

吕雯雪, 李建章. 基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘研究[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 202–205.  
[LV Wenxue and LI Jianzhang. Research on UAV Fine Mapping of Terrain Feature Points Based on Relay Communication Technology [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 202–205. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.037.]

# 基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机 精细测绘研究<sup>\*</sup>

吕雯雪<sup>1,2,3</sup>, 李建章<sup>1,2,3</sup>

(1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:** 采用当前方法绘制灾后区域地形时, 测绘所用时间较长, 绘制结果与实际区域地形之间存在较大误差。为此, 该文提出基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法。采用中继通信技术获取灾后区域地形影像, 基于共线方程理论获取灾后区域地形特征点对应的坐标, 利用 POS 辅助控制三角测量方法处理影像, 通过高精度物方 DEM 匹配技术实现灾后区域地形的绘制。

**关键词:** 中继通信技术; 灾后区域地形; 无人机; 地形绘制

**中图分类号:** P231; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)04-0202-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.037

自然灾害具有快速变化和不确定性等特点, 因此及时掌握灾害的发展情况和发生情况是救灾、减灾和防灾的首要问题<sup>[1]</sup>。在实际应用中研究自然灾害的主要途径是在数字高程模型中提取地形特征线进行地貌综合分析, 在遥感数据分析中提取的地形因子也是重要的辅助信息<sup>[2]</sup>。在我国灾害预警研究中, 可靠、高效的对灾后区域进行监测, 实现灾后区域地形的精细测绘是研究的重点。当前灾后区域地形测绘方法存在测绘效率低和测绘精度低的问题, 需要对灾后区域地形测绘方法进行研究与分析<sup>[3]</sup>。

曹斌等人提出基于 WorldView-2 影像的灾后区域地形测绘方法, 该方法在双介质物像几何关系的基础上通过双介质立体摄影测量折射改正方法在 WorldView-2 立体影像的基础上测绘灾后区域地形, 该方法测绘的灾后区域地形与实际地形之间的误差较大, 存在测绘精度的问题<sup>[4]</sup>。唐新明等人<sup>[5]</sup>提出基于合成孔径雷达干涉的灾后区域地形测绘方法, 该方法通过定标设备测量校验干涉参数和几何参数, 通过校验参数处理干涉数据, 获得 DEM 数据, 结合升降轨融合、长短基线组合和区域网平差技术实现灾后区域地形的测绘, 该方法处理干涉数据所用的时间较长, 存在测绘效率低的问题。孟震等人<sup>[6]</sup>提出基于双目视觉的灾后区域地形测绘方法该方法通过 DLT 模型对主点坐标进行估算, 采用非线性优化方法对相机的

内外参数进行标定, 在图像形态学的基础上提取光斑对应的质心坐标, 根据其余光斑与定位光斑之间存在的位置关系, 匹配两幅图像中存在的同名斑点, 通过超定线性方程组对点阵光斑对应的三维坐标进行计算, 实现灾后区域地形的测绘, 该方法采用 DLT 模型估算主点坐标时容易出现误差, 存在测绘精度低的问题。

为了解决上述方法中存在的问题, 本文提出基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法。

## 1 灾后区域地形特征点提取

### 1.1 中继通信技术

由于每个模块通过运营商获取的 IP 地址是不固定的, 因此每登录时都对应不同的 IP 地址, 不能直接实现两个 GPRS 模块的网络通信<sup>[7]</sup>。需要 NAT 网络地址转换服务器实现 IP 地址的分配, 将通信协议植入 GPRS 模块中的芯片中, 实现数据在 GPRS 模块之间的转发。采集的监测数据通过机载 GPRS 模块传输到 NAT 网络服务器中, 利用移动网络实现无人机地面站对指定网络服务器的访问, 通过移动网络通信的方式根据下载和上传的飞行数据对无人机航摄作业进行控制。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-03-05 修回日期: 2020-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41661091); 兰州交通大学优秀平台支持项目(201806)

第一作者简介: 吕雯雪(1996-), 女, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要从事点云数据处理研究. E-mail: 1364950611@qq.com

通讯作者: 李建章(1974-), 男, 甘肃会宁人, 副教授, 主要从事全球定位系统与测量数据处理研究.

