

文章编号 1004-924X(2015)10-2927-16

## 航空变焦距斜视成像几何畸变的自动校正

周前飞<sup>1,2</sup>, 刘晶红<sup>1\*</sup>, 王 宣<sup>1,2</sup>, 孙明超<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空  
光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对变焦距航空摄像机斜视成像产生的几何变形,提出一种同时校正斜视梯形失真和变焦距镜头非线性畸变的自动校正方法。根据直线透视投影不变性原理,利用单参数除式模型通过变步长优化搜索方法得到不同焦距对应的镜头畸变系数和畸变中心坐标;研究了焦距变化对畸变的影响规律,校正了镜头畸变使其满足针孔成像模型;引入飞机位置、姿态和摄像机视轴指向方位等因素,将航空图像重投影到地图坐标系中,对坐标变换后的像素亮度值进行重采样得到校正斜视变形和镜头畸变后的正射投影图像。对不同焦距和位置姿态下拍摄的地面靶标畸变图像和实际航空变焦距斜视图像进行了校正。结果表明,该方法能够有效准确地校正图像的几何变形,当飞行高度为 2 500 m 时,在文中给定的位置姿态精度下的图像几何校正均方误差约为 2 m,较好地满足了后续图像拼接需求。该方法效率高,便于自动化实现,对提高图像拼接精度和实现目标精确定位与实时稳定跟踪具有重要意义。

**关键词:**变焦距斜视成像;几何校正;镜头畸变;除式模型;摄像机标定

**中图分类号:** V248. 3; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20152310. 2927

## Automatic correction of geometric distortion in aerial zoom squint imaging

ZHOU Qian-fei<sup>1,2</sup>, LIU Jing-hong<sup>1\*</sup>, WANG Xuan<sup>1,2</sup>, SUN Ming-chao<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: liu1577@126.com*

**Abstract:** For geometric distortion caused by squint imaging of a zoom aerial camera, an automatic simultaneously correction method for both squint trapezoidal distortion and nonlinear distortion of the zoom lens was proposed. Based on the same geometric type between straight line and its ideal projection image, the one-parameter division model was adopted to estimate the distortion coefficient and the distortion center coordinates at different focal lengths by an optimization searching method of variant step length. The effects of focal distance change on the distortion coefficient and distortion center coordinates were researched, then the lens's distortion was corrected to satisfy the ideal pinhole imaging

**收稿日期:** 2014-11-07; **修订日期:** 2014-12-22.

**基金项目:** 吉林省重大科技攻关项目(No. 11ZDGG001); 总装预研基金资助项目(No. 402040203); 国家林业公益性行业科研专项基金资助项目(No. 201204515)

model. By introducing the position and attitude of airplane and the pointing azimuth of the optical axis for the camera, the oblique aerial images specified in the camera frame were georectified into the mapping frame. The pixel intensity after coordinate transformation was resampled to obtain orthorectified images without the lens distortion and squint distortion. The correction experiments were performed for the distortion patterns captured under various focal lengths, positions and attitudes and the actual aerial zoom oblique images, and the results show that this method effectively and accurately corrects the geometric distortion of images. The Root Mean Square Error (RMSE) of image geometric correction is about 2 m when the flight height is 2 500 m with the position and attitude measurement precision given in this article. The precision satisfies the requirements of the follow-up image mosaicing. It concludes that the method is more efficient, easy to realize in automation and has great significance for promoting aerial image mosaicing precision, implementing fast positioning and real-time tracking of moving objects.

**Key words:** zoom squint imaging mode; geometric correction; lens distortion; division model; camera calibration

## 1 引言

连续变焦距光学系统具有在视场转换中不丢失目标的优点,能对快速运动目标进行搜索和捕获,较好地实现大视场搜索目标和小视场分辨目标的功能,在航空光电侦察中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。由于系统制造与装配误差的存在,变焦距镜头的非线性畸变特性随焦距的变化而变化,同时由于飞机姿态和摄像机视轴方位的变化,航空摄像机会以一定倾斜角度对地成像,从而产生了复杂的几何变形,即拍摄到的目标发生旋转、缩放和变形,利用其影像进行实时拼接时,将严重影响拼接精度<sup>[2]</sup>,从而极大地增大了对目标进行持续稳定跟踪的难度<sup>[3]</sup>。

对于斜视摄影引起的梯形失真,有基于经验模型的几何校正方法(多项式模型、有理函数模型、支持向量机等)<sup>[4-5]</sup>,还有与参考图像配准进行校正的方法<sup>[6]</sup>和基于构象模型的几何校正方法(共线方程法、投影变换法)<sup>[7-9]</sup>,其中后者由于不需要人工采集地面控制点数据或提供参考图像,便于采用嵌入式系统自动实现,成为遥感图像几何校正的主流算法。对于成像系统的非线性畸变,校正方法主要分为两类:一类是摄像机标定方法,包括 Tsai 基于径向约束的两步法<sup>[10]</sup>和张正友基于平面标靶的标定方法<sup>[11-13]</sup>,这类方法基于摄像机成像模型,同时考虑了摄像机的内、外参

数,求解精度高,但计算量大,在优化搜索过程中畸变模型参数与摄像机的内、外参数耦合,易导致求解过程不收敛或收敛于局部极小值;其次通常需要采集多幅标靶图像提取大量标定点的坐标;另外,由于变焦距镜头的非线性畸变随焦距的变化而变化,针对系统的特定焦距状态,一般需要重新进行标定,操作繁琐耗时。另一类是基于射影几何不变性或不变量(直线透视投影不变性<sup>[14-15]</sup>、交比不变原理<sup>[16]</sup>、线段斜率<sup>[17]</sup>、灭点<sup>[18]</sup>和平面约束<sup>[19-21]</sup>等)的非量测校正方法,这类方法主要依据拍摄目标上具有共同特征的点在理想图像上依然保持这一特征的性质,在真实图像上寻找并标定符合特定特征的点,建立以畸变参数为最优解的线性泛函,采用优化搜索方法求解畸变参数。这类校正方法要预先获得场景的结构信息,对在未知环境条件下(如侦察、情报等应用)获得的图像不一定适用<sup>[22]</sup>,例如图像中边缘特征不显著(如草原,沙漠,海洋等)或者同时包含镜头畸变引起的曲线和一些真实世界中曲线时,利用直线透视投影不变性的优化搜索方法可能无法实施或导致错误的畸变参数估计结果。

本文首先根据投影变换方法和单参数除式模型,建立了斜视梯形失真和镜头非线性畸变的综合校正模型;接着采用地面离线标定和机上在线校正相结合的方法,根据直线的透视投影不变性原理,利用单参数除式模型,通过变步长优化搜索方法得到若干离散焦距值下平面棋盘模板图像的

畸变系数和畸变中心坐标;进一步分析了焦距变化对图像畸变的影响规律,建立了镜头畸变系数、畸变中心坐标与焦距的数学关系;最后,根据该关系得到任意连续焦距下的镜头畸变参数,结合图像的位置姿态参数计算出其内、外方位元素,代入上述校正模型对航空图像进行校正。该方法避免了重复进行繁琐耗时的摄像机标定和非量测校正方法对图像直线、灭点等几何不变特征的依赖性,提高了校正速度和自动化程度。

## 2 变焦距斜视成像几何畸变校正

### 2.1 建立图像几何畸变校正模型

文中建立的几何畸变校正模型主要针对中小型无人机光电平台搭载的航空变焦距面阵 CCD (Charge Coupled Device) 摄像机,采用中低空飞行侦察,飞行高度一般小于 3 km,视场角为 30~40°,单幅图像可覆盖地面 1~2 km,多数情况下不会有太大的起伏,可认为对应地面区域近似平坦,地形起伏和地球曲率引起的变形近似为零,可只考虑由于摄像机外方位元素变化引起的图像变形和变焦距镜头引起的图像畸变。

航空图像几何校正将摄像机坐标系下的原始图像坐标投影变换到地图(或地面)坐标系中,根据地图坐标范围采用一定的地面像元分辨率 (Ground-Sampled Distance, GSD) 划分格网,每个网点代表输出图像的一个像素,再将地图坐标转换为输出图像坐标,对坐标变换后的像素亮度值进行重采样得到正射投影图像,如图 1 所示。在没有地面控制点的条件下,求解从摄像机坐标系到地图坐标系的转换关系需提供摄像机所搭载的光电平台位置和姿态数据。由于这些数据分别相对于不同的坐标系,需分别建立以下坐标系模型,主要坐标系如图 1 所示。

**摄像机坐标系:**原点为摄像机投影中心  $G$ ,  $z_c$  轴正向指向摄像机光轴,  $x_c$  轴、 $y_c$  轴分别与图像像素坐标系  $u$  轴(标记图像的列,单位为 pixel)、 $v$  轴(标记图像的行)平行且方向一致;图像物理坐标系  $o-xy$  的原点位于摄像机光轴与图像平面的交点即主点位置,  $x$  轴、 $y$  轴分别与  $u$  轴、 $v$  轴平行且方向一致,该坐标系以  $m$  或  $mm$  为单位。

