

文章编号 1004-924X(2016)增-0675-07

大口径测绘相机内方位元素标定和畸变矫正方法

王誉都^{1,2}, 陈凡胜^{2*}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:在空间大口径测绘相机系统的应用中,内方位元素的标定和畸变是严重影响其定位精度的重要因素。为提高该系统的定位精度,本文对其畸变特性进行了分析和研究。根据大口径测绘相机非中心对称性畸变图像的特点,提出了一种利用改进的二维拉格朗日插值对系统进行畸变矫正的方法。首先在二维像面上取一系列样点,用实验的方法得到其矫正前后的对应关系,然后利用这些样点对需要校正的像点进行二维拉格朗日插值,得到其矫正后的位置。针对系统的两个通道,该方法的畸变矫正精度可达 0.37 个像元以内。该方法克服了传统方法在对畸变图像进行矫正时测算流程复杂、图像边缘畸变精度差的不足,对其他大口径测绘相机具有普遍意义和广泛的实用性。

关键词:大口径测绘相机;内方位元素;畸变矫正;二维拉格朗日插值

中图分类号:TP301.6;O439 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0675

Calibration of inner orientation elements and distort correction for large diameter space mapping camera

WANG Yu-du^{1,2}, CHEN Fan-sheng^{2*}

(1. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

2. *Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*

* *Corresponding author, E-mail: cfs@mail. sitp. ac. cn; wangyudu@gmail. com*

Abstract: In the applications of large diameter space mapping camera system, the calculation of inner orientation elements and the distortion correction are the important factors, and can affect the positioning accuracy. In order to improve the accuracy of the system, distortion feature was explored and analyzed in this paper. According to the characteristic of noncentral symmetry distortion image of large diameter space mapping camera, a method which uses improved two-dimension Lagrange interpolation was provided to correct the distortion of the system. First, a number of samples dots were taken on the two-dimensional image, Then the corresponding positions of the dots before and after correction were obtained through experiments, and these samples dots were used to determine the position of image dots with assistance of two dimensional Lagrange interpolation. In terms of two channels in the system, the accuracy of distortion correction is within 0.37 pixel by utilizing this method. This method overcomes the deficiencies of the traditional methods of distortion correction in terms of the complex calculating process of correcting distorted image and inaccurate corner of image, which brings universal significance and widespread practicability towards its counterparts.

收稿日期:2016-05-24;修订日期:2016-06-11.

基金项目:中国科学院上海技术物理研究所创新资助项目(No. CX-64)

Key words: large diameter mapping camera; inner orientation element; distortion correction; two-dimensional Lagrange's interpolation

1 引言

若要实现高精度的几何定位,使图像能准确描述空间物点的位置,则精确标定出遥感相机的主点、主距、畸变等内参数是一个首要条件^[1-3]。测绘相机内方位元素的标定原理是在不同方位对经过精确测量的已知标定物成像,然后通过设定合适的成像模型,求解非线性方程组得到测绘相机的几何标定参数^[4-6]。根据成像模型及非线性方程组的迭代解法,可将常用的内方位元素实验室标定方法主要分为内精密测角法、三维试验场标定算法、径向约束两步算法、张正友标定算法、直接线性算法、自标定算法等^[7-9]。

畸变的实质是由于成像系统本身的设计、加工、装调误差和环控等原因导致的图像和实物间的投影射线不能在全视场范围内严格满足直线传播的要求,从而使得像平面上的像点和实际物点不满足针孔成像模型,即图像平面上图像像素点的实际坐标在几何位置上发生了偏移,与理论坐标位置不一致^[3, 10-13]。现行的畸变矫正方法主要有 Tai 的基于径向畸变的 RAC 两步标定算法, Zhang 提出的基于 2D 标定板的相机镜头标定^[14-15]。

目前,针对大口径测绘相机的内方位元素和畸变矫正的相关研究尚处于起步阶段,本文旨在提出一种基于改进的二维拉格朗日插值的畸变矫正方法,以达到畸变矫正误差在 1 pixel 以内。

