

文章编号 1004-924X(2019)10-2272-08

改进的空间大口径追踪相机畸变校正

蔡 萍^{1,2}, 李潇雁^{1,2}, 唐玉俊^{1,2}, 张 勇¹, 胡亭亮¹, 陈凡胜^{1*}

(1. 中国科学院 智能红外感知重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:在空间大口径追踪相机应用系统中,像面畸变和主点主距标定误差是影响其在轨定位精度的重要因素。为了满足空间大口径追踪相机高精度的标定要求,像面畸变类型、主点主距标定误差及探测器面阵旋转、倾斜对像点坐标带来的误差等因素均不可忽略。针对以上问题,本文对该类系统的畸变特性进行了研究,提出了一种改进的大口径追踪相机畸变校正方法。首先,在视场中央无畸变区域测量 13 个样点,根据最小二乘法获取光学系统的主点主距;然后,依据所求主点主距,解算像面 25 个均匀分布样点的理论位置坐标;最后,由样点的理论坐标和测量坐标解算畸变模型,实现畸变校正。实验结果表明,该方法畸变校正精度在近红外波段优于 0.32 pixel,在短波红外波段优于 0.28 pixel,其相对传统畸变校正模型分别提高了 44.6%和 50.9%。该方法可为大口径追踪相机的焦平面倾角解算研究提供有益参考。

关键词:大口径追踪相机;畸变校正;畸变模型

中图分类号:TP394.1;TH691.9 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192710.2272

Improved distortion correction method for spacial large aperture tracking cameras

CAI Ping^{1,2}, LI Xiao-yan^{1,2}, TANG Yu-jun^{1,2}, ZHANG Yong¹,

HU Ting-liang¹, CHEN Fan-sheng^{1*}

(1. *Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: cfs@mail.sitp.ac.cn*

Abstract: In the context of applications of spatial large aperture tracking cameras, calibration errors of the principal point and distance and associated distortions are considered to be important issues in the problem of on-orbit geometric positioning. To meet the high-precision calibration demands on spatial large-aperture tracking cameras, factors of the distortion types, calibration errors of the principal point and distance, as well as rotation and inclination of the detector array, must all be addressed. To solve these problems, this paper analyzes distortion characteristics of systems of this type and proposes an improved distortion correction method for large aperture tracking cameras. First, the optical principal point and distance are ascertained using 13 points on the small central area of the focal plane via the least square method. Following that, the theoretical coordinates of the 25 test points

收稿日期:2019-01-28;修订日期:2019-03-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61975222)

distributed uniformly on the focal plane are calculated with the help of the recently acquired principal point and distance. Finally, the parameters of the distortion model are estimated using the theoretical coordinates and the measured coordinates of the test points, and the distortions of the camera are corrected. Experimental results showed that even distortion errors of less than 0.32 pixels and 0.28 pixels were corrected by the proposed method in a near-infrared image and a short-wavelength infrared image, respectively. Thus, the distortion correction is 44.6% and 50.9% better than that of conventional distortion models. Thus, the proposed method provides a beneficial reference in the research concerning the obliquity of the focal plane of large aperture tracking cameras.

Key words: large aperture tracking cameras; distortion correction; distortion models

1 引 言

实际光学系统由于设计、制造、安装等原因往往存在畸变,畸变的存在虽不影响光学系统成像的清晰度,但直接影响成像的几何位置精度^[1-3]。此外,光学畸变在整个像面的分布具有不均匀性,通常随着视场角的增加而增大^[4-6]。对空间大口径遥感相机系统而言,图像畸变是影响其在轨几何定位精度及其产品质量的重要因素。因此,为提高遥感数据的定量化应用水平,必须对像面畸变误差予以校正。