**载机坐标系:**原点为航姿测量系统质心,由于

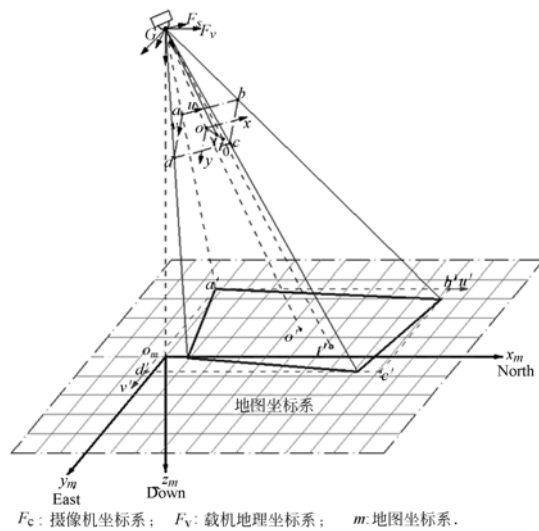


图 1 航空变焦距斜视图像几何校正原理图

Fig. 1 Principle of geometric correction for aerial zoom oblique imaging

航姿测量系统、GPS 定位系统固定于光电平台的水平基准面上,摄像机投影中心和航姿测量系统质心距离很小,可近似认为两者重合,  $x_b$  轴为航姿测量系统的 0°方向,  $y_b$  轴为航姿测量系统的 90°方向,  $z_b$  轴通过右手螺旋定则确定,光电平台输出的方位角  $A$  和高低角  $E$  是相对该坐标系的。

**载机地理坐标系:**原点位于航姿测量系统质心,为 NED(North East Down)坐标系,航姿测量系统输出的载机航向角  $\beta$ ,俯仰角  $\epsilon$  和横滚角  $\gamma$  是相对该坐标系的。

**地图坐标系:**也是 NED 坐标系,与载机地理坐标系仅存在一个平移量,设拍摄第 1 幅图像时摄像机投影中心  $G$  在地平面的投影点  $o_m$  为地图坐标系原点,拍摄第  $i$  幅图像时两坐标系之间的平移量为该时刻 GPS 输出的载机位置在地图坐标系中的坐标  $[x_{mi} \ y_{mi} \ z_{mi}]^T$ 。

先假设不存在镜头畸变,根据针孔成像模型<sup>[11]</sup>,地图坐标系中的一点  $t'(x_m, y_m, z_m)$  和图像平面上理想像点  $t_0(u, v)$  存在以下关系:

$$s[u \ v \ 1]^T = \mathbf{A}_0 \mathbf{C}_{cm} [x_m \ y_m \ z_m \ 1]^T, \quad (1)$$

式中:  $s$  为任意缩放因子,  $\mathbf{A}_0$  表示摄像机内方位元素,按下式计算:

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} F/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & F/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $d_x, d_y$  表示单个像素的物理尺寸,单位为

$\mu\text{m}$ ;  $F$  为摄像机的焦距, 可通过调焦机构上相应传感器测量得到, 单位为  $\text{mm}$ ;  $(u_0, v_0)$  为图像主点  $o$  (畸变中心) 坐标, 可通过 2.2 节的镜头畸变参数估计算法得到, 单位为  $\text{pixel}$ ;  $C_{\text{cm}}$  为摄像机外方位元素, 表示从地图坐标系到摄像机坐标系的转换关系, 需经过地图坐标系、载机地理坐标系、载机坐标系、摄像机坐标系 4 个坐标系的转换, 如图 2 所示。

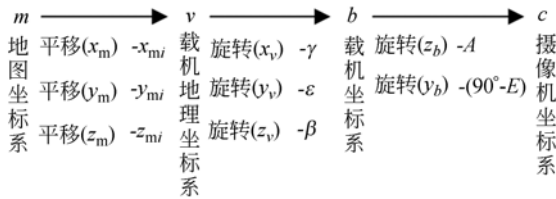


图 2 几何校正的坐标转换流程

Fig. 2 Coordinate transformation process for geometric correction

首先根据拍摄第  $i$  幅图像时载机的 GPS 位置计算该时刻载机地理坐标系与地图坐标系之间的平移量  $[x_{mi} \ y_{mi} \ z_{mi}]^T$ , 由 GPS 测量得到载机位置的经度  $L$ 、纬度  $M$  和大地高  $H$ , 计算载机在 WGS-84 (World Geodetic System 1984) 地心空间直角坐标系的坐标:

$$P_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+H)\cos M\cos L \\ (N+H)\cos M\sin L \\ [N(1-e^2)+H]\sin M \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: 椭球长半轴  $a=6\ 378\ 137.0\ \text{m}$ , 椭球短半轴  $b=6\ 356\ 752.0\ \text{m}$ , 椭球第一偏心率  $e = \sqrt{(a^2 - b^2)/a^2}$ , 椭球卯西圈曲率半径  $N = a/\sqrt{1 - e^2 \sin^2 M}$ ,  $P_e$  为拍摄第  $i$  幅图像时载机位置在地心空间直角坐标系中的坐标, 该位置在地图坐标系中的坐标  $P_m = [x_{mi} \ y_{mi} \ z_{mi}]^T$  可按下式计算:

$$P_m = [x_{mi} \ y_{mi} \ z_{mi}]^T = R_{m/e} (P_e - P_{e,\text{ref}}), \quad (4)$$

式中:  $P_{e,\text{ref}}$  为地图坐标系原点  $o_m$  在地心空间直角坐标系中的坐标,  $R_{m/e}$  为从地心空间直角坐标系到地图坐标系的旋转矩阵, 按下式计算:

$$R_{m/e} = \begin{bmatrix} -\cos L_1 \sin M_1 & -\sin L_1 \sin M_1 & \cos M_1 \\ -\sin L_1 & \cos L_1 & 0 \\ -\cos L_1 \cos M_1 & -\cos M_1 \sin L_1 & -\sin M_1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中:  $L_1, M_1$  为地图坐标系原点  $o_m$  的经纬度坐标。

然后根据图 2 中地图坐标系到摄像机坐标系的转换关系计算出第  $i$  幅图像对应的外方位元素  $C_{\text{cm}}$  为:

$$C_{\text{cm}} = \begin{bmatrix} c_{\Lambda} s_{\Delta} & s_{\Delta} s_{\Lambda} & -c_{\Delta} & 0 \\ -s_{\Lambda} & c_{\Lambda} & 0 & 0 \\ c_{\Lambda} c_{\Delta} & s_{\Lambda} c_{\Delta} & s_{\Delta} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{\epsilon} c_{\beta} & c_{\epsilon} s_{\beta} & -s_{\epsilon} & 0 \\ c_{\beta} s_{\gamma} s_{\epsilon} - c_{\gamma} s_{\beta} & c_{\gamma} c_{\beta} + s_{\gamma} s_{\epsilon} s_{\beta} & c_{\epsilon} s_{\gamma} & 0 \\ s_{\gamma} s_{\beta} + c_{\gamma} c_{\beta} s_{\epsilon} & c_{\gamma} s_{\epsilon} s_{\beta} - c_{\beta} s_{\gamma} & c_{\gamma} c_{\epsilon} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{mi} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{mi} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{mi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中  $c_* = \cos(*)$ ,  $s_* = \sin(*)$ 。

不失一般性原则, 假设原始图像的正射投影

图像位于地图坐标系  $z_m=0$  平面, 令:

$$C = A_0 C_{\text{cm}} = \begin{bmatrix} F/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & F/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式(1)可变换为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

由式(8)可得

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (uc_{31} - c_{11}) & (uc_{32} - c_{12}) \\ (vc_{31} - c_{21}) & (vc_{32} - c_{22}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} c_{14} - uc_{34} \\ c_{24} - vc_{34} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

利用式(9)可以计算出原始图像每个像素对应的物点位置在地图坐标系中的坐标。

考虑镜头畸变时, 物点在图像平面的对应像点从理想位置  $t_0$  移动到畸变点位置  $t$ , 物点  $t'$  的

地图坐标  $(x_m, y_m)$  到对应像点  $t$  的像素坐标  $(u_d, v_d)$  的转换关系推导如下。先计算出物点  $t'(x_m, y_m)$  在理想无畸变图像中对应像点  $t_0$  的物理坐标  $(x_n, y_n)$  如下:

$$s \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{cm} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

