

基于多无人机协同测绘技术的山区地表覆被变化成像分析

董洁, 段丁丁, 宋博, 王兴中

(北京建业通工程检测技术有限公司, 北京 102627)

摘要: 为了准确监测当前地表覆被情况, 全面可靠地分析山区多种地表覆被类型的面积变化, 以某省中的某山区作为研究区域, 提出基于多无人机协同测绘技术的山区地表覆被变化成像分析方法。结合该研究区域的地形、地势情况, 采用人工势场法构建多无人机协同测绘航迹规划模型, 完成其地表覆被影像测绘, 获取准确的遥感测绘监测结果; 利用最大类间方差方法, 获取该影像中的变化像元和非变化像元的最优阈值, 以此确定地表覆被的变化情况。分析结果显示: 该方法可保证多无人机的航行时间误差均在1 s内; 无人机之间的距离均大于2.5 m; 能够依据测绘区域情况, 完成无人机的协同航迹规划; 测绘影像的信息熵均在6.8以上, 质量较好, 可以准确监测当前地表覆被情况, 从而全面呈现山区耕地、林地、草地、湿地、水体、人造地表、未利用地多种地表覆被类型的变化情况, 且与区域发展规划一致, 可靠性较强。

关键词: 多无人机; 协同测绘技术; 山区地表; 覆被变化; 成像分析

中图分类号: TP943 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2025.01.14

0 引言

近几年, 环境变化分析以及生态环境演变成为环境科学领域中的重点关注问题, 并且也是国土资源管理部门的重要管理内容。在该管理过程中, 陆地生态系统中的土壤、水以及植被的变化情况, 均是管理的核心依据^[1-3]。其中, 地表覆被变化情况更是直观体现生态环境变化的重要因素, 依据地表覆被的变化可进行气候变化、生态环境变化的分析和判断。但是山区地区的地形、地势较为复杂, 并且具有明显的云雾天气特征, 因此, 在进行该类地区生态环境或者土地资源管理过程中^[4], 对于该地区的覆被信息的采集可靠性相对较差, 导致对于生态环境变化的分析、土地资源的演变统计结果的精准性降低^[5-6]。

为提升山区地表覆被变化信息的采集效果, 文献^[7]以某地区为例, 基于时序合并的PS-InSAR方法对其地表情况进行监测, 但是, 该方法在应用过程中, 无法对地表覆被的演变情况进行有效分析; 文献^[8]为实现地表覆被变化的分析, 主要结合自然和人文两种要素, 构建地表覆被分析模拟模型。但是以上两种方法在应用过程中, 是依据统计的相关数据完成模拟分析, 应用在地形复杂的山区环境中, 无法准确获得当前地表覆被的监测情况, 难以全面分析多种地表覆被类型的变化情况。

无人机遥感技术已经在诸多领域中被大量应用, 其具有可操作性较好、分辨率较高等优势, 对于复杂地形的监测效果良好^[9-10]。随着应用需求的逐渐增加, 测绘区面积的增加, 单一无人机遥感技术的视野和覆盖范围具有局限性, 无法保障全面覆盖目标区域, 导致最终测绘成像质量不高。因此, 为了

收稿日期: 2023-10-10

第一作者: 董洁(1987—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事市政工程检测、工程测绘等研究, E-mail: bihuan386066032@163.com。

保证测量精度和全面性,多无人机协同测绘技术被大量关注,其具有更佳的容错性和鲁棒性。为了准确监测当前地表覆被情况,全面可靠地分析多种地表覆被类型的变化,笔者引入无人机遥感技术^[11],根据山区地形、地势的特点获得监测影像,以某山区为例,提出基于多无人机协同测绘技术的山区地表覆被变化成像分析方法,并进行变化分析。

1 山区地表覆被变化成像分析

1.1 研究区概况

将江西省景德镇市作为研究区域,地理位置介于东经 116°57′—117°42′,北纬 28°44′—29°56′ 之间。该区域属于四极构造区的高台山穹断东区,地质构造复杂。属于亚热带季风气候,境内光照充足,雨量充沛,温和湿润,四季分明。研究区分布情况如图 1 所示。该研究区受到地质构造和岩石类型的影响,形成多种土壤类型,地表植被分布格局较为独特,

