

文章编号:1007-2780(2015)03-0505-09

## 面阵 CCD 航空相机斜视图像的几何校正

周前飞<sup>1,2</sup>, 刘晶红<sup>1\*</sup>, 居波<sup>1</sup>, 李刚<sup>1</sup>

(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, 北京 100049)

**摘要:**为增大机载光电侦察系统的视场角,航空相机多采用扫描方式对地摄影成像,文章对面阵 CCD 航空相机斜视摄影引起的图像变形进行校正。由于该类相机与载机之间存在方位和俯仰两轴运动,文章同时考虑相机相对载机的旋转角度和载机相对地面的姿态角,建立了更符合该类相机工作状态的六姿态角投影校正模型,推导出同一地物在畸变图像和标准图像上的像素坐标变换关系,采用双线性插值算法对坐标变换后的像素灰度值进行重采样,对航空图像进行自动校正。最后,对某机场的航拍图像进行校正实验,并与基于地面控制点的多项式校正方法以及基于畸变图像和参考图像配准的校正方法进行比较。实验结果表明,六姿态角投影校正模型能够取得比较高的校正精度(可达像素级),当姿态角的测量精度为  $3'$ ,图像大小为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  时,图像校正的均方根误差为  $1.1747 \text{ pixel}$ 。该方法不需要提供参考图像和野外采集地面控制点数据,便于工程实现,基本满足航空图像处理的稳定可靠、精度高、实时性强等要求。

**关键词:**航空遥感;面阵 CCD 图像;几何校正;斜视摄影

中图分类号:TP75 文献标识码:A doi:10.3788/YJYXS20153003.0505

## Geometric correction of oblique images for array CCD aerial cameras

ZHOU Qian-fei<sup>1,2</sup>, LIU Jing-hong<sup>1\*</sup>, JU Bo<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>

(1. *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*)

**Abstract:** To increase the airborne photoelectric reconnaissance devices' field of view, most aerial cameras adopt the method of scanning to photograph the earth. For the purpose of image distortion caused by the oblique photography of array CCD aerial camera, a practical auto-rectification approach was proposed in the thesis. As there was a dual-axis rotation (specifically, the azimuth and pitch motion) between these array CCD aerial cameras and aircrafts, this paper introduced a new approach for image geometric correction that took into account both the rotational angles from cameras to aircrafts and the attitude angles of the aircrafts relative to the ground. First, the six attitude angles projective rectification model of these array CCD aerial cameras was established. Then, the relationship of pixel coordinates between distortion image and standard image was obtained. Through coordinate transformation

收稿日期:2014-06-26;修订日期:2014-07-31.

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(No. 201204515);吉林省重大科技攻关项目(No. 11ZDGG001)

\* 通信联系人, E-mail: liu1577@126.com

and luminance bilinear interpolation, the aerial remote sensing image with distortion was auto-accurately rectified. Finally, the aerial image of an airport was corrected using the six attitude angles projective rectification model, the ground control point based multinomial correction model and the correction method of matching the distortion image and reference image, respectively. Experiments show that the six attitude angles projective rectification model can achieve pixel level correction precision. For 512 pixel $\times$ 512 pixel images, the root mean square error of image correction can reach 1.174 7 pixel accuracy when the accuracy of attitude angles is 3 min. The proposed algorithm in the thesis doesn't need for reference images and ground control points, and facilitates engineering application. It can satisfy the system requirements of online, real time, higher precision and stabilization.

**Key words:** aerial remote sensing; array CCD images; geometric correction; oblique photography

## 1 引言

为满足航空侦察任务大视场、高分辨率、高实时性的要求,航空相机多采用单片面阵 CCD 传感器扫描成像方式,通过 CCD 传感器和特殊的机械结构,在不同时刻、以不同角度对地摄影成像,然后通过图像拼接技术将获取的多时相、多倾角航空图像序列合成一幅等效的宽视场、高分辨率图像。与正射投影图像相比,多角度航空图像存在更为复杂的几何畸变,对原始图像直接进行拼接,可能会出现重叠区域像元错位导致某些目标完全拼接不上的问题<sup>[1]</sup>,因此必须对图像进行几何校正以保证拼接图像的质量。由于飞机的飞行姿态、飞行高度以及航空相机相对载机平台方位的变化,导致拍摄到的目标发生旋转、缩放、甚至变形,极大地增大了对目标进行持续稳定跟踪的难度<sup>[3]</sup>。因此,对高分辨率航空图像进行几何校正,消除图像中的各种几何变形,对实现目标精确跟踪定位也具有重要意义<sup>[2]</sup>。