2 内方位元素测试方法

2.1 坐标系定义

在进行相机内方位元素标定时,会涉及到多种坐标系之间的转换关系,本节将对这些坐标系做简要介绍。

2.1.1 图像坐标系

图像坐标系 $O_1 - ij$ 原点 O_1 在图像的左上角,为像元中心位置,沿图像行方向向右为 j 坐标轴,沿图像列方向向下为 i 坐标轴。图像坐标系单位为像元(pixel),坐标原点坐标为 $(0, 0)$ 。如

图 1 所示。

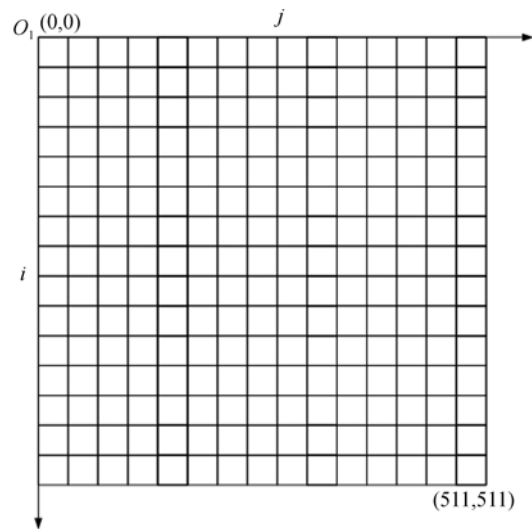


图 1 图像坐标系

Fig. 1 Image coordinate system

2.1.2 焦平面坐标系

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,其作用是实现图像坐标系像素坐标至物理坐标的转换,焦平面坐标系 $O_2 - x$ 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 $(255.5, 255.5)$ 像元处的物理位置。焦平面坐标系单位为 mm。如图 2 所

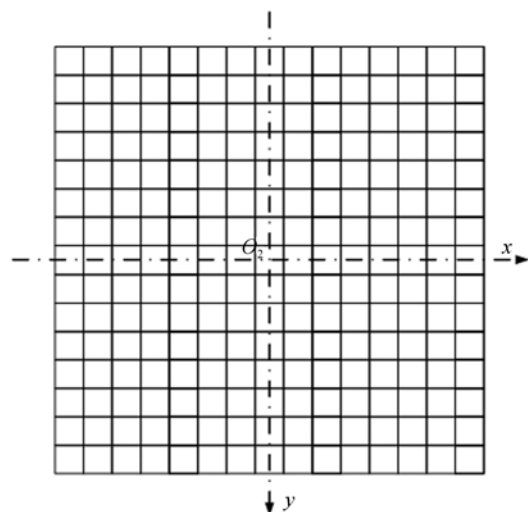


图 2 光通道焦平面坐标系

Fig. 2 Focal plane coordinate

示。

可将光通道图像坐标系到焦平面坐标系的转换关系表示如下式:

$$x = (j - 255.5) a_{VIS}, \quad (1)$$

$$y = (i - 255.5) a_{VIS}, \quad (2)$$

式中 a_{VIS} 为像元大小。

2.1.3 理想像平面坐标系

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,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。

2.2 标定系统的组成

测绘相机标定系统如图 4 所示。整个系统由黑体、星点板、平行光管、相机、转台、转台控制系统、图像处理系统组成。将测绘相机放置于精密转台上,通过转台的转动,使平行光管所发射出的平行光与相机的光轴产生一个夹角,从而模拟相机在不同视场角度下的入射光。记录不同入射角度下的探测器响应位置 (x_i, y_i) 以及转台的转动