主要覆盖自然生长的森林、草原、灌丛等以及人类种植的农作物。

1.2 基于多无人机协同测绘技术的地表数据采集

1.2.1 多无人机参数

为实现研究区域地表覆被数据采集,文中采用 5 架无人机进行该区域的遥感成像^[12],成像使用的无人机为 eBee Plus 型号,该无人机具有重量轻、耐用性好等特点,其在进行成像过程中,能够从起飞到着陆过程中,实现地表图像的自动获取,无人机的详细参数如表 1 所示。

表 1 无人机参数详情

Tab.1 Details of drone parameters

参数名称	数值
最大转弯角/°	60
速度范围/(m/s)	40~70
最短航路段/km	0.5
最大航行高度/km	6
最大航程/km	150
最大俯冲角/°	30
最大爬升角/°	30

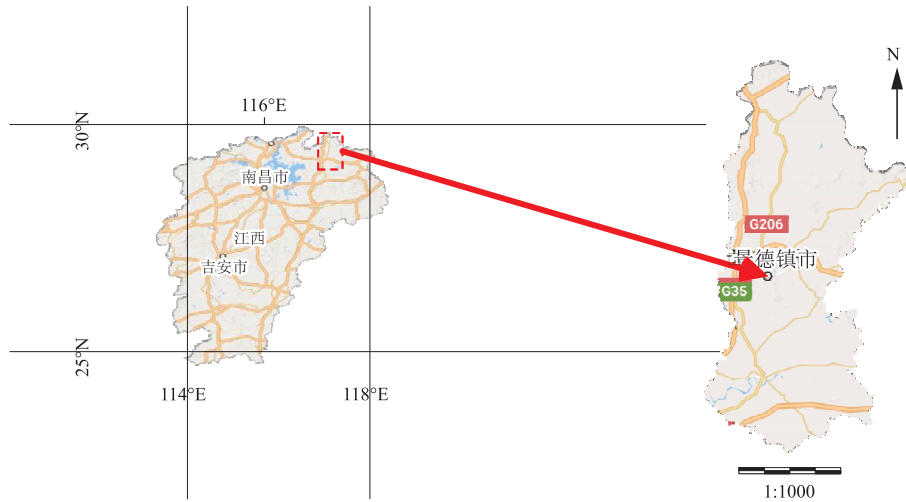


图 1 研究区分布示意图

Fig.1 Distribution diagram of the research area

1.2.2 多无人机协同测绘航迹规划

笔者在进行山区地表覆被成像时,采用多无人机协同测绘技术完成,在协同测绘过程中,为提升目前山区地表覆被监测结果的准确性,需要保证测绘成像效果,因此进行协同测绘航迹规划^[13-15]。文中结合研究区环境的情况以及测绘成像需求,采用人工势场法构建多无人机协同测绘航迹规划模型,用于完成多无人机协同测绘,模型的整个结构如图 2 所示。



图 2 多无人机协同测绘航迹规划模型结构

Fig.2 Structure of multi UAV collaborative surveying and mapping track planning model

1) 传感器类型选择模块

选择多光谱传感器的参数具体如下,波段范围:450 nm~520 nm(蓝光)、540 nm~580 nm(绿光)、650 nm~690 nm(红光)、780 nm~900 nm(近红外);光谱分辨率:以12位表示每个波段内能够检测到的细微变化程度;像素分辨率:6 000×4 000;重叠度:25%;帧速率:每秒3帧;数据格式:32位的TIFF格式。

2) 人工势场算法模块

在人工势场算法中,无人机被视为一个受力点,具有引力和斥力。引力使得无人机朝着目标点移动,而斥力使得无人机远离障碍物和其他无人机。无人机的航行引力、斥力与多架无人机之间由于相互斥力而产生的合力分别用 F_a 、 F_e 、 F_g 表示,其公式为:

$$F_a = \eta \times s_{i,k} \quad (1)$$

$$F_e = \begin{cases} \xi \times \frac{1}{l_{ij}}, & l_{ij} \leq l_0 \\ 0, & l_{ij} > l_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$F_g = \frac{l_{ij}}{|l_{ij}|} \sum_{i=1}^n \frac{\xi}{l_{ij}^2} \quad (3)$$