实际中,空间遥感相机在发射前需进行实验室标定,以精确获取相机的主点主距及其畸变模型,从而为高精度的在轨几何定标提供解算初始值。近年来,很多学者对遥感相机的畸变校正方法做了深入研究。王誉都等^[3,7-9]提出了一种二维拉格朗日插值方法,首先通过实验方法测量像面一系列样点畸变前后的位置坐标,然后以插值的方法实现任意位置的畸变校正。王欣刚等^[10-11]建立了一个非线性畸变校正模型,通过拟合多项式来校正光学系统的像面畸变。余俊等^[12]采用标靶测试的方法,通过将标靶样点畸变后坐标与理论点坐标对比,解算多项式模型进行畸变校正。Wang 等^[13]提出了一种二维指向角模型以精确表征探测器像元的出射矢量,并通过多项式模型来拟合像面畸变特性。Zhang^[14]提出了一种基于二维标定板的相机镜头自标定方法,首先由角点提取算法获取标定板上角点位置信息,然后,根据物像关系模型及畸变前后对应点的位置信息解算共线方程获取相机内参模型,最终实现畸变校正。以上方法虽有一定的实用价值,但其主要考虑径向畸变对像点几何位置造成的误

差,忽略了主点、主距的标定误差及实际光学系统由于安装误差造成的探测器像面的倾斜、旋转对像点位置的影响。而探测器及透镜的制造、安装误差是偏心畸变、棱镜畸变等的主要来源^[1]。

本文针对空间大面阵相机像点位置易受探测器像面的倾斜、旋转等因素影戏的特点,提出了一种改进的空间大口径追踪相机畸变校正方法,充分考虑了空间大面阵相机像面的倾斜、旋转及主点、主距标定误差对像点几何位置的影响,对于提高空间遥感相机在轨几何定标精度具有重要意义。

2 实验装置及原理

该系统如图 1 所示,整个实验装置由黑体、星点板,平行光管,自准直仪,反射镜,测试相机,三维转台及相应控制系统组成。黑体和星点板用来模拟生成点光源。自准直仪用来精确测量三维转台每次的转动角度,其精度可达 2 角秒。实验时,将实验相机固定安装在精密转台上,通过转台的转动,使平行光管出射的平行光依次成像于探测器的不同位置。此时,平行光管出射的平行光会与相机主光轴形成一个夹角,从而模拟不同视场角度下的入射光。对像面的每一个测试样点,记录不同入射角度下的探测器响应位置 (x_i, y_i) 及对应的自准直仪测得的方位角与俯仰角 $(\alpha z_i, \epsilon l_i)$ 。

入射光线在像面成像后,为提高点目标的位置提取精度,采用跨像元成像的方法使目标成像在多个像元上,然后通过质心提取算法获取亚像元级的质心位置提取精度^[15-17]:

$$\begin{bmatrix} \bar{r} \\ \bar{c} \end{bmatrix} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij} \begin{bmatrix} r_{ij} \\ c_{ij} \end{bmatrix}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij}}, \quad (1)$$

其中: r_{ij}, c_{ij} 为目标像点区域内像元的行坐标和列坐标, m, n 为目标像点区域内像元行列数目, \bar{r}, \bar{c} 为所求目标像点区域的质心坐标。

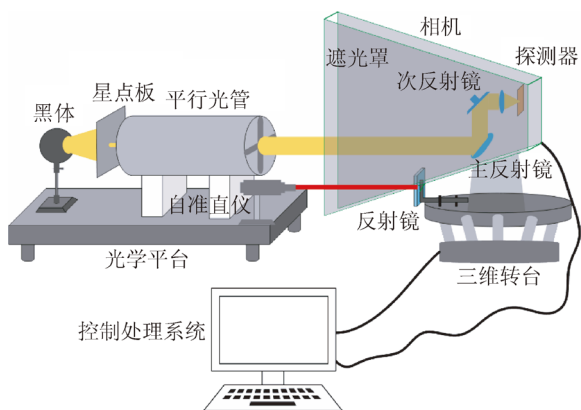


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

图 2 所示为该实验光路原理图, $O_c-X_c Y_c Z_c$ 为相机坐标系, $o_p-x y$ 为图像坐标系, $o-x y$ 为焦平面坐标系。 P 为物方空间一点, P' 为其在探测器平面的像点, V_{object} 为物方入射矢量, V_{LOS} 为目标质心位置对应的出射矢量。为计算方便, 将目标质心坐标由像素坐标系转换到相机坐标系:

$$\begin{cases} x_i = (\bar{r}_i - r_0) d_x \\ y_i = (\bar{c}_i - c_0) d_y, \\ z_i = -f \end{cases} \quad (2)$$