目前遥感图像的几何校正主要有两种方法:一种是通过 GPS 采集大量地面控制点(ground control points,GCPs)利用多项式校正模型进行,这类方法的校正精度主要与地面控制点的数量和分布位置有关,若控制点的数量和位置选择合适,可达到像素级校正精度<sup>[3]</sup>;另一种是采用已校正过的正射投影图像为参考图像,通过参考图像和畸变图像中的同名点匹配,自动获取密集同名点对作为控制点,再由密集同名点对构成密集三角网,在小三角形面元上采用多项式模型进行校正,能够获得小于 0.9 pixel 的校正精度<sup>[4-5]</sup>。由于航空相机拍摄的区域范围大,地形环境复杂,很难获

得大量分布均匀的地面控制点,也很难得到与航空图像分辨率相匹配的大比例尺参考图像,因此,这些方法均不适合航空图像的几何校正。

缺少控制点的遥感图像几何校正一直是国内外学者的研究热点<sup>[6-10]</sup>。Sébastien Leprince 等<sup>[7]</sup>采用优化的成像模型,补偿卫星姿态漂移和传感器方位变化引起的像点位移,同时引入数字高程模型校正地形起伏引起的像点位移,实现 SPOT 卫星图像的精确正射校正,校正精度达到 1/50 pixel。Guoqing Zhou 采用 DLT (direct linear transformation)方法求解出航拍图像的内、外方位元素,对小型无人机航拍视频图像进行正射校正和拼接,校正后图像拼接精度达到 1~2 pixel<sup>[8]</sup>。胡春晖等<sup>[9]</sup>在航天遥感器像移补偿模型基础上建立图像畸变计算模型,准确引入轨道参数、卫星姿态和指向镜安装方位等因素,实现了指向镜低频正弦振动下遥感器图像的畸变校正,理想状况下该方法的校正精度优于 1 pixel。程红<sup>[10]</sup>等利用某新型军用侦察机试飞所获取的图像、定位和飞行姿态等数据,将三维投影变换引入几何校正模型中,实现了图像的自动校正。该方法在建立航空相机成像模型时假设航空相机与载机固定联接为一个整体,将载机相对地面的姿态作为相机相对地面的姿态,这对于大多数线阵 CCD 航空相机是成立的。一般面阵 CCD 航空相机采用扫描方式对地摄影成像,相机与载机之间存在方位和俯仰两轴运动,这与上述成像模型不符合。

针对上述问题,本文同时考虑扫描式面阵 CCD 航空相机相对载机的旋转角度和载机相对地面的姿态角,建立了更符合该类相机工作状态的六姿态角投影校正模型,推导出畸变图像和标准图像之间的像素坐标变换关系。该几何校正模

型无需采集地面控制点和参考图像,更符合相机的实际工作状态,对今后实现航空图像的实时无缝拼接和目标精确跟踪定位具有重要意义。

## 2 面阵 CCD 航空斜视图像几何校正模型

### 2.1 面阵 CCD 航空相机斜视成像模型

本文研究的面阵 CCD 航空相机图像中所有像元都是在同一时刻成像形成的,生成的每一幅图像都符合中心投影规律,一幅图像对应一组姿态参数。因此,可以根据中心投影方式建立成像模型。为描述该类相机的成像模型,需要在像方和物方分别建立坐标系,如图 1 所示<sup>[10]</sup>。

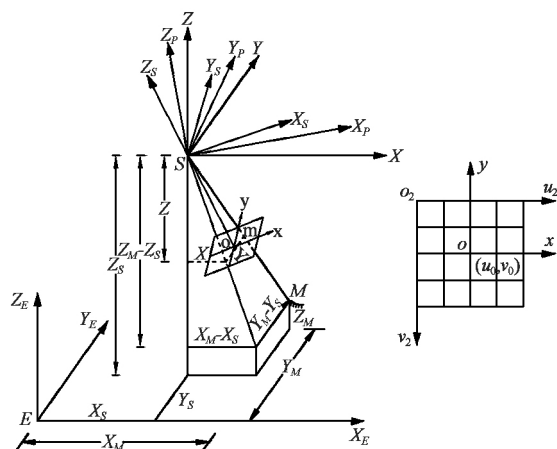


图 1 扫描式面阵 CCD 航空相机的成像模型

Fig. 1 Imaging model of scanning array CCD aerial cameras

图 1 中相关的坐标系有:像平面坐标系(包括图像坐标系  $o-x-y$  和像素坐标系  $o_2-u_2 v_2$ ),相机坐标系  $S-X_S Y_S Z_S$ ,载机坐标系  $S-X_P Y_P Z_P$ ,像空间辅助坐标系  $S-XYZ$  和地面坐标系  $E-X_E Y_E Z_E$ 。为建立面阵 CCD 航空相机的成像方程,先要求解以上各坐标系之间的变换关系。