式中: η 表示引力系数; ξ 表示斥力系数; l_0 表示无人机和干扰源之间的最短距离; $s_{i,k}$ 和 l_{ij} 均表示欧式距离,前者对应第 i 架无人机和第 k 个干扰源之间,后者对应第 i 架和第 j 架无人机之间; n 表示无人机的数量; $|l_{ij}|$ 表示 l_{ij} 的绝对值。 $s_{i,k}$ 和 l_{ij} 的计算公式分别为:

$$s_{i,k} = \sqrt{(x_{u,i} - x_{r,k})^2 + (y_{u,i} - y_{r,k})^2} \quad (4)$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_{u,i} - x_{u,j})^2 + (y_{u,i} - y_{u,j})^2} \quad (5)$$

引力和斥力相互作用,导致无人机在复杂环境中找到最优路径,并且避免与障碍物发生碰撞。

3) 航行规划模块

该模型在进行多无人机协同测绘航迹规划时,多架无人机均位于待测区域上方,下达测绘指令后,所有的无人机均按照各自设定航线进行航行,完成山区地表覆被数据采集。

如果无人机的航迹点坐标用 $\Omega = [x, y]$ 表示,无人机在二维空间中,横纵坐标用 x 和 y 表示,其表达式为:

$$\begin{cases} \tilde{x}_i = v_i \times \cos\theta \\ \tilde{y}_i = v_i \times \sin\theta \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i=1, 2, \dots, K$ 表示无人机编号;无人机在测

绘过程中的航行速度用 v_i 表示,其满足 $v \in [v_{\min}, v_{\max}]$; θ 表示航行方向和纵坐标方向之间的夹角。通过确定无人机的具体航迹点位置,进而规划出合适的航迹路径以满足测绘需求。

4) 协同飞行控制模块

航行规划还需考虑到无人机之间的相互作用和协同飞行,从而规划出适合的航迹路径以满足测绘需求。为了确保所有无人机彼此之间不会发生碰撞,设定安全距离,也是合作测绘任务中十分重要的一环。任意两架无人机之间的安全距离用 d_c 表示,文中确定该距离为2.5 m,多无人机在飞行过程中,安全距离不可小于 d_c ,其表达式为:

$$d_c < \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (7)$$

测绘区域与无人机航行区域的匹配,需要保证所有无人机的飞行区域均为待测绘区域,以提升测绘成像效果,其表达式为:

$$\begin{cases} x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \\ y_{\min} \leq y_i \leq y_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: x_{\min} 和 y_{\min} 、 x_{\max} 和 y_{\max} 分别表示山区地表测绘区域在横纵两个方向上的范围下限和上限。

多无人机在进行山区地表覆被测绘时,为降低无人机能耗,需控制无人机的航行高度 H_D ,其公式为:

$$H_D = \min \sum_{i=1}^K (d_s + d_r + d_e) \quad (9)$$

式中: d_s 表示无人机在水平方向直线飞行的距离,即两个不同测绘点之间的直线距离; d_r 表示无人机绕某个特定点(如目标区域的边缘)飞行的距离; d_e 无人机为了调整航线而进行的额外飞行距离,通常是由于避障或优化航线而进行的调整飞行。

5) 性能优化与调整模块

为保证多无人机在安全航向下的测绘效率和效果,文中通过单架无人机的航行时间、总航行距离、测绘成像精度等指标规划多无人机的测绘航迹,强调多无人机在协同测绘过程中的协同性。多无人机在协同测绘过程中,彼此之间的协同性是提升测绘成像效果的核心^[16-17],需保证所有无人机同时起飞,并在完成山区地表覆被测绘后同时返回降落点,即确保所有无人机具有相同的航行时间,其公式为:

$$\max(t_i) - \min(t_i) \leq \frac{1}{\sigma} \times \min(t_i) \quad (10)$$

式中: t_i 表示第 i 架无人机的航行时间;多无人机之间允许的航行时间差用 σ 表示。

多无人机按照上述的航迹规划,确保了无人机

在协同测绘过程中的安全性和高效性,为最终完成研究区山区地表覆被测绘成像奠定了坚实基础。

1.2.3 协同测绘遥感成像

完成山区地表覆被协同测绘成像后,该成像结果为真彩色数字图像,结合测绘相关标准、研究区域的地形和地势条件、无人机的测绘高度等多方面因素,最终确定测绘成像精度为 1:1 000,地面分辨率为 6 cm。则研究区的测绘成像结果如图 3 所示。



