

基于相机内外参数的机载光电平台图像几何校正

李铁成^{1,2,3}, 刘晶红^{1,3}, 周前飞^{1,2,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学 材料学院, 北京 100049;

3. 中国科学院 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:传统机载光电平台图像几何校正依赖于控制点,实时性较差,不利于实现自动校正。该文在缺少控制点的情况下,通过相机内、外参数对机载光电平台原始图像进行几何校正。建立了正确的几何数学模型,采用 Matlab 的 Camera Calibration Toolbox 工具箱对相机进行标定获得相机内参数,采用惯性导航系统提取相机外参数,依据提取的内、外参数对图像的几何畸变进行校正。利用获得的实验数据对由同一相机拍摄的图像进行校正验证,实验结果表明,畸变图像得到了很好的还原,各姿态角测量精度为 0.05° 时,图像校正均方差约为 0.996 3 像素。研究表明,此方法准确、快速、直观,可移植性及实用性强。

关键词:航空光电成像;几何畸变校正;内参数;外参数;摄像机标定

中图分类号:TM282

文献标识码:A

Geometric Correction of Airborne Optoelectronic Platform Image Based on Internal and External Parameters

LI Tiecheng^{1,2,3}, LIU Jinghong^{1,3}, ZHOU Qianfei^{1,2,3}

(1. Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. College of Material Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Lab. of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The traditional geometric correction of airborne optoelectronic platform relies on the control points and is not real-time, and is not benefit for realizing automatic correction. This work realizes the geometric correction process of distorted image completed by internal and external parameters when lacking control points. Based on the MATLAB camera calibration toolbox and inertial navigation systems, the projection matrix consisting of the camera's internal and external parameters is obtained. The verification of the image's correction is captured by the same camera, using experimental data which are already made. The experimental results indicate that the distorted image has been effectively restored. The mean square deviation of image correction is about 0.996 3 pixels when the accuracy of attitude angle is 0.05° . Overall, the proposed method is time-efficient, direct, accurate, and easy to achieve transplanation in hardware. This method has fine validity in engineering applications.

Key words: airborne optoelectronic imaging; geometric distortion correction; internal parameter; external parameter; camera calibration

0 引言

机载光电平台在获取图像的过程中,由于其姿态、高度、速度及地球自转等原因导致图像发生几何畸变^[1]。现有的机载光电平台图像几何校正主要有两种方法^[2-3]:

1) 利用地面控制点进行多项式拟合。

2) 使用底图配准。

第1)种方法需要足够数量且分布良好的地面控制点。实际情况下,某些地面控制点难以获取;第2)种方法需要能覆盖航摄范围的大比例尺地形图,对于人口相对稀少的草原、荒漠、边境等地区获得大比例尺地形图的可能性很小^[4]。以上两点成为机载

收稿日期:2015-05-04

基金项目:吉林省重大科技攻关基金资助项目(11ZDGG001);装备预研基金资助项目(402040203);国家林业公益性行业科研基金资助专项(201204515)

作者简介:李铁成(1986-),男,吉林省公主岭市人,硕士生,主要从事基于 FPGA 的图像畸变校正的研究。通信作者: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与测量技术的研究。E-mail:liu1577@126.com。

光电平台图像处理应用的障碍,为了使机载光电平台图像能在无控制点情况下尽可能真实地反映地形地貌,必须解决无控制点情况下的机载光电平台图像的几何校正^[5-7]。

基于相机内、外参数对机载光电平台图像的几何畸变进行校正是一种不依赖于控制点及地形图的校正方法,利用 Matlab 的 Camera Calibration Toolbox 工具箱对相机进行标定获取相机内参数^[8-9],利用惯导系统提取相机外参数^[10],根据相机的构像方程建立几何校正数学模型,构造校正算法对图像进行校正。

1 涉及的坐标系

基于相机内外参数的机载光电平台图像几何校正依赖于坐标系统与坐标变换。该方法涉及到的坐标系统有图像像素坐标系、图像物理坐标系、相机坐标系、机体坐标系及世界坐标系^[4]。

