引文格式：胡华宗. 无人机倾斜摄影测量近景影像绝对定向方法[J]. 地理空间信息, 2023, 21(4): 23-26. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.04.006

无人机倾斜摄影测量近景影像绝对定向方法

胡华宗[1]
（1. 河南省航空物探遥感中心，河南 郑州 450006）

摘　要：复杂地形的距离与噪声的影响，会导致无人机倾斜摄影的定向精度较差，为此，设计一个无人机倾斜摄影测量近景影像绝对定向方法。建立一个比例相同的空间坐标系，规范方向矩阵，对近景影像进行灰度处理，在确定实际空间与平面模型间存在的属性关系后，获取复杂地形空间参数，以此优化定向过程，并建立投影模型，实现无人机倾斜摄影测量近景影像绝对定向。对不同距离下与不同噪声下的定向误差进行对比，实验结果表明，在不同距离与不同噪声下，无人机倾斜摄影测量近景影像绝对定向方法的定向误差均较小，满足实际应用需求。

关键词：复杂地形；无人机；倾斜摄影；近景影像；绝对定向
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）04-0023-04

Absolute Orientation Method of near-field images in UAV Oblique Photogrammetry

HU Huazong[1]
(1. Henan Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: Affected by the distance and noise of complex terrain, the orientation accuracy of UAV oblique photogrammetry is poor. Therefore, we designed an absolute orientation method of near-field images. We established a spatial coordinate system with the same proportion, standardized the direction matrix, and processed the near-field image gray scale. After determining the attribute relationship between the actual space and the plane model, we obtained the complex terrain spatial parameters to optimize the directional process, and established a projection modelto realize the absolute orientation of near-field images in UAV obliquephotogrammetry. Comparing the directional error at different distances and different noise, the experimental results show that the directional error of absolute orientation of near-field images in UAV oblique photogrammetry is small at different distances and different noise, which can meet the actual application needs.

Key words: complex terrain, UAV, oblique photogrammetry, near-field image, absolute orientation

1　绝对定向坐标系建立

直接测量无人机近景定向过程中，会存在各种不确定因素，如直线特征干扰、冗余坐标较多等，为了避免误差，需要建立绝对定向坐标系，进行准确测量[1-3]。

首先要建立一个比例相同的空间坐标系，即利用空间坐标系直观实际图像，排除预知的因素影响，测量近景图像，如图1所示。

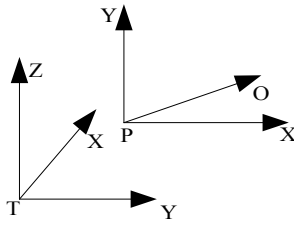


图1　空间坐标系示意图

图1中，空间坐标系的3个坐标轴分别用X、Y、Z表示；T、P、S为坐标原点。预测将空间坐标移动的特定方向[4-5]，得出坐标移动距离的相关方程，如下：

$$\begin{cases} X_k - X_l = 0 \\ Y_k - Y_l = 0 \\ S_{ij} = \sqrt{\left(X_j - X_i\right)^2 + \left(Y_j - Y_i\right)^2 + \left(Z_j - Z_i\right)^2} \\ \alpha = \arctan\dfrac{Y_j - Y_i}{X_j - X_i} \end{cases} \tag{1}$$

式中，i为坐标点移动距离的起点和终点；k和l为垂直方向坐标移动距离的起点和终点；S_{ij}为移动距离，而坐标点移动距离的长度与坐标轴形成的角度为α。

通过建立空间坐标系，对得到的矩阵的方向变化坐标进行规范化处理，弥补了传统方法的不足，在Rodrigues矩阵的基础上，设所需要的方向变化矩

收稿日期：2021-06-28；修回日期：2023-03-04。
作者简介：胡华宗（1969—），硕士，高级工程师，主要研究方向为工程测量、地理信息数据处理和系统建设等，E-mail：qiaojiao10750408@163.com。