E-mail: 13919054939@163.com

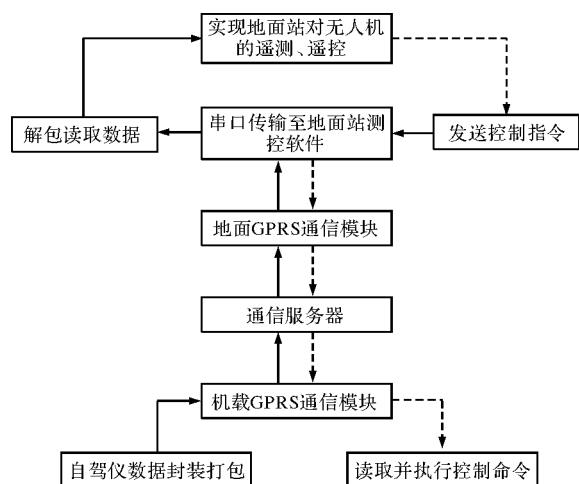


图1 中继通信工作原理

## 1.2 共线方程

基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法通过构建中心投影的共线方程对地面点和像点之间存在的数学关系进行研究,提取灾后区域地形特征点。

设  $A$  为地面点;  $S$  为摄影中心点;  $a$  为像平面中地面点  $A$  对应的像点;  $(x, y, -f)$  为在像空间坐标系中像点  $a$  对应的位置;  $(X_s, Y_s, Z_s)$  为在地面坐标系中摄像中心  $S$  对应的位置;  $(X, Y, Z)$  为地面坐标系中地面点  $A$  对应的位置。在两坐标系数学关系的基础上可得:

$$\begin{pmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{pmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中:  $R$  为像空间辅助坐标系和像空间坐标系的正交矩阵, 可利用 POS 的角元素计算得到;  $\lambda$  为比例因子;  $f$  为相机焦距;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为矩阵元素, 描述方向余弦。消除比例因子  $\lambda$ , 对式(1)进行展开:

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}; \\ y = f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}. \end{cases} \quad (2)$$

对内方位元素进行考虑, 可得:

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}; \\ y - y_0 = f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $(x_0, y_0)$  为像主点, 当确定了相片的内外方位元素时, 式(3)表示在像片上地面点  $(X, Y, Z)$  的像点  $(x, y)$ , 即为在摄影时, 经投影中心将物点投影到像点的过程。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}. \quad (4)$$

在式(4)的基础上对式(2)进行变形, 可得:

$$\begin{cases} \frac{X - X_s}{Z - Z_s} = \frac{a_1 x + a_2 y + a_3 z}{c_1 x + c_2 y + c_3 z}; \\ \frac{Y - Y_s}{Z - Z_s} = \frac{b_1 x + b_2 y + b_3 z}{c_1 x + c_2 y + c_3 z}. \end{cases} \quad (5)$$

式(5)表示通过投影中心将像点投影到相应物

点的过程, 分析式(5)可知, 即使已知像点坐标  $(x, y)$  和外方位元素, 也不能确定物点对应的空间位置  $(X, Y, Z)$  [8-9]。因此需要对同一物体从不同摄站进行摄影, 确定物点对应的三维空间坐标。通过立体相对获得下式:

$$\begin{cases} \frac{X - X_s}{Z - Z_s} = \frac{a_1 x_0 + a_2 y_0 + a_3 f}{c_1 x_0 + c_2 y_0 + c_3 f}; \\ \frac{Y - Y_s}{Z - Z_s} = \frac{b_1 x_0 + b_2 y_0 + b_3 f}{c_1 x_0 + c_2 y_0 + c_3 f}; \\ \frac{X - X'_s}{Z - Z'_s} = \frac{a'_1 x_0 + a'_2 y_0 + a'_3 f}{c'_1 x_0 + c'_2 y_0 + c'_3 f}; \\ \frac{Y - Y'_s}{Z - Z'_s} = \frac{b'_1 x_0 + b'_2 y_0 + b'_3 f}{c'_1 x_0 + c'_2 y_0 + c'_3 f}. \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)变化, 构建共线方程, 获得灾后区域地形特征点坐标:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c_1 x_0 + c_2 y_0 + c_3 f) X_s - (a_1 x_0 + a_2 y_0 + a_3 f) Z_s \\ (c_1 x_0 + c_2 y_0 + c_3 f) Y_s - (b_1 x_0 + b_2 y_0 + b_3 f) Z_s \\ (c'_1 x_1 + c'_2 y_1 + c'_3 f) X'_s - (a'_1 x_1 + a'_2 y_1 + a'_3 f) Z'_s \\ (c'_1 x_1 + c'_2 y_1 + c'_3 f) Y'_s - (b'_1 x_1 + b'_2 y_1 + b'_3 f) Z'_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_1 x_0 + c_2 y_0 + c_3 f & 0 & -(a_1 x_0 + a_2 y_0 + a_3 f) \\ 0 & c_1 x_0 + c_2 y_0 + c_3 f & -(b_1 x_0 + b_2 y_0 + b_3 f) \\ c'_1 x_1 + c'_2 y_1 + c'_3 f & 0 & -(a'_1 x_1 + a'_2 y_1 + a'_3 f) \\ 0 & c'_1 x_1 + c'_2 y_1 + c'_3 f & -(b'_1 x_1 + b'_2 y_1 + b'_3 f) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