图 1 为图像像素坐标系,符合左手定则,一般选取像素为单位。

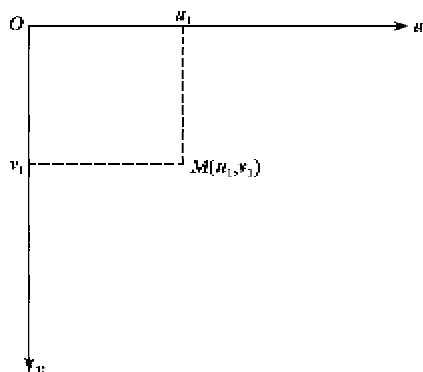


图 1 图像像素坐标系

图 2 为图像物理坐标系,符合右手定则,可选取毫米等物理单位。

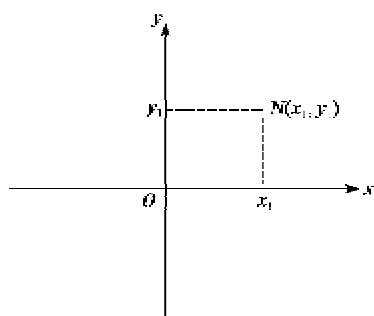


图 2 图像物理坐标系

相机坐标系即传感器坐标系如图 3 所示,其原点 S 在相机镜头光心处, Z_s 轴的正向为摄影方向的反方向, X_s 方向按右手定则确定。

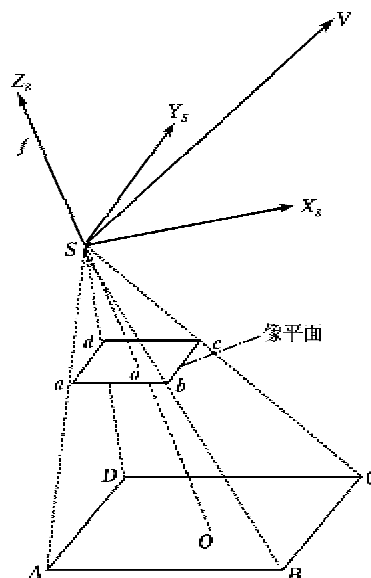


图 3 相机坐标系

机体坐标系 $P-X_pY_pZ_p$ 与飞行器固连(见图 4),其原点位于飞行器的质心,坐标轴的方向依照附加在其上的惯导所处的坐标系。

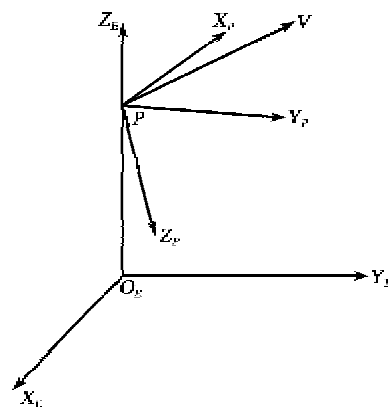


图 4 机体坐标系和世界坐标系

世界坐标系 $O_E-X_EY_EZ_E$ 与地球固连(见图 4),原点 O_E 一般取飞机质心在地面上的投影点, Y_E 轴在水平面内,指向目标的方向为正; Z_E 轴与地面垂直,向上为正; X_E 轴按右手定则确定。

通过相机的标定可确定由图像像素坐标系到图像物理坐标系的转换关系,而相机坐标系-机体坐标系-世界坐标系之间的转换关系则由图像采集盒及惯性导航系统获得。

2 几何校正关键算法

2.1 内参数矩阵

对于图像物理坐标系和相机坐标系间的转换,可根据理想针孔成像模型,设在相机坐标系中的一个物点 Q 的坐标为 (X, Y, Z) ,在图像物理坐标系中

的坐标为 $q(x, y)$, f 为焦距, 则有

$$\begin{cases} x = f \times \frac{X}{Z} \\ y = f \times \frac{Y}{Z} \end{cases} \quad (1)$$

图像平面 q 点的物理坐标 (x_d, y_d) 转换为像素坐标 (u, v) 时, 由于图像平面与光轴交点为图像物理坐标系的原点, 左上角视为图像像素坐标系的原点, 则二者关系为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \mathbf{q}' = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为内参数矩阵; c_x 和 c_y 为图像标定中心像素坐标, 即光轴与图像平面的交点坐标, 称为主点; $\gamma=0$ 为 u 轴和 v 轴间的不垂直因子; 设 d_x 和 d_y 为单个像素在成像仪 x 与 y 方向上的物理尺寸; $f_x = f \times s_x$, $f_y = f \times s_y$, 分别定义为 x 与 y 方向的等效焦距, $s_x = 1/d_x$, $s_y = 1/d_y$ 是单位长度的像素个数; $c_x, c_y, f_x, f_y, \gamma$ 不依赖于相机的位置和偏向, 称为相机的内参数。