一般镜头畸变以径向畸变形式为主,切向畸变和薄棱镜畸变很小,可忽略不计,这里引入 Fitzgibbon 提出的单参数除式模型<sup>[23]</sup>描述变焦距镜头畸变:

$$x_n = x_d / (1 + k_1 r_d^2), y_n = y_d / (1 + k_1 r_d^2), \quad (11)$$

式中  $k_1$  为径向畸变系数,可通过 2.2 节的镜头畸变参数估计算法得到。 $(x_d, y_d)$  为畸变像点  $t$  的物理坐标,  $r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$  为其到畸变中心的欧式距离,令  $r_n = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}$ ,式(11)可转化为  $r_d$  的一元二次方程:

$$r_d^2 - r_d / (k_1 r_n) + 1 / k_1 = 0, \quad (12)$$

解上述方程组得  $r_d$  如式(13)所示,其中  $k_1 > 0$  时对应枕形畸变,  $k_1 < 0$  时对应桶形畸变:

$$r_d = \begin{cases} (1 - \sqrt{1 - 4k_1 r_n^2}) / (2k_1 r_n) & k_1 > 0, 0 < r_n^2 < 1 / (4k_1) \\ (1 + \sqrt{1 - 4k_1 r_n^2}) / (2k_1 r_n) & k_1 < 0, r_n^2 > 0 \\ r_n & k_1 = 0 \text{ 或 } r_n = 0 \end{cases}, \quad (13)$$

求解出  $r_d$  后,根据下式计算物点  $t'(x_m, y_m)$  在畸变图像中对应像点  $t$  的像素坐标  $(u_d, v_d)$  如下:

$$\begin{bmatrix} u_d & v_d & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{A}_0 \begin{bmatrix} (r_d / r_n) x_n & (r_d / r_n) y_n & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (14)$$

同理,畸变像点  $t$  的像素坐标  $(u_d, v_d)$  到对应物点  $t'$  的地图坐标  $(x_m, y_m)$  的转换如下:首先由像点  $t$  的像素坐标  $(u_d, v_d)$  计算其物理坐标  $(x_d, y_d)$ ,如下式所示:

$$\begin{bmatrix} x_d & y_d & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{A}_0^{-1} \begin{bmatrix} u_d & v_d & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (15)$$

然后根据式(11)计算出物点  $t'$  在理想无畸变图像中对应像点  $t_0$  的物理坐标  $(x_n, y_n)$ ,最后根据下式计算物点  $t'$  的地图坐标  $(x_m, y_m)$

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{34} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

## 2.2 镜头畸变模型参数估计算法

根据直线的透视投影不变性原理,3D 空间的一条直线在理想无畸变图像上投影为一条 2D 直线,然而由于镜头畸变的影响,在实际图像上投影为一条圆弧曲线。根据畸变系数  $k_1$  和畸变中心坐标  $(u_0, v_0)$  的范围,利用变步长优化搜索方法和除式畸变校正模型,分别计算采用不同畸变系数和畸变中心坐标校正后的图像,再构造衡量校正后图像中各条曲线弯曲程度的评价函数,使各条曲线的弯曲程度最小,最接近于理想直线,从而得到最佳的畸变系数和畸变中心坐标值,对畸变图像进行校正。

首先确定畸变系数  $k_1$  和畸变中心  $(u_0, v_0)$  的范围。对于变焦距镜头,畸变系数  $k_1$  一般位于  $[-1/D^2, 1/D^2]$  内<sup>[24]</sup>,其中  $D$  为图像对角线长度。设图像大小为  $w \text{ pixel} \times h \text{ pixel}$ ,得到  $D = \sqrt{w^2 + h^2}$ 。畸变中心一般位于图像中心附近  $0.1w \times 0.1h$  大小的矩形区域内<sup>[25]</sup>,得到  $u_0 \in [0.45w, 0.55w]$ ,  $v_0 \in [0.45h, 0.55h]$ 。该算法的主要步骤如下:

(1) 采用 Canny 边缘检测器检测原始畸变图像中的边缘像素点,得到相应的边缘图像,其中 Canny 算子的阈值根据图像梯度值的一定百分比确定。

(2) 根据上述畸变参数  $k_1, u_0, v_0$  的取值范围,分别选择相应的步长  $\delta k_1, \delta u_0, \delta v_0$ ,得到畸变参数组合  $(k_1^i, u_0^j, v_0^p)$  为:

$$k_1^i = -1/D^2 + i \cdot \delta k_1, u_0^j = 0.45w + j \cdot \delta u_0, v_0^p = 0.45h + p \cdot \delta v_0, \quad (17)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, N_1; j = 1, 2, \dots, N_2; p = 1, 2, \dots, N_3; \delta k_1 = 2 / (N_1 D^2); \delta u_0 = 0.1w / N_2; \delta v_0 = 0.1h / N_3$ 。

为避免摄像机内、外参数发生耦合,将畸变参数从摄像机模型中分离出来,采用上述各种畸变参数组合  $(k_1^i, u_0^j, v_0^p)$ ,根据式(18)~(19)计算边缘图像的校正图像,并根据式(20)~(21)计算校正后各边缘像素点的梯度,得到校正后各边缘像素点的坐标  $(u_n, v_n)$  和梯度方向  $\alpha(u_n, v_n)$ ,

$$x_d = (u_d - u_0) d_x, y_d = (v_d - v_0) d_y, \quad (18)$$

$$\begin{cases} u_n = u_0 + x_d / (1 + k_1 x_d^2 + k_1 y_d^2) / d_x \\ v_n = v_0 + y_d / (1 + k_1 x_d^2 + k_1 y_d^2) / d_y \end{cases}, \quad (19)$$

$$\begin{cases} G_u = (I_{v_n, u_n+1} - I_{v_n, u_n} + I_{v_n+1, u_n+1} - I_{v_n+1, u_n})/2 \\ G_v = (I_{v_n+1, u_n} - I_{v_n, u_n} + I_{v_n+1, u_n+1} - I_{v_n, u_n+1})/2 \end{cases}, \quad (20)$$

$$\alpha(u_n, v_n) = \arctan(G_v/G_u), \quad (21)$$

式中:  $I$  表示图像亮度值,  $G_u, G_v$  为校正后的边缘图像亮度值在  $(u_n, v_n)$  处的一阶偏导数,  $(u_d, v_d)$  分别为畸变像点的像素坐标和物理坐标,  $(u_n, v_n), (x_n, y_n)$  分别为校正后像点的像素坐标和物理坐标。

(3) 计算校正图像的 Hough 变换, 求得前  $N$  个 Hough 变换单元峰值对应的  $N_i$  条直线段边缘, 及其与原点的距离  $dist(q)$  和方向  $\beta(q), q=1, 2, \dots, N$ 。

(4) 对校正图像中的每个边缘像素点计算投票: 如果该像素点的梯度方向  $\alpha(u_n, v_n)$  与第  $q$  条直线的方向  $\beta(q)$  相差小于  $\delta_\alpha$ , 例如  $\delta_\alpha = 2^\circ$ , 计算该点与第  $q$  条直线的距离:

$$d_q = |u_n \cos(\beta(q)) + v_n \sin(\beta(q)) - dist(q)|, \quad (22)$$

如果  $d_q \leq \delta_d$ , 例如  $\delta_d = 2$  pixel, 计算该点的投票值  $votes = 1/(1+d_q)$ , 计算所有边缘像素点的投票之和, 此时求得投票之和最大值对应的畸变参数  $k_1^{(0)}, u_0^{(0)}, v_0^{(0)}$  为最佳值:

$$\max \left\{ \sum_{q=1}^N votes(dist(q), \beta(q), k_1^i, u_0^j, v_0^k) \right\}, \quad (23)$$

式中  $votes(dist(q), \beta(q), k_1^i, u_0^j, v_0^k)_{q=1}^N$  为采用畸变参数  $(k_1^i, u_0^j, v_0^k)$  校正图像中各边缘像素点对  $N_i$  条直线段的投票值。

(5) 为了更精确地估计畸变系数  $k_1$  和畸变中心  $(u_0, v_0)$ , 分别在  $[k_1^{(0)} - \delta k_1, k_1^{(0)} + \delta k_1], [u_0^{(0)} - \delta u_0, u_0^{(0)} + \delta u_0], [v_0^{(0)} - \delta v_0, v_0^{(0)} + \delta v_0]$  范围内, 选择搜索步长为步骤(2)中的  $1/N_1, 1/N_2, 1/N_3$ , 重复步骤(2)~(4), 直到  $k_1$  的搜索范围小于  $10^{-10}$ , 算法结束, 此时对应的系数  $k_1, u_0, v_0$  为优化后的最佳值。

### 2.3 航空变焦距斜视图像几何校正流程

上述畸变模型参数估计算法主要基于直线的透视投影不变性原理, 如果图像中包含一些真实世界中的圆弧曲线, 可能会导致不正确的畸变参数估计。为解决这个问题, 采用平行直线或平面棋盘图案作为变焦距航空摄像机地面标定实验的靶标, 采集若干不同焦距下的靶标畸变图像, 利用

上述畸变参数估计算法求解出各焦距对应的畸变参数, 对畸变参数进行曲线拟合或建立畸变参数查找表。在线校正时, 根据调焦机构上相应传感器测量得到摄像机的实际工作焦距值, 代入畸变参数与焦距之间拟合公式或查表, 得到该焦距对应的畸变参数, 再根据摄像机成像时的位置姿态数据计算出外方位元素, 代入式(1)~(16), 完成图像的畸变校正, 如图 3 所示。