由于数字图像最终要存放在计算机内部,所以要将像平面上的投影坐标转换为像素坐标。如图 1 所示,设像平面内任一点  $m$  在像素坐标系中的坐标为  $(u, v)$ ,在图像坐标系中的坐标为  $(x, y)$ ,则其在相机坐标系  $S-X_S Y_S Z_S$  中的坐标值为  $(x, y, z \equiv -f)$ ,其中  $f$  为相机的焦距;像主点  $o$  在像素坐标系中的坐标为  $(u_0, v_0)$ ;面阵 CCD 的大小为  $r \times s$ ,像素在  $x, y$  方向的物理尺寸分别为  $d_x, d_y$ ;则有图像坐标系与像素坐标系之间的变

换关系为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = -\frac{1}{f} \begin{bmatrix} s_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & s_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $s_y = -1/d_y$ ,  $s_x = 1/d_x$ 。

相机坐标系  $S-X_S Y_S Z_S$  与载机坐标系  $S-X_P Y_P Z_P$  为共原点直角坐标系,并且这两个坐标系之间满足以相机相对载机的方位角  $u'_b, v'_b$  的转轴  $Z_S$  为主轴、高低角  $\alpha$  的转轴为第二轴和像片旋角  $\kappa_V$  的转轴作为第三轴的  $A\alpha\kappa_V$  转角关系,可通过 3 个坐标轴的旋转实现这两个坐标系之间的变换,得到点  $m$  在载机坐标系中的坐标  $(X_m, Y_m, Z_m)$  为:

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A & \sin A & 0 \\ -\sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \kappa_V & -\sin \kappa_V & 0 \\ \sin \kappa_V & \cos \kappa_V & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \cos A \cos \kappa_V + \sin A \cos \alpha \sin \kappa_V \\ a_2 &= -\cos A \sin \kappa_V + \sin A \cos \alpha \cos \kappa_V \\ a_3 &= -\sin A \sin \alpha \\ b_1 &= -\sin A \cos \kappa_V + \cos A \cos \alpha \sin \kappa_V \\ b_2 &= \sin A \sin \kappa_V + \cos A \cos \alpha \cos \kappa_V \\ b_3 &= -\cos A \sin \alpha \\ c_1 &= \sin \alpha \sin \kappa_V \\ c_2 &= \sin \alpha \cos \kappa_V \\ c_3 &= \cos \alpha \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

载机坐标系  $S-X_P Y_P Z_P$  与地面坐标系  $E-X_E Y_E Z_E$  之间满足以俯仰角  $\varphi$  的转轴  $Y_P$  为主轴、滚转角  $\omega$  的转轴为第二轴、偏航角  $\kappa$  的转轴作为第三轴的  $\varphi\omega\kappa$  转角关系,同理可得像点  $m$  在像空间辅助坐标系  $S-XYZ$  中的坐标  $(X, Y, Z)$  为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 \\ e_1 & e_2 & e_3 \\ f_1 & f_2 & f_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= \cos\varphi\cos\kappa - \sin\varphi\sin\omega\sin\kappa \\ d_2 &= -\cos\varphi\sin\kappa - \sin\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ d_3 &= -\sin\varphi\cos\omega \\ e_1 &= \cos\omega\sin\kappa \\ e_2 &= \cos\omega\cos\kappa \\ e_3 &= -\sin\omega \\ f_1 &= \sin\varphi\cos\kappa + \cos\varphi\sin\omega\sin\kappa \\ f_2 &= -\sin\varphi\sin\kappa + \cos\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ f_3 &= \cos\varphi\cos\omega \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

设投影中心  $S$  在地面坐标系中的坐标为  $(X_S, Y_S, Z_S)$ , 像点  $m$  对应的物点  $M$  在地面坐标系中的坐标为  $(X_M, Y_M, Z_M)$ , 由于摄影时  $S, m, M$  三点位于一条直线上, 由图 1 中各相似三角形的关系, 可得像空间辅助坐标  $(X, Y, Z)$  与对应地面点在指定地面坐标系中坐标  $(X_M, Y_M, Z_M)$  间的关系为:

$$\frac{X}{X_M - X_S} = \frac{Y}{Y_M - Y_S} = \frac{Z}{Z_M - Z_S} = \frac{1}{\lambda}, \quad (6)$$

联立式(2)~(6), 得:

$$\begin{bmatrix} X_M - X_S \\ Y_M - Y_S \\ Z_M - Z_S \\ \lambda \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & 0 \\ e_1 & e_2 & e_3 & 0 \\ f_1 & f_2 & f_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & 0 \\ b_1 & b_2 & b_3 & 0 \\ c_1 & c_2 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $\lambda$  为比例因子。