其中: (\bar{r}_i, \bar{c}_i) 为由式(1)所求目标质心像素坐标, (x_i, y_i, z_i) 为该目标像点在相机坐标系下的坐标值, (r_0, c_0) 为探测器几何中心行列坐标值, f 为光学系统焦距, d_x, d_y 分别为像元在 x 和 y 方向的尺寸。

根据成像几何关系可知, 物方入射矢量与目标像点对应的出射矢量共线, 即有式(3)成立:

$$V_{\text{object}} = -V_{\text{LOS}}, \quad (3)$$

其中:

$$V_{\text{object}} = \begin{bmatrix} \cos(az_i - az_0) & 0 & -\sin(az_i - az_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(az_i - az_0) & 0 & \cos(az_i - az_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(el_i - el_0) & \sin(el_i - el_0) \\ 0 & \sin(el_i - el_0) & \cos(el_i - el_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix},$$

$$V_{\text{LOS}} = \begin{bmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ -f \end{bmatrix},$$

即:

$$\begin{bmatrix} -\cos(el_i^R) \sin(az_i^R) \\ \sin(el_i^R) \\ \cos(el_i^R) \cos(az_i^R) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ -f \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: az_i, el_i 为自准直仪测得的相对于初始位置 (az_0, el_0) 的方位角和俯仰角, $az_i^R = az_i - az_0$, $el_i^R = el_i - el_0$ 。

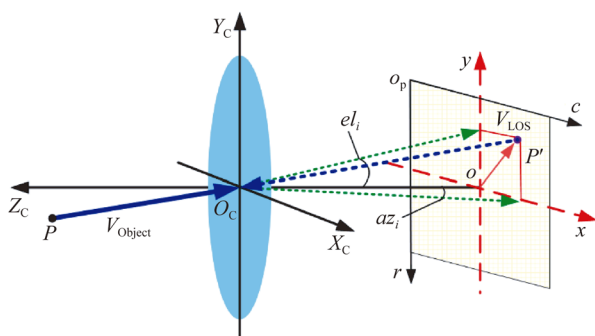


图 2 成像系统原理图

Fig. 2 Diagram of imaging system

3 畸变校正方法

3.1 主点主距

实际光学系统像面畸变随着视场角的增加而增大, 视场中心小区域内畸变较小, 甚至没有畸变。因此在视场中心小区域内, 实际光学系统近似满足理想成像关系。图 3 为该方法测试点在像面的分布示意图(彩图见期刊电子版), 如中央红色区域所示, 调整三维转台在视场中心区域测量 13 个样点, 分别记录每一个样点的位置坐标 (x_i, y_i) , $(i=1, 2, \dots, 13)$ 和相应自准直仪的方位角、俯仰角 (az_i, el_i) , $(i=1, 2, \dots, 13)$ 。根据成像几何模型和式(4), 由最小二乘法可解算相机主点、主距的估计值如下:

$$\begin{cases} \hat{f} = \frac{n \sum (x_i \tan(az_i^R)) - \sum \tan(az_i^R) \sum x_i}{n \sum \tan^2(az_i^R) - (\sum \tan(az_i^R))^2} \\ \hat{x}_0 = \frac{1}{n} (\sum x_i - \hat{f} \sum \tan(az_i^R)) \\ \hat{y}_0 = \frac{1}{n} \left\{ \sum y_i - \hat{f} \sum \frac{\tan(el_i^R)}{\cos(az_i^R)} \right\} \\ (n = 13; i = 1, 2, \dots, 13) \end{cases} \quad (5)$$