## 2 灾后区域地形测绘

将每张相片输入到 POS 系统中, 通过卡尔曼滤波器在曝光时刻对数据做滤波处理, 获得像片对应的外方位元素用于影像的定向, 为了提高摄影测量的精度, 基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法采用 POS 辅助空中三角测量。

基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘采用 POS 辅助光束法区域网平差, 将姿态角、GPS 摄站坐标和像点坐标作为观测值, 将各种系统误差改正参数、影像外方位元素和物点地面坐标作为待定参数, 实现区域网平差, 即空中三角测量获得的外方位元素与 POS 系统获得的外方位元素相等 [10]。采用 GPS 采集到的位置坐标如下:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式中:  $X_A$ 、 $Y_A$ 、 $Z_A$  为在地面坐标系中 GPS 天线相位中心对应的坐标;  $R$  为正交变换矩阵;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为在航摄仪本体坐标系  $S-uvw$  中  $A$  点对应的坐标。

航摄仪本体坐标系  $S-uvw$  绕  $u$ 、 $v$ 、 $w$  连续旋转  $\varphi_l$ 、 $\omega_l$ 、 $k_l$  角获得 IMU 本体坐标系, 对于 IMU 获得的姿态角  $\varphi'$ 、 $\omega'$ 、 $k'$  存在下式:

$$R_{IMU} = R R_l^T; \quad (9)$$

$$R_{IMU} = R_{\varphi'} R_{\omega'} R_{k'}; \quad (10)$$

$$R_l = R_{\varphi_l} R_{\omega_l} R_{k_l}. \quad (11)$$

$$\text{令: } R R_l^T = \begin{pmatrix} a'_1 & a'_2 & a'_3 \\ b'_1 & b'_2 & b'_3 \\ c'_1 & c'_2 & c'_3 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

获得姿态角  $\varphi'$ 、 $\omega'$ 、 $k'$  的计算公式:

$$\begin{cases} \varphi' = -\arctan(\frac{a'_3}{c'_3}); \\ \omega' = -\arcsin(\frac{b'_3}{c'_3}); \\ k' = -\arctan(\frac{b'_1}{b'_2}). \end{cases} \quad (13)$$

上述过程即为 POS 辅助光束法空中三角测量的主要过程,其代表了影响外方元素与含有 POS 数据的联合平差中 IMU、GPS 和像点坐标测定的影像定向参数之间存在的几何关系。

通过规则的栅格高程抽样离散点,根据像素对应的三维坐标生成三维点云,采用有限元软件获得粗略 DEM,在共线方程的基础上获得正射影像 DOM。

绘制灾后区域地形的基础是高精度的 DEM,当用当前方法制作 DEM 时,在前期阶段需要对水系、面状和线状等要素进行编辑,受作业员能力的影响较大,存在精度低、作业效率低、质量差和周期长的问题。

影像匹配是获取高精度 DEM 的关键,基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法采用多影像相关匹配算法结合特征线、特征点等多个匹配单元,获得高精度的匹配结果。

设置影像和影像间的核线约束条件,设  $N_i$  代表点  $p_o$  在搜索影像  $I_i$  和参考影像  $I_0$  对应匹配窗口之间存在的归一化相关系数,其计算公式如下:

$$N_i(p_o, Z) = \frac{\sum_{s \in W} [I_0(s) - T_o] \times [I_i(s_i(Z)) - T]}{\sqrt{\sum_{s \in W} [I_0(s) - T_o]^2} \sqrt{\sum_{s \in W} [I_i(s_i(Z)) - T]^2}}; \quad (14)$$

$$T_o = \frac{1}{m \times n} \sum_{s \in W} I_0(s); \quad (15)$$

$$T = \frac{1}{m \times n} \sum_{s \in W} I_i(s_i(Z)). \quad (16)$$

式中:  $I_0$ 、 $I_i$  代表影像对应的灰度值矩阵;  $s$  代表匹配窗口中存在的像点;  $W$  代表参考影像对应的匹配窗口;  $s_i(Z)$  代表搜索影像上存在的像点,与  $s$  相对应;  $m$ 、 $n$  代表匹配窗口  $W$  对应的大小。

