

无人机三维实景精细建模在露天矿综合治理中的应用

任东风, 郝凌云

(辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新, 123000)

摘要: 针对新邱区露天矿对三维实景模型的高精度、精细化真实还原需求, 基于倾斜摄影测量技术与实景三维建模方法, 利用飞马 D2000 多旋翼无人机搭载 Sony a6000 相机通过变高航飞获取多视角高分辨率影像数据, 通过 Context Capture 软件进行空三加密生成三维实景模型, 并利用检测点进行精度评定, 点云中误差为 4.33cm, 高程中误差为 5.75cm, 融合 SketchUp 个体景观建模进行三维精细实景建模。从测绘建模到设计规划再到后期运维, 实现了露天矿综合治理项目中在各阶段基于三维场景的应用和分析研究, 为矿坑综合治理高效高质完成提供保障。

关键词: 无人机; 三维实景建模; Context Capture; Skyline; 空间规划

1 项目背景

新邱区露天矿位于辽宁西北部, 开采始于 1937 年, 过度开采使煤炭资源枯竭, 也留下长 5 公里、宽 3 公里、最深处 100m 的矿坑, 因此矿坑综合治理亟待解决。根据辽宁省十三届人大常委会出台的《辽宁省矿山综合治理条例》, 以“变废为宝”的设计理念, 充分利用露天矿特殊地质条件, 新邱区人民政府与中科盛联公司联合成立阜新百年赛道小镇项目, 将废弃矿坑改造成越野赛道, 不仅解决现有的地质灾害问题, 而且解决了残余煤炭的燃烧问题, 并解决矿坑塌陷、沉陷等问题, 提供探索破解露天煤矿综合治理这一世界性难题的“新邱解决方案”。



图 1 赛道小镇施工区图

采用传统手段进行地形测量更新慢、成本高, 难以满足较高需求^[1,2]。针对地势起伏大、地形复杂地区中采集地物点位置出错率高且危险系数大的劣势^[3], 以阜新市新邱区百年赛道小镇项目为切入点, 从矿山综合治理的实际需求出发, 利用飞马无人机 D2000 搭载 Sony a6000 相机获取露天矿坑丰

富的地物信息数据, 使用 Context Capture 软件进行特定矿区范围的三维实景建模和精度评定, 结合 SketchUp 个体景观建模, 以期通过 Skyline 软件提供可精确量测的实景模型, 并进行空间规划及决策分析, 为露天煤矿综合治理方案的概念性规划及施工阶段提供高精度, 多时相的空间数据成果, 为“矿坑变赛场”的创意理念的全国性推广提供展示平台。

2 主要任务及技术路线

2.1 主要任务

(1) I 类测区 (大范围航测)

对新邱区露天矿进行大范围原始地形采集分辨率优于 10cm 的航空影像, 并制作 1:1000 比例尺正射影像, 面积约 180 平方千米。

(2) II 类测区 (重点区域航测)

对局部重点施工区域的原始地形, 采集分辨率高于 5cm 的航空影像, 进行三维实景精细建模, 面积约 20 平方千米。

(3) III 类 (多期变化航测)

对于露天矿多个矿坑的重点建设区域, 如一号坑, 二号坑, 五号坑等, 需进行分工期, 多批次的航飞任务, 要求分辨率高于 5cm 的航空影像, 时间跨度约为 2018 年-2022 年, 所采集数据服务于赛道小镇工程中的各个阶段。



图2 赛道小镇测区范围图

(I类为黄色边界, II为红色边界)

2.2 技术路线

三维实景建模技术流程如图3所示。

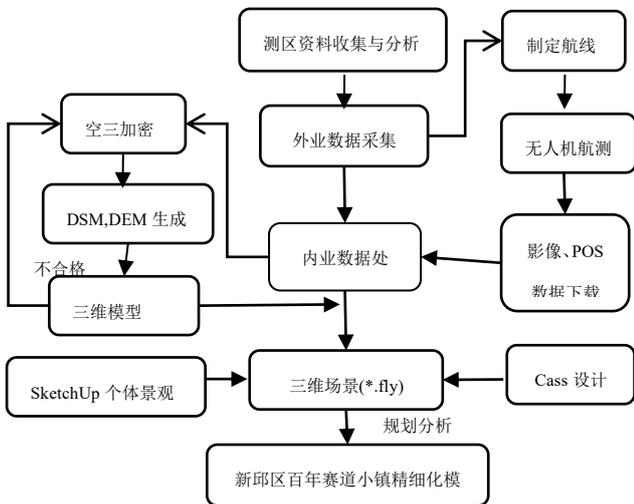


图3 无人机三维实景建模技术流程

倾斜摄影的优势主要体现在:

(1)无人机设备相较于传统有人航摄飞机更加便携、灵活、高效、经济,以无人机作为航摄平台能够快速便捷地获取影像。

(2)侧方相机能够直接获取建筑物、树木等实体地物的纹理信息,无需人工逐个粘贴,从根本上丰富了原始影像数据信息,提高建模效率。

(3)用其获取的数据生成的三维模型数据量较小,可直接进行测量和网络传输共享,且模型不仅是一个空间模型,其中还包含大量的地理数据和空间数据,扩展了倾斜摄影技术在行业中的应用。

3 项目特点

(1)飞行条件比较困难

测区最低点深约100多米,最高点约500多米,II类测区大部分高差超过300米,且露天矿区地形

复杂,煤矸石山岩壁陡峭,部分采煤沉陷区存在残余甲烷气体燃烧,导致无人机存在飞行安全,风险较大,且测区频发沙尘暴,对无人机飞行要求较高。多次测试后,选用飞马D2000较好完成了数据采集。

(2)项目成果类型多样

成果类型包括:正射影像,数字高程模型,三维实景精细模型,1:500地形图等。本项目不仅涉及测区正射影像采集,倾斜影像采集处理等,而且包含基于三维数据的处理分析,规划展示,矿区生态修复等工作。

(3)项目成果精度要求高

赛道小镇项目地形为露天矿煤矸石山地,正射影像成果要求分辨率优于0.1m,平面中误差优于0.8m。三维实景模型影像分辨率优于0.05m,平面中误差优于0.6m,高程中误差优于1m。

4 原始数据获取与处理

新邱区露天矿位于辽宁省西北部丘陵区,是典型的半干旱地区,矿坑面积约7.08平方公里,地貌崎岖不平,采坑最大深度约100m,边坡角为 60° ~ 70° 。项目利用无人机搭载多台相机获取倾斜影像数据共6740张,通过多次航飞获取多期不同施工阶段的影像数据,便于后期进行对比分析。

4.1 像控点的布设与测量

无人机摄影测量可采用飞前布控或飞后布控。此次采用航飞前布控,可分组作业,航飞时影像上已有控制点,利于计算机自动识别影像^[4]。地面控制点为13个,选择固定地物布设,像控点布设间隔为150m~200m。要求像片中控制点的影像清晰,易判别,应位于航向及旁向至少重叠五张照片的范围内,特殊位置保证四张,控制点距像片边缘不小于1cm。依据卫星定位测量综合服务系统(CORS网)测量地面控制点坐标,同时拍摄布设控制点时的局部照片和整体照片,像控点的布设如图4,为建模中刺像控点提供依据。



图4 像控点布设图

4.2 倾斜摄影数据获取

倾斜摄影采用基于一站式高精度单兵作业平台——飞马 D2000 多旋翼无人机，拥有 GPS 定位系统和 IMU 姿态测量系统，具有遥控可控范围大、可定点悬停、自动避障功能、续航久、轻小型、信号好、抗风强等优点，配备高精度差分 GNSS 板卡，标配千寻 FindCM 及 FindTrace 服务，支持 PPK/RTK 融合解算，实现无基站架设便可获取统一基准的高精度参考数据，提高数据采集稳定性。如图 5 所示，具体参数见表 1。采用低空无人机倾斜建模，具有数据量大、影像倾角大、模型成果数据量大等特点 [5]。