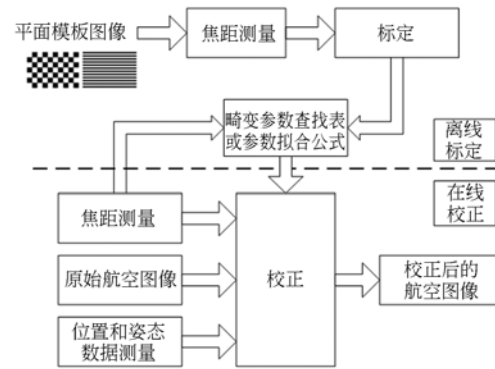


图 3 本文所提图像几何校正流程图

Fig. 3 Flowchart of geometric correction for proposed method

航空变焦距斜视图像几何校正算法步骤如下:

(1) 根据相应传感器测量得到摄像机实际工作焦距值, 通过查表方法或根据畸变参数与焦距之间拟合公式计算得到该焦距值对应的镜头畸变参数。

(2) 将原始图像 4 个角点坐标  $a(u_{21}, v_{21}), b(u_{22}, v_{22}), c(u_{23}, v_{23}), d(u_{24}, v_{24})$  按式(15), (11), (16) 投影到地图坐标系中, 得到 8 个地图坐标值  $a'(x_{m1}, y_{m1}), b'(x_{m2}, y_{m2}), c'(x_{m3}, y_{m3}), d'(x_{m4}, y_{m4})$ , 并对这 8 个坐标值按  $x_m$  和  $y_m$  两个坐标组分别求其最小值  $(x_{\min}, y_{\min})$  和最大值  $(x_{\max}, y_{\max})$ 。

(3) 划分地面网格, 定义输出图像每个像素点的地面尺寸  $d_{xm}$  和  $d_{ym}$ , 得到输出校正图像的总行数  $row$  和总列数  $col$ :

$$\begin{cases} row = fix[(y_{\max} - y_{\min})/d_{ym}] + 1 \\ col = fix[(x_{\max} - x_{\min})/d_{xm}] + 1 \end{cases}, \quad (24)$$

式中  $fix$  表示取整函数。

(4) 对于校正图像中的每个像素点坐标  $(u',$

$v'$ ), 计算其地图坐标  $(x_m, y_m)$ :

$$x_m = x_{\min} + (u' - 1)d_{3m}, y_m = y_{\min} + (v' - 1)d_{3m}, \quad (25)$$

其中  $u' = 1, 2, \dots, col, v' = 1, 2, \dots, row$ 。

(5) 根据式(10) ~ (14), 由地图坐标  $(x_m, y_m)$  计算对应的原始图像像素点坐标  $(u_d, v_d)$ 。

(6) 采用双线性插值算法计算出原始图像像素点坐标  $(u_d, v_d)$  的灰度值, 将该灰度值赋给校正图像  $(u', v')$  像素点, 即

$$Q(u', v') = \begin{cases} P(u_d, v_d) & u_d \in [1, w], v_d \in [1, h] \\ 0 & u_d, v_d \text{ 为其它值} \end{cases}, \quad (26)$$

式中:  $Q$  表示校正图像的灰度矩阵,  $P$  表示原始图像的灰度矩阵,  $h, w$  分别为原始图像的行列坐标范围。

(7) 重复步骤(4)、(5)、(6), 依次计算标准图像每个像点的灰度值, 直至所有像点计算完毕。

### 3 实验与分析

#### 3.1 变焦距镜头畸变模型参数估计

为实现变焦距航空摄像机图像自动校正算法, 需要在实验室对摄像机进行标定得到镜头的畸变参数。采用  $35 \times 35$  个方格的平面棋盘图案作为摄像机拍摄的靶标进行标定。图案大小为  $350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ , 实验采用的摄像机焦距从  $5 \text{ mm}$  到  $100 \text{ mm}$ , 选择 13 个离散焦距值:  $5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 \text{ mm}$ , 分别对每个焦距值拍摄一幅靶标图像, 采用 2.2 节的畸变模型参数估计算法求解该焦距对应的畸变参数, 重复计算 20 次取平均值, 作为参数估计结果。得到畸变系数  $k_1$  与焦距  $F$  的关系如图 4 所示; 得到畸变中心坐标  $(u_0, v_0)$  与焦距  $F$  的关系如图 5 所示。

从图 4 可以看出, 当  $F$  为  $5.8 \text{ mm}$  到  $42.5 \text{ mm}$  时,  $k_1$  为负值, 对应桶形畸变; 当  $F$  为  $42.5 \text{ mm}$  到  $100 \text{ mm}$  时,  $k_1$  为正值, 对应枕形畸变。对各焦距值  $F$  对应的畸变系数  $k_1$  进行曲线拟合, 发现畸变系数  $k_1$  与  $F$  存在以下函数关系:

当  $5.8 \text{ mm} \leq F \leq 20 \text{ mm}$  时

$$k_1(F) = \rho \cdot F^2 + \sigma \cdot F + \tau, \quad (27)$$

式中  $\rho = 1.369 \times 10^{-10}, \sigma = -1 \times 10^{-9}, \tau = -1.108 \times 10^{-7}$ 。

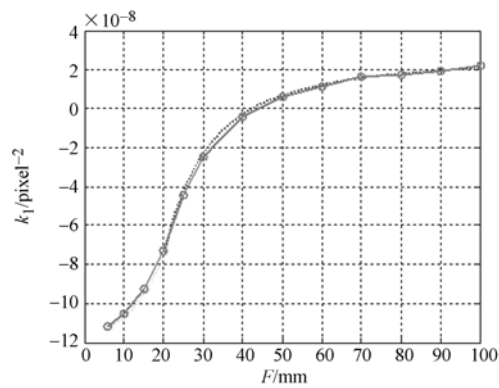


图 4 镜头畸变系数与焦距的关系

Fig. 4 Relationship between distortion coefficient and focal length

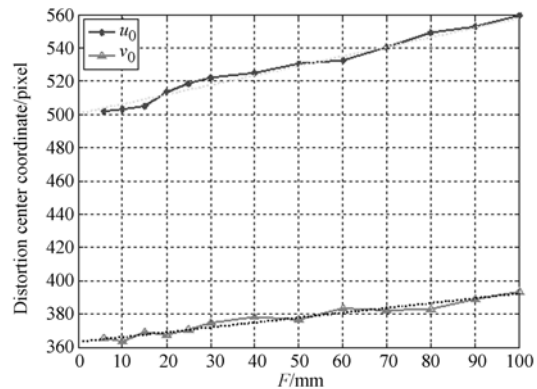


图 5 畸变中心坐标与焦距的关系

Fig. 5 Relationship between focal length and distortion center coordinates

当  $20 \text{ mm} \leq F \leq 100 \text{ mm}$  时

$$k_1(F) = \frac{\delta}{(F + \eta)^2} + \psi, \quad (28)$$

式中  $\delta = -5.245 \times 10^{-5}, \eta = 2.768, \psi = 2.564 \times 10^{-8}$ 。

从图 5 可以看出, 当焦距变化时畸变中心基本上位于一条直线上, 畸变中心的像素坐标  $(u_0, v_0)$  与焦距  $F$  的关系可近似用下式表示:

$$u_0(F) = \lambda_1 \cdot F + \mu_1, v_0(F) = \lambda_2 \cdot F + \mu_2. \quad (29)$$

式中  $\lambda_1 = 0.5722, \mu_1 = 500.4904, \lambda_2 = 0.2897, \mu_2 = 363.5341$ 。

利用不同焦距对应的畸变中心坐标值构造查找表。实际校正时通过传感器测量得到摄像机的实际工作焦距, 再通过查表得到该焦距值相邻两个焦距值对应的畸变中心坐标, 采用线性插值方

法计算出该焦距值对应的畸变中心坐标 ( $u_0$ ,  $v_0$ ), 利用拟合公式 (27)~(28) 计算得到该焦距值对应的畸变系数值  $k_1$ , 同时根据航姿测量系统、GPS 和光电平台内部的角度传感器记录的摄像机位置和姿态信息计算出摄像机成像时的外方位元素, 将结果代入上述几何校正算法中, 可同时校正变焦距镜头引起的非线性畸变和倾斜摄影引起的梯形畸变。