在已知地物点坐标和相机的外方位元素的情况下, 对式(7)求逆运算, 可以求取相应的像点坐标为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 \\ a_3 & b_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 & e_1 & f_1 & 0 \\ d_2 & e_2 & f_2 & 0 \\ d_3 & e_3 & f_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_M - X_S \\ Y_M - Y_S \\ Z_M - Z_S \\ \lambda \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式(7)和式(8)为本文研究的面阵 CCD 航空相机的成像方程。

## 2.2 几何校正模型

航空图像几何校正的目的是消除图像中的几何变形, 产生一幅符合正射投影的新图像。通常拍摄的航空图像是地面的中心投影, 只要消除斜视摄影与地形起伏引起的像点位移, 就能将图像由中心投影变换为地面一定比例尺的正射投影图

像, 并用正射投影图像拼接成一幅具有较宽视角的高分辨率图像。文章正是针对航空相机斜视摄影时外方位元素变化引起的像点位移进行校正。该几何校正模型的建立, 基于以下假设条件:

(1) 相机镜头所造成的图像几何畸变很小, 或已通过镜头畸变校正算法校正至可接受的范围内<sup>[11]</sup>, 这里视为理想镜头, 不存在由镜头本身引起的图像变形;

(2) 相机的投影中心与载机的质心重合, 即相机坐标系与载机坐标系之间仅存在旋转变换;

(3) 航空相机所拍摄的区域内地势平坦, 不存在地形起伏引起的像点位移, 即地面上物点  $M$  的坐标  $Z_M = 0$ 。

几何校正的基本环节有两个, 一是像素坐标的几何变换, 二是对坐标变换后的像素灰度值进行重采样。

### 2.2.1 像素坐标的几何变换

像素坐标的几何变换就是要建立变换前后图像像素坐标的对应关系, 如果已知一地物点的地面坐标分别与变换前后图像坐标的变换关系, 由于同一地物点的地面坐标是相同的, 就可以得到校正前后图像坐标的对应关系。

设畸变情况下一地物点的地面坐标为  $(X_N, Y_N, Z_N)$ , 对应像点的图像坐标为  $(x_2, y_2)$ , 根据式(7)有:

$$\begin{bmatrix} X_N - X_S \\ Y_N - Y_S \\ Z_N - Z_S \\ \lambda \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & 0 \\ e_1 & e_2 & e_3 & 0 \\ f_1 & f_2 & f_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & 0 \\ b_1 & b_2 & b_3 & 0 \\ c_1 & c_2 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -f \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

标准情况下, 姿态角的方向余弦矩阵为单位矩阵, 此时该地物点对应像点的图像坐标为  $(x_1, y_1)$ , 同理可得:

$$\begin{bmatrix} X_N - X_S \\ Y_N - Y_S \\ Z_N - Z_S \\ \lambda \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

由式(9), (10)可得畸变图像与标准图像之间的关系如下:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & 0 \\ e_1 & e_2 & e_3 & 0 \\ f_1 & f_2 & f_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & 0 \\ b_1 & b_2 & b_3 & 0 \\ c_1 & c_2 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -f \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

联立式(1)~(11),将投影坐标转换为像素坐标,得:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = -\frac{1}{f} \begin{bmatrix} s_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & s_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & 0 \\ e_1 & e_2 & e_3 & 0 \\ f_1 & f_2 & f_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & 0 \\ b_1 & b_2 & b_3 & 0 \\ c_1 & c_2 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x & 0 & -u_0 d_x \\ 0 & -d_y & v_0 d_y \\ 0 & 0 & -f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

对式(12)求逆可得输出标准图像到原始畸变图像的像素坐标转换关系为

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = -\frac{1}{f} \begin{bmatrix} s_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & s_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 \\ a_3 & b_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 & e_1 & f_1 & 0 \\ d_2 & e_2 & f_2 & 0 \\ d_3 & e_3 & f_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x & 0 & -u_0 d_x \\ 0 & -d_y & v_0 d_y \\ 0 & 0 & -f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(12),(13)分别对应两种校正方案,即直接法和间接法校正方案,如图2所示。

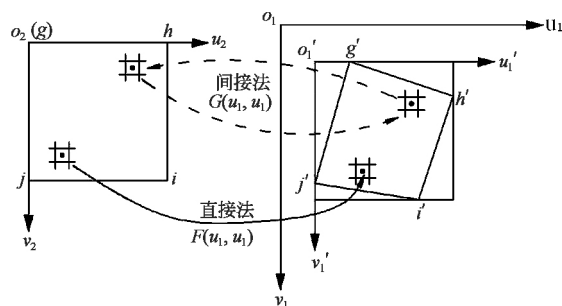


图2 直接法和间接法校正方案

Fig. 2 Direct correction solution and the indirect correction solution

在直接法校正方案中,畸变图像空间  $o_2-u_2-v_2$  中的两个不同的或更多的像素点可能会映射到标准图像空间  $o_1-u_1-v_1$  的同一像素点上,校正图像像素点的最后灰度是周边畸变图像像素灰度的贡献之和,需要较多的寻址,特别是在采用高阶插值时;相对来说间接法校正方案映射效率比较高,校正图像是逐个像素得到的,每个像素的灰度由一