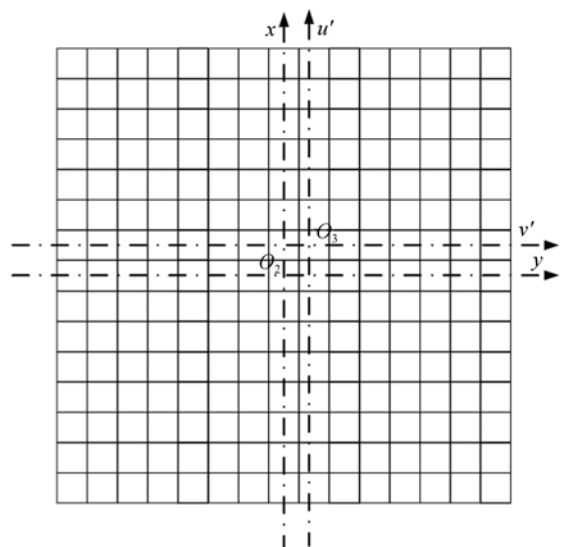


图 3 理想像平面坐标系
Fig. 3 Ideal image plane coordinate

位置 ω_i , 通过 $5 \times 5 = 25$ 个离散位置的基准采样点数据,建立系统畸变与此入射光下理论位置的关系,来标定内方位元素并修正其他视场的畸变位置。

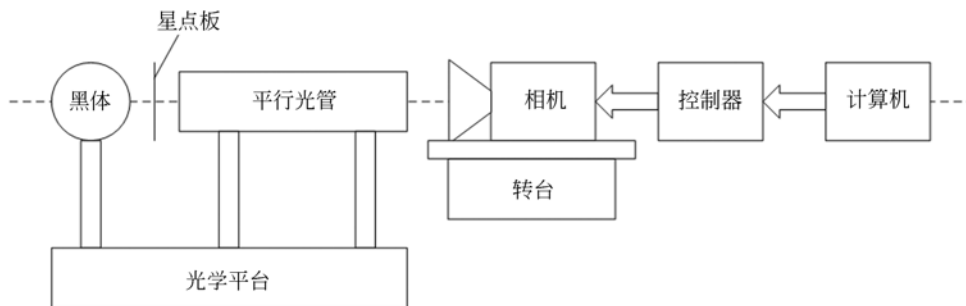


图 4 测绘相机标定系统原理图
Fig. 4 Schematic diagram of calibration system for mapping camera

2.3 内方位元素解算方法

首先,调整转相机平台方位角及俯仰角,转动俯仰角使目标成像于焦平面中心像元位置处。同时,转动相机平台方位角使目标成像于焦平面中心行,转动俯仰角使目标成像于焦平面中心列,记录目标点成像于焦平面中心像元位置时方位角俯仰角 $(azi_0, elev_0)$ 以此作为转台角度基准,建立畸变测试初始位置。

然后,调整相机平台方位角及俯仰角,使目标成像于焦平面不同视场位置,此时目标像点坐标记为 (x_i, y_i) ,俯仰角方位角记为 $(azi, elev)$ 。

小孔成像模型如图 5 所示,可以得到的目标

矢量在焦平面坐标系的表达式为^[16-17]:

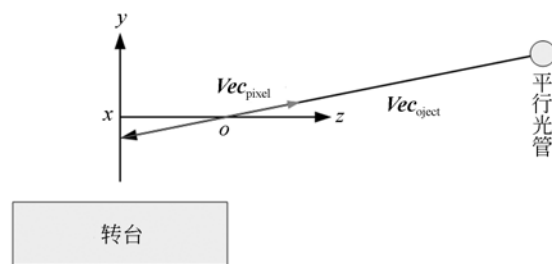


图 5 理想小孔成像模型
Fig. 5 Ideal model of pinhole imaging

$$\mathbf{Vec}_{\text{object}} = \begin{bmatrix} \cos(azi - azi_0) & 0 & -\sin(azi - azi_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(azi - azi_0) & 0 & \cos(azi - azi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(elev - elev_0) & \sin(elev - elev_0) \\ 0 & -\sin(elev - elev_0) & \cos(elev - elev_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