### 3.2 变焦距斜视标准图库校正实验

为便于分析和评价几何校正算法的精度和效果, 将航空摄像机及其搭载的光电平台安装在升降机构上, 在不同高度、不同姿态角、不同焦距下对地面棋盘靶标拍摄图像, 作为校正实验的标准图库, 如图 6 所示。实验将光电平台的上表面制作成水平基准面, 将 NAV440CA-202 系列 GPS-AHRS (Global Position System-Attitude and Heading Reference System) 组合惯性导航系统安装于该基准面上, 该惯导可以测量出平台相对于 NED 坐标系的俯仰角、横滚角和航向角, 其中俯仰角和横滚角的测量精度小于  $0.4^\circ$ , 双天线 GPS 辅助测量航向角的均方差小于  $0.75^\circ$ , AHRS 惯导测量姿态角数据软件界面如图 7 所示。将 Geo Explorer 3000 系列 GPS 接收机安装于基准面上测量平台位置, 将测量平台及其在地面投影点的大地高进行相减, 可得到平台相对地面的高度。该接收机支持 RTCM (Radio Technical Commission For Maritime) 和 CMR (Compact Measurement Record) 实时差分修正, 能够获得实时亚米级定位精度, 采用 Trimble DeltaPhase 技术处理后可获得  $0.1\text{ m}$  的定位精度。摄像机的实际工作焦距值通过摄像机调焦机构上相应传感器测量得到, 其测量精度小于  $0.2\text{ mm}$ , 摄像机相对平台的方位角 (azimuth, 简称 A) 和高低角 (elevation, 简称 E) 可通过平台内部的角度传感器测量得到, 测量精度小于  $0.1^\circ$ , 方位角 A、高低角 E 和焦距 F 的测量结果如图 8(a) 所示。角度传感器的高低角和 AHRS 惯导的俯仰角零位均以水平面为基准进行校准, AHRS 惯导的航向角零位与角度传感器的方位角零位安装严格一致。

采用上述实验装置采集 15 幅不同焦距、不同姿态角、不同光照强度以及复杂背景下拍摄的靶标图像, 它们均为  $1\ 024\text{ pixel} \times 768\text{ pixel}$  的 RGB 类型图像。在实验测试平台上对这些图像进行几

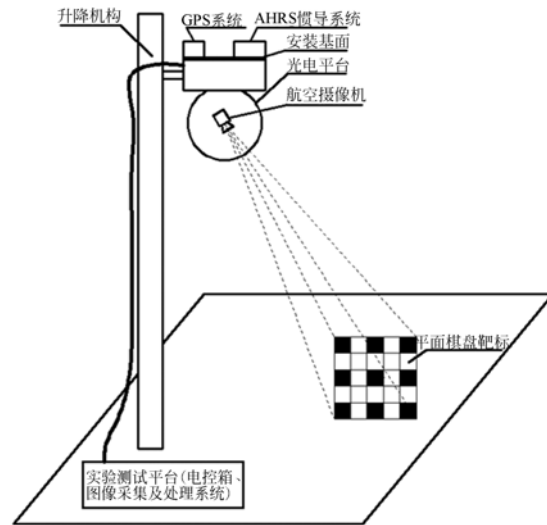


图 6 靶标畸变图像校正实验装置

Fig. 6 Experimental set-up of distortion correction for template images

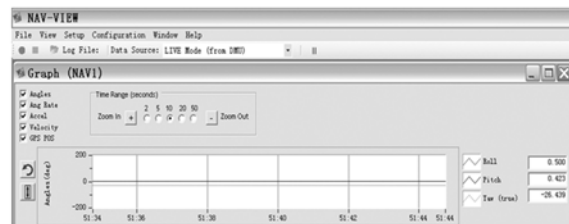


图 7 拍摄图 8(a) 图像时 AHRS 惯导输出的姿态测量数据

Fig. 7 Attitude data of AHRS inertial navigation system in capturing Fig. 8(a)

何校正, 部分图像校正结果如图 8 所示, 第一行为原始图像, 第二行为校正图像。为便于观察图像几何变形及其校正情况, 在图 8(b)~(h) 中将摄像机的方位角 A、高低角 E 和焦距值 F 等测量数据显示字符消隐。

从图 8 中可以看出, 在不同焦距和姿态下拍摄的图像中, 由斜视摄影引起的梯形畸变和镜头本身引起的桶形畸变 (图 8(a), (b) 中视觉上较明显) 或枕形畸变 (图 8(g), (h) 中较明显) 均得到了有效校正, 文中校正算法对不同光照 (如图 8(a)~(d), (h) 所示) 和复杂背景 (如图 8(c), 所示) 具有较强的适应性和鲁棒性。

为定量分析和评价校正精度和效果, 采用均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 和峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 作为衡量指标用于评价校正图像质量。RMSE 表

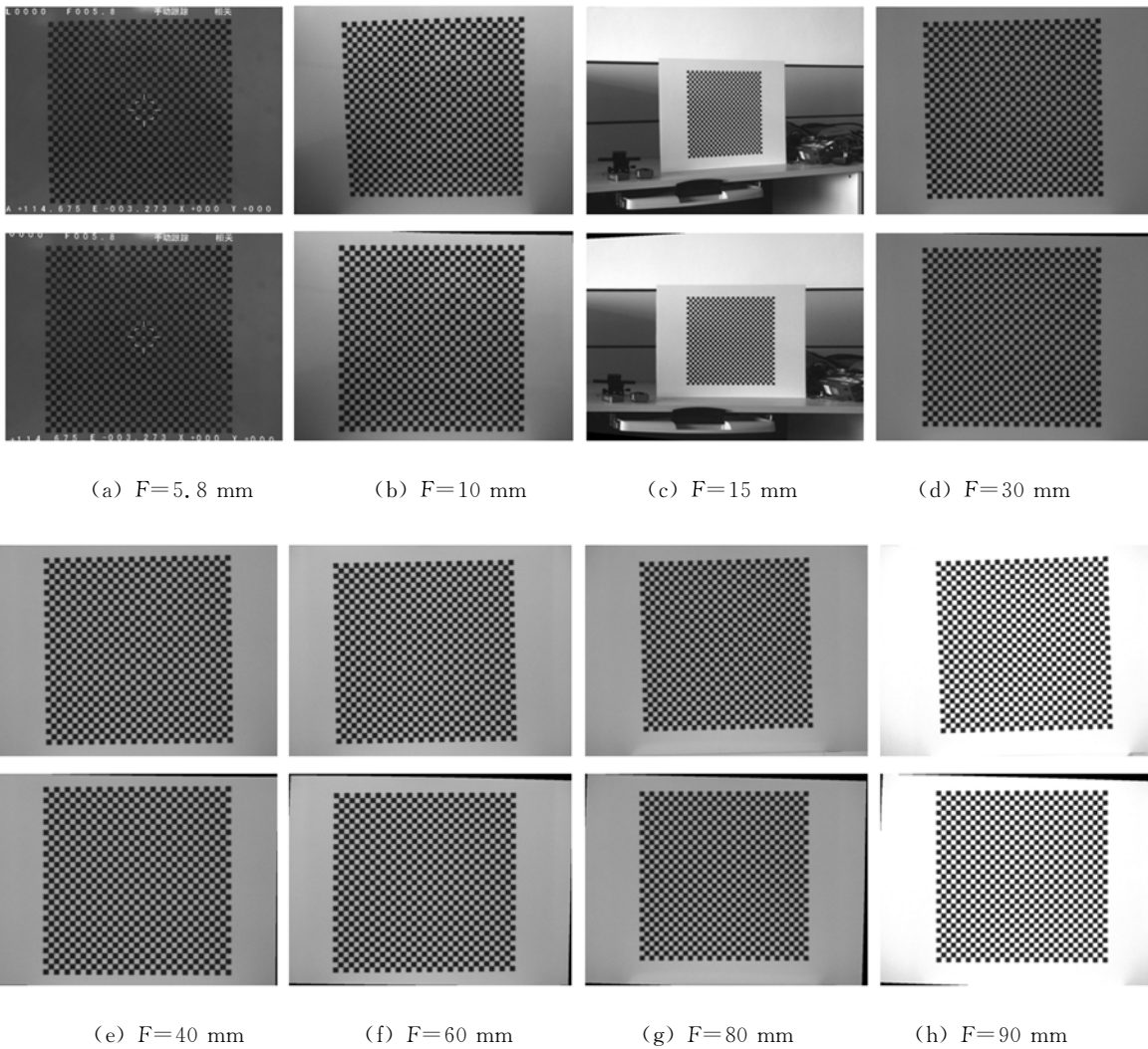


图 8 不同焦距、不同姿态、不同光照及复杂背景下拍摄靶标畸变图像的校正结果

Fig. 8 Distortion correction results of template images captured with different focal lengths, attitudes, illuminations and under complex backgrounds

示校正图像检验点位置  $(u_p, v_p)$  和理想无畸变图像检验点位置  $(u_b', v_b')$  之间的距离,可按式计算:<sup>[14]</sup>

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(u_{ip} - u_{ib}')^2 + (v_{ip} - v_{ib}')^2]}, \quad (30)$$

式中:  $n$  为检验点个数;  $du_i = u_{ip} - u_{ib}'$  为第  $i$  个检验点的列残差;  $dv_i = v_{ip} - v_{ib}'$  为第  $i$  个检验点的行残差。