步插值确定,因此本文采用间接法校正方案。

由于空中气流或其他因素的影响,会使空中摄影时航高  $Z_s$  发生变化,因而引起相邻航拍图像的比例尺不一致。如果相邻图像的比例尺相差太大,会影响图像拼接和目标稳定跟踪。因此,需要把拍摄图像变换到基准航高  $H$  下的图像,消除图像比例尺不一致问题。设任意航高  $H_1$  时图像像素坐标为  $(u_1, v_1)$ ,基准航高  $H$  下图像像素坐标为  $(u_b, v_b)$ ,则:

$$\begin{cases} u_b = H_1 u_1 / H \\ v_b = H_1 v_1 / H \end{cases} \quad (14)$$

## 2.2.2 灰度重采样

假设输出校正图像中的一个像素映射到原始畸变图像的像素点位为整数,便可直接将畸变图像中该整数点位上的已有灰度值取出填入标准图像相应像素位置;若校正图像的像素点位对应畸变图像像素的4个像素之间(非整数点),则先根据插值算法计算出该位置的灰度,再将其映射给标准图像的对应像素。目前数字图像的灰度插值算法主要有最近邻插值法、双线性插值法和三次卷积插值法。最近邻插值法计算量小,但精度不高;三次卷积插值法精度高但运算量大,双线性插值可以折中最近邻插值法和三次卷积插值法。在保证输出图像质量的前提下,考虑航空图像处理的实时性要求,文章采用双线性插值方法。

## 3 几何校正算法流程

面阵 CCD 航空相机斜视图像的几何校正算法流程如下:

### (1) 确定输出标准图像的边界范围

如图2所示,把原始畸变图像4个角点  $g(u_{21}, v_{21}), h(u_{22}, v_{22}), i(u_{23}, v_{23}), j(u_{24}, v_{24})$  按式(12)投影到标准图像像素坐标系  $o_1-u_1-v_1$  中去,得8个新的坐标值:  $g'(u_{11}, v_{11}), h'(u_{12}, v_{12}), i'(u_{13}, v_{13}), j'(u_{14}, v_{14})$ ;

对这8个坐标值按  $u$  和  $v$  两个坐标组分别求其最小值  $(u_{\min}, v_{\min})$  和最大值  $(u_{\max}, v_{\max})$ ;此时,在输出标准图像坐标系  $o_1-u_1-v_1$  中,每个像素的行列号取值范围为

$$\begin{cases} u_1 = u_{\min}, u_{\min} + 1, \dots, u_{\max} \\ v_1 = v_{\min}, v_{\min} + 1, \dots, v_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

将输出标准图像坐标系  $o_1-u_1-v_1$  的原点  $o_1$  平移

至边界范围左上角  $o'_1$  点  $(u_{\min}, v_{\min})$ , 将输出图像坐标转换为  $o'_1 - u'_1 v'_1$  坐标系中的坐标  $(u'_1, v'_1)$ :

$$\left. \begin{aligned} u'_1 &= u_1 - u_{\min} + 1 \\ v'_1 &= v_1 - v_{\min} + 1 \end{aligned} \right\}. \quad (16)$$

至此, 在输出标准图像坐标系  $o'_1 - u'_1 v'_1$  中, 每个像素的行列号取值范围为

$$\left. \begin{aligned} u'_1 &= 1, 2, \dots, u_{\max} - u_{\min} + 1 \\ v'_1 &= 1, 2, \dots, v_{\max} - v_{\min} + 1 \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

(2) 从空白的输出图像出发, 按式(17)的顺序依次对每个输出像素点位反求原始图像坐标中的位置, 具体步骤如下:

① 根据式(16), 将  $(u'_1, v'_1)$  变换成  $(u_1, v_1)$ ;

② 根据式(13), 将  $(u_1, v_1)$  变换成  $(u_2, v_2)$ ;

(3) 运用灰度插值算法将点  $(u_2, v_2)$  的灰度值取出, 赋值给空白输出图像  $(u'_1, v'_1)$  像素点位, 即

$$q(u'_1, v'_1) = \begin{cases} p(u_2, v_2) & u_2 \in [1, r], v_2 \in [1, s] \\ 0 & u_2, v_2 \text{ 为其他值} \end{cases} \quad (18)$$