图 3 研究区的测绘遥感影像

Fig. 3 Surveying and remote sensing images of the study area

1.3 基于 OTSU 方法的地表覆被变化分析

完成山区地表覆被测绘成像后,使用多元变化检测算法对测绘成像进行处理,获取差异影像。

采用 OTSU 方法确定影像中变化像元和非变化像元的最优阈值。OTSU 方法是一种非参数阈值选择方法,通过最大化类间方差确定最优阈值,从而实现影像的自动二值化。

多无人机协同测绘影像用 $X(i, j)$ 表示,其像元灰度值位于 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 范围内,其中共有变化像元的数量为 M_0 ,未变化像元数量为 M_1 ,如果两种像元之间的分割阈值用 F 表示,则 M_0 和 M_1 的表达式为:

$$\begin{cases} M_0 = [X_0(i, j) | f_{\min} \leq X(i, j) \leq F] \\ M_1 = [X_1(i, j) | F \leq X(i, j) \leq f_{\max}] \end{cases} \quad (11)$$

利用最优阈值,通过像元灰度循环的方式,将影像分割为变化区域和未发生变化区域。灰度值用 i 表示,且 $[f_{\min} \leq i \leq f_{\max}]$,其在测绘影像中出现次数为 N_i ,则 $X(i, j)$ 中像元总数量计算公式为:

$$N = \sum_{i=f_{\min}}^{f_{\max}} N_i \quad (12)$$

基于此,则 i 的出现频率、发生变化和没有发生变化的像元出现频率分别用 $P(i)$ 、 P_0 、 P_1 表示,三者的计算公式分别为:

$$\begin{cases} P(i) = \frac{N_i}{N} \\ P_0 = \sum_{i=f_{\min}}^F P(i) \\ P_1 = \sum_{i=F+1}^{f_{\max}} P(i) \end{cases} \quad (13)$$

测绘影像的平均灰度值、发生变化和没有发生变化的平均灰度值分别用 u 、 u_0 、 u_1 表示,其计算公式分别为:

$$\begin{cases} u = \sum_{i=f_{\min}}^{f_{\max}} P(i) \\ u_0 = \sum_{i=f_{\min}}^F \frac{iP(i)}{P_0} \\ u_1 = \sum_{i=F+1}^{f_{\max}} \frac{iP(i)}{P_0} \end{cases} \quad (14)$$

则变化像元和没有发生变化像元的类间方差计算公式为:

$$\sigma^2(F) = P_0(u - u_0)^2 + P_1(u - u_1)^2 \quad (15)$$

式中: F 在 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 范围内循环变化; $\sigma^2(F)$ 值为最大值时,其对应的 F 结果为最佳阈值 F'' 。

根据 F'' 将影像进行二值分割,重新划分为前景 \bar{k} 与背景 \tilde{k} 两个类别,分别计算 \bar{k} 与 \tilde{k} 中的像元个数,计算过程为:

$$\bar{k}_M = F'' [u(L_i + \rho_i)^2] \quad (16)$$

$$\tilde{k}_M = F'' [(u_0 + u_1)(L_i + \rho_i)^2] \quad (17)$$

式中: \bar{k}_M 表示前景像元个数, \tilde{k}_M 表示背景像元个数, L_i 表示每个灰度级别的像素频数, ρ_i 每个灰度级别的像素频率, \bar{M} 代表图像像元。通过计算前景像元和背景像元的个数,将影像分割为不同的区域。

结合 \bar{k}_M 与 \tilde{k}_M 结果与 F'' 对比,若 $\bar{k}_M \geq F''$,则影像像元在 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 范围内属于前景,若 $\tilde{k}_M \geq F''$,则影像像元在 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 属于背景。根据影像像元分割结果构建地表覆被变化区域图像,即原始图像大小相同的二值图像,遍历 $X(i, j)$ 中所有像元,若影像中前景像元 $\bar{k}_M \leq M_0$,背景像元 $M_1 \leq \tilde{k}_M \leq M_0$,则表示该像元所表示区域为未发生变化区域,将其标记为 0。若影像中前景像元 $\bar{k}_M \geq M_0$,背景像元 $M_0 \leq \tilde{k}_M \leq M_1$,则该像元所表示区域为变