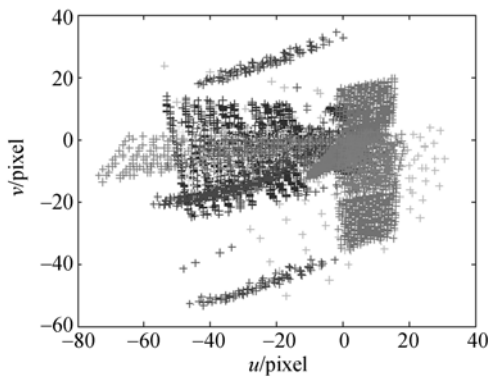
给定一幅大小为  $w \times h$  的数字图像  $f_{u,v}^0$  和参考图像  $f_{u,v}$ , PSNR 按下式计算<sup>[26]</sup>:

$$PSNR = 10 \lg \left[ (2^n - 1)^2 / \left[ \frac{1}{\omega \times h} \sum_1^w \sum_1^h (f_{u,v} - f_{u,v}^0)^2 \right] \right], \quad (31)$$

式中  $(2^n - 1)^2$  为图像中最大可能的信号值平方,  $n$  为每个像素的比特数。

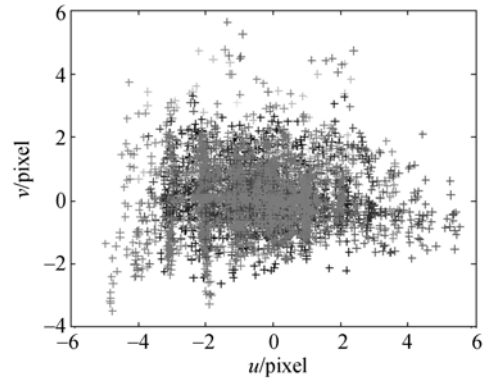
采用 Harris 角点检测算法提取校正前后图像中棋盘图案角点作为检验点,采用文献[27]的方法逆向重建得到理想无畸变图像作为参考图像,然后根据式(30)计算上述 15 幅图像校正前后的行、列残差,如图 9(a)~(b)所示。同时,给出文献[13]中基于张正友摄像机标定法和投影变换模型的校正结果,以及文献[28]中先校正镜头非线性径向畸变再校正透视畸变的两步法的校正结果作为对比,如图 9(c)~(d)所示。

从图 9 中可以看出,上述几种方法校正后,图像各检验点的行、列残差明显减小,本文方法和文献[13]方法校正后行、列残差范围略小于文献



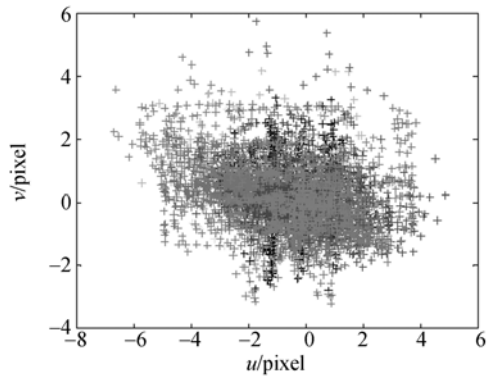
(a) 畸变图像中各检验点的行、列残差

(a) Row and column residual errors in distorted images



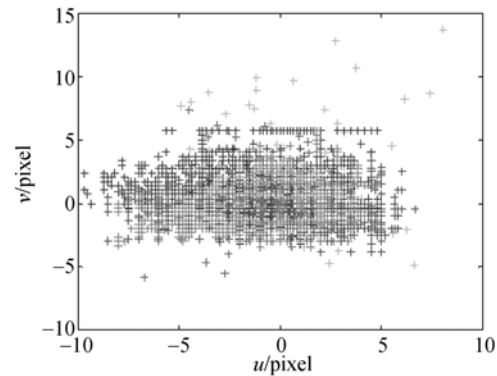
(b) 本文方法校正图像的行、列残差

(b) Row and column residual errors in undistorted images using proposed method



(c) 文献[13]方法校正图像的行、列残差

(c) Row and column residual errors in undistorted images using Ref. [13] method



(d) 文献[28]校正图像的行、列残差

(d) Row and column residual errors in undistorted images using Ref. [28] method

图 9 几种方法校正靶标畸变图像前后的行、列残差

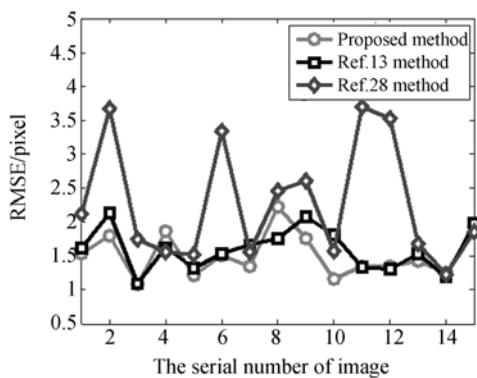
Fig. 9 Row and column residual errors of different methods in distorted and undistorted template images

[28]方法。为进一步定量比较上述几种方法的校正效果,计算各幅校正图像的 RMSE 和 PSNR,结果如图 10 所示。计算各幅图像的平均 RMSE、平均 PSNR 及运行时间,结果如表 1 所示。从图 10 和表 1 可以看出,在 RMSE 指标上,本文算法比文献[28]方法平均降低了 38.96%,相比文献[13]方法降低了 3.96%;在 PSNR 指标上,本文算法比文献[28]方法平均提高了 1.31%,比文献[13]方法平均提高了 0.33%。本文算法的 RMSE 和 PSNR 均优于文献[28]算法。这是因为本文算法将梯形失真校正和镜头畸变校正结合在一起,减少了一次双线性插值和坐标转换过程中引起的误差和类似低通滤波引起的图像模糊,

能最大程度地保护校正图像的质量。另外,本文算法的运算速度也有较大的提高,与文献[28]算法相比运算时间减少了 3.650 s。实验测试平台的 CPU 主频为 2.6 GHz,内存容量为 2G,各算法的测试程序均在 VC6.0 SP6 环境下编译完成。与文献[13]算法相比,本文算法的 RMSE 和 PSNR 指标也有一定提高,这说明本文采用的单参数除式模型能够有效校正镜头畸变,对于变焦距镜头,其校正精度略高于文献[13]方法。由于除式模型只包含一个畸变系数  $k_1$ ,模型最高次数为 2 次,计算量较小,因此校正速度也有小幅调高,平均提高了 1.099 s。

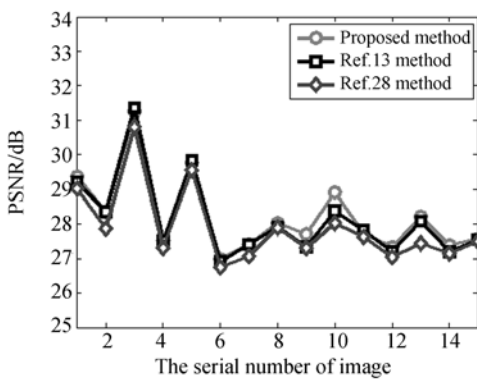
文献[13]中基于摄像机标定的校正方法采用

Brown 提出的多项式镜头畸变模型,引入的待求解畸变参数过多,各参数之间容易发生耦合,很难发现各畸变参数与焦距之间的规律,只要焦距发生变化,就需要重新进行繁琐耗时的标定,工作量大,不适合批量生产的变焦距航空摄像机的几何畸变校正。而本文算法不需要进行文献[13]中繁杂耗时的摄像机标定过程,同时采用离线标定与在线校正相结合的方法也避免了文献[28]中对直线特征的依赖性,在校正速度和自动化实现方面有了明显提高。



(a) 各校正图像的均方根误差

(a) RMSE of undistorted template images



(b) 各校正图像的峰值信噪比

(b) PSNR of undistorted template images

图 10 本文算法与文献[13],[28]的算法对上述 15 幅图像校正后的 RMSE 与 PSNR

Fig. 10 RMSEs and PSNRs of 15 template images using Ref. [13], Ref. [28] and proposed methods

表 1 本文算法和文献[13],[28]算法的实验结果对比  
Tab. 1 Result comparison between Refs. [13], [28] methods and proposed method

校正方法	RMSE/pixel	PSNR/dB	运行时间/s
本文算法	1.550 0	28.363 3	13.515 <sup>a</sup>
文献[13]算法	1.613 9	28.270 7	14.614 <sup>b</sup>
文献[28]算法	2.539 2	27.996 3	17.165 <sup>c</sup>

a:包括在线校正不包括离线估计若干焦距值对应的畸变参数的时间;b:不包括文献[13]算法中摄像机标定的时间;c:包括文献[28]算法中分步校正非线性畸变和透视畸变的时间,不包括优化搜索非线性径向畸变参量和透视畸变参量的时间。