2.2 相机坐标系变换到机体坐标系

本文涉及的相机镜头相对载荷结构本身或与载荷相互固定的惯性导航系统只存在两种旋转角, 即纵向旋转角(E)和横向旋转角(A), 这两个角可通过与图像采集盒相连的 PC 显示屏得到。由于惯导系统代表了机体本身的位置, 所以, 可通过构造三角函数矩阵找到由相机坐标系变换到机体坐标系的关联, 即

$$\mathbf{C}_s^p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & -\sin A \\ 0 & \sin A & \cos A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos E & 0 & \sin E \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin E & 0 & \cos E \end{bmatrix} =$$

$$\mathbf{C}_p^E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \sin \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma \\ -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.4 算法建立

在上述工作完成, 即内、外参数矩阵都已构建完后, 可以将其整合成整体的算法。设校正后的无

$$\begin{bmatrix} \cos E & 0 & \sin E \\ \sin A \sin E & \cos A & -\sin A \cos E \\ -\cos A \sin E & \sin A & \cos A \cos E \end{bmatrix} \quad (3)$$

在进行本实验采集此部分畸变图像及 A 角和 E 角时, 顺带采集了一些各种角度和距离的棋盘图像, 为后面的相机校定作了准备工作并提供了素材。

2.3 机体坐标系变换到世界坐标系

本实验模型遵循的机体坐标系为 NED 坐标系, 即北-东-地坐标系(见图 5)。由图可知, 该系 X 轴位于飞行器参考面内平行于机身轴线并指向飞行器前方, Y 轴垂直于飞行器参考面并指向飞行器右方, Z 轴在参考面内垂直于 XOY 平面, 指向飞行器下方。

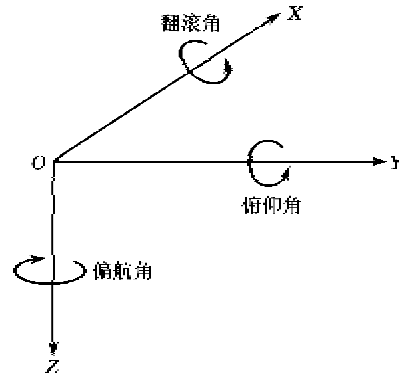


图 5 本实验模型遵循的 NED 坐标系

机体坐标系与世界坐标系的变换可反映出飞机的飞行姿态, 由惯性导航系统实时获得了飞行姿态角后, 即可确定由机体坐标系变换到世界坐标系的转换矩阵。

由于大气湍流的影响, 机载光电平台会出现俯仰、翻滚和偏航的情况, 相对于机体坐标系的起始相对位置会产生角度的变化, 即俯仰角(α)、翻滚角(β)及偏航角(γ), 由这 3 个姿态角可构造机体坐标系到世界坐标系的变换矩阵。

畸变点坐标或原始图像坐标为 (u, v) , 其对应的校正前的畸变图像某点的坐标为 (u', v') , 由前文得到的坐标转换矩阵 $\mathbf{C}_s^p$ 、 $\mathbf{C}_p^E$ 及 $\mathbf{M}$ 构造出由 (u, v) 到 (u', v')

v' 的转化矩阵,即校正前图像的某点转换到校正后图像的某点应满足

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{C}_p^v \cdot \mathbf{C}_s^p \cdot \mathbf{M}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ t \end{bmatrix} \quad (5)$$

建立上述关系后,可通过像素灰度插值算法计算出校正图像每个像素的灰度值。

2.5 像素灰度插值

实际情形下,由于数字图像的位置坐标总是整数,其像素值只有在坐标为整数时有定义,但经由几何位置坐标变换公式计算得到的位置坐标通常都不是整数,所以也无法直接给出其对应原始图像位置上的灰度值 $f(u, v)$,因此在非整数处的像素值就要用其周围紧邻的一些整数处的像素值来计算得到,这个计算校正后图像像素灰度值大小的过程即为图像灰度插值^[7],图像的灰度插值是对空间变换后的像素赋予相应的灰度值,当前主要的插值方法有最近邻插值、双线性插值和三次线性插值。