根据成像原理,平行光管发出的目标矢量 $\mathbf{Vec}_{\text{object}}$ 等于其在焦平面响应位置的视矢量。

$$\mathbf{Vec}_{\text{object}} = -\mathbf{Vec}_{\text{pixel}} = - \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \cos(azi^r) & 0 & -\sin(azi^r) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(azi^r) & 0 & \cos(azi^r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(elev^r) & \sin(elev^r) \\ 0 & -\sin(elev^r) & \cos(elev^r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中, $(azi^r, elev^r)$ 为相对于转台基准位置 $(azi_0, elev_0)$ 的方位角和俯仰角, $azi^r = azi - azi_0$, $elev^r = elev - elev_0$ 。

联立可得到:

$$\begin{bmatrix} -\cos(elev^r)\sin(azi^r) \\ \sin(elev^r) \\ \cos(elev^r)\cos(azi^r) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix}, \quad (6)$$

即:

$$\tan(azi^r) = \frac{x - x_0}{f}, \quad (7)$$

$$\frac{\tan(elev^r)}{\cos(azi^r)} = -\frac{y - y_0}{f}, \quad (8)$$

将上式展开,有:

$$x = x_0 + f \tan(azi^r), \quad (9)$$

$$y = y_0 - f \frac{\tan(elev^r)}{\cos(azi^r)}, \quad (10)$$

利用最小二乘法可以获得内方位元素的解析解:

$$f' = \frac{n \sum (x_i \tan(azi_i^r)) - \sum \tan(azi_i^r) \sum x_i}{n \sum \tan^2(azi_i^r) - (\sum \tan(azi_i^r))^2}, \quad (11)$$

$$x_0 = \frac{1}{n} (\sum x_i - f' \sum \tan(azi_i^r)), \quad (12)$$

$$y_0 = \frac{1}{n} \left[\sum y_i + f' \sum \frac{\tan(elev_i^r)}{\cos(azi_i^r)} \right]. \quad (13)$$

3 畸变矫正方法

3.1 畸变标定原理

为了克服传统方法对径向畸变模型的依赖性,本文采用二维拉格朗日插值的方法对图像进

行畸变矫正处理^[15]。具体操作是在二维像面上取一系列样点,用实验的方法得到其矫正前后的对应关系,然后利用这些样点对所需要矫正的像点做二维拉格朗日插值,得到其矫正后的位置。由于插值是在两个方向进行的,因此不要求像面畸变关于光轴中心对称。

解算时,首先根据测量数据 (x_i, y_i) 和方位角俯仰角 $(azi^r, elev^r)$,采用最小二乘回归分析方法,利用式(14),求解正规方程组得到主点偏移量 x_0 和主距 f' 的估计值。

$$x_i = x_0 + f' \tan \omega_i, \quad (14)$$

$$y_i = y_0 - f' \frac{\tan(elev^r)}{\cos(azi^r)}, \quad (15)$$

式中 $f' \tan \omega_i$ 为视场入射光在像面的理论位置。

然后可以计算出各基准采样点位置处的畸变值 D_{ix}, D_{iy} 。

$$D_{ix} = x_i - (x_0 + f' \tan \omega_i), \quad (16)$$

$$D_{iy} = y_i - \left[y_0 - f' \frac{\tan(elev^r)}{\cos(azi^r)} \right]. \quad (17)$$

由文献[15]可知,样本点取 5×5 网格 25 点时误差最小,因此采集各个通道 25 个基准采样点数据,便可计算各个通道采样点位置处的畸变。最后通过 5 个随机点来进行误差对比,验证得到的畸变矫正结果是否满足要求。

3.2 二维拉格朗日插值畸变校正方法

理想采样点的网格划分如图 6 所示。在二维像平面上,若由坐标 $(x_i, y_i) \{ i=1, 2 \dots m, j=1, 2, \dots n \}$ 构成的网格节点 (x_i, y_j) 上的函数值为 z_{ij} , 那么对于非网格点位置处的点 (x, y) , 其函数值 z 可用 Lagrange 插值函数近似求得^[15]:

$$z(x, y) \approx \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \prod_{k=1, k \neq i}^m \frac{x - x_k}{x_i - x_k} \prod_{l=1, l \neq j}^n \frac{y - y_l}{y_i - y_l} z_{ij}. \quad (18)$$