阵如下：

$$\begin{bmatrix}\bar{X}_t\\ \bar{Y}_t\\ \bar{Z}_t\end{bmatrix}=\lambda\boldsymbol{R}\begin{bmatrix}\bar{X}_p\\ \bar{Y}_P\\ \bar{Z}_p\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中，λ 为比例系数；$\boldsymbol{R}$ 为矩阵。

坐标点的处理可以减少直线特征干扰数据和冗余坐标，提高计算精度，如果公式（2）为0，则需要重新计算并单独处理，以确保操作的准确性。在此条件下，根据参数中的坐标和运行距离的方向[6-8]，计算比例系数的均值，起始值用 λ_0 表示。

$$\lambda=\frac{\sum\limits_{pi=-1}^{n}\left(\bar{X}_{pi}^{\ 2}+\bar{Y}_{pi}^{2}+\bar{Z}_{pi}^{2}\right)}{\sum\limits_{F=-1}^{n}\left(\bar{X}_F^2+\bar{Y}_F^2+\bar{Z}_F^2\right)} \tag{3}$$

式中，$\bar{X}_{pi}^{\ 2}$、$\bar{Y}_{pi}^{2}$、$\bar{Z}_{pi}^{2}$ 为中心化后的空间坐标点；F 为矩阵的干扰系数；n 为坐标点个数。

由此完成了对影像定位坐标点的初始处理，建立了绝对定向坐标系，为准确量测影像奠定基础。

2 影像灰度确定

上述过程对影像定位坐标点进行了初始处理，在此基础上，在方向变化矩阵中，由于矩阵的数据输入范围尚未确定，矩阵是不断变化的，容易产生一些未知的方向因子，而空间角度的大小对其的影响也具有不确定性[9]。因此，需要确定影像的灰度，即通过影像间投影方式的循环变化，放大显示影像，设灰度差用 n 来表示，则：

$$n_1+g_1(x,y)=n_2+g_2(x,y) \tag{4}$$

式中，$g_1(x,y)$、$g_2(x,y)$ 分别为坐标参数。

此时确定的影像灰度是唯一的，但是影响色度的因素较多，例如自然因素阳光或物理因素辐射，当影像显示比例较小时，影像产生畸变，影像间投影方式的变化只有一次，达不到循环变化的效果，因此，需要利用最小二乘法，二次匹配影像灰度，匹配函数为：

$$\boldsymbol{R}=h_0+h_1g_2\left(a_0+a_1x+a_2y,b_0+b_1x+b_2y\right) \tag{5}$$

式中，a_0、a_1、a_2 为变化后系数；b_0、b_1、b_2 为受到影响后系数；h_0、h_1 为变量。

根据公式可知，最小二乘法结果是否准确取决于比例系数，系数增加，结果也就相对准确，所以，具有更清晰、更具体的影像灰度差，进而确定影像的灰度。在影响灰度值的基础上，对定向影像进行优化处理。

3 定向影像优化处理

以空间坐标系和影像灰度值为前提，构建一般的定向影像优化处理模型，设坐标点为 $(\Delta X,\Delta Y,\Delta Z)$，$\boldsymbol{R}$ 代表所得矩阵，建立平差关系，将其依次排列，形成多个矩阵，即：

$$Q_T=\boldsymbol{A}_3^tN_a^{-1}\boldsymbol{A}_3 \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{A}_3^t$、$\boldsymbol{A}_3$ 分别为矩阵中的两个向量，k 为次数，在此条件下，求出相关系数为：

$$S_k=N_K^{-1}W_K \tag{7}$$

式中，N_K^{-1} 为定向元素的起始值；W_K 为平差处理参数。由此完成定向影像优化模型的构建。

4 旋转角与旋转轴确定

在上述优化模型的基础上，计算影像的旋转角与旋转轴。在对近景影像的测量中，在空间坐标系的前提下，已知比例系数，假设旋转角度的大小为0，计算出移动距离，从而确定绝对定向的控制方向。具体公式如下：

$$\dot{X}_m=\frac{\sum\limits_{n}^{i=0}X_m}{n} \tag{8}$$

式中，X_m 为影像在空间坐标系的实际方向 X 的坐标点。

计算空间坐标，如下：

$$\begin{aligned}\bar{X}_m&=X_m-\dot{X}_m\\ \bar{Y}_m&=Y_m-\dot{Y}_m\\ \bar{Z}_m&=Z_m-\dot{Z}_m\end{aligned} \tag{9}$$