综合考虑插值效果和算法的可移植性,本文实现图像畸变校正选用双线性插值算法。即利用离目标像素最近邻的 4 个像素的灰度值计算其像素灰度值。该算法复杂度介于最近邻插值和三次线性插值,但在图像信息丰富处过度比较自然。图 6 为双线性插值原理。经过几何变换后的新图像中某点像素的整数位置前向映射到畸变图像中的 G 像素位置处 (u', v') ,进而可得到新图像中某点像素的灰度值。对 u' 和 v' 向下取整为 u 和 v ,可得与点 G 最近邻的 4 点 A, B, C, D 的像素值分别为 $f(u, v)$, $f(u+1, v)$, $f(u, v+1)$, $f(u+1, v+1)$,利用双线性插值模型可得 G 点的灰度值。将 $t(u) = u' - u$, $t(v) = v' - v$ 设为像素点 G 到 u 和 v 轴的距离权重,则 G 点的灰度值为

$$\begin{aligned} f(u', v') = & (1-t(u))(1-t(v))f(u, v) + \\ & t(u)(1-t(v))f(u+1, v) + \\ & (1-t(u))t(v)f(u, v+1) + \\ & t(u)t(v)f(u+1, v+1) \end{aligned} \quad (6)$$

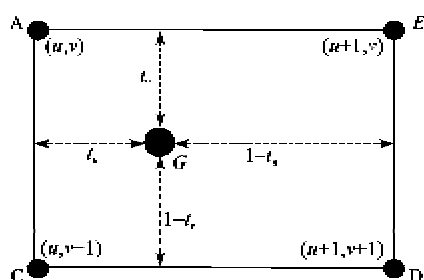


图 6 双线性插值原理

3 几何校正实验

3.1 相机内参数标定

相机标定建立相机图像像素位置与模板场景点位置之间的对应关系,由已知特征点的图像坐标求解相机的模型参数。现在主流的标定方法是传统相机标定法和相机自标定法。本文在已有的相关理论基础,基于 Matlab 的 Camera Calibration Toolbox 工具箱实现相机标定^[8]。

本文采用的方法介于传统标定法与自标定法之间,通过对一个精确的棋盘模板以不同的距离和角度摄取相片,来获取成像平面的像素坐标与物理坐标间的转化关系。为提高精度,本实验采集了同一张标定模板图片的 25 幅不同位置和姿态的图像进行标定,过程如下:

1) 安装 toolbox_calib 工具箱到 Matlab 路径中,调用 calib_gui.m 函数,进入相机标定工具菜单。

2) 读取 25 幅图像(见图 7),分别提取每幅图像的角点,对于每幅图像,需在边缘手动提取 4 个角点,其内部的其余角点可自动提取,接下来采用同样操作依次对每幅图像提取角点,提取完成后,角点检测图像也自动生成,如图 8 所示,角点提取的精度能达到 0.1 像素。提取角点的过程可通过手动设置初始畸变系数对自动检测到的角点进行调节(可以反复进行),直到对提取的角点精度满意。

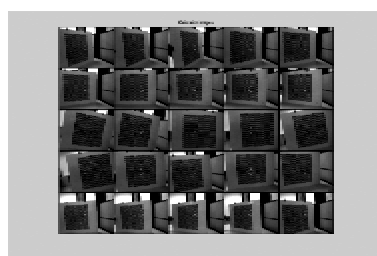


图 7 相机内参数标定选取的 25 幅图像

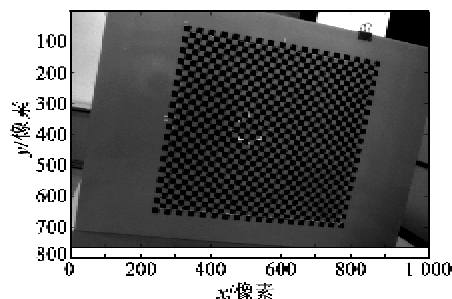


图 8 角点检测图像

3) 角点提取后调用 `go_calib_optim.m` 和 `go_calib_optimizer.m` 函数, 就会得到标定结果。并可基于最小二乘准则优化, 使像点的反投影误差最小, 多次实验选取最优结果, 如表 1 所示。