其中 \hat{f} , \hat{x}_0 和 \hat{y}_0 分别为相机的主距 f 和主点 x_0, y_0 的估计值。

3.2 测试点理论坐标

同理,如图 3 所示,调整三维转台在整个视场中测量 25 个样点,分别记录每一个样点的位置坐标 (x_i, y_i) , $(i=1, 2, \dots, 25)$ 和相应自准直仪的方位角、俯仰角 (a_{z_i}, e_{l_i}) , $(i=1, 2, \dots, 25)$ 。根据所求主点、主距估计值及自准直仪方位角、俯仰角,计算像面样点的理论坐标值如下:

$$\begin{cases} x_{LOi} = \hat{x}_0 + \hat{f} \tan(a_{z_i}^R) \\ y_{LOi} = \hat{y}_0 - \hat{f} \frac{\tan(e_{l_i}^R)}{\cos(a_{z_i}^R)} \end{cases} (i=1, 2, \dots, 25), \quad (6)$$

其中: (x_{LOi}, y_{LOi}) 为相应测试点 (x_i, y_i) 的理论坐标位置。

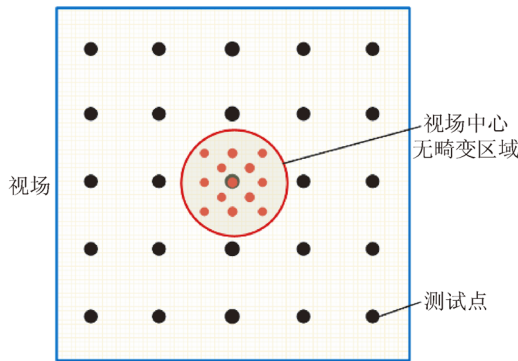


图 3 测试点分布示意图

Fig. 3 Distribution schematic of test points

3.3 畸变模型

理论上,在像平面上存在一个两维曲面能够完全拟合实际光学系统的畸变模型。假设 $D(x, y)$ 为理想的像面畸变模型,则有式(7)成立:

$$\begin{cases} x_i = x_{LOi} + D_x(x, y) \\ y_i = y_{LOi} + D_y(x, y) \end{cases}, \quad (7)$$

其中: (x_i, y_i) 和 (x_{LOi}, y_{LOi}) 为像面样点的测量坐标和理论坐标, $D_x(x, y)$ 和 $D_y(x, y)$ 为理想畸变模型在 x 和 y 方向的分量。

传统畸变模型 (Conventional Distortion Model, CDM) 常用来描述小视场民用相机像面的畸变特性,其主要考虑径向畸变、偏心畸变及薄棱镜畸变所造成的像点几何位置误差^[1,18]:

$$\begin{cases} D_x = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy] + s_1(x^2 + y^2) \\ D_y = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1 xy] + s_2(x^2 + y^2) \end{cases}, \quad (8)$$

其中: $r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$ 为像点 (x, y) 距离主点 (x_0, y_0) 的径向距离, k_1, k_2, k_3 为前 3 项径向畸变系数, p_1, p_2 为前两项偏心畸变系数, s_1, s_2 为前两项薄棱镜畸变系数。

当焦平面发生倾斜时,像点的位置坐标将发生改变。通常,像面倾斜可分解为绕像平面两坐标轴的旋转,在该光学系统中,设焦平面分别绕 x 轴, y 轴旋转 α 和 β 角,设旋转前后的坐标分别为 (x, y) 和 (x', y') , (不考虑 z 轴方向的影响) 则有:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix},$$

可得:

$$\begin{cases} x' = x \cos \beta + y \sin \alpha \sin \beta \\ y' = y \cos \alpha \end{cases}, \quad (9)$$

其中 α, β 分别为探测器平面相对 x 轴方向和 y 轴方向的理论倾角。

考虑主点主距标定误差、像元尺度变化及探测器平面旋转、倾斜对像面畸变的影响,本文采用改进的自校正畸变模型表征大口径遥感相机的像面畸变^[19-22]:

$$\begin{cases} D_x = -x_0 - \frac{\Delta f}{f} x + x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy] + ax + x \cos \beta + y \sin \alpha \sin \beta \\ D_y = -y_0 - \frac{\Delta f}{f} y + y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1 xy] + bxy \cos \alpha \end{cases}, \quad (10)$$

其中: x_0, y_0 及 f 为光学系统的主点主距, Δf 为主距误差量, r 为像点 (x, y) 距离主点 (x_0, y_0) 的径向距离, k_1, k_2, k_3 为前 3 项径向畸变系数, p_1, p_2 为前两项偏心畸变系数, a, b 为 x, y 方向的尺度因子, α, β 分别表示探测器平面相对 x 轴方向和 y 轴方向的理论倾斜角。

