

60°二维指向镜的面阵相机几何模型标定方法

陆 强^{1,2}

(1. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国科学院 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要:三轴稳定静止轨道面阵相机需要对一定视场内的目标进行搜索和跟踪,常采用二维指向镜与面阵探测器结合的“凝视”成像的技术方案。但是具有二维指向镜的面阵相机像面存在畸变和像旋等问题,影响目标跟踪定位精度。对60°二维指向镜的面阵相机进行了畸变校正和像旋校正,提出基于内外方位元素结合的几何模型实验室标定方法。通过对指向镜法线、南北轴、东西轴的共计13个误差项进行解算优化,平均误差为0.74像元,满足实际使用需求。

关键词:几何模型;畸变校正;像旋校正;内外方位元素
中图分类号:P237;O435.1 **文献标识码:**A

Geometric calibration method of plane array camera with 60 degrees two-dimensional pointing mirror

LU Qiang^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Three-axis stabilized geostationary orbit plane array camera needs to search and track the target in a certain field of view, and usually adopts the "staring" imaging technology scheme combining two-dimensional directional mirror and array detector. However, there are some problems such as image distortion and image rotation, which affect the accuracy of target tracking and positioning. The distortion correction and image rotation correction of 60 degrees two-dimensional directional mirror array camera is carried out, and a geometric model laboratory calibration method based on the combination of internal and external azimuth elements is proposed. The average error are 0.74 pixels, which satisfies the requirement of practical use, by calculating and optimizing 13 error items of the normal, north-south axis and east-west axis of the pointing mirror.

Key words: geometric model, distortion correction, image rotation correction, internal and external azimuth elements

PACS: 07.57.Kp, 07.05.Tp

引言

三轴稳定静止轨道空间相机对地观测位置相对固定,具有时间分辨率高、观测范围广等特点,是航天对地观测成像技术的重要组成部分。三轴稳

定静止轨道空间相机常采用二维指向镜与面阵探测器结合的“凝视”成像的技术方案,从而既可以获得较大的搜索视场,又可对捕获到的目标进行详查和跟踪。随着空间相机大范围搜索目标的要求,面阵探测器配合二维指向镜在空间相机中的应用也

收稿日期:2019-08-30,修回日期:2020-03-20

基金项目:中国科学院 CASEarth 小卫星热像仪项目(XDAI 19010102)

Foundation items: Supported by the CASEarth Minisatellite Thermal Infrared Spectrometer Project of the Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences (XDAI 19010102)

作者简介(Biography):陆强(1985-),男,博士,副研究员,主要从事光学设计、光学装校及光学测试方面的研究。E-mail:luqiangac@126.com

Received date:2019-08-30, Revised date:2020-03-20

越来越多。但是具有二维指向镜的面阵相机的像面存在畸变和像旋等问题,影响目标真实位置信息的获取。因此,消除二维指向镜带来的畸变和像旋,对面阵探测器的目标精确定位具有十分重要的意义。