将公式中的空间坐标转换为平面坐标，为：

$$\begin{bmatrix}\bar{X}_G\\ \bar{Y}_G\\ \bar{Z}_G\end{bmatrix}=\lambda\boldsymbol{R}\begin{bmatrix}\bar{X}_m\\ \bar{Y}_m\\ \bar{Z}_m\end{bmatrix} \tag{10}$$

在公式中可以看出，变换后的空间坐标已经抛开了距离的因素，因此，可以精准地测量旋转角度。在设角度值为0时，得到方程：

$$V=Ax-1 \tag{11}$$

式中，Ax 为角度参数。

实际近景影像和平面空间坐标可以看成两个部分，当旋转中的实际影像与平面影像相重合时，表示为：

$$\boldsymbol{R}_J=\boldsymbol{R}'\,\mathrm{rot}\left(n_j,\alpha\right)=\begin{bmatrix}c & -s & 0\\ s & c & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{12}$$

式中，n_j 为实际近景系数；$\boldsymbol{R}$ 为矩阵；α 为角度。

获取旋转轴的步骤，如下所示：

设实际空间与平面模型间存在属性关系[10-12]，当同时旋转时，关系公式如下：

$$n_j = \boldsymbol{R}' n_l \tag{13}$$

按照旋转轴的方向规律，旋转的角度可以用 q 来表示，在旋转前系数是 q_i，旋转后系数是 q_j 的前提下，可得出公式为：

$$n_l \cdot n_j = |n_l||n_j|\cos\theta, \theta = \arccos\left(\frac{n_l \cdot n_j}{|n_l||n_j|}\right) \tag{14}$$

已知水平方向与垂直方向形成的角度，旋转轴的计算公式为：

$$q = q_i \times q_j \tag{15}$$

通过上述公式得到的矩阵将具有坐标点和绝对方向元素分成若干小部分，分别进行计算。如果控制位置距离和方向，则绝对定向成像方法大大简化，定向过程如图2所示。

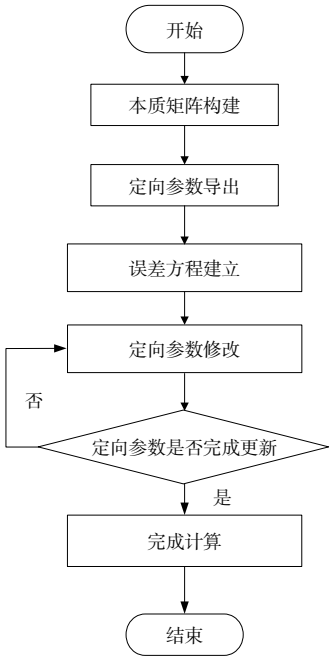


图2　定向流程

图2中，定向参数至关重要。虽然文中已对定向参数进行预估，但仍然需要细化参数。假设一个方向的直线上存在两个随机的变量为 p_1、p_2，而实际影像的两点用 p_1'、p_2' 来表示，因此空间与平面间距离的公式表示为：

$$d^2\left(\hat{l}, l'\right) = d^2\left(\hat{p}_1, l'\right) + d^2\left(\hat{p}_2, l'\right) \tag{16}$$