化区域,将其标记为 1,根据标记结果明确地表覆被变化区域,由此完成山区地表覆被变化分析。

2 实验结果分析

2.1 多无人机协同测绘性能分析

依据多无人机可进行山区地表覆被变化成像,无人机的协同性能对于成像结果存在一定影响。通过 Mission Planner 设计无人机的航线,输入起降点、飞行高度、航迹点位置等相关信息。飞行任务准备过程中,使用 DJI GO 4 进行无人机的起

飞、路径规划上传以及飞行参数预设等操作。实地飞行任务中,使用 PX4 Autopilot 对无人机进行控制,并搭配 Mission Planner 监控飞行状态,包括航线规划、飞行监控、数据记录等。针对采集到的成像数据,使用 Pix4D 进行数据处理和分析,生成山区地表覆被变化成像的结果。文章使用 ArcGIS 进行制图、空间分析和可视化,从而评估和总结实验结果。

获取本文方法应用后,在不同的航行速度下,对相同区域进行测绘时,无人机航行时间差以及无人机之间的距离结果,如表 2 所示。

表 2 多无人机协同测绘性能测试结果

Tab. 2 Performance test results of multi uav collaborative surveying and mapping

航行速度/(m/s)	航行时间差/s	无人机距离/m
40	0.22	2.61
43	0.54	2.55
46	0.00	2.60
49	0.61	2.74
52	0.25	2.59
55	0.10	2.62
58	0.00	2.68
61	0.00	2.58
64	0.00	2.60
67	0.75	2.65
70	0.60	0.68

依据表 2 测试结果可知:文中采用多无人机进行山区地表覆被成像,多无人机在协同测绘过程中,需保证无人机的航行时间一致,并且保证各个无人机之间的安全距离。笔者在进行测绘成像过程中,随着航行速度的变化,无人机的航行时间差均在 1 s 内;并且,无人机之间的距离均大于设定的安全距离 2.5 m。因此,笔者提出的多无人机的协同测绘技术性能良好,可在安全距

离下,在几乎相同的时间内,协同完成目标测绘成像。

为了直观展现多无人机系统相对于单无人机系统在实际作业中的优势,以测绘效率为评价指标,在相同的测绘范围和条件下,分别采用多无人机系统和单无人机系统完成同一测绘任务,记录实际测绘过程中所需的时间,并测量其覆盖面积和数据采集速度等,结果如表 3 所示。

表 3 单无人机与多无人机测绘效率对比

Tab. 3 Comparison of surveying efficiency between single and multiple drones

测绘系统	完成测绘任务所需时间/h	覆盖面积/km ²	数据采集速度/(km ² /h)
单无人机系统	10	5	0.5
多无人机系统	6	5	0.83

依据表 3 测试结果可知:多无人机系统相对于单无人机系统在测绘效率方面表现更优秀,完成同样的测绘任务所需时间更短,数据采集速度更快。

为进一步验证本文方法的多无人机协同效果,获取其在进行山区地表覆被成像过程中,无人机的航迹规划结果,如图 4 所示。

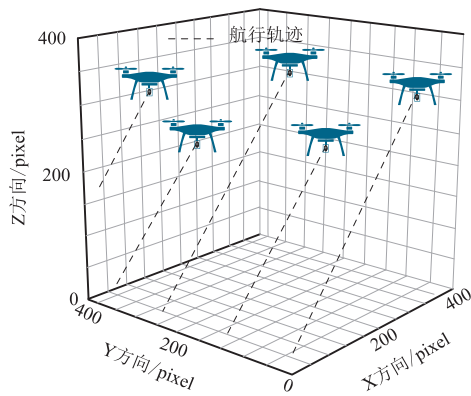


图 4 多无人机测绘航迹规划结果

Fig. 4 Mapping and path planning results of multiple unmanned aerial vehicles

依据图 4 测试结果可知:本文方法在多无人机测绘过程中,能够依据测绘区域的情况,进行无人机协同航迹规划,保证地表覆被测绘成像的全面性。

2.2 测绘成像质量测试

为分析方法应用后获取的山区地表覆被变化测绘成像质量,笔者采用图像信息熵 En 作为评价指标,该指标能够衡量图像中的信息量,信息量越大,则表示成像细节清晰度越佳,即测绘影像的质量越好,该指标的计算公式为:

$$En = - \sum_{g=0}^{255} p(g) \log_2 p(g) \quad (18)$$

式中: g 表示灰度值;属于该灰度值的像素数量和图像中所有像素数量的比值用 $p(g)$ 表示。

将文献^[7]方法和文献^[8]方法作为对比方法,依据该公式计算在不同距离下三种方法测绘图像的 En 结果,如表 4 所示; En 的期望值高于 6.8。

依据表 4 测试结果可知:在不同测绘距离下,随着测绘距离的增加,三种方法测绘影像的 En 值逐渐下降,但本文方法获取的测绘影像的 En 值均高于 6.8,其中,最大 En 值达到 8.55。而其他方法 En 值较低,存在低于 6.8 的情况。因此,该方法获取的山区地表覆被测绘影像质量较好,影像细节清晰。