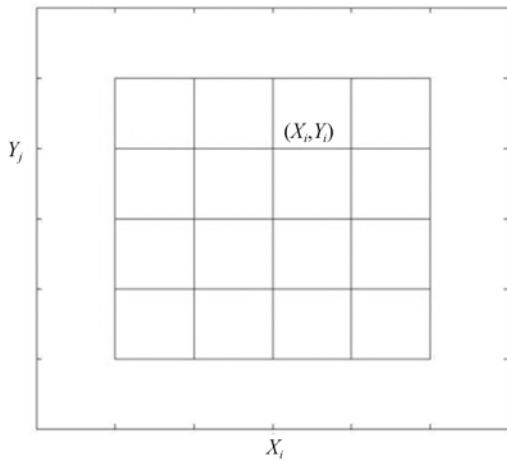


图 6 理想采样点网格
Fig. 6 Ideal grid samples

将上式应用到畸变矫正模型中,在二维像面上得到一系列样点构成的网格,以样点的实际坐标 (x_i, y_j) 作为自变量,以样点的理论位置 (X_i, Y_j) 作为函数值,可以通过像面任意点的实际位置求得其理论位置 $[U, V]$:

$$\begin{cases} U(x, y) \approx \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \prod_{k=1, k \neq i}^m \frac{x - x_k}{x_i - x_k} \prod_{l=1, l \neq j}^n \frac{y - y_l}{y_i - y_l} X_{ij} \\ V(x, y) \approx \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \prod_{k=1, k \neq i}^m \frac{x - x_k}{x_i - x_k} \prod_{l=1, l \neq j}^n \frac{y - y_l}{y_i - y_l} Y_{ij} \end{cases} \quad (19)$$

以上插值函数要求样点在 x, y 方向的取值是相互独立的,即样点 $(x_i, y_j), \{i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n\}$ 成一个规则的 m 行 n 列的网格。但实际采样时,只能保证构成一个近似规则的 m 行 n 列的网格,不可能得到理想的规则网格,即采样点的 x, y 坐标是相互关联、成对出现的,每个样点对应一个 (x, y) 坐标。因此,要用 Lagrange 插值函数,必须对上式做一变形,如下:

$$\begin{cases} U(x, y) \approx \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \prod_{k=1, k \neq i}^m \frac{x - x_k}{x_{ij} - x_k} \prod_{l=1, l \neq j}^n \frac{y - y_l}{y_{ij} - y_l} X_{ij} \\ V(x, y) \approx \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \prod_{k=1, k \neq i}^m \frac{x - x_k}{x_{ij} - x_k} \prod_{l=1, l \neq j}^n \frac{y - y_l}{y_{ij} - y_l} Y_{ij} \end{cases} \quad (20)$$

式中, x_{ij} 是像面上第 i 行第 j 列样点的实际 x 坐标; y_{ij} 是像面上第 i 行第 j 列样点的实际 y 坐标; X_{ij}, Y_{ij} 是像面上第 i 行第 j 列样点的理论位置的 x, y 坐标; (x, y) 是畸变矫正前像点的实际坐标; $[U, V]$ 是通过插值计算出来的点 (x, y) 经过校正

后的理论位置坐标。利用上述公式,就可通过插值由像点的实际位置计算出其理论位置,实现像面的畸变校正。

3.3 改进的二维拉格朗日插值畸变校正方法

上述方法用的是所有 25 个点进行插值的结果,对于距离插值点较远的网格点,虽然对插值结果也有贡献,但是跟插值处畸变变化趋势的相关性较小,可予以删除,以缩小网格点使用范围。因此,可以将全域的 5×5 插值网格点,变成插值点邻域的 3×3 网格点进行插值。如图所示。当测试点位置确定时,找到距离最近的 3×3 网格进行插值,这样可大大提高脚部位置的畸变精度。