图5 飞马 D2000 多旋翼无人机

表 1 倾斜摄影平台参数表

序号	名称	仪器设备参数
1	影像 POS 数据获取方式	高精度差分 GNSS
2	最长航程/km	50
3	地面分辨率(GSD)/cm	2
4	飞行速度/(km/h)	80~120
5	旋偏角(°)	< 8
6	航向重叠度(%)	80
7	旁向重叠度(%)	80

搭配五镜头倾斜云台，选用 Sony a6000 相机。文件格式支持 TIFF、JPEG 等，相机体积小、重量

轻，内方位元素和畸变参数标定精确，画质良好，相机参数见表 2。

表 2 相机参数表

Tab. 2 The parameters of camera

序号	名称	仪器设备参数
1	相机型号	Sony a6000
2	镜头焦距/mm	倾斜镜头 35; 垂直镜头 25
3	传感器尺寸/mm	23.5×15.6
4	像素/万	2430
5	闪光同步速度/s	1/160
6	相机检校	测前相机检校 出具单台相机独立检校报告

4.3 数据预处理及航线规划

原始数据主要包括 POS 数据、航飞相片、外业控制点坐标。数据预处理包括畸变改正、TIFF 文件按照瓦片格式存储、生成图像金字塔等来加速图像处理 [6]。修改 POS 数据和格式，检查照片名称和质量，删除试拍照。

航线规划用配套飞马 GIS 软件设置飞行高度、时间、航线，也可利用手柄手动控制无人机飞行。无人机组装完成后，设置起飞点和降落点，在软件中进行航线规划，确保将研究区全部覆盖，航线规划如图 6 所示。由于部分矿坑深度达到 100 多米，为了最大可能提高地面分辨率，所以采用变高飞行设计航线，如图 7。



图6 航线规划图



图7 变高航线规划图

5 基于 Context Capture 的新邱区露天矿三维实景建模

利用 Context Capture 进行三维建模,通过像片生成分辨率较高的真实三维模型、正射影像(DOM)、数字表面模型(DSM)。具有人工干涉少,数据处理过程高效,数据成果多样并兼容多种数据源等优点,并支持局域网中多台电脑集群运算,极大提高运算效率。关键技术包括空中三角测量、倾斜影像密集匹配、DSM 点云生成及三维实景建模等。重点是空中三角测量自动生成三维模型和纹理映射,它为后续数据处理及三维建模奠定基础[7]。技术路线如图 8 所示。

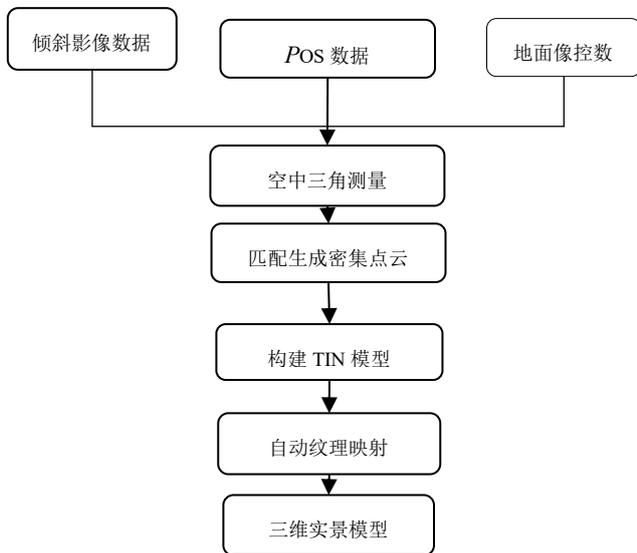


图 8 技术路线图

5.1 倾斜影像联合空中三角测量

空中三角测量以 POS 数据作为初始外方位元素,共线方程为基础,进行光束法区域网平差处理,提取倾斜影像的特征点,进行像对匹配和同名点的密集匹配,根据成像模型,可计算每个像元的物方坐标。空中三角测量关键步骤为提取照片特征点、匹配同名特征点、影像外方位元素反算。采用基于空间直角坐标系的优化模式,按照控制点的移动实现绝对定向。

影像路径用英文,导入像控点后先刺少许边缘控制点,运行第一遍空三,查看空三效果。以软件在照片中预测出的控制点位置为参考,查看外业拍摄的局部照片进行准确刺点,每个航带刺点数量不少于 9 张,通过尽可能多的刺点提高模型精度。对于处于照片边缘或位置模糊的控制点,至少刺 3 张照片。添加控制点的作用:(1)有利于空三加密过程