根据 Levenberg-Marquardt 算法,该畸变模型系数可由式(11)求得:

$$\min_N \sum_{i=1}^N \left\{ \begin{bmatrix} x_i - x_{iDi} \\ y_i - y_{iDi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_x(x, y) \\ D_y(x, y) \end{bmatrix} \right\}^2, \quad (11)$$

其中 N 为畸变模型中的参数数目。

3.4 畸变校正

根据所求畸变模型,像面任意一点 (x, y) 的畸变误差可通过如下方法进行校正:

$$\begin{cases} x_{\text{Cor}} = x - D_x(x, y), \\ y_{\text{Cor}} = y - D_y(x, y), \end{cases} \quad (12)$$

其中 $(x_{\text{Cor}}, y_{\text{Cor}})$ 为畸变校正后像点 (x, y) 的坐标值。

根据以上分析定义该畸变校正方法在 x 和 y 方向的绝对校正误差为:

$$\begin{cases} \text{Error}_x = x_{\text{Cor}} - x_{\text{L.O}}, \\ \text{Error}_y = y_{\text{Cor}} - y_{\text{L.O}} \end{cases}, \quad (13)$$

其中: $x_{\text{L.O}}$ 和 $y_{\text{L.O}}$ 为式(6)所求理论坐标值, Error_x 和 Error_y 为 x 和 y 方向的绝对校正误差。

4 实验结果与分析

为验证本文所提方法,选取某型号静止轨道大口径追踪相机近红外和短波红外的测试数据进行畸变校正实验。

首先,通过高精度三维转台在相机视场中心区域测量 13 个样点,记录每一点的质心提取坐标和相应自准直仪的方位角和俯仰角。根据式(5)所述方法求取遥感相机的主点主距,结果如表 1 所示。

表 1 主点主距解算结果

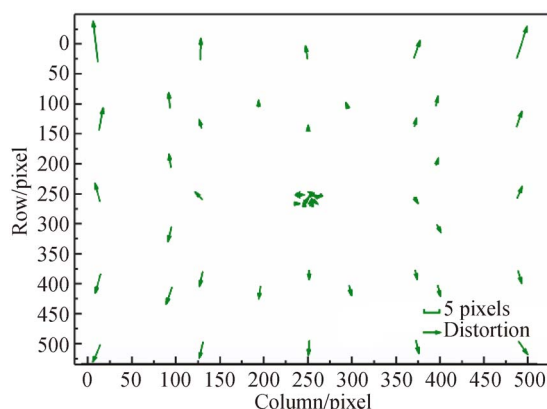
Tab. 1 Calculation results of principle point and distance

设备	近红外		短波红外	
	$(x_0, y_0)/\text{mm}$	f/mm	$(x_0, y_0)/\text{mm}$	f/mm
测试相机	(0.005 9, -0.001 5)	984.550 6	(0.004 3, 0.001 9)	996.970 9

同理,在相机视场中均匀测量一系列样点,由式(6)及所获取的主点主距,计算每一个测试点的理论位置坐标。然后,对比样点的测量坐标和解算的理论坐标求得该光学系统在两个波段的原始畸变量。

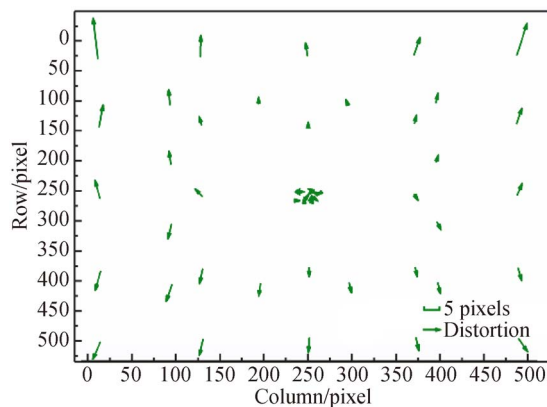
图 4 所示为测试相机原始畸变分布图,其中箭头的长度表示箭头起点位置处的畸变大小,箭头的方向表示该点的畸变趋势。由图 4(a)和图