对于二维指向镜畸变和像旋的校正有软件校正和光机校正两种方法。光机校正中道威棱镜和K镜系统可以有效地消除二维指向镜产生的像旋,如我国海洋一号卫星上搭载的10通道水色扫描仪COCTS^[1]以及极轨气象卫星FY-3卫星上搭载的中分辨率光谱成像仪MERSI^[2],均使用了K镜系统消除像旋,但该系统具有光学材料选择和系统体积较大,使用往往受到限制。而软件校正像旋时,无需在光路中插入任何光学元件,可靠性高,对系统体积重量影响小。如日本空间开发局NASDA研制的海洋水色水温扫描仪OCTS,为了消除45°旋转扫描反射镜产生的像旋,采用了软件校正的方法,取得了较好的效果。国内对推扫结合二维扫描镜^[3-4]、摆扫结合45度镜^[5-7]、凝视结合二维指向镜^[8-9]引起的像旋进行了软件校正。Li Xiaopin等用分类建模的思想建立了离轴三反红外相机扫描镜的几何模型,分析了两类七种扫描模式的扫描特性,最终选择光学系统光轴与扫描坐标系存在一定夹角的模式,并分析定位误差为2个像元,但并未通过试验对结果进行验证^[10]。Wang Mi等对高分四号建立了几何模型,分析了探测器平移旋转、光学畸变和焦距变化对定位精度的影响,仿真得到定位精度约1个像元^[11],但是高分四号由于视场较小并没有采用二维指向镜。对于三轴稳定静止轨道卫星光学系统,目前国内只有少量学者针对该类卫星特点开展了畸变、像旋模拟和系统性校正算法研究,缺少从卫星成像的严格几何模型进行系统性的计算及实验验证。本文对具有60°二维指向镜的三轴稳定静止轨道面阵相机,提出基于内外方位元素的几何模型标定方法消除畸变和像旋,并通过实验对该标定方法进行验证。

1 几何模型标定的原理

面阵相机几何成像模型受主点、主距、畸变、焦平面、指向机构安装误差等因素的影响。因此面阵相机几何模型要通过内外方位元素标定,建立图像坐标系任一像元与该像元视线矢量在相机坐标系的空指指向的一一对应关系。内方位元素包括主点、主距和畸变等参数的标定,外方位元素包括相

机的位置、方向等参数的标定。

畸变校正模型的基准坐标系为焦平面坐标系,首先需要建立焦平面坐标系与目标出射矢量的转换关系,然后在此基础上进行入射光矢量在焦平面的入射角与实际像点响应位置的相互转换关系,即内方位元素的标定。像旋校正模型的基准坐标系为相机坐标系,首先需要建立相机坐标系与目标出射矢量的转换关系,然后在此基础上依次进行指向镜法线、南北轴、东西轴的标定,即外方位元素的标定。

焦平面坐标系 O_2-xy 为一个平面坐标系。焦平面坐标系是在图像坐标系的基础上建立的, O_2-x 轴、 O_2-y 分别与图像坐标系 O_1-j 、 O_1-i 平行,焦平面坐标系原点对应于图像坐标系中心像元处的物理位置。理想像平面坐标系是一个虚拟的坐标系,该坐标系主要用于畸变校正目的,理想像平面坐标系 $O_3-u'v'$ 原点为主点 O_3 ,像平面坐标系垂直于主距。理想像平面坐标系 O_3-u' 、 O_3-v' 分别与焦平面坐标系 O_2-x 、 O_2-y 平行且方向相同,见图1。像空间坐标系 O_4-uvw 为一个三维坐标系,像空间坐标系 O_4-u 轴与像平面坐标系 O_3-u' 平行, O_4-v 轴与 O_3-v' 平行。主点在像空间坐标系的坐标为 $[0,0,-f]^T$,见图2。

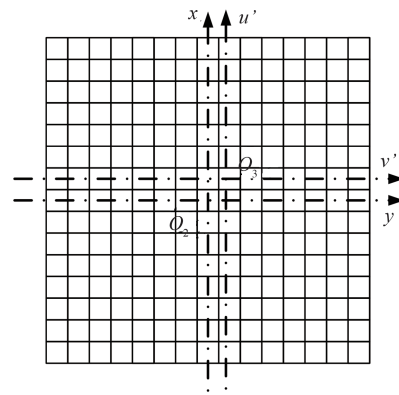


图1 理想像平面坐标系与焦平面坐标系的定义

Fig. 1 Definition of ideal image plane coordinate system and focal plane coordinate system

面阵相机几何成像示意图如图3。探测器上任一像元发出的视矢量经过二维指向镜的反射作用,射向所探测的目标。A和A'分别为视轴的人射和出射方向,N为指向镜法线方向,P和Q分别为二维指向镜的南北轴和东西轴,通过P轴和Q轴的转动来实现不同区域的观测。