中影像匹配的速度和精度;(2)对空中三角测量成果进行控制加密;(3)可以对建模成果起到坐标转换的作用[5]。

刺点完成后运行第二遍空三,若空三排列有序,无明显的交叉和分层现象,处于大致水平面即可进行后续建模,如图 9、10 所示。

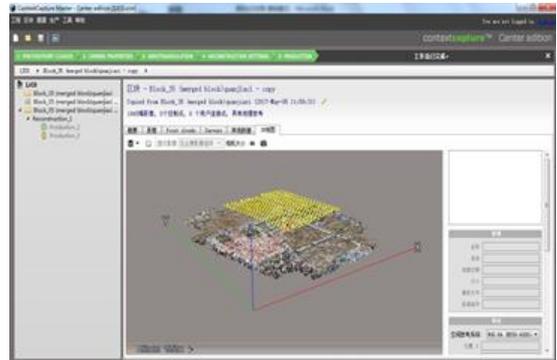


图 9 空中三角测量计算完成

		Before stereoregistration						After stereoregistration					
Type	Number of points	Median of reprojection error (mm)											
Stationary points	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Control points	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Points	10000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

图 10 空三报告

5.2 模型输出

由空三加密文件通过多视影像联合平差得到高密度数字点云。多视影像联合平差需结合外方位元素,提取同名特征点,在 GCP、连接点、连接线之间建立区域网平差的误差方程,联合解算出像片的外方位元素和加密点的物方坐标[8],光束法区域网平差的数学模型为:

$$\begin{cases} u - u_0 = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ v - v_0 = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases}$$

其中, (u, v) 为像点坐标; f 为焦距; (X, Y, Z) 为物体的物方空间坐标; (X_s, Y_s, Z_s) 为影像外方位线元素; $a_i, b_i, c_i (i=1,2,3)$ 为外方位角元素 (ϕ, ω, κ) 构成的方向余弦。

密集点云数据量大,先将数据分块后再进行不

同层次细节度下的 TIN 模型构建^[9]。倾斜影像联合空三后解算出各影像的外方位元素，分析并选择最佳影像匹配单元进行特征匹配和逐像素级匹配，引入并行算法，提高计算效率。基于点云构建不同层次细节度(Levels of Detail)下的三角网(TIN)模型，通过改变三角形大小匹配影像分辨率进行三角网优化^[10]。

最后对 TIN 模型进行配准和纹理映射。软件求解模型中每个三角面的法线方向，对比相应位置的照片姿态，模型中任一三角网有且只有一张目标影像与之对应，求解二者夹角，以此为依据判断该三角网模型的纹理贴图。根据二者夹角的数值，判断该三角面与航飞影像贴合程度。若夹角过大，表明匹配不佳，导致模型纹理不清晰。

自动纹理映射基于瓦片技术，将测区分为多个面积固定的子区域（瓦片）。本项目以规则瓦片划分，建模时瓦片大小占用的内存（RAM）选择电脑内存的三分之一。计算出相应目标影像后，还需求解具体对应位置。纹理贴图依据 TIN 中三角形和照片相应位置间的几何关系，寻找实际纹理区间，使纹理影像配准后，反投影到相应三角形表面。分瓦片处理后需建立一个 S3C 索引文件，用 Acute3D Viewer 查看同一坐标系下模型最终效果，检查模型是否存在局部缺失、纹理丢失、建筑轮廓模糊等问题。三维实景模型如图 11 所示。