4(b)可知,在近红外波段和短波红外波段,该测试相机的畸变形状近似对称分布。视场中央区域的畸变量最小,且接近于 0。在整个视场中,畸变随视场角的增加而增大,在视场边缘达到最大,校正前视场边缘的畸变超过 10 个像元。



(a) 近红外相机畸变分布

(a) Distortion distribution of near infrared camera



(b) 短波红外相机畸变分布

(b) Distortion distribution of short-wave infrared camera

图 4 测试相机原始畸变误差分布

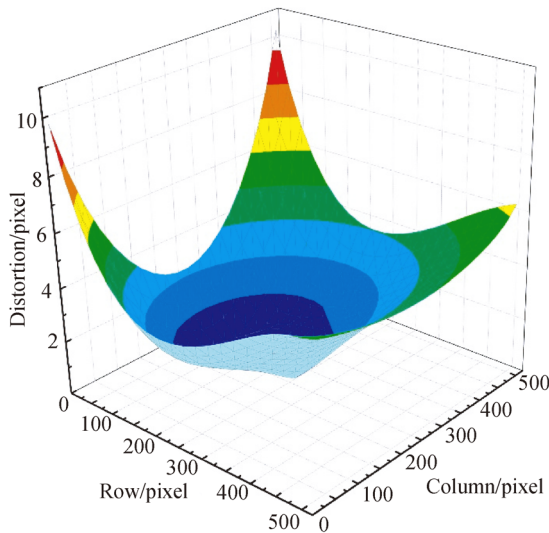
Fig. 4 Distribution of initial distortion errors of experimental camera

最后,根据所获取的像面 25 个均匀分布样点的测量坐标和理论坐标及式(8)、式(10)、式(11),分别对传统畸变模型和本文畸变模型进行解算。畸变模型系数解算结果分别如表 2 和表 3 所示。图 5(a)和 5(b)所示为本文所提畸变模型在近红外和短波红外的三维模型图。

表 2 传统畸变模型系数解算结果

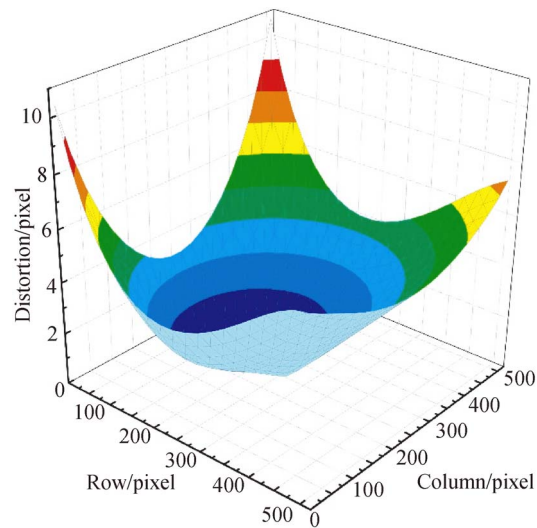
Tab. 2 Coefficients of conventional distortion model

	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2	s_1	s_2
近红外	-5.97E-04	1.35E-05	-6.84E-08	-3.02E-05	6.78E-06	9.90E-05	1.8E-03
短波红外	-3.01E-04	5.00E-06	-1.47E-08	8.16E-06	3.89E-06	1.16E-04	2.03E-03



(a) 近红外波段畸变模型三维图

(a) Three-dimensional diagram of proposed distortion model in near infrared spectrum



(b) 短波红外波段畸变模型三维图

(b) Three-dimensional diagram of proposed distortion model in short-wave infrared spectrum

图 5 本文所提畸变模型三维图

Fig. 5 Three-dimensional diagram of proposed distortion model

表 3 本文畸变模型系数解算结果

Tab. 3 Coefficients of proposed distortion model

	Δf	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2	s_1	s_2	a	b	α	β
近红外	985.7417	3.88E-04	-4.61E-06	2.52E-08	1.43E-05	8.70E-06	1.05E-04	1.91E-03	-0.992 6	-1.006 1	-0.875 4	1.573 3
短波红外	998.1628	2.20E-04	-6.03E-07	4.06E-09	9.21E-06	-2.27E-06	1.26E-04	1.79E-03	-0.998 1	-0.993 6	-0.323 9	-3.469 0