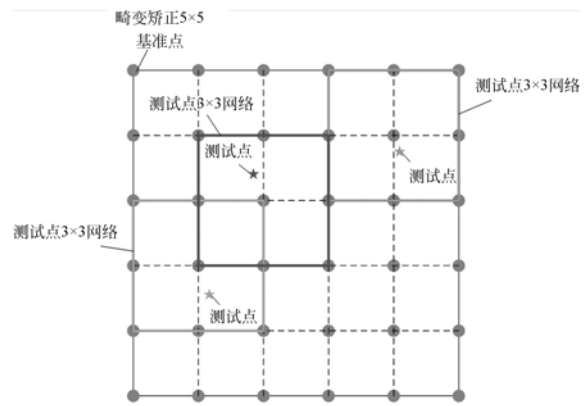


图 7 改进的拉格朗日插值法

Fig. 7 Improved Lagrange interpolation method

3.4 畸变校正模型

根据基准采样点的实际坐标和理论位置坐标,利用 Lagrange 插值函数即可得到测绘相机的畸变校正模型。从而将像空间像点实际坐标转换为物空间无畸变影响下的理论坐标,实现畸变的校正。

畸变校正模型建立的具体流程可以归纳为:

(1) 获取转台的角度数据,通过主距标定结果 f' 计算出在不同视场情况下的探测器响应的理论位置 (U_i, V_j) 。

(2) 将探测器的实际响应像元转换为在探测器坐标系内的实际响应位置 (x_i, y_j) 。

(3) 将得到的实际响应位置 (x_i, y_j) 和理论响应位置 (U_i, V_j) 代入 Lagrange 插值函数中,即可实现对探测器各探测元的畸变校正。

4 畸变校正精度评估

通过计算所得的结果与理论坐标的畸变值 D_i 判定多通道畸变校正结果,采用局部拉格朗日

计算后的误差如表 1 所示。

由于最大误差要小于 1 pixel,因此只考虑数据中最大误差的情况。结果可见 5 个随机点在各个通道内最大畸变量为 0.363 6,小于 1 pixel,因此对于大口径离轴光学系统该方法是可行的。

表 1 畸变校正随机点精度结果

Tab. 1 Result of distortion correction for random points

通道	随机点校正后偏差	1	2	3	4	5	最大偏差像元
通道一	d_x	0.110 2	-0.120 8	0.224 0	0.340 9	0.194 7	0.340 9
	d_y	0.034 4	-0.015 0	-0.068 6	0.164 5	-0.043 8	
通道二	d_x	0.192 3	-0.189 3	0.174 5	0.348 9	0.363 6	0.363 6
	d_y	-0.009 6	0.079 7	0.248 5	-0.137 0	0.144 9	

5 结 论

本文针对大口径测绘相机的畸变特点,验证了使用改进的二维拉格朗日差插值进行畸变校正的方法。该方法不仅克服了传统方法对非径向畸变图像进行校正时的不足,同时也很好地提高了

图像角部位置的成像精度。实验结果表明,对该光学系统,只需要预先测定少量的基准样点,就能生成畸变校正模板,以对其他畸变图像进行校正,校正结果很好的满足了实际应用需要。该方法虽然是对某一特定大口径离轴光学系统进行的,但是由于各个离轴光学系统畸变的特性基本相同,故具有普遍意义。

参考文献:

- [1] 刘伟毅,丁亚林,贾继强,等. 借助于星点标定相机的内方位元素 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(9): 2086-2093.
LIU W Y, DING Y L, JIA J Q, et al.. Calibration of inner orientation elements for camera by means of star points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2086-2093. (in Chinese)
- [2] 崔继文,刘雪明,谭久彬. 超精密级二维工作台的自标定 [J]. 光学 精密工程, 2012, 20(9): 1960-1966.
CUI J W, LIU X M, TAN J B. Self-calibration for 2-D ultra-precision stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1960-1966. (in Chinese)
- [3] 王东杰,张继友,马丽娜,等. 基于自标定技术的相机内方位元素测试影响因素分析 [J]. 测绘通报, 2014, (S1): 89-93.
WANG D J, ZHANG J Y, MA L N, et al.. Analysis of camera intrinsic parameter testing factors based on self-calibration [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014, (S1): 89-93. (in Chinese)
- [4] 雷蓉. 星载线阵传感器在轨几何定标的理论与算法研究 [D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2011.
LEI R. *Study on theory and algorithm of the in-flight geometric calibration of spaceborne linear array sensor* [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [5] 苏文博. 航天线阵 CCD 传感器在轨几何定标技术研究 [D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2010.
SU W B. *Research on techniques for on-orbit geometric calibration of space linear CCD sensors* [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2010. (in Chinese)
- [6] 王涛. 线阵 CCD 传感器实验场几何定标的理论与方法研究 [D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2012.
WANG T. *Study on theories and methods of linear CCD sensor Geometric Calibration Based on Field* [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [7] 远国勤. 具有前向像移补偿功能的彩色大面阵测绘相机内方位元素标定研究 [D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012.
YUAN G Q. *Research on the calibration of inner orientation elements for area scan color CCD map-*

- ping camera with forward image motion compensation mechanism* [D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2012. (in Chinese)
- [8] WENG J, COHEN P, HERNIOU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(10): 965-980.
- [9] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [10] 杨秋慧. 大视场镜头的畸变校正和图像拼接 [D]. 南宁:广西大学, 2014.
YANG Q H. *Distortion correction of large field-of-view lens and image stitching* [D]. Nanning: Guangxi University, 2014. (in Chinese)
- [11] 段马丽. 广角图像畸变校正算法的研究与实现 [D]. 河北工程大学, 2013.
DUAN M L. *The research and realization of distortion correction algorithm for wide-angle image* [D]. Hebei University of Engineering, 2013. (in Chinese)
- [12] 赵建科, 李霞, 薛勋, 等. TDI CCD 立体相机内方位元素测试技术研究 [J]. *光学技术*, 2010, 36(3): 428-431.
ZHAO J K, LI X, XUE X, *et al.*. TDI CCD stereo camera orientation elements testing technology [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(3): 428-431. (in Chinese)
- [13] 韩广良, 宋建中. 一种基于畸变等效曲面的图像畸变校正 [J]. *光学技术*, 2005, 31(1): 122-124.
HAN G L, SONG J ZH. An equivalent surface model of image distortion and the correction algorithm [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(1): 122-124. (in Chinese)
- [14] 侯佳. 基于畸变校正的成像自由曲面光学设计 [D]. 杭州:浙江大学, 2013.
HOU J. *Design method for imaging freeform lens based on distortion correction* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [15] 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. Distort correction for large aperture off-axis optical system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(S1): 157-161. (in Chinese)
- [16] 卜江萍. 用于凝视式相机的大视场离轴三反光学系统的研究 [D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2006.
BU J P. *Study on wide field off-axis reflective system for fixation camera* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [17] RECKTENWALD G. 数值方法和 Matlab 实现与应用 [M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
RECKTENWALD G. *Numerical Methods Using MATLAB* [M], Beijing: China Machine Press, 2004.

作者简介:



王誉都(1991—),男,河南洛阳人,博士研究生,2010年于西北工业大学获得学士学位,主要从事空间遥感与光电系统设计等方面的研究。E-mail: wangyudu@gmail.com



陈凡胜(1978—),男,山东邹城人,博士研究生,2007年于中国科学院上海技术物理研究所获得博士学位,主要从事空间高分辨率遥感与探测载荷的设计方法研究。E-mail: cfs@mail.sitp.ac.cn