(4) 重复步骤(2)、(3), 依次计算每个标准图像像点在畸变图像中的像点坐标及其灰度值, 直至所有像点计算完毕。

## 4 实验与分析

为验证文中几何校正算法的效果, 分别利用多项式校正模型<sup>[3]</sup>(采集控制点方法, 包括二次多项式与双线性两种方法), 与参考图像配准进行校正的方法<sup>[4-5]</sup>, 以及六姿态角投影校正模型(本文方法), 对某机场的实际航拍图像进行几何校正。参考图像选择 SPOT-5 卫星提供的正射投影图像, 如图 3(a)所示。图 3(b)为实际飞行实验中航空相机拍摄的单通道可见光图像, 图像大小为 512 pixel  $\times$  512 pixel, 图 3(c)为采用与参考图像配准的方法对畸变图像进行校正的结果; 图 3(d), (e)为通过 GPS 实测 30 个地面控制点的数据, 分别利用二次多项式模型和双线性模型进行校正的结果; 图 3(f)为利用六姿态角投影校正模型校正后的图像。

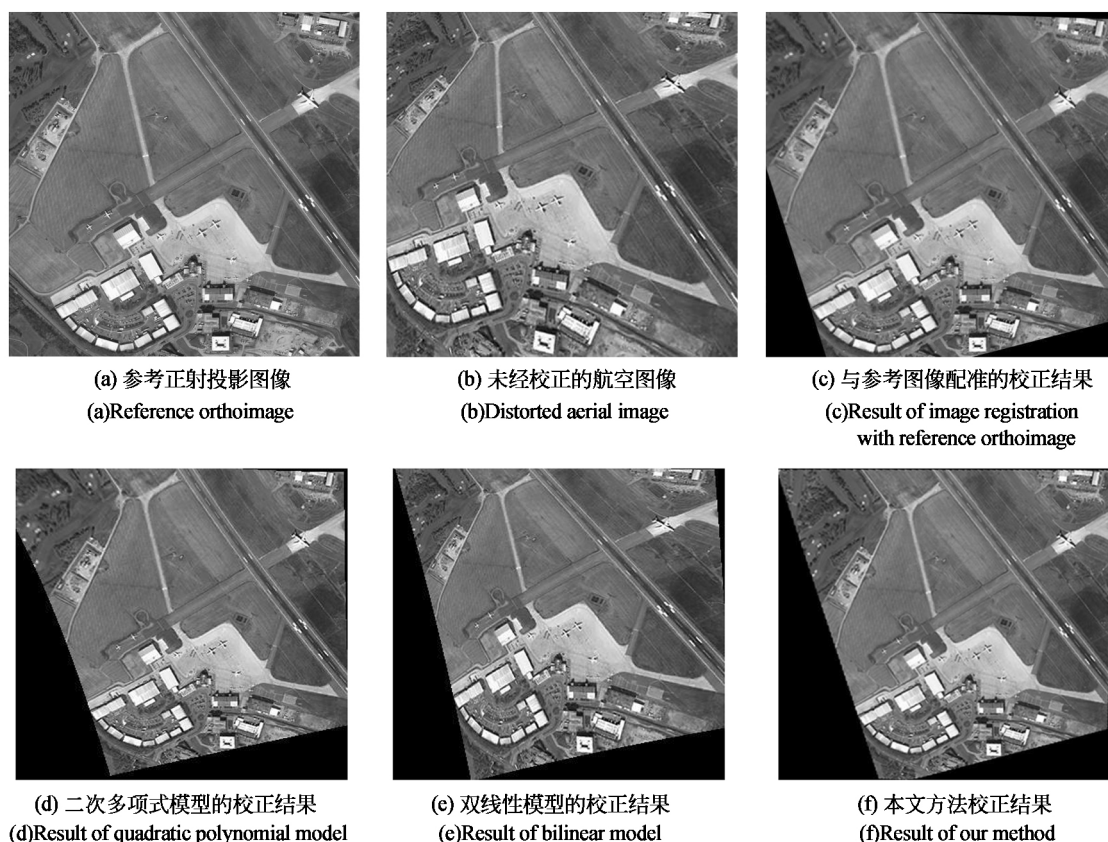


图 3 航空图像的几何校正

Fig. 3 Image geometric correction for array CCD aerial camera

从图3中可以看出,本文方法和与参考图像配准的方法能够有效地校正梯形跑道及房屋建筑物的投影变形,建筑物轮廓的侧面可视面减小,顶面可视面增多,并逐渐由不规则图形转变为规则图形;二次多项式模型基本上消除了由姿态角变化引起的图像变形,但存在一定的残余变形;双线性模型不能完全校正由航空相机斜视摄影引起的图像变形,存在较大的残余变形。由于航空图像序列相邻图像之间存在一定的重叠率(大于20%),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。