如表 4 所示,为验证所提方法的有效性,在模型解算点的边缘范围内随机选取 8 个验证点,将本文所提方法畸变校正结果与传统畸变模型校正结果进行了对比。由表 4 可知,本文所提方法的畸变校正精度在近红外波段优于 0.32 pixel,在短波红外波段优于 0.28 pixel,相对传统畸变校

正模型分别提高了 44.6% 和 50.9%。且该方法的畸变校正精度在近红外和短波红外波段均优于传统畸变校正方法。此外,由表 4 可知,在近红外和短波红外波段, x 方向的畸变校正误差均大于 y 方向的畸变校正误差,其可能与焦平面的倾斜有关。

表 4 测试相机畸变校正结果对比

Tab. 4 Comparison of distortion correction results of experimental camera

方法	波段	误差	1	2	3	4	5	6	7	8	最大误差/pixel
传统模型方法	近红外	Error _x	0.034 7	-0.265 4	-0.323 7	0.563 3	0.159 7	0.325 0	-0.357 8	-0.317 9	0.563 3
		Error _y	-0.319 8	-0.078 9	0.098 7	-0.403 5	0.009 6	-0.095 2	0.379 6	0.427 8	0.427 8
	短波红外	Error _x	0.455 6	0.288 8	0.553 4	0.489 7	0.213 5	-0.352 4	-0.222 9	-0.164 8	0.553 4
		Error _y	-0.073 3	0.148 4	-0.042 4	-0.314 7	-0.358 4	-0.272 5	-0.313 1	0.241 9	-0.358 4
本文方法	近红外	Error _x	-0.172 0	0.155 6	0.279 4	0.272 1	0.313 1	0.219 7	-0.231 4	-0.298 8	0.313 1
		Error _y	-0.271 7	-0.138 9	-0.074 5	0.139 4	0.001 7	0.092 2	-0.095 0	0.081 1	-0.271 7
	短波红外	Error _x	-0.119 4	-0.104 1	0.036 8	0.273 4	0.231 4	0.070 8	-0.179 5	-0.024 1	0.273 4
		Error _y	0.049 0	0.158 5	-0.024 5	0.148 6	-0.131 8	0.049 6	-0.200 2	-0.094 0	-0.200 2

5 结 论

针对空间大口径追踪相机像面畸变易受主点、主距标定误差及探测器平面旋转、倾斜等因素影响的特点,提出了一种改进的畸变校正的方法。本文首先介绍了畸变测试系统的组成和原理。然后根据实验过程详细描述了所提的畸变校正模型及方法。对大口径面阵遥感相机,只需在探测器

平面测定一定数量的样点,即可实现对畸变模型的精确解算,进而实现畸变校正。实验结果表明本文所提方法的畸变校正精度优于传统畸变模型的校正结果,且在近红外波段优于 0.32 pixel,在短波红外波段优于 0.28 pixel,其相对传统畸变校正模型分别提高了 44.6% 和 50.9%。尽管该方法是基于某一特定型号的遥感相机而提出的,但由于大口径面阵遥感相机成像结构及畸变特性的相似性,该方法具有普遍的参考价值。

参考文献:

- [1] WENG J, COHEN P, HERNIOU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(10):965-980.
- [2] SUN Q, HOU Y, CHEN J. Lens distortion correction for improving measurement accuracy of digital image correlation [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 126(21):3153-3157.
- [3] 熊琨,王春喜,吴跃,等. 基于三轴转台的多视场星敏感器标定方法 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4):417002-0417002(6).
XIONG K, WANG CH X, WU Y, et al.. Calibration method for multiple FOV star sensors based on three-axis turntable [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4):417002-0417002(6). (in Chinese)
- [4] LAVA P, PAEPEGEM W V, COPPIETERS S, et al.. Impact of lens distortions on strain measurements obtained with 2D digital image correlation [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2013, 51(5):576-584.
- [5] 赵高飞,刘辉,裴云天. 大口径离轴光学系统畸变的校正方法 [J]. *中国激光*, 2010, 37(S1):157-161.
ZHAO G F, LIU H, PEI Y T. Distortion correction for large-aperture off-axis optical system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(S1):157-161. (in Chinese)
- [6] 李重阳,董欣,岳丽清,等. 航天大视场遥感相机畸变测试方法 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11):217-221.
LI CH Y, DONG X, YUE L Q, et al.. Testing method of distortion for space remote sensing camera with large field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11):1117003-1117003(5). (in Chinese)
- [7] 王誉都,陈凡胜. 大口径测绘相机内方位元素标定和畸变矫正方法 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10s):675-681.
WANG Y D, CHEN F SH. Calibration of inner o-

- orientation elements and distortion correction for large diameter space mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10s):675-681. (in Chinese)
- [8] 吴国栋, 韩冰, 何煦. 精密测角法的线阵 CCD 相机几何参数实验室标定方法 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10):1628-1632.
- WU G D, HAN B, HE X. Calibration of geometric parameters of line array CCD camera based on exact measuring angle in lab [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1628-1632. (in Chinese)
- [9] LIU Y, YANG L, CHEN F S. Multispectral registration method based on stellar trajectory fitting [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, 50(4):189.
- [10] 王欣刚, 宋建中, 顾海军, 等. 红外观察仪图像畸变的校正 [J]. *光学精密工程*, 2001, 9(1):39-42.
- WANG X G, SONG J ZH, GU H J, *et al.*. Image distortion calibration of IR electroviewer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1):39-42. (in Chinese)
- [11] 艾莉莉, 袁峰, 丁振良. 照相物镜径向畸变模型的再商讨 [J]. *光学学报*, 2008, 28(10):1930-1933.
- AI L L, YUAN F, DING ZH L. Further study on radial distortion model for photographic objective [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10):1930-1933. (in Chinese)
- [12] 余俊, 林家明, 杨建宇, 等. 基于新型靶的 CCD 摄像系统畸变测量与校正 [J]. *光学学报*, 2007, 27(8):1440-1442.
- YU J, LIN J M, YANG J Y, *et al.*. Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8):1440-1442. (in Chinese)
- [13] WANG M, CHENG Y, CHANG X, *et al.*. 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.
- [14] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 22(11):1330-1334.
- [15] CRONK S, FRASER C, HANLEY H. Automated metric calibration of colour digital cameras [J]. *The photogrammetric record*, 2006, 21(116):355-372.
- [16] SHORTIS M R, CLARKE T A, SHORT T. Comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images [C]. *Videometrics III. International Society for Optics and Photonics*, 1994, 2350:239-251.
- [17] OTEPKA J O, HANLEY H B, FRASER C S. Algorithm developments for automated off-line vision metrology [J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2002, 34(5):60-67.
- [18] WANG J, SHI F, ZHANG J, *et al.*. A new calibration model of camera lens distortion [J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41(2):607-615.
- [19] FRASER C S. Digital camera self-calibration [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1997, 52(4):149-159.
- [20] YILMAZTÜRK F. Full-automatic self-calibration of color digital cameras using color targets [J]. *Optics express*, 2011, 19(19):18164-18174.
- [21] SCHNEIDER D, SCHWALBE E, MAAS H G. Validation of geometric models for fisheye lenses [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(3):259-266.
- [22] LUBER A, REULKE R. A unified calibration approach for generic cameras [J]. *The international archives of the Photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 2010:399-404.

作者简介:



蔡萍(1988—),女,福建莆田人,2009年于厦门大学获得学士学位,主要从事空间遥感与光电系统探测等方面技术的研究。E-mail: caiping@mail.sitp.ac.cn

导师简介:



陈凡胜(1978—),男,山东邹城人,研究员,博士生导师,2002年于山东大学获得学士学位,2007年于中国科学院上海技术物理研究所获得博士学位,主要从事高时敏红外探测载荷总体技术研究。E-mail: cfs@mail.sitp.ac.cn

(本栏目编辑:秦 思)