归一化相关系数与传统系数的定义之间存在区别,是高程  $Z$  和像点  $p_o$  的函数,  $Z \in [Z_o - \Delta Z, Z_o + \Delta Z]$ ,其中  $\Delta Z$  代表高程容差,  $Z_o$  代表像点  $p_o$  对应的概略高程值,定义  $SN$ ,加权平均所有立体像对的归一化相关系数  $N_i$ :

$$S_N(p_o, Z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i(p_o, Z). \quad (17)$$

通过定义  $S_N$  实现多个影像的同时匹配,完成灾后区域地形的测绘。

### 3 实验结果与分析

为了验证基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法的整体有效性,需要对基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法进行测试。本次测试在 Simulink 平台中完成,分别采用基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法、基于 WorldView-2 影像的灾后区域地形测绘方法和基于合成孔径雷达干涉的灾后区域地形测绘方法进行测试,对比三种不同方法的测绘效率,测试结果如图 2 所

示。分析图 2 可知,在多次迭代中采用基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法绘制地形所用的时间均低于采用基于 WorldView-2 影像的灾后区域地形测绘方法和基于合成孔径雷达干涉的灾后区域地形测绘方法绘制地形所用的时间。这是因为基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法通过中继通信技术获取灾后区域地形的数据,缩短了数据采集时间,提高了基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法的测绘效率。

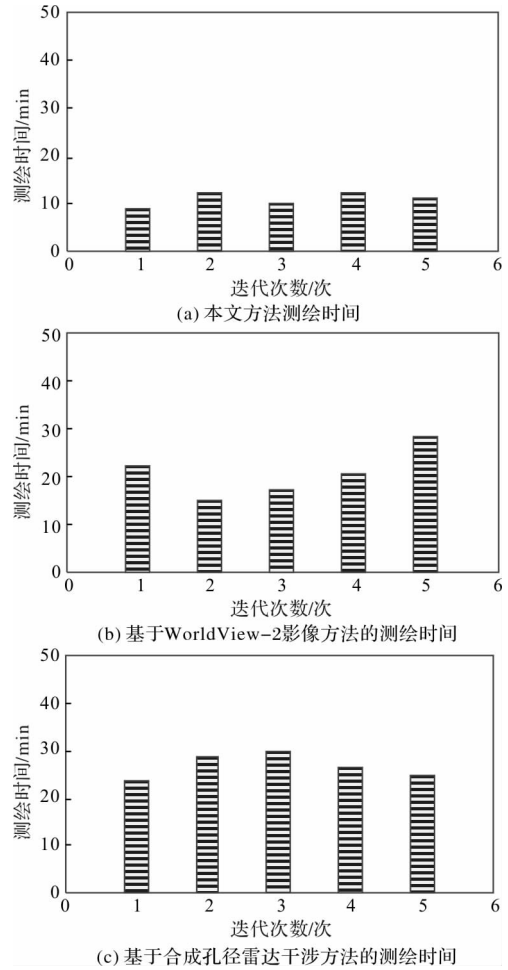


图 2 不同方法的测绘时间

分别采用基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法、基于 WorldView-2 影像的灾后区域地形测绘方法和基于合成孔径雷达干涉的灾后区域地形测绘方法进行测试,对比不同方法的测绘精度,测试结果如图 3 所示。分析图 3 中的数据可知,基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法在多次迭代中获得的测绘精度均高于基于 WorldView-2 影像的灾后区域地形测绘方法和基于合成孔径雷达干涉的灾后区域地形测绘方法在多次迭代中获得的测绘精度,因为基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法采用多影像相关匹配算法结合特征线、特征点等多个匹配单元,获得高精度的匹配结果,提高了基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法的绘制精度。