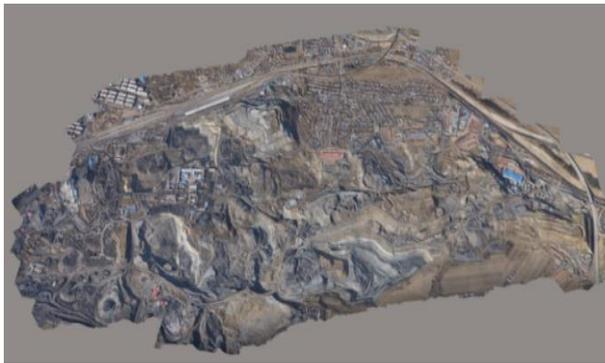


图 11 矿山三维实景模型

5.3 模型精度分析

三维实景模型的精度受多种因素影响，例如外业控制点布设的方式和个数、所用的照相机的参数、飞行条件、航飞高度等。精度分析需检查数据完整性、位置精度、表现质量、逻辑一致性等^[11]。

本项目采用人工实测的方式检验精度，选取 10 个检查点，均匀分布在测区范围内，采用莱卡 RTK 利用相对定位原理，实时解算检查点的三维坐标，

检测点分布如图 12。在全数字摄影测量系统中加载三维模型，尽可能多次测量检查点平面坐标，取平均值减少人为误差。以检查点外业测量结果为真值，误差统计如下表 3。



图 12 检测点分布图

表 3 检查点精度统计

序号	检测点号	$\Delta X/cm$	$\Delta Y/cm$	$\Delta H/cm$
1	JCD1	-3.5	3.1	4.2
2	JCD2	-2.8	-1.4	2.4
3	JCD3	-1.6	-3.7	-3.1
4	JCD4	0.3	-2.1	-5.6
5	JCD5	-4.7	3.6	14.2
6	JCD6	0.2	-4.0	-0.8
7	JCD7	-5.4	2.9	-4.9
8	JCD8	-1.7	1.3	-2.1
9	JCD9	-5.9	-0.3	3.1
10	JCD10	2.8	0.9	-5.1

根据中误差公式得：

$$m_x = \sqrt{\left(\frac{1}{10} \sum_1^{10} \Delta x_i^2\right)} = 3.45 \quad (1)$$

$$m_y = \sqrt{\left(\frac{1}{10} \sum_1^{10} \Delta y_i^2\right)} = 2.63 \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{(m_x^2 + m_y^2)} = 4.33 \quad (3)$$

$$m_z = \sqrt{\left(\frac{1}{10} \sum_1^{10} \Delta H_i^2\right)} = 5.75 \quad (4)$$

由结果可知，检查点 X 方向中误差 3.45 cm，Y 方向中误差 2.63 cm，点位中误差为 4.33 cm，高程中误差为 5.75 cm。依据《三维地理信息模型数据产品规范》（CH/T 9015-2012）中对平面精度和地形精度的要求，满足 1:1000 比例尺下模型平面精度

0.8 m，高程精度为 1 m 的精度要求。

6 创新型应用

阜新百年赛道小镇项目基于 Context Capture 软件生成的三维实景模型，在 skyline 平台下利用煤矿废弃矿坑有利的地形条件结合科学设计理念建设多功能赛道，这在全世界属于首创。本项目主要服务于百年赛道小镇的前期概念性设计和后期赛场变更规划，同时具有可量测与易规划的显著优势。现以五号矿坑为例，进行三维实景模型的规划设计。

6.1 在露天矿综合治理中的应用优势分析

目前该技术在露天矿综合治理中的应用主要体现在以下几个方面：

(1)避免繁重且危险的实地考察工作。通过三维实景建模技术能够将新邱矿山的地形地貌情况、建筑物和采场情况以及赛道建设情况等信息进行采集，并生成三维实景模型，达到直观设计三维立体的效果，便于施工阶段中数据的测量、分析与浏览，如填挖方量计算，距离或面积的量测及周边拆迁房屋的查看与统计等，为矿山综合治理的精细化管理提供帮助。

(2)依据露天矿实景模型构建的三维空间信息服务平台，可用于周边城市规划建设项目，道路变更，科学的分析和判断现状与治理情况，更好的保障露天矿综合治理的建设，并对后续赛道周边推进环境治理和生态修复提供支撑。