式中，$\hat{l}$ 为变换前的距离参数，变换之后的距离为 l'。

为了避免计算中的误差影响定位结果[13-15]，将用时具有大小和方向的量即以向量的形式将定位坐标具体化，设定为 ψ^*，建立函数为：

$$\psi^* = \sum_{i\in 1}\sum_{k\in l} d^2\left(l_{ik}, l'_{\alpha}\right) \tag{17}$$

式中，l_{ik} 为近景影像；l'_{α} 为图中坐标点；d^2 为影像中直线。

得出投影后的坐标阈值：

$$A = K\left(\mathrm{X}_r - T\right)/\lambda + KT_j \tag{18}$$

式中，X_r、λ、T_j 为变化后的优化值，K 为未变化的值。

每个坐标可对应一个误差关系，当水平直线与垂直直线形成角度小于45°时，可以获得水平方向的长度，当大于45°时，可以获取垂直方向的长度，公式如下：

$$\begin{cases} l_x = (y - y_a)\cdot(x_b - x_a)/(y_b - y_a) + x_a - x \\ l_y = (x - x_a)\cdot(y_b - y_a)/(x_b - x_4) + y_a - y \end{cases} \tag{19}$$

式中，x、y 为投影前的坐标；x_a、y_a、x_b、y_b 为实际近景的坐标。通过计算误差得到的公式来看，将误差降到最低，具体步骤如图3所示。以此完成近景影像绝对定向。

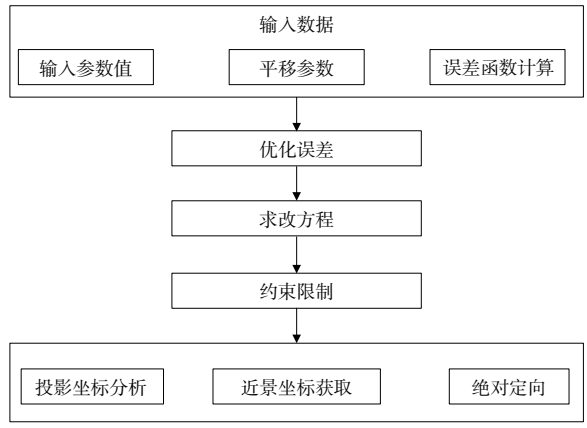


图3　定向误差降低过程

5　实验对比

为验证设计的近景影像绝对定向方法在实际中的应用效果，对4个区域进行影像模拟，并将传统的定向方法（文献[2]方法和文献[3]方法）与所研究方法对比。

在对比实验开始前需要对选定的4个区域进行扫描，得到的近景影像定向坐标参数如表1所示。

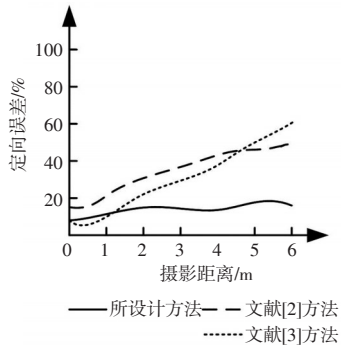
表1　近景影像定向坐标参数

区域	x_a/像素	x_b/像素	y_a/像素	y_b/像素
1	0.814 315 7	0.032 226 7	0.358 011 3	0.269 026 4
2	−0.629 316 6	0.040 391 4	0.523 457 2	0.523 319 0
3	−0.436 013 2	0.022 531 8	0.205 148 3	0.764 318 8
4	0.329 678 2	0.723 314 1	0.062 429 0	0.636 216 9