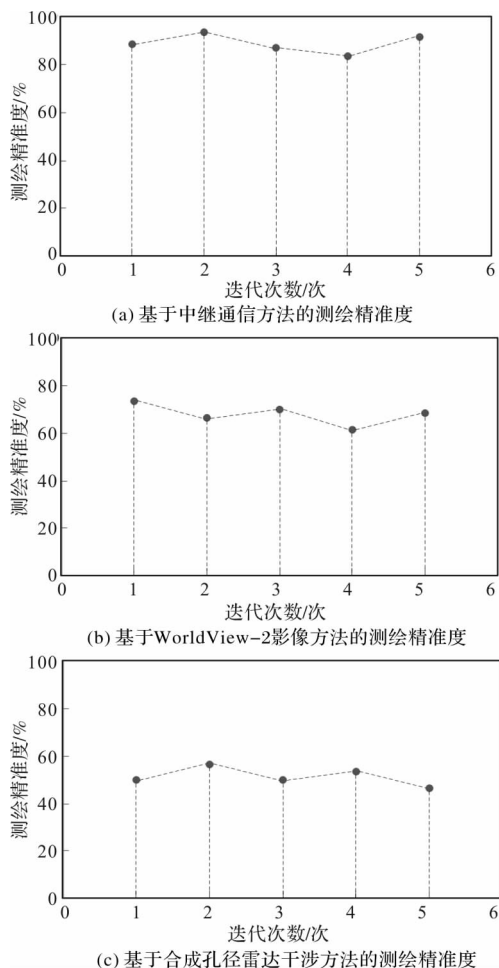


图 3 不同方法的测绘精度

## 4 结束语

无人机获取影像不受地形限制, 具有成本低、

快速和方便的特点, 能够快速、实时的采集高分辨率的影像, 被广泛的应用在灾后区域地形制图领域中, 使灾后区域地形测绘方法成为研究的热点。当前灾后区域地形测绘方法存在测绘效率低和测绘精度低的问题, 提出基于中继通信技术的灾后区域地形特征点无人机精细测绘方法, 可在较短的时间内高精度的完成灾后区域地形的绘制, 为灾后的救援和重建提供了相关数据。

## 参考文献:

- [1] 林元茂, 李建, 韩立. 灾后复杂地形区域的测量测绘模型设计[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 35-40.
- [2] 白希选, 闫昊明, 朱耀仲, 等. 利用卫星大地测量技术研究海面动力地形及地转流的进展[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2063-2071.
- [3] 张永毅, 张兴福, 周波阳, 等. 剩余地形模型高程异常计算的积分法及精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(9): 770-774.
- [4] 曹斌, 朱述龙, 邱振戈, 等. WorldView-2 影像双介质摄影测量的浅海地形测绘试验[J]. 遥感学报, 2017, 22(5): 745-757.
- [5] 唐新明, 李涛, 高小明, 等. 雷达卫星自动成图的精密干涉测量关键技术[J]. 测绘学报, 2018, 47(6): 730-740.
- [6] 孟震, 李丹勋, 曹列凯, 等. 基于双目视觉和主动光源的河工模型三维地形测量方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(5): 901-913.
- [7] 张堃薇, 王可东. 多参照点联合概率地形误匹配判断准则[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(7): 1562-1568.
- [8] 孙亚飞, 江利明, 柳林, 等. TanDEM-X 双站 InSAR 地形提取及精度评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 100-105.
- [9] 欧阳明达, 孙中苗, 翟振和, 等. 海洋垂直重力梯度异常的计算及其在地形反演中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(9): 766-769.
- [10] 吕利利, 颜耀文, 董龙龙. 基于不同地形校正模型的影像反射率对比分析[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(4): 751-759.

# Research on UAV Fine Mapping of Terrain Feature Points Based on Relay Communication Technology

LV Wenxue<sup>1,2,3</sup> and LI Jianzhang<sup>1,2,3</sup>

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;  
2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** When the current method is used to map the post disaster regional terrain, the mapping takes a long time, and there is a big error between the mapping results and the actual regional terrain. For this reason, a precise mapping method of UAV based on relay communication technology is proposed. After the disaster, the terrain image is obtained by relay communication technology, the coordinates corresponding to the terrain feature points are obtained based on the collinear equation theory, the image is processed by POS auxiliary control triangulation method, and the terrain is drawn by high-precision object DEM matching technology. The experimental results show that the proposed method has high efficiency and accuracy.

**Key words:** relay communication technology; terrain after the disaster; drone; terrain drawing