数为 $-0.011, 0.0089, -0.0189, -0.0101, -0.0043, -0.0005, -0.0033$ rad;求得的主点主距为 678.935, 517.032, 2551.226 pixel。

表 1 中的第 1、2 列是利用太阳位置算法得到的某时刻太阳在当地东北上坐标系下的高度角和方位角;第 3、4 列是同一时刻太阳在摄像机坐标系下的

像素坐标 X 和 Y ;第 5、6 列是此时装置本身的俯仰角和方位角,利用俯仰方位电机所带的编码器可直接读出其值;第 7、8 列是将此时太阳的高度角和方位角、太阳在摄像机坐标系下的像素坐标 X 和 Y 以及将旋转参数代入到(12)式所得到的高度角和方位角,表示的是太阳出现在这个像素坐标上时系统期望的俯仰角和方位角;第 9、10 列是此时太阳出现在这个像素上时通过编码器获取的俯仰角和方位角与计算出的俯仰角、方位角之间的偏差。

表 1 一号机部分测试数据

Table 1 Partial test data of No.1 machine

Elevating angle of the sun /($^{\circ}$)	Azimuth angle of the sun /($^{\circ}$)	Pixel X of the sun /pixel	Pixel Y of the sun /pixel	Measured pitch angle /($^{\circ}$)	Measured azimuth angle /($^{\circ}$)	Calculated pitch angle /($^{\circ}$)	Calculated azimuth angle /($^{\circ}$)	Pitch angle error /($^{\circ}$)	Azimuth angle error /($^{\circ}$)
50.7564	122.80939	667	587	50.4848	122.343	50.4616	122.287	0.02321	0.05600
51.4766	124.06119	391	877	45.3212	113.499	45.2959	113.528	0.02529	-0.02870
51.5697	124.22684	396	866	45.6013	113.806	45.6148	113.850	-0.01340	-0.04360
51.6325	124.33924	399	850	46.0078	113.993	46.0209	114.055	-0.01300	-0.06170
51.6926	124.44702	410	829	46.4912	114.499	46.5077	114.545	-0.01640	-0.04620
51.7471	124.54521	421	807	47.0076	115.009	47.0130	115.029	-0.00530	-0.01930
51.8124	124.66333	424	787	47.5075	115.207	47.5127	115.243	-0.00510	-0.03590
51.8722	124.77187	430	776	47.7931	115.509	47.7979	115.558	-0.00470	-0.04860
51.9509	124.91535	440	769	48.0074	116.009	48.0012	116.050	0.00618	-0.04050
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
56.5255	134.78822	661	485	58.5050	134.005	58.4944	134.042	0.01059	-0.03710
56.5770	134.92173	669	464	59.0049	134.500	59.0119	134.513	-0.00700	-0.01380

由表 1 可以看出,理论计算值与实测值基本相符,误差值保持在 0.1° 以内,误差均值为 10^{-5} 数量级,并趋近于 0。同样,对其余两台仪器采集的数据进行处理,得到的结果如表 2 所示。由表 2 可知,三台仪器方位角和俯仰角的指向精度均优于 0.1° 。

表 2 三台仪器的测试结果

Table 2 Test results of three instruments

Parameter	Machine 1	Machine 2	Machine 3
Standard deviation of pitch angle /($^{\circ}$)	0.012521	0.010286	0.014841
Standard deviation of azimuth angle /($^{\circ}$)	0.041288	0.032504	0.035445

为了验证对选取数据的求解是否正确,将一号机所采集的全部数据进行参数计算,求得 7 个旋转参数为 $-0.0127, -0.0008, -0.0189, -0.0021, 0.0004, 0.0001, -0.0036$ rad,摄像头参数为 679.358,

517.677, 2553.058,将这些参数代入(12)式,重复第 4 节第 2 段所描述的计算,求得的方位角、俯仰角与表 2 完全一致,验证了求解方法的稳定性及准确性。

在实际中,摄像头的精度与电机编码器的精度不一致,但是将非线性方程组转化为无约束优化问题时,为了方便计算,将摄像头与电机编码器看作是等精度,并未加权处理。为了进一步提升系统精度,在转化方程的时候应加权处理,或使用更高精度的设备,并且对摄像机所采集的图像进行去畸变处理。

5 结 论

高精度反射式点光源设备的指向精度是确保中高轨遥感器在轨道检测、缩小现有点光源设备体积的重要参数之一。将 CCD 相机和太阳敏感器作为输入传感器对系统和镜子法向进行建模,通过重

新定义旋转矩阵的参数,将变量数由 14 减少为 10。将 10 个参数分为两组,利用阻尼 Gauss-Newton 方法交替迭代求解参数。实测结果表明模型很好地代表了此系统,系统的指向精度优于 0.1° 。在保证指向精度的前提下,该系统不仅能对中高轨卫星进行在轨辐射定标和在轨调制传递函数检测,而且可以缩减现有设备 90% 以上的体积和质量,为进一步实现光学遥感器基于反射式点光源阵列定标的自动化、网络化提供基础。

参 考 文 献

- [1] Wang Z, Xiong X X, Choi T, *et al.* On-orbit characterization of MODIS modulation transfer function using the Moon[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(7): 4112-4121.
- [2] Guo Y, Liu X P, Yang H. MTF analysis for CCD[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2004, 25(3): 25-28.
郭悦, 刘晓鹏, 杨桦. CCD 的调制传递函数(MTF)分析[J]. 航天返回与遥感, 2004, 25(3): 25-28.
- [3] Viallefont-Robinet F, Leger D. Improvement of the method for on-orbit MTF measurement[J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3531-3545.
- [4] Zheng X B, Zhang L M, Wu H Y, *et al.* Advanced radiometric calibration techniques for optical remote sensing[J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(s1): 16-22.
郑小兵, 张黎明, 吴浩宇, 等. 面向光学遥感的先进光谱辐射定标技术[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(s1): 16-22.
- [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] Xiong X X, Barnes W. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization[J]. 2006, 23(1): 69-79.
- [7] Schiller S, Silny J. The specular array radiometric calibration (SPARC) method: a new approach for absolute vicarious calibration in the solar reflective[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7813: 78130E.
- [8] Xu W W, Zhang L M, Chen H Y, *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研究[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0328001.
- [9] Xu W W, Zhang L M, Si X L, *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.
- [10] Blanco-Muriel M, Alarcon-Padilla D C, Lopez-Moratalla T, *et al.* Computing the solar vector[J]. Solar Energy, 2001, 70(5): 431-441.
- [11] Reda I, Andreas A. Solar position algorithm for solar radiation application[R]. Colorado: U.S. Department of Energy Laboratory, 2008.
- [12] Meeus J. Astronomical algorithm[M]. Richmond: Willmann-Bell, Inc, 1998.
- [13] Michalsky J J. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950—2050)[J]. Solar Energy, 1988, 40(3): 227-235.
- [14] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.