表 4 测绘影像的质量测试结果

Tab. 4 Quality test results of surveying and mapping images

像素点数量/个	测绘距离/km								
	2			4			6		
	本文方法	文献 ^[7] 方法	文献 ^[8] 方法	本文方法	文献 ^[7] 方法	文献 ^[8] 方法	本文方法	文献 ^[7] 方法	文献 ^[8] 方法
100	6.94	6.12	6.01	6.826	5.88	6.01	6.816	5.68	5.72
200	7.22	6.23	6.12	6.98	5.93	6.11	6.89	5.82	5.82
300	7.95	6.37	6.25	7.11	6.07	6.15	7.26	5.97	5.95
400	8.14	6.56	6.13	7.56	6.33	6.01	7.54	5.95	6.01
500	7.98	6.64	6.39	7.55	6.44	6.13	7.65	6.04	6.13
600	8.24	6.74	6.29	7.69	6.64	6.25	7.66	6.24	6.14
700	8.77	6.79	6.57	8.17	6.69	6.35	7.62	6.29	6.08
800	8.79	6.82	6.59	8.22	6.72	6.43	8.11	6.36	6.15
900	8.86	7.09	6.76	8.39	6.84	6.46	8.28	6.49	6.37
1000	8.92	7.16	6.57	8.56	7.02	6.48	8.35	6.82	6.28

2.3 山区地表覆被变化分析结果

为验证本文方法对于山区地表覆被的变化成像分析效果,通过多无人机获取的协同测绘影像,分析该研究区域内,2020—2022 年局部重点山区地表覆被变化的分析结果,如图 5 所示。

依据图 5 测试结果可知:本文方法应用后,可依据多无人机协同测绘影像像元分割结果构建地表覆被变化区域图像,遍历图像中所有像元,通过像元灰度循环的方式,获取地表覆被变化区

域,呈现地表覆被的变化情况。其中,人造地表面积显著增加,林地面积相对减少。根据该地区 2020—2022 年土地利用总体规划,该区域的土地覆被在该时期内属于高强度变化阶段,人造用地将高速增长,林地面积则相应减少,与本文方法地表覆被变化区域的分析结果基本一致,因此本文方法分析结果的可靠性较强,可以满足山区地表覆被变化分析需求,可为土地资源的管理提供一定依据。

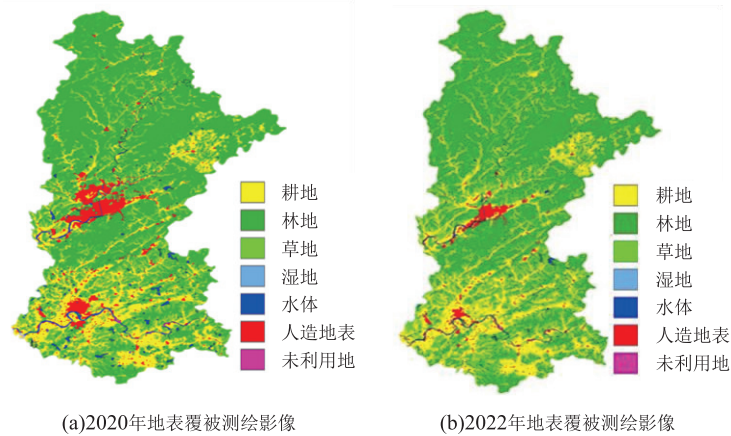


图 5 研究区域中重点山区地表覆被变化分析结果

Fig. 5 Analysis results of surface cover changes in key mountainous areas in the study area