(3)利用无人机航测生成高质量的数字正射影像，进行叠加对比分析，可判断现有实测地形图存在的质量问题，减少外业实地考察。

6.2 赛道小镇三维实景模型实现

从 BigeMap 软件上下载栅格影像，原始坐标必须通过地理配准以减少误差。用 ArcMap 对栅格影像图进行配准，再通过剪裁多余影像部分得到需要的栅格数据。DEM 高程数据利用 Context Capture 软件进行三维实景建模时生成。使用 Skyline 系列 TerraBuilder 新建一个工程，选球面工程模式并自带高程数据，加载配准完成的影像数据以及 DEM 高程数据创建 MPT。

其次，选用 TerraExplorer Pro 软件创建 Fly 工程，设置之前在 TerraBuilder 创建好的 MPT 文件路径。加载三维实景模型 3DML 数据，和通过 Arcgis 软件格式转换后的 cass 设计图，通过以上步骤初步

建立了三维场景模型。对特殊要求的个体景观模型需要在 SketchUp 软件中手动建模，如 VIP 看台等。部分小型模型可以在 Skyline 中的 SketchUp Warehouse 中下载，如小汽车、建筑物里的桌椅等。依据 cass 设计图，将个体模型与 3DML 数据在 Skyline 平台下通过合理调整大小、位置、角度等属性进行融合。对于赛道的三维规划，可用软件中 "Urban Design" 模块进行道路设计。根据实际生产需要，选择合理的路面贴图、行道树、路灯等附属设施。虚拟规划成果支持多种类型的空间分析。将模型融合精修后，可进行测量与分析功能，如面积测量、距离测量、阴影分析、剖面分析、空间分析等。技术路线如图 13 所示。

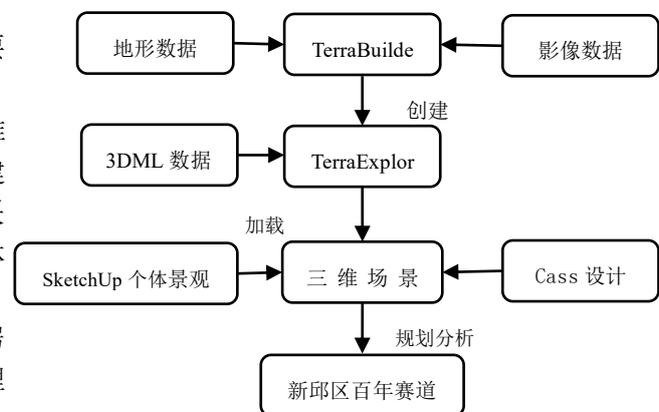


图 13 技术路线图

由于 TerraExplorer Pro 软件建模的局限性，本项目结合 SketchUp 软件进行个体景观单独建模。建模方式一则利用现有模型改造，避免重复劳动；二则根据实际赛车场地设计需要，按照实际比例构建新模型。如图 14 为依比例建造的 VIP 看台模型。