表 1 标定结果数据

	焦距长度	焦距误差
x 方向/像素	695.460 50	$\pm 3.576 57$
y 方向/像素	702.225 05	$\pm 3.589 81$
	主点位置	主点误差
x 方向/像素	374.242 42	$\pm 2.514 22$
y 方向/像素	325.237 25	$\pm 1.811 48$

3.2 外参数获取

本实验中相机旋转角的获取采用我所自主研发的光电平台载荷相机, 通过图像采集盒与 PC 联接, 并与惯性导航系统经方向调校后固定, 图 9 为 PC 显示器所显示图像的底部即为 E 和 A 。对于飞行姿态角的测定, 本实验选用大惯性导航系统用于提取飞行姿态角, 通过 PC 读取惯性导航系统采集的航姿数据显示 (见图 9), 其中第一行显示的 3 个姿态角数据是翻滚角、俯仰角、偏航角对应的数据。

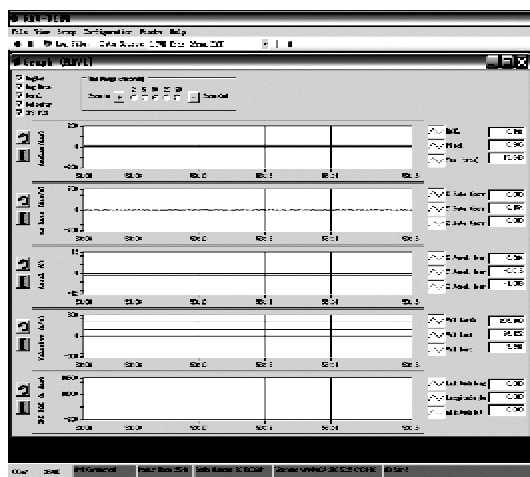


图 9 惯性导航系统工作时采集到的航姿数据

3.3 靶标图像校正

经过前面处理过程后, 把标定得到的相机内参数和外参数代入到几何畸变校正模型中计算, 求得校正后图像像素点的理想坐标位置, 然后进行灰度插值, 可得到几何畸变校正的图像。图 10 为由该 CCD 相机拍摄的有畸变的靶标图像。图 11 为用本文方法进行畸变校正后所得图像。



图 10 原畸变靶标图像



图 11 本文方法校正后的图像

3.4 实际航拍图像

本文利用相机标定得到的相机内参数及惯导系统提取的相机外参数, 根据畸变校正模型在 Matlab 软件中进行编程处理, 对畸变图像像素位置进行了几何坐标校正, 并对校正后的图像进行了双线性插值。通过肉眼判断, 可以看到校正效果较理想。校正前、后的航拍实景图如图 12、13 所示, 由图可知, 畸变图像中建筑顶部很明显的梯形畸变被校正为规则的矩形, 椭圆形区域转变为规则的圆形。但局部区域还残留建筑物侧面及其投影的畸变, 主要原因是忽略了建筑物高度引起的投影误差。并且校正前、后, 图像色彩的还原度较好, 无失真。整个校正所消耗时间为 3.602 0 s, 说明此校正方法实时性较强。