### 3.3 实际航拍图像的校正及精度计算

为验证本文几何校正算法的有效性和正确性,采用上述航空变焦距摄像机进行了飞行实验,选取其中 3 个不同焦距值拍摄的 3 幅图像(如图 11(a)~(c)所示),图像大小为 1024 pixel×768 pixel,拍摄每幅图像时光电平台和飞机的位置姿态参数及测量精度如表 2 所示。根据这些位置姿态数据可以计算出摄像机的外方位元素,将 3.1 节得到的镜头畸变模型参数代入上述算法中,对各幅图像进行几何校正。设置地面像元分辨率为 1.0 m,得到校正图像如图 11(d)~(f)所示。从图 11 中可以看出,本文算法有效地校正了飞机航向角和平台方位角引起的旋转变形,恢复了图像中河流和桥梁的正确方位,这与图 12(a)中同一地区正射校正后的高分辨率卫星图像是一致的;同时,由平台高低角,载机俯仰角和横滚角引起的梯形畸变也得到了有效校正,图 11(a),(b)中十字丝指向处桥梁和河岸公路之间的夹角已由畸变图像的非直角变为校正图像中的近似直角,这与实际情况较符合(与图 12(a)中的卫星正射图像一致)。

上述实验表明在有雾的恶劣天气情况下,本文算法仍能够有效地校正斜视摄影引起的桥梁、公路及田地的梯形失真和变焦距镜头引起的不同程度的桶形畸变,再一次证明了本文算法的有效性和鲁棒性。由于航空视频图像序列的相邻两帧图像之间存在较大重叠率,校正后图像边缘处的黑边可通过相邻图像的重叠区域覆盖消除。

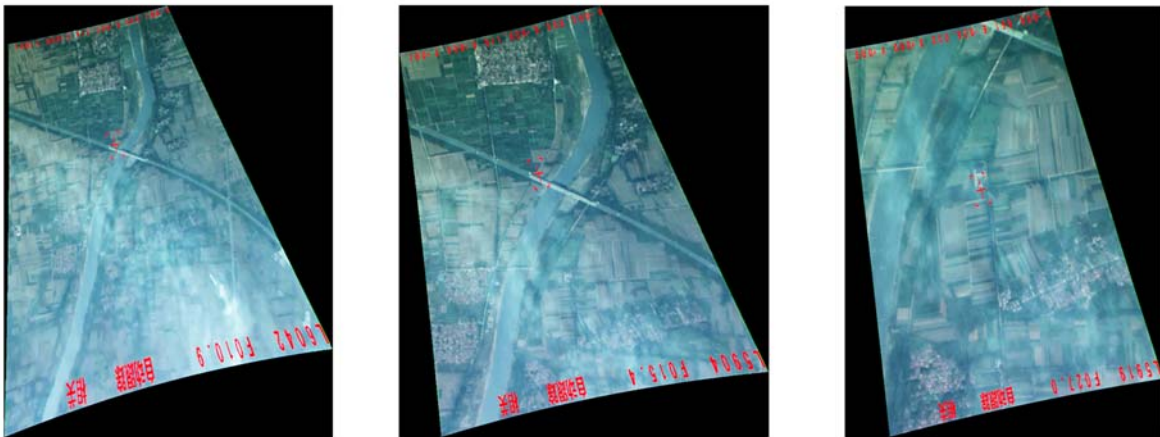
表 2 摄像机拍摄各幅图像时的位置姿态数据

Tab. 2 Position and attitude data for captured images

	焦距/mm	方位角 /(°)	高低角 /(°)	纬度 /(°)	经度 /(°)	高度 /m	俯仰角 /(°)	横滚角 /(°)	航向角 /(°)
图 11(a)	10.9	-1.939	-27.114	42.594 67	122.895 73	2 498	2.8	0.9	190.65
图 11(b)	15.4	-3.993	-28.119	42.593 26	122.895 67	2498.2	3.2	-1.6	191.53
图 11(c)	27.0	-0.851	-26.032	42.584	122.895 55	2498.6	1.9	0.1	190.94
测量精度	0.2	0.1	0.1	0.000 15	0.000 15	15	0.4	0.4	0.75



(a) F=10.9 mm 时的原始航空图像 (b) F=15.4 mm 时的原始航空图像 (c) F=27.0 mm 时的原始航空图像  
 (a)Original aerial image with F=10.9 mm (b)Original aerial image with F=15.4 mm (c)Original aerial image with F=27.0 mm



(d) F= 10.9 mm 时的校正图像:  $k_1 = -1.056 \times 10^{-7}$ ,  $(u_0, v_0) = (503.44, 364.66)$   
 (e) F= 15.4 mm 时的校正图像:  $k_1 = -9.243 \times 10^{-8}$ ,  $(u_0, v_0) = (505.68, 369.48)$   
 (f) F=27.0 mm 时的校正图像:  $k_1 = -3.664 \times 10^{-8}$ ,  $(u_0, v_0) = (519.88, 372.40)$   
 (d)Corrected image with F=10.9 mm (e)Corrected image with F=15.4 mm (f)Corrected image with F=27.0 mm

图 11 航空变焦距斜视图像的几何校正

Fig. 11 Geometric correction of aerial zoom oblique images

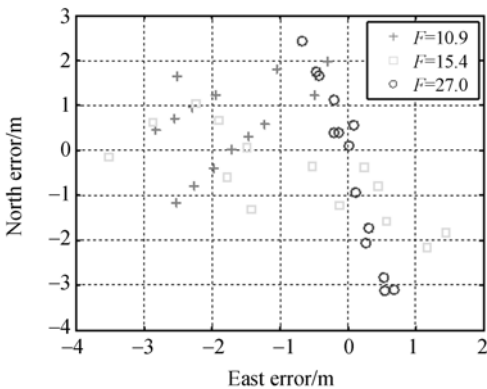
为验证几何校正结果的准确性并计算图像校正误差,选择 SPOT6 卫星提供的同一地区正射校正后的高分辨率卫星图像为参考图像。在上述各幅图像和参考图像中分别设置 14 个检验点,其中图 11(b)对应的正射投影图像及其检验点位置分布如图 12(a)所示。由于单幅航空图像地面覆

盖范围较小,一般为 1~2 km,对于单幅图像而言,通过野外实测检验点坐标的验证方法简单易行,便于操作,对于局部区域的验证有一定的优势。因此本文利用美国 Trimble 公司的 RTK-GPS 采集上述图像中各检验点的大地坐标作为名义值,对几何校正精度进行验证。该仪器的水

平测量精度为 0.1 m, 根据式(3)~(5)将各检验点的大地坐标转换为地图坐标  $(x_{m0i}, y_{m0i})$ 。同时, 根据各检验点在校正后图像(图 11(d)~(f))中的像素坐标, 利用式(25)计算出各检验点的地图坐标  $(x_{m1i}, y_{m1i})$ , 将该计算值与通过 GPS 测量得到的地图坐标进行比较, 得到各检验点在北, 东方向的误差分别为  $\Delta x_{mi} = x_{m1i} - x_{m0i}, \Delta y_{mi} = y_{m1i} - y_{m0i}$ , 其中  $i=1, 2, \dots, n, n$  为检验点个数, 根据该式计算出各检验点在北, 东方向的误差如图 12 (b) 所示。



(a) SPOT6 提供的参考正射投影图像(14 个检验点)  
(a) Reference orthoimage from SPOT6 satellite (14 checkpoints)



(b) 校正后各幅图像中检验点的误差分布  
(b) Error distribution of checkpoints after correction

图 12 检验点位置分布及其误差计算

Fig. 12 Distribution of checkpoints and their error calculation

采用 RMSE 作为校正精度的衡量指标。定义北方向均方根误差 NRMS、东方向均方根误差 ERMS 和总的均方根误差 RMSE 分别为

$$NRMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_{mi}^2}, ERMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta y_{mi}^2}, \quad (32)$$

$$RMSE = \sqrt{NRMS^2 + ERMS^2}. \quad (33)$$

采用式(32), (33)计算得出第 1 幅图像在北、东方向的校正均方根误差分别为 1.10, 1.95 m, 总的均方差为 2.24 m (相当于 2.24 pixels); 第 2 幅图像在北、东方向的校正均方根误差分别为 1.09, 1.71 m, 总的均方差为 2.03 m; 第 3 幅图像在北、东方向的校正均方根误差分别为 1.87, 0.39 m, 总的均方差为 1.91 m。上述几何校正算法校正不同焦距所拍摄图像的总均方根误差基本相同(约为 2 m), 且随着焦距的增大略有减小。因为随着焦距的增大, 镜头的桶形畸变减小, 校正后的残余变形相对也较小。实际航拍图像的校正误差略大于 3.2 节对地面靶标图像的校正误差, 分析原因如下: (1) 实际航拍图像存在由于飞机及平台振动引起的畸变; (2) 上述几何校正模型假设单幅图像对应地面区域平坦, 实际航拍图像中存在由于地形起伏引起的变形。