3 结论

为全面、精准完成山区地表覆被信息的统计,以此分析生态变化以及实现土地资源管理,笔者以某地区为例,展开相关研究,并提出基于多无人机协同测绘技术的山区地表覆被变化成像分析方法。对该方法的应用效果展开相关测试后得出:该方法应用性能较好,能够可靠完成山区地表覆被成像,并且测绘影像的质量较高;除此之外,可依据多无人机的协同测绘影像,实现山区地表覆被变化分析,掌握土地资源的变化情况,为土地资源管理等提供可靠参考。

参考文献:

- [1] 朱黔, 许诺, 黄蓓, 等. 基于角色切换策略的多无人机协同区域搜索[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(5): 928-938.
ZHU Q, XU N, HUANG B, et al. Multi-UAV cooperative surveillance based on role switch strategy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(5): 928-938. (In Chinese)
- [2] 高莎, 袁希平, 甘淑, 等. 融合无人机影像与 LiDAR 点云的山区地表覆被景观特征探测[J]. 测绘通报, 2022(1): 110-115.
GAO S, YUAN X P, GAN S, et al. Fusion of UAV image and LiDAR point cloud to study the detection technology of mountain surface cover landscape characteristics[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022 (1): 110-115. (In Chinese)
- [3] 孙华生, 张远, 史云飞, 等. 利用无人机搭载的多光谱相机直接测定地表反射率的新方法[J]. 光谱学与

光谱分析, 2022, 42(5): 1581-1587.

SUN H S, ZHANG Y, SHI Y F, et al. A new method for direct measurement of land surface reflectance with UAV-based multispectral cameras[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(5): 1581-1587. (In Chinese)

- [4] 刘超群, 卢自来, 刘敏, 等. 基于无人机和无人船的河(江)道地形测绘技术应用[J]. 水运工程, 2023(1): 138-142.
LIU C Q, LU Z L, LIU M, et al. Application of river channel topography mapping technology based on UAVs and unmanned ships[J]. Port & Waterway Engineering, 2023(1): 138-142. (In Chinese)
- [5] 高书鹏, 刘晓龙, 宋金玲, 等. 热带山区高时空分辨率 NDVI 融合精度及其影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(2): 405-419.
GAO S P, LIU X L, SONG J L, et al. Study on the factors that influencing high spatio-temporal resolution NDVI fusion accuracy in tropical mountainous area [J]. Journal of Geo-Information Science, 2022, 24 (2): 405-419. (In Chinese)
- [6] 王玥璞, 秦伟, 杨文涛, 等. 基于气象和覆被条件考量的无人机地形勘察适宜期: 以东北黑土区为例[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(4): 121-128.
WANG Y P, QIN W, YANG W T, et al. Investigating optimal time window for UAV terrain measuring by considering weather and land cover conditions: Taking the northeast black soil region as an example [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19 (4): 121-128. (In Chinese)
- [7] 陶威, 贾洪果, 亢逸远, 等. 基于时序合并的 PS-InSAR 方法在雄县及周边区域地表形变监测中的应用[J]. 测绘通报, 2023(1): 101-106.