理想状态下,计算面阵相机的几何模型包括以下四步:

- a. 将图像坐标系坐标 (i,j) 转换到焦平面坐标

$$Vec_{object} = \begin{bmatrix} \cos(azi - azi_0) & 0 & -\sin(azi - azi_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(azi - azi_0) & 0 & \cos(azi - azi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(elev - elev_0) & \sin(elev - elev_0) \\ 0 & -\sin(elev - elev_0) & \cos(elev - elev_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

根据成像原理,平行光管发出的目标矢量 $-Vec_{object}$ 等于其在焦平面响应位置的视矢量 Vec_{pixel}

$$Vec_{object} = -Vec_{pixel} = -\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix}, \quad (8)$$

即有

$$\begin{bmatrix} \cos(azi') & 0 & -\sin(azi') \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(azi') & 0 & \cos(azi') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(elev') & \sin(elev') \\ 0 & -\sin(elev') & \cos(elev') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中, $(azi', elev')$ 为相对于自准直仪基准位置 $(azi_0, elev_0)$ 的方位角和俯仰角, $azi' = azi - azi_0$ 、 $elev' = elev - elev_0$ 。

利用最小二乘法可以获得内方位元素的解析解:

$$f' = \frac{n \sum (x_i \tan(azi'_i)) - \sum \tan(azi'_i) \sum x_i}{n \sum \tan^2(azi'_i) - (\sum \tan(azi'_i))^2}, \quad (10)$$

$$x_0 = \frac{1}{n} (\sum x_i - f' \sum \tan(azi'_i)) \quad (11)$$

$$y_0 = \frac{1}{n} \left(\sum y_i + f' \sum \frac{\tan(elev'_i)}{\cos(azi'_i)} \right) \quad (12)$$

2.2 畸变校正模型标定

畸变校正建立实际焦平面像点坐标 (x, y) 和理想像平面像点坐标 (u, v) 的相互转换关系。在已知主点、主距的情况下,利用点目标图像坐标系响应坐标和转台数据即可获得理想像平面像点坐标和对应实际焦平面像点坐标,然后通过拉格朗日插值方法可完成凝视相机畸变校正模型的建立。在标定完相机的内方位元素后,即可以在此基础上进行畸变校正。

$$D_i^x = x_i - x_0 - f \tan(azi'_i) \quad (13)$$

$$D_i^y = y_i - y_0 + f \frac{\tan(elev'_i)}{\cos(azi'_i)} \quad (14)$$

2.3 标定指向镜法线矢量

在相机坐标系内,指向镜在零点位置固定。相机坐标系内视线矢量与理想焦平面像点坐标的关系如下:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = -R_{mirror} \cdot R_{imgPlane2CUBE} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ -f \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中, $[a, b, c]'$ 为目标矢量在相机坐标系的表达式, R_{mirror} 为指向镜南北、东西轴均在零点位置时的反射矩阵, R_{mirror} 由指向镜法线矢量 N 决定, u, v 为畸变校正后像点在理想像平面坐标系的坐标值, f 为相机的主距, $R_{imgPlane2CUBE}$ 为视矢量到像平面的转换矩阵。

理想情况下, $N = \left[0, \frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}\right]'$,指向镜反射矩阵为:

$$R_{mirror} = 1 - 2NN' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

实际考虑安装误差,指向镜法线并不为 N ,指向镜实际法线方向 N_{real} 可以用两个绕Z、X轴旋转的旋转矩阵表示:

$$N_{real} = \begin{bmatrix} \cos(nyE) & 0 & -\sin(nyE) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(nyE) & 0 & \cos(nyE) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(nxE) & \sin(nxE) \\ 0 & -\sin(nxE) & \cos(nxE) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$N_{real} = \begin{bmatrix} \frac{\sin(nxE) \sin(nyE)}{2} - \frac{\sqrt{3} \cos(nxE) \sin(nyE)}{2} \\ \frac{\cos(nxE)}{2} + \frac{\sqrt{3} \sin(nxE)}{2} \\ \frac{\sqrt{3} \cos(nxE) \cos(nyE)}{2} - \frac{\cos(nyE) \sin(nxE)}{2} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