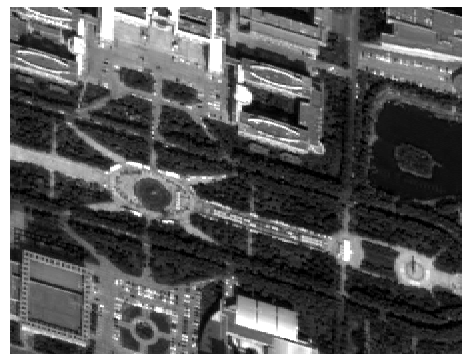


图 12 原畸变航拍实景图

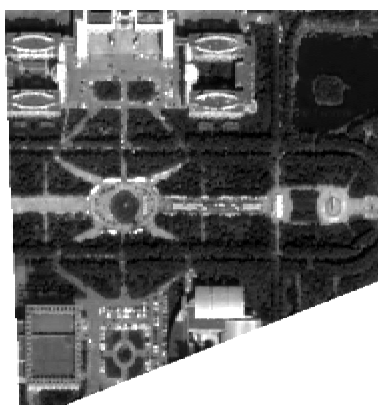


图13 本文方法校正后的图像

户外通过GPS实测采集15个检验点数据(见图14),用以进行误差分析,计算各个检验点的误差,图15为绘制出的 x 、 y 方向误差。

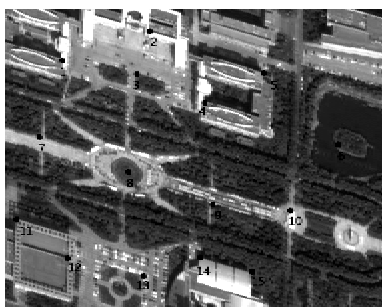


图14 通过GPS实测采集的15个检验点

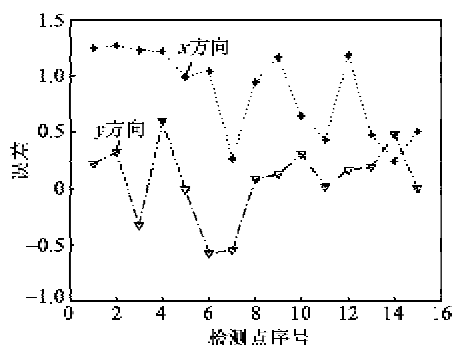


图15 检测点误差

评定校正误差时采用均方根误差^[11]:

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2} \quad (7)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (8)$$

$$RMSE_{total} =$$

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2]} \quad (9)$$

根据检验点所测数据得到的 x 方向的均方根误差 $RMSE_x=0.9387$ 像素, y 方向的均方根误差

$RMSE_y = 0.3339$ 像素,总的均方根误差 $RMSE_{total}=0.9963$ 像素,因此可知, x 方向的误差比 y 方向的误差大,以及在采集图像时,惯导测出的俯仰角比偏航角更精确。

4 结束语

基于Matlab的Camera Calibration Toolbox工具箱对相机进行标定获得相机内参数,采用惯性导航系统提取相机外参数,依据提取的内、外参数可在无控制点且无配准底图时对机载光电平台畸变图像进行校正。实验结果表明,用此方法进行几何校正,结果较理想。算法运算过程较快,为该校正方法移植到硬件提供了可能性

参考文献:

- [1] LIU Shuxi, WANG Zhongwu, HAO Wei, et al. On geometric correction method of R-T panchromatic image covering kingdom of lesotho[J]. Asian Agricultural Research, 2014, 4: 75-78.
- [2] LI Conggui, SHE Xiangyang, SUN Yizhen. Comparison and analysis research on geometric correction of remote sensing images[J]. Image Analysis and Signal Processing (IASP), 2010 International Conference on, 2010: 169-175.
- [3] LIU Qiang, LIU Qinhua, XIAO Qing, et al. Study on geometric correction of airborne multiangular imagery [D]. Science in China, 2002, 45(12): 1075-1088.
- [4] 李峰. 缺少控制点的无人机遥感影像几何校正技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [5] 刘异, 李玉霞, 童玲. 无地面控制点的无人机遥感影像几何校正算法[J]. 测绘通报, 2012(7): 57-59.
- [6] 孙军, 黎琪, 李和睿. 支持向量机遥感图像几何校正中的不同核函数算法比较[J]. 四川兵工学报, 2012(8): 76-80.
- [7] 徐秋辉. 无控制点的无人机遥感影像几何校正与拼接方法研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [8] 徐芳, 刘晶红, 王宜. 基于标定的CCD图像畸变校正方法研究[J]. 液晶与显示, 2013, 28(4): 633-640.
- [9] JURIC D, OSMANKOVIC D, FETIC A. The procedure of a camera calibration using camera calibration toolbox for MATLAB[C]//S. I. 2012 Proceedings of the 35th International Con MIPRO, 2012: 1752-1757.
- [10] 王庭军. 旋转式捷联惯导系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [11] 马广彬, 章文毅, 陈甫. 图像几何畸变精校正研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(9): 45-48.