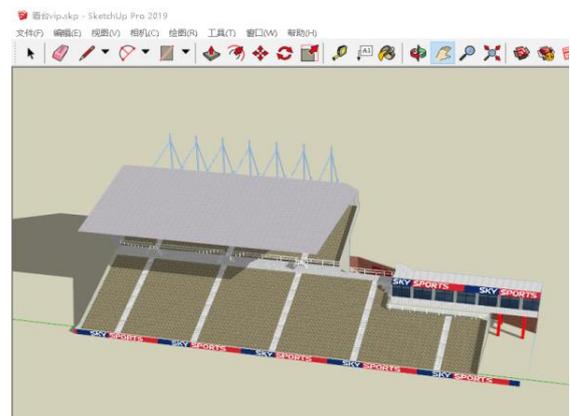


图 14 VIP 看台模型

施工阶段中将三维实景模型和道路及看台等设计模型相结合，对比分析得出最佳设计方案。确定赛道选址后，导入看台设计模型，依据现有道路，

分析看台安全出口，并设计看台的绿化带。建设过

处模型的圆滑处理。以五号坑为例，治理前后的对



程中，依据建设进度进行多次航飞，实时更新实景模型。规划难点在于道路的坡度、宽度变化及拐弯

比图如图 15，规划前后的对比图如图 16 所示。

图 15 治理前后对比图

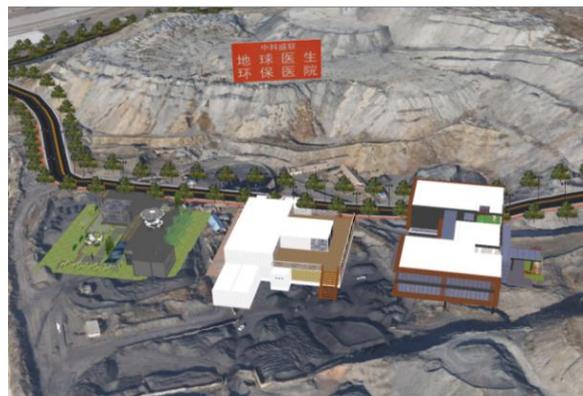


图 16 虚拟规划对比图

6.3 应用

1.虚拟规划成果支持多种类型的空间分析。将模型融合精修后，就可以使用系统提供的测量和分析功能，如面积测量、距离测量、土方量计算、阴影分析、剖面分析、空间分析等。

1) 土方量计算如图 17 所示，通过自定义范围可以精确计算出需要添加或移除的土方量。



图 17 土方量计算

2) 阴影分析可以调节 x、y 方向不同大小的阴影，用来模拟不同时间段、不同季节的日照情况，考察建筑物的室内采光以及相互之间是否存在遮挡阳光等问题，阴影分析如图 18 所示。



图 18 阴影分析

3) 通视分析如图 19 所示，绿色区域表示通视，红色区域表示不通视，呈现出了在某个地点人眼的可视范围，在空间中选取一点确定为人眼所在位置，然后移动鼠标点击另一位置，这两点之间的距离就是想检测的可视半径大小，在以人眼位置为中心、所选两点距离长度为半径的范围内的通视情况就由红绿两种颜色显示。