这样,实际的指向镜反射矩阵 R'_{mirror}

$$R'_{mirror} = 1 - 2N_{real}N'_{real} \quad (19)$$

代入式(15),得到

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = -R'_{mirror} \cdot R_{imgPlane2CUBE} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ -f \end{bmatrix}, \quad (20)$$

该方程较为复杂,无法推导出 nxE 、 nyE 参数的解析表达式,故而利用优化方法进行求解。

计算 nxE 、 nyE 参数的目标函数为:根据 nxE 、 nyE 参数计算出来的像点在理想焦平面的坐标值 (u^{cal}, v^{cal}) 与实际像点在理想焦平面的坐标值 (u, v) 距离和最小,如下式。

$$(nxE, nyE) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[(u_i - u_i^{cal})^2 + (v_i - v_i^{cal})^2 \right], \quad (21)$$

为了保证优化结果的精度,选择均匀分布的 11~20 个采样点数据进行平差。

2.4 标定南北旋转轴

通过指令控制东西方向旋转轴固定在东西向零位位置,仅控制指向镜在南北方向转动,获得不同南北指向情况下感应同步器读数、像元响应位置参数。对于南北方向旋转轴,其误差来源包括旋转轴安装误差以及感应同步器读数误差。

理想状态下,南北方向旋转轴矢量为

$$P_x = i + 0j + 0k, \quad (22)$$

实际考虑南北轴的安装误差,其在相机坐标系的矢量表达式并非为 P_x ,其实际矢量 P'_x 可以用下式表示:

$$P'_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(snxE) & \sin(snxE) \\ 0 & -\sin(snxE) & \cos(snxE) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(snzE) & \sin(snzE) & 0 \\ -\sin(snzE) & \cos(snzE) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P_x, \quad (23)$$

$$P'_x = \begin{bmatrix} \cos(snzE) \\ -\cos(snxE) \sin(snzE) \\ \sin(snxE) \sin(snzE) \end{bmatrix}, \quad (24)$$

对应南北轴旋转 $pitch$ 角度后,指向镜反射矩阵表达式:

$$snReflect = rotateV(P'_x, pitch + pitchesE), \quad (25)$$

$$N_{real}^{sn} = snReflect \cdot N_{real}, \quad (26)$$

$$R_{mirror}^{sn} = 1 - 2N_{real}^{sn} \cdot N_{real}^{sn}, \quad (27)$$

此时,物象关系可以描述为:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = -R_{mirror}^{sn}(snxE, snzE, pitchesE) \cdot R_{imgPlane2CUBE} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ -f \end{bmatrix}, \quad (28)$$

采用指向镜法线矢量的求解方法,可得到南北轴轴系安装误差 $snxE$ 、 $snzE$ 参数以及南北轴角度误差 $pitchesE$,即可完成南北轴的标定。

2.5 标定东西旋转轴

通过指令控制指向镜在东西方向转动,获得不同指向情况下感应同步器读数、像元响应位置参数。对于东西方向旋转轴,其误差来源包括旋转轴安装误差以及感应同步器读数误差。

理想状态下,东西方向旋转轴矢量为

$$P_Q = 0i - \frac{\sqrt{3}}{2}j + \frac{1}{2}k, \quad (29)$$

实际考虑东西轴的安装误差,其在相机坐标系的矢量表达式并非为 P_Q ,其实际矢量 P'_Q 可以用下式表示:

$$P'_Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(ewxE) & \sin(ewxE) \\ 0 & -\sin(ewxE) & \cos(ewxE) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(ewzE) & \sin(ewzE) & 0 \\ -\sin(ewzE) & \cos(ewzE) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P_Q, \quad (30)$$

$$P'_Q = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3} \sin(ewzE)}{2} \\ \frac{\sin(ewxE)}{2} - \frac{\sqrt{3} \cos(ewxE) \cos(ewzE)}{2} \\ \frac{\cos(ewxE)}{2} + \frac{\sqrt{3} \cos(ewzE) \sin(ewxE)}{2} \end{bmatrix}, \quad (31)$$