- TAO W, JIA H G, KANG M H, et al. Application of PS-InSAR method based on time series combination in surface deformation monitoring of Xiongxin county and its surrounding areas[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(1): 101–106. (In Chinese)
- [8] 范泽孟. 基于 SSP-RCP 不同情景的京津冀地区土地覆被变化模拟[J]. *地理学报*, 2022, 77(1): 228–244.
- FAN Z M. Simulation of land cover change in Beijing-Tianjin-Hebei region under different SSP-RCP scenarios[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 228–244. (In Chinese)
- [9] 崔云鹏, 谢科, 周漾, 等. 面向复杂动态场景的多无人机协同摄影[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2021, 33(7): 1113–1125.
- CUI Y P, XIE K, ZHOU Y, et al. Multi-UAVs collaborative cinematography for complex dynamic scenes [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2021, 33(7): 1113–1125. (In Chinese)
- [10] 姜波, 梁晨阳, 梅杰, 等. 一种面向无人机群区域协同覆盖的深度强化学习方法[J]. *空间控制技术与应用*, 2021, 47(6): 59–69.
- JIANG B, LIANG C Y, MEI J, et al. A deep reinforcement learning method for collaborative coverage of unmanned aerial vehicle groups[J]. *Aerospace Control and Application*, 2021, 47(6): 59–69. (In Chinese)
- [11] 崔志强, 胥值礼, 孟庆敏, 等. 高精度无人机航空磁测在塔里木盆地西南部地质构造调查中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2023, 45(5): 635–645.
- CUI Z Q, XU Z L, MENG Q M, et al. Application of the high-precision UAV aeromagnetic survey in geological structure investigation in southwestern Tarim basin[J]. *Computing Techniques For Geophysical and Geochemical Exploration*, 2023, 45(5): 635–645. (In Chinese)
- [12] 魏文强, 陈建华, 王峰, 等. 基于无人机倾斜摄影三维建模的数字露头及其在剖面实测和研究中的应用——以宁夏中卫下河沿剖面为例[J]. *物探化探计算技术*, 2023, 46(4): 490–498.
- WEI W Q, CHEN J H, WANG F, et al. Digital outcrop based on 3D modeling of UAV oblique photography and its application in profile measurement and research: A case study of Xiaheyan profile in Zhongwei, Ningxia [J]. *Computing Techniques For Geophysical and Geochemical Exploration*, 2023, 46(4): 490–498. (In Chinese)
- [13] 张栋, 徐丹丹, 吴永波, 等. 融合物候特征对城市土地覆被进行分类及覆被变化分析: 以金坛区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(7): 1614–1624.
- ZHANG D, XU D D, WU Y B, et al. Urban land cover classification and land cover change analysis based on phenological features from: A case study of Jintan [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7): 1614–1624. (In Chinese)
- [14] 樊冰, 胡晓宁, 马良, 等. 无人机 LiDAR 及倾斜摄影测量技术在复杂河道工程测绘中的融合研究[J]. *水运工程*, 2023(1): 11–17.
- FAN B, HU X N, MA L, et al. UAV LiDAR and tilt photogrammetry technology in complex river channels fusion research in engineering mapping [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2023(1): 11–17. (In Chinese)
- [15] 谷旭平, 唐大全. 基于联邦滤波算法的无人机集群分层协同导航[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(3): 967–976.
- GU X P, TANG D Q. Hierarchical cooperative navigation of UAV swarm based on federated filtering algorithm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(3): 967–976. (In Chinese)
- [16] 孙沁, 李鸿旭, 王毓智, 等. 韧性无人机群多域协同方法建模与求解[J]. *航空学报*, 2022, 43(5): 544–557.
- SUN Q, LI H X, WANG Y Z, et al. Resilient UAV swarm modeling and solving based on multi-domain collaborative method [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(5): 544–557. (In Chinese)
- [17] 陈宁静, 翟玉庆. 基于阈值值法的空间形态地域特征识别[J]. *计算机仿真*, 2022, 39(2): 406–409.
- CHEN N J, ZHAI Y Q. Regional feature recognition of spatial morphology based on threshold method [J]. *Computer Simulation*, 2022, 39(2): 406–409. (In Chinese)

Imaging analysis of surface cover changes in mountainous areas based on multi drone collaborative surveying technology

DONG Jie, DUAN Dingding, SONG Bo, WANG Xingzhong

(Beijing Jianyetong Engineering Testing Technology Co., Ltd, Beijing 102627, China)

Abstract: In order to accurately monitor the current surface cover situation and comprehensively and reliably analyze the area changes of various surface cover types in mountainous areas, a mountainous area in a specific province is taken as the research area, while a mountainous area with surface cover change is imaged by analysis method based on multi drone collaborative surveying technology is proposed. Based on the terrain and topography of the research area, a multi-drone collaborative surveying and mapping trajectory planning model was constructed using the artificial potential field method to complete the mapping of surface cover images and obtain accurate remote sensing surveying and monitoring results. Using the maximum inter class variance method, obtain the optimal thresholds for changing and non changing pixels in the image to determine the changes in surface cover. The analysis results show that this method can ensure that the navigation time error of multiple drones is within 1 second. The distance between drones is more significant than 2.5m. Capable of completing collaborative trajectory planning for uncrewed aerial vehicles based on the surveying and mapping area situation. The information entropy of the surveyed images is above 6.8, and the quality is good. It can accurately monitor the current surface cover situation, comprehensively presenting the changes of various surface cover types in mountainous areas such as farmland, forest land, grassland, wetland, water bodies, artificial surface, and unused land. It is consistent with regional development planning and has strong reliability.

Keywords: multiple uncrewed aerial vehicles; collaborative mapping technology; mountain surface; change in cover; imaging analysis