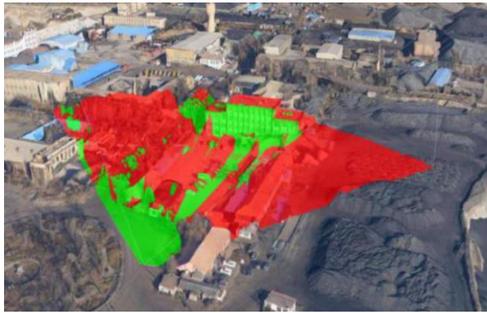


图 19 阴影分析

2.大比例尺地形图质量检查主要包括数学精度、属性精度、数据正确性及要素完备性、整饰质量及附件质量检查^[12]。1:500 更新后地形图如图 20。

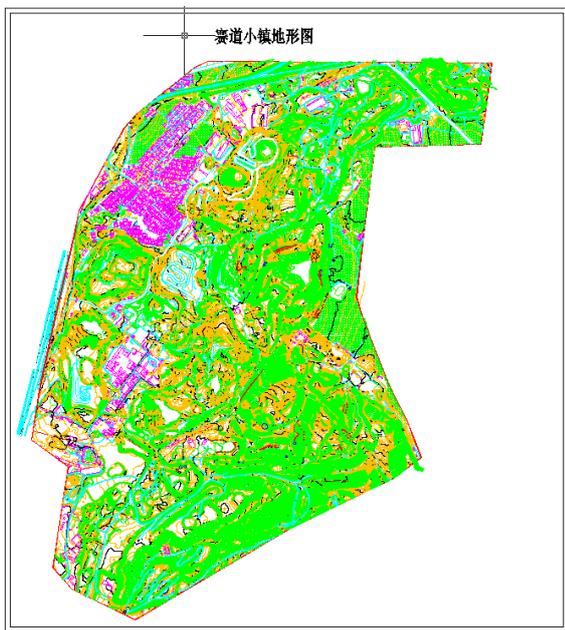


图 20 赛道小镇地形图

利用正射影像图（DOM）与实测地形图叠加、对比、分析，发现以下几点问题：

1) 实测遗漏

如图 21 所示，DOM 有一处简易棚房、路灯及电线杆，而实测地形图中则没有，分析发现实测地形图存在漏测现象。



图 21 遗漏分析

2) 测图错误

如图 22 所示，存在旱地与林地地类表示错误、范围边界错误。根据制图规范不同地物用特殊符号单独表示。

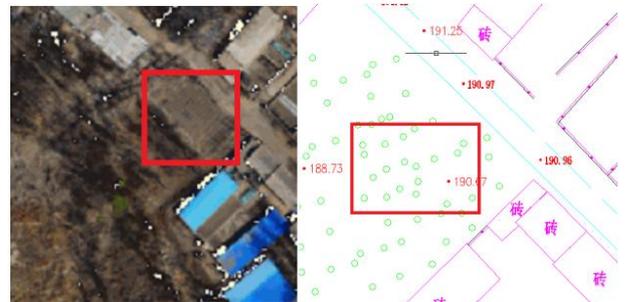


图 22 测图错误分析

3) 地形图不合理

如图 23 所示，DOM 与地形图比对后，表达陡坎不合理，陡坎应用等高线来表示，不应采用斜坡符号，树木要单独表示。



图 23 测图不合理分析

7 项目总结

在数字化矿山快速发展宏观背景下，结合倾斜摄影测量技术与实景三维建模方法，以新邱区百年赛道小镇项目为契机，使用飞马无人机科学规划变高航线，采集多视影像，获取实时影像数据。利用 Context Capture 进行三维实景模型，并设置检测点进行精度分析，快速高效的构建高精度、真实直观的三维模型，符合量测级精度。

本项目贯穿赛道小镇多个矿坑建设全过程，按年度，分批次对地形地貌及工程进度进行高精度航拍数据采集。对于面积广阔，地形复杂存在危险性的露天矿不仅实现了赛道小镇整体空间规划及决策分析等功能，而且对于建设中地形图的检核，土方量的计算等问题提供快捷高效的应用。

此次提出的无人机建模思路和运用多种软件规划方法已经在阜新百年赛道小镇项目中得到了验证，能够快速、有效地构建三维实景模型并依据

生产工程需要进行合理规划分析。其自动化程度高,生成成本低,强大的多维度空间分析功能等显著优势,为露天煤矿走矿山综合治理和资源综合利用相结合的转型之路提供规划模型和决策依据,并为无人机实景三维建模在露天矿综合治理中的应用指明一个新方向,同时为资源枯竭型城市转型摸索可行路径。

参考文献:

- [1] 蔡利平,李钢,史文中.增地节地型露天矿排土场优化设计[J].煤炭学报,2013,38(12): 2208—2214.
- [2] 栾婷婷,谢振华,吴宗之,等.露天矿排土场滑坡的可拓评价预警[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(4):1274—1280.
- [3] 高勇强.基于无人机正射影像和三维模型的复杂地形辅助测量方法及其应用[J].测绘通报,2019(S2):134-136.
- [4] 尹玉廷.轻型无人机在精细场景建模中的应用[J].测绘通报,2018,(S1):92-95+153.
- [5] 范攀峰,李露露.基于 Smart3D 的低空无人机倾斜摄影实景三维建模研究[J].测绘通报,2017,(S2):77-81.
- [6] 刘凤珠,杨伯钢,张飞舟,等.低空无人机影像应急快速可视化方法[J].测绘科学,2018,43(07):94-102+108.
- [7] 曲林,冯洋,支玲美,等.基于无人机倾斜摄影数据的实景三维建模研究[J].测绘与空间地理信息,2015,38(03):38-43.
- [8] 张祖勋,吴军,张剑清.建筑物场景三维重建中影像方位元素的获取方法[J].武汉大学学报,2003,28(3):265-271.
- [9] 周智勇.基于 VirtuoZo 的快速三维建模方法探讨[J].城市勘测,2012(03):70-73.
- [10] 任东风,杨帆,潘红汐.基于 Smart3D 的辽工大北校区三维实景建模研究[J].测绘与空间地理信息,2019,42(02):16-18.
- [11] 任诚,高利敏,冯耀楼,等.基于无人机倾斜摄影的建筑物三维建模尝试[J].测绘通报,2019(2):161-164.
- [12] 潘成军.无人机倾斜摄影在道路工程中的应用与分析[J].测绘工程,2018,27(12):64-69+74.