对应东西轴旋转 $azimuth$ 角度后,指向镜反射矩阵表达式:

$$ewReflect = rotateV(P'_Q, azimuth + azimuthsE), \quad (32)$$

$$N_{real}^{ew} = ewReflect \cdot N_{real}, \quad (33)$$

$$R_{mirror}^{ew} = 1 - 2N_{real}^{ew} \cdot N_{real}^{ew}, \quad (34)$$

此时,物象关系可以描述为:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = -R_{mirror}^{ew}(ewxE, ewzE, azimuthsE) \cdot R_{imgPlane2CUBE} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ -f \end{bmatrix}, \quad (35)$$

考虑到仅东西轴转动时成像方程的复杂性,这里仍然用优化求解方法来计算 $ewxE$ 、 $ewzE$ 以及 $azimuthsE$ 参数。其求解过程与指向镜法线矢量的求解过程一样。

3 几何模型测试结果

按上节所述的方法对60°二维指向镜的面阵相机建立几何模型,按照物矢量的测试数据解出上述标定的13个误差项,见表1。将随机点代入模型,求出物矢量在探测器图像坐标系下的图像坐标 I', J' ,与测试数据对应的实际图像坐标 I, J 进行差值比较,得到三个通道的误差,平均误差约0.74个像元,见表2。

对表2得到的几何模型误差结果,可求出误差的标准差为0.79像元,在95%置信区间内误差在-1.24~1.92像元(2σ),如图5所示。

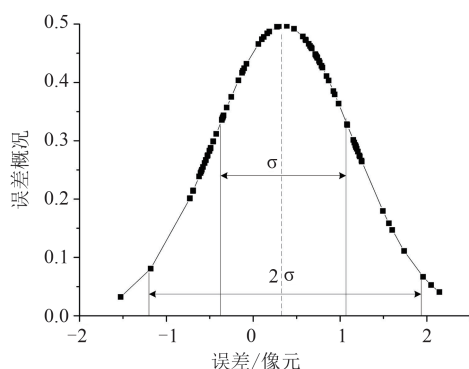


图5 几何模型误差概率分布

Fig. 5 Error probability distribution of the geometric model after substituting random points

4 精度分析

通过第2节中几何成像模型建立的过程,可知主要误差项有三个:内方位元素的标定精度、畸变校正参数标定精度和指向机构参数标定精度。根

据测试水平,对各测试误差项进行精度分析。

1)内方位元素(x_0, y_0 和 f)标定精度 Δ_A

采用自准直仪监测角度、转台带动相机对目标成像的测试方案,根据自准直仪方位角和俯仰角等测试数据,解算内方位元素。

自准直仪读数精度 Δ_1 为0.1角秒;像元重心判读精度 Δ_2 为0.1个像元;内方位元素标定算法精度 Δ_3 为0.5个像元。因此相机内方位元素标定精度

$$\Delta_A = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2} = \sqrt{0.1^2 + 0.3^2 + 3^2} = 3'' \quad (36)$$

2)畸变校正参数(ΔX 和 ΔY)标定精度 Δ_B

畸变校正测试方法和内方位元素标定测试类似,使用的设备一致,区别在于畸变测试采集的目标点数更多:内方位元素标定测试采集 3×3 的像素点阵即可,畸变测试采集 5×5 像素点阵。

畸变校正算法精度 Δ_4 为0.5个像元。因此相机畸变校正精度为

$$\Delta_B = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_4^2} = \sqrt{0.1^2 + 0.3^2 + 3^2} = 3'' \quad (37)$$