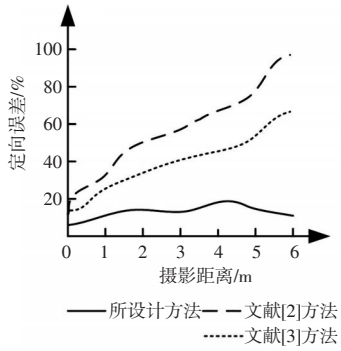
以表1数据为基础，从不同距离、不同噪声两个角度比较3种方法的定向误差。

5.1　不同距离下定向误差对比

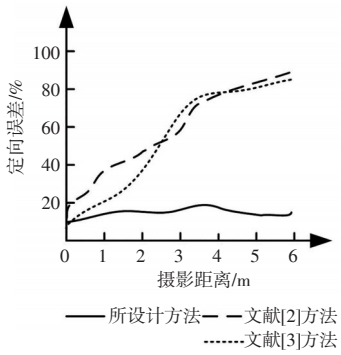
所研究的定向方法与传统定向方法，在不同距离下的定向误差对比结果如图4所示。



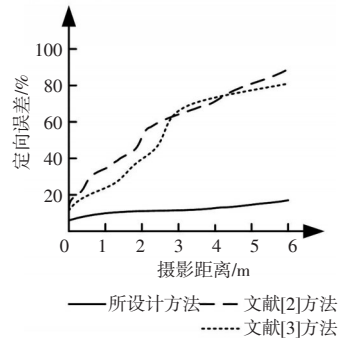
a 不同距离下区域1的定向精度



b 不同距离下区域2的定向精度



c 不同距离下区域3的定向精度



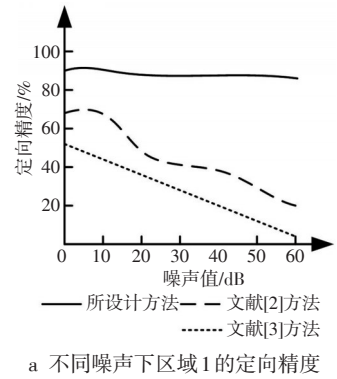
d 不同距离下区域4的定向精度

图4　不同距离下定向误差对比

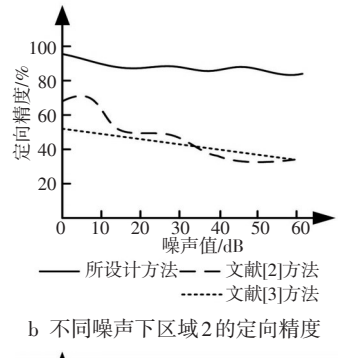
通过图4可知，在摄影距离较短时，传统的定向方法与所研究的定向方法的相对误差均较小，但是随着摄影距离的逐渐增加，传统方法定向后的相对误差呈逐渐增加的趋势，此次研究方法的相对误差没有明显增加，由整体曲线可知，测量的相对误差一直在20%以下，精度保持良好。

5.2　不同噪声下定向精度对比

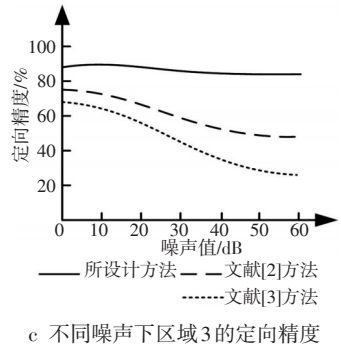
在实际的定向过程中，会存在一定的噪声，为此，此部分实验主要在噪声环境下，验证传统方法与所研究方法的定向精度。在实验中，添加不同均值大小的随机噪声，噪声范围设置为60 dB，并进行多次实验，取实验结果的平均值，结果如5所示。



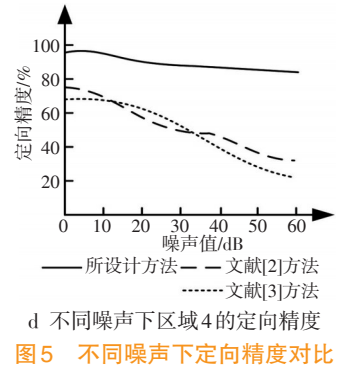
a 不同噪声下区域1的定向精度



b 不同噪声下区域2的定向精度



c 不同噪声下区域3的定向精度



d 不同噪声下区域4的定向精度

图5　不同噪声下定向精度对比

（下转第38页）