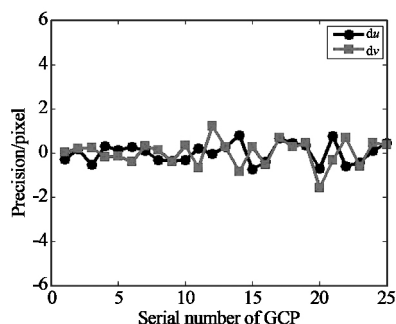
为定量分析上述各几何校正算法的校正精度,这里采用均方根误差 RMSE(Root Mean Square Error)来作为校正精度的衡量指标。RMSE 是原始图像检验点位置  $(u_p, v_p)$  和标准图像检验点位置  $(u_b, v_b)$  按式(13)做逆变换后的输出位置  $(u'_b, v'_b)$  之间的距离<sup>[12-13]</sup>,由式(19)表示:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n (u_{ip} - u'_{ib})^2 + \sum_{i=1}^n (v_{ip} - v'_{ib})^2 \right]}, \quad (19)$$

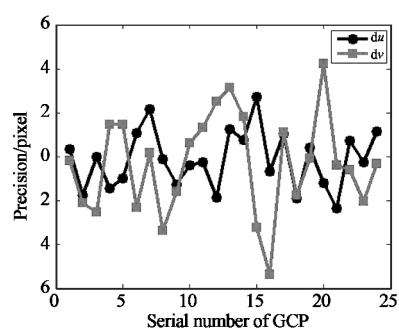
式中: $n$  为检验点个数; $du_i = u_{ip} - u'_{ib}$  为第  $i$  个检验点的列残差; $dv_i = v_{ip} - v'_{ib}$  为第  $i$  个检验点的行残差。这里定义列均方根误差 URMS、行均方根误差 VRMS 分别为

$$\text{URMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n du_i^2}, \text{VRMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dv_i^2}. \quad (20)$$

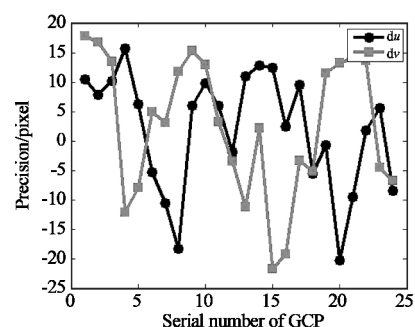
在图3中校正前后的各图像中选择25个检验点,根据式(19)计算各检验点的行残差  $du$  和列残差  $dv$  如图4所示。



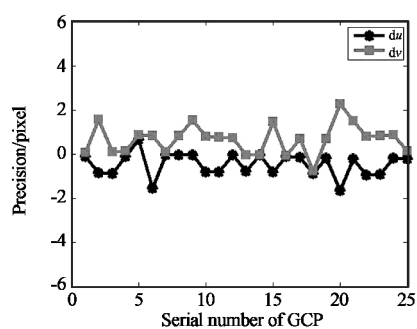
(a) Error curve of image registration with reference orthoimage



(b) Error curve of quadratic polynomial correction model



(c) Error curve of bilinear correction model



(d) Error curve of proposed method

图4 检验点的误差分布曲线

Fig. 4 Distribution curve of checkpoint error

从图4可以看出,与参考图像配准方法的精度最高,行残差最大值为1.6002 pixel 列残差最大值为0.7425 pixel 如图4(a)所示;二次多项式模型的精度次之,行残差最大值为5.3997 pixel 列残差最大值为2.7291 pixel 如图4(b)所示;双线性模型的精度最差,行、列残差最大值均达到20 pixel 该模型不适合校正航空图像外方位元素变化引起的非线性变形,如图4(c)所示;当姿态角的测量精度为3'时,本文方法能够达到较高精度,行残差最大值为2.2546 pixel 列残差最大值为1.6785 pixel 如

图 4(d)所示。为进一步评定上述各方法的校正误差,根据式(19)计算各检验点的均方根误差如表 1 所示。

表 1 航空图像几何校正方法的比较

Tab. 1 Comparison of geometric correction methodologies for aerial images

指标	方 法			
	与参考图像配准	二次多项式模型	双线性模型	本文方法
$du_{\max}/\text{pixel}$	0.742 5	2.729 1	20.31 7	1.678 5
$dv_{\max}/\text{pixel}$	1.600 2	5.399 7	21.72 5	2.254 6
URMS/pixel	0.448 1	2.059 6	9.990 4	0.715 7
VRMS/pixel	0.578 6	2.482 3	11.84 6	0.931 5
RMSE/pixel	0.731 8	3.225 5	15.49 7	1.174 7
运行时间/s	8.1535	5.2162	5.2024	3.6342