3)相机指向镜标定参数(cxE, cyE 和 czE)标定精度 Δ_C

相机指向镜标定方法采用经纬仪建站测试,现阶段经纬仪标称精度 Δ_5 为0.5角秒,人眼判读误差 Δ_6 为2角秒,指向镜标定算法精度 Δ_7 为0.5个像元。因此相机指向镜标定精度为

表1 像旋模型的13个变量求解结果

Table 1 The solution of 13 variables of image rotation model

序号	测量参量(主距mm,其余为度)		通道1	通道2	通道3
1	主距	(f)	828.789 4	991.341	999.895 2
2	理想像空间坐标系到基准棱镜坐标系的三个角度偏差量	$thetaU$	0.035 925	0.041 917	0.044 458
		$thetaV$	0.006 041	-0.012 3	0.003 148
		$ThetaW$	0.009 359	-0.001	0.000 353
3	相机指向机构的安装误差的三个角度偏差量	nxE	-0.010 41	0.016 738	-0.017 38
		nyE	-0.004 15	-0.016 42	0.008 56
		nzE	-0.019 39	0.059 09	-0.015 53
4	指向机构南北轴系在棱镜坐标系下的误差量	sxE	0.002 527	-0.006 66	0.091 47
		$snzE$	0.002 086	-0.012 42	0.003 725
5	指向机构东西轴系在棱镜坐标系下的误差量	$pitchsE$	-0.009 91	0.017 249	-0.016 85
		$ewxE$	0.005 16	0.014 56	-0.012 13
		$ewzE$	0.007 0	0.003 005	0.001 348
	东西感应同步器的读数偏差	$azimuthsE$	-0.001 52	0.017 579	-0.007 98

表2 代入随机点后的几何模型误差计算

Table 2 Error calculation of geometric model after substituting random points

测点	通道1		通道2		通道3	
	I-I'	J-J'	I-I'	J-J'	I-I'	J-J'
1.	0.2749	-0.1031	0.5712	-0.0770	0.7346	-0.1179
2.	1.4941	1.5627	1.1851	1.6014	1.9562	2.1447
3.	-0.3618	-0.1287	0.7575	-0.1275	0.0592	0.6675
4.	-0.7292	-0.2529	0.8453	-0.3404	-0.5981	0.3874
5.	-0.3593	-1.5268	1.7383	-1.1794	0.0996	0.2951
6.	1.1930	-0.4609	0.1223	-0.4593	2.0488	0.7976
7.	0.7977	-0.5231	-0.5271	0.9396	-0.69	0.6073
8.	-0.4259	0.8688	-0.3522	1.0807	-0.4922	1.2278
9.	-0.4895	-0.5464	0.6037	-0.5907	-0.5022	-0.5775
10.	-0.5592	-0.3473	0.6013	0.7147	-0.5046	0.6391
11.	-0.3043	1.2465	0.6745	1.1805	0.7398	1.1833
12.	0.6552	-0.606	0.7187	-0.5448	1.2058	-0.6223
13.	0.7265	-0.7306	0.7682	-0.6929	0.9839	1.1753
14.	0.4704	-0.1697	0.7885	1.1523	1.2236	0.9232
15.	0.7872	1.0842	0.1615	1.2516	0.1854	1.1643

平均误差 0.74 像元

$$\Delta_C = \sqrt{\Delta_2^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2 + \Delta_7^2} = \sqrt{0.3^2 + 0.5^2 + 2^2 + 3^2} = 3.6'' \quad (38)$$

综上所述,相机几何模型平均标定精度 Δ

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2 + \Delta_C^2} = \sqrt{3^2 + 3^2 + 3.6^2} = 5.5'' \quad (39)$$