上述图像校正实验在 PC 机上实现, CPU 主频为 3.3 GHz, 内存容量为 4G, 各算法的测试程序在 VC6.0 SP6 环境下编译完成, 对上述 3 幅 1 024 pixel × 768 pixel 可见光 RGB 类型图像进行校正平均需要 9.82 s。由于不需要与参考图像进行配准和采集地面控制点数据, 上述算法大大减少了校正时间, 且计算每个像素的正射投影位置具有并行性, 可以很方便地映射到现场可编程门阵列(Field Programming Gate Arrays, FPGA)中, 通过硬件并行计算在速度上的优势来满足实时性系统的处理需求, 从而实现机上自动在线实时校正。

## 4 结 论

本文提出一种同时校正航空变焦距面阵 CCD 摄像机斜视梯形失真和镜头非线性畸变的方法。该方法采用地面离线标定镜头畸变参数和机上在线校正相结合的方式, 在地面利用单参数除式模型, 采用变步长优化搜索方法, 求解出若干焦距下平面棋盘靶标图像的畸变系数和畸变中心坐标, 通过曲线拟合得到畸变参数与焦距之间的

经验公式或构造畸变参数查找表。在飞行试验中根据实际工作焦距值通过上述经验公式或查找表方法,得到该焦距值对应的畸变参数,结合飞机和光电平台的位置姿态参数,计算出摄像机坐标系与地图坐标系之间的转换关系,采用投影变换方法和除式畸变校正模型一次性校正图像的斜视变形和非线性畸变。在地面对不同焦距和位置姿态下拍摄的靶标畸变图像进行校正,与基于摄像机标定和构象模型的校正方法以及分步校正斜视变形和镜头畸变的结果进行比较。结果显示:本文

算法的校正精度分别提高了 3.96% 和 38.96%, 峰值信噪比和校正速度也有一定程度提高。对实际航空变焦斜视图像的校正结果表明,当飞行高度为 2 500 m 时,图像几何校正的均方误差约为 2 m,较好地满足了后续图像拼接和目标定位跟踪的需求。本文对地形起伏和载机振动引起的图像变形未作分析,下一步的工作将引入所拍摄地区的数字高程信息(Digital Elevation Model, DEM)和振动因素,进一步校正由地形起伏和振动引起的像点位移。

### 参考文献:

- [1] 田铁印,王红. 长焦距大口径连续变焦距光学系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2369-2374.  
TIAN T Y, WANG H. Optical zoom system with long focal length and large aperture[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2369-2374. (in Chinese)
- [2] 兰海滨,王平,龙腾. 图像拼接中相机镜头非线性畸变的校正[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1197-1201.  
LAN H B, WANG P, LONG T. Nonlinear aberration correction of lens in image mosaic [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1197-1201. (in Chinese)
- [3] 李静宇,王延杰. 基于子空间的目标跟踪算法研究[J]. 液晶与显示, 2014, 29(4): 617-619.  
LI J Y, WANG Y J. Subspace based target tracking algorithm[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(4): 617-619. (in Chinese)
- [4] 朱倩,李霞,李少峰. 基于有理函数模型和多项式模型的天绘一号影像几何校正精度评估[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(2): 111-114.  
ZHU Q, LI X, LI SH F. Accuracy assessment of TH-1 satellite image geometric correction using rational function model and polynomial model [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2013, 43(2): 111-114. (in Chinese)
- [5] 库向阳,李崇贵,姚硕强. 遥感图像几何校正的支持向量机算法研究[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2011, 38(5): 121-128.  
SHE X Y, LI CH G, YAO W Q. Research on the geometric correction algorithm for the remote sensing image by a support vector machine [J]. *Journal of Xidian University*, 2011, 38(5): 121-128. (in Chinese)
- [6] 张谦,贾永红,吴晓良,等. 一种带几何约束的大幅面遥感影像自动快速配准方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2014, 39(1): 17-21.  
ZHANG Q, JIA Y H, WU X L, et al.. A rapid image registration method based on restricted geometry constraints for large-size remote sensing image [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(1): 17-21. (in Chinese)
- [7] ZHOU G Q. Near real-time orthorectification and mosaic of small UAV video flow for time-critical event response [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(3): 739-746.
- [8] 胡春晖,颜昌翔,邵建兵. 指向镜低频正弦振动下遥感器图像的畸变及校正[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0428002.  
HU CH H, YAN CH X, SHAO J B. Pointing mirror low frequency sine oscillation induced remote sensor Image distortion and correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0428002. (in Chinese)
- [9] 张峰,江桦,闫隰,等. 锥束 CT 圆轨迹半覆盖扫描的几何校正[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1659-1665.  
ZHANG F, JIANG H, YAN B, et al.. Geometric calibration for half-cover scanning incircular cone-beam CT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1659-1665. (in Chinese)

- [10] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.
- [11] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 11(22): 1330-1334.
- [12] 徐芳,刘晶红,王宣. 基于标定的CCD图像畸变校正方法研究[J]. *液晶与显示*, 2013, 33(9): 2623-2626.
- XU F, LIU J H, WANG X. The study on distortion correction method for CCD image based on calibration[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 33(9): 2623-2626. (in Chinese)
- [13] XIANG H T, TIAN L. Method for automatic georeferencing aerial remote sensing (RS) images from an unmanned aerial vehicle (UAV) platform [J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 108: 104-113.
- [14] 陈天飞,马孜,吴翔,等. 摄像机镜头畸变的鲁棒校正方法[J]. *控制与决策*, 2013, 28(3): 461-465.
- CHEN T F, MA Z, WU X, *et al.*. Robust correction method for camera lens distortion[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(3): 461-465. (in Chinese)
- [15] 刘超,李醒飞,郭敬滨,等. 基于共线点的镜头畸变校正方法[J]. *计算机应用*, 2013, 33(12): 3555-3558.
- LIU CH, LI X F, GUO J B, *et al.*. Lens distortion correction method based on collinear points [J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, 33(12): 3555-3558. (in Chinese)
- [16] AI S J, WANG X, MA M CH, *et al.*. A method for correcting non-linear geometric distortion in ultra-wide-angle imaging system [J]. *Optik*, 2013 (124): 7014-7021.
- [17] 张艳珍,欧宗瑛,薛斌亮. 一种基于斜率的摄像机畸变校正方法[J]. *小型微型计算机系统*, 2002, 23(5): 625-627.
- ZHANG Y ZH, OU Z Y, XUE B D. Error correction method based on slope for camera radial distortion [J]. *Mini-micro System*, 2002, 23(5): 625-627. (in Chinese)
- [18] 刘丹,刘学军,王美珍. 由灭点进行径向畸变的自动校正[J]. *中国图象图形学报*, 2014, 19(3): 407-413.
- LIU D, LIU X J, WANG M ZH. Automatic approach of lens radial distortion correction based on vanishing points [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(3): 407-413. (in Chinese)
- [19] 徐嵩,孙秀霞,刘树光,等. 摄像机畸变标定的模型参考逼近方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 231-242.
- XU S, SUN X X, LIU SH G, *et al.*. Model reference approaching method of camera distortion calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 231-242. (in Chinese)
- [20] 苏成志,王恩国,郝江涛,等. 平面几何测量中的图像畸变校正[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 161-167.
- SU CH ZH, WANG EN G, HAO J T, *et al.*. Distortion correction for images in planar metrology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 161-167. (in Chinese)
- [21] 胡浩,梁晋,唐正宗,等. 显微立体视觉小尺度测量系统的标定[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 1985-1994.
- HU H, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Calibration of stereo microscope measurement systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 1985-1994. (in Chinese)
- [22] FAISAL B, MATTHEW N D. Automatic radial distortion estimation from a single image[J]. *J. Math Imaging Vis*, 2013, 45: 31-45.
- [23] FITZGIBBON A W. Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion [C]. *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001: 125-132.
- [24] CAI J H, STAN M. Automatic curve selection for lens distortion correction using Hough transform

- energy[C]. 2013 *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, Tampa, FL, 455-460
- [25] GOLJAN M, FRIDRICH J. Estimation of lens distortion correction from single images [C]. *Proc. SPIE 9028, Media Watermarking, Security, and Forensics 2014*, 90280 N.
- [26] MICHAEL S B, YAU C T. Geometric and shading correction for images of printed materials using boundary[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2006, 15(6): 1544-1554.
- [27] PARK J H, BYUN S CH, LEE B U. Lens distortion using iudeal image coordinates [J]. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 2009, 55(3): 987-991.
- [28] 汪贵平, 王会峰, 刘盼芝, 等. 特征平行直线的成像畸变现场校正 [J]. *光子学报*, 2014, 43(1): 0111001.
- WANG G P, WANG H F, LIU P ZH, *et al.*. A distortion field-calibrating method based on feature parallel lines of image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(1): 0111001. (in Chinese)

## 作者简介:



周前飞(1989—),男,湖南邵阳人,博士研究生,2011年于中国地质大学(武汉)获得学士学位,主要从事航空光电成像畸变校正技术方面的研究。E-mail:wgzqfei@163.com

## 导师简介:



刘晶红(1967—)女,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事机载光电成像测量设备方面的研究。E-mail:liu1577@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)