从表 1 可以看出,行方向的均方根误差大于列方向的均方根误差。与参考图像配准方法和本文方法的校正精度要优于二次多项式模型的校正精度,但是与参考图像配准方法需要提供与航空图像分辨率相匹配的参考影像,难以应用于工程实践中。当姿态角的测量精度为  $3'$ ,图像大小为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  时,本文方法的校正均方根误差为  $1.174 7 \text{ pixel}$ ,达到了像素级校正精度。实验测试平台的 CPU 主频为  $3.3 \text{ GHz}$ ,内存容量为  $4 \text{ G}$ ,各算法的测试程序在 MATLAB 环境下编译完成。从表 1 可以看出,与参考图像配准方法由于需要在参考图像和畸变图像中提取同名点进行匹配,耗时最长,二次多项式模型和双线性模型次之,本文方法计算速度较快,校正  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  大

小图像耗时  $3.634 2 \text{ s}$ ,同时不需要提供参考图像和采集地面控制点数据,便于移植到 FPGA 中实现图像的实时或准实时校正。

## 4 结 论

文章对面阵 CCD 航空相机斜视图像的几何校正技术进行了比较深入的研究,同时考虑相机相对载机的旋转角度和载机相对地面的姿态角,建立了该类相机的成像模型,推导出同一地物在畸变图像和标准图像上的像素坐标变换关系。分别将本文的六姿态角校正模型,基于地面控制点的二次多项式模型和双线性模型校正方法以及与参考图像配准进行校正的方法应用于某机场航拍图像的几何校正中,并选择 25 个检验点计算上述四种方法的校正精度。实验结果表明,二次多项式模型和双线性模型不能完全消除图像的几何变形,校正后图像存在不同程度的残余变形,本文方法和与参考图像配准的方法都能够获得较高校正精度,但是与参考图像配准的方法需要提供与航拍图像分辨率相近的参考图像,难以应用于工程实践中。文章提出的六姿态角校正模型能够有效地校正由姿态角变化引起的图像变形,达到工程应用所需要的精度,不需要提供参考图像和采集地面控制点数据,便于采用嵌入式系统实现航空图像的机上自动实时校正。同时,为进一步提高校正精度,可考虑测定相机镜头中心与载机质心在 3 个坐标轴方向的距离,引入相机坐标系与载机坐标系之间的平移变换关系,建立更精确的几何校正模型;同时引入所拍摄地区的数字高程信息(digital elevation model, DEM),进一步校正由地形起伏引起的像点位移。

## 参 考 文 献:

- [1] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(5): 1197-1201. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] Wang J H, Yong G, Gerard B. M. Heuvelink, et al. Effect of the sampling design of ground control points on the



- geometric correction of remotely sensed imagery [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 18: 91-100.
- [4] John R J. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective* [M]. 3rd Ed. Columbia: University of South Carolina Press, 2005.
- [5] 陈华, 安娜, 杨清华. 基于 GPS 实测控制点的 SPOT 5 1A 数据几何校正方法精度比较[J]. 国土资源遥感, 2007, 4: 47-49.
- Chen H, An N, Yang Q H. Geometric correction methods of SPOT 5 1A data based on GPS-measured ground control points [J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, 2007, 4: 47-49. (in Chinese)
- [6] 李玉霞, 董玲, 刘异, 等. 缺少控制点的无人机遥感影像几何畸变校正算法[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(3): 395-398.
- Li Y X, Tong L, Liu Y, et al. Geometric correction algorithm for unmanned aerial vehicle remote sensing image without ground control points [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, 42(3): 395-398. (in Chinese)
- [7] Sébastien L, Sylvain B, François A. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1529-1532.
- [8] Zhou Q. Near real-time orthorectification and mosaic of small UAV video flow for time-critical event response [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(3): 739-746.
- [9] 胡春晖, 颜昌翔, 邵建兵. 指向镜低频正弦振动下传感器图像的畸变及校正[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0428002.
- Hu C H, Yan C H, 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)
- [10] 程红, 王志强, 张耀宇. 航空影像几何校正方法的研究[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2009, 41(3): 50-54.
- Chen H, Wang Z Q, Zhang Y Y. Research on geometric rectification of aerial images [J]. *Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition*, 2009, 41(3): 50-54. (in Chinese)
- [11] 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, 28(4): 634-640.
- Xu F, Liu J H, Wang X. Distortion correction method for CCD image based on calibration [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(4): 634-640. (in Chinese)
- [12] 王富治, 黄大贵. 基于图像差分的精密畸变校正研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 378-381.
- Wang F Z, Huang D G. Accurate distortion correction study based on differential images [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(2): 378-381. (in Chinese)
- [13] 王家骥, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 106-116.
- Wang J Q, Jin G, Yan C X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(2): 106-116. (in Chinese)

作者简介: 周前飞(1989—), 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要从事航空相机图像几何校正与拼接技术方面的研究。

E-mail: wgzhouqfei@126.com

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方面的研究。

E-mail: liu1577@126.com