相机几何模型平均标定精度为 5.5", 即 0.9 像元, 与测试结果相当。

5 结论

对具有 60° 二维指向镜的三轴稳定静止轨道面阵相机进行了畸变校正和像旋校正, 提出了基于内外方位元素的几何模型实验室标定方法, 通过对指向镜法线、南北轴、东西轴三个目标共计 13 个误差项的进行解算优化。计算出物矢量在探测器图像坐标系下的图像坐标与测试数据对应的实际图像坐标进行差值比较, 几何模型标定平均误差为 0.74 像元, 满足实际使用要求。

References

[1] ZHENG Lie-hua, YIN Da-yi, FENG Xin. Application for

Offsetting Image Rotation "K Mirror" in COCTS [J]. *Infrared Technology*. (郑列华, 尹达一, 冯鑫. K 镜消像旋机构在海洋卫星水色仪中的应用, *红外技术*) 2007, **1**(29): 17-21.

- [2] GUAN Min, GUO Qiang. Offsetting Image Rotation System in FY-3 MERIS's Geolocation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*. (关敏, 郭强. 光学像消旋系统在 FY-3 MERIS 图像定位中的应用. *应用气象学报*). 2008, **4**(19): 420-427.
- [3] HUI Bin, PEI Yun-tian. Optical analysis of space two-axis scanning mirror [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*. (惠彬, 裴云天. 二维扫描镜扫描特性理论分析, *量子电子学报*). 2005, **22**(5): 140-143.
- [4] WANG Wu, HONG Pu, Wang Bo, et al. 2015. Characteristic analysis of two-dimensional scanning mirror rotating [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, (王武, 洪普, 王波, 等. 2015. 二维扫描镜像旋特性分析, *光学与光电技术*). **13**(2): 82-86.
- [5] ZHANG E, GONG Hui-xing. Research and application of system for offsetting image rotation from 45° rotating scan mirror [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (张鄂, 龚惠兴. 消除 45° 旋转扫描反射镜像旋转系统的研究及应用. *红外与毫米波学报*) 1999, **18**(2): 31-38.
- [6] ZENG Tao, LIU Jia-qiang, XIE Chun-hua. Correction to the image rotation of "HY-1A" COCTS images. [J] *Acta Oceanologica Sinica*. (曾韬, 刘建强, 谢春华. "HY-1A" 卫星海洋水色扫描仪像旋转图像校正处理. *海洋学报*). 2008, **1**(30): 47-50.
- [7] LIU Su-mei, MA Hong-zhang. Image aberrance of 45° multi-parallel scanning mirror and software correction. *Infrared and Laser Engineering* [J]. (刘素美, 马红章. 45° 旋转扫描镜多元并扫的图像畸变及软件校正. *红外与激光工程*) 2007, **4**(36): 56-529.
- [8] WANG Mei-zhu, HUANG Xiao-xian, FENG Qi. Elimination method of image rotation for geostationary radiometer and its verification method [J]. *Opto-Electronic Engineering*. (王梅竹, 黄小仙, 冯旗. 静止轨道图像消旋算法及其验证方法. *光电工程*) 2018, **5**(45): 170725 1-8.
- [9] WANG Mei-zhu, HUANG Xiao-xian, FENG Qi. Two judging methods of seamless stitching for frame sensor on the geostationary orbit: Gird method and the geometric intersection method [J]. *Journal of Remote Sensing*. (王梅竹, 黄小仙, 冯旗. 高轨无缝面阵扫描判断方法: 栅格法和几何相交法. *遥感学报*) 2017, **21**(6): 871-880.
- [10] LI Xiao-ping, LI Xing-long, FANG Zhong-hua. Large area two-dimensional scanning model and image rotation analysis [J]. *Proc. of SPIE*, 2010, **7849**, 78492Z-1-10.
- [11] WANG Mi, CHENG Yu-feng, CHANG Xue-li. On-orbit geometric calibration and geometric quality assessment for the high-resolution geostationary optical satellite GaoFen4 [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, **125**: 63-77.