引文格式：陈富强. 基于倾斜摄影与BIM技术的土方量算方法[J]. 地理空间信息, 2024, 22(1): 56-59. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.01.013

基于倾斜摄影与BIM技术的土方量算方法

陈富强[1]
（1. 河南省地质局矿产资源勘查中心，河南 郑州 450006）

摘　要：为解决传统土方量算人员投入高、效率低，土方测算精度不高等问题，采用无人机倾斜航摄测量与BIM技术相结合的土方量算方法，通过倾斜摄影测量获得真实地表DEM数据，再与BIM模型进行比较分析，以检验道路工程施工质量。通过对某道路工程土方量算项目的实际验证和分析发现，该方法获得了精度优于1.4%的土方量算值，可高效检测土方量算值以及道路工程各进度质量，并定位超限差位置。

关键词：无人机；实景三维；倾斜摄影；土方量算；BIM；DEM
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）01-0056-04

Earthwork Calculation Method Based on Oblique Photography and BIM Technology

CHEN Fuqiang[1]
(1. Mineral Resources Exploration Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: In order to solve the problems of high input, low efficiency and low accuracy of traditional earthwork calculation, we studied the earthwork calculation method combining UAV oblique aerial photogrammetry and BIM technology. Firstly, we used UAV oblique photogrammetry to obtain DEM data of the real surface. Then, we compared DEM data with the BIM model to check and analyze the construction quality of road engineering. The actual verification and analysis of a road engineering earthwork calculation project shows that the accuracy of this method is better than 1.4%, which can provide efficient detection for earthwork calculation and quality of road engineering under various schedules, and locate the position of out of tolerance.

Key words: UAV, real scene 3D, oblique photography, earthwork calculation, BIM, DEM

土方工程作为道路工程施工项目中的工作之一，需消耗一定人力和物力来实施，且土方量算成果将直接影响工程项目的工程量、工程成本核算和工期规划安排[1-2]。传统的土方量算需要大量人力和外业测绘工作才能确保其测量精度。随着信息化技术的不断发展，BIM技术在建设行业的作用越来越突出，工程项目均采用BIM技术建立“所见即所得”的项目工程部署，提前高效计算精细化工程量。利用BIM技术分析项目重难点、部署实施方案、控制工程各工序的高效衔接，可大大提高项目的施工效率，节约作业成本[3-4]。道路工程基础设施建设项目属于长度较长、宽度不大的带状分布工程，原地表复测和土方工程量的计算意义重大，也是工程量核实造价乃至工程进度安排中必不可少的环节。无人机航测技术的突飞猛进，给传统测绘技术带来了革命性变革。利用无人机航摄技术能高效快速完成带状原始地表信息采集，再利用专业数据处理软件可快速生成原始地貌实景三维模型，获得道路工程建设施工现场DSM模型数据[5-7]。传统道路工程土方量算方法的环节众多，精度与实际地形起伏变化、外业测量设备、测量方法、点位密度等条件有直接关系，还与内业数据处理有关，不同处理方法（如方格网法和断面法）将导致土方量算产生较大偏差[8]。无人机倾斜摄影与BIM技术相结合可为工程土石方量算与核查、项目进度状态监控与分析、施工质量检查与评定等环节提供数据支持。无人机倾斜摄影测量可获得区域内具有较高精度的实景三维模型[9]。因此，本文主要研究无人机倾斜摄影与BIM技术相结合的方法在土方量算、作业效率和工程质量检查等环节的应用效果与精度[3]。该方法利用现代信息化技术辅助施工项目低成本高效作业，提高施工效率，为道路工程建设信息化改革提供新思路。

收稿日期：2022-06-20。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41671507）。
作者简介：陈富强（1980—），硕士，高级工程师，注册测绘师，主要从事工程测量、三维建模和地理信息系统方面的生产、经营和管理工作，E-mail：58287247@qq.com。

1　精确计算和控制土方工程的关键技术

1.1　无人机航测现场实景三维模型

1）倾斜摄影获取实景三维模型。利用无人机搭载5镜头倾斜摄影设备，获取道路工程线路带状影像；再利用航空摄影测量数据处理软件获得精度较高的地表实景三维模型。获取过程中需分析相机的像素、地表分辨率、重叠度和土方工程精度要求，确定无人机航飞航高和航线等关键技术参数；再根据道路的线形设计无人机航飞路线、飞行架次等参数。为保证无人机倾斜摄影获取原始地表信息的准确性和精度，还需沿道路工程线路布设一定数量的像控点[10]。根据工程项目精度和时效要求，也可利用无人机自带的惯导定位数据以及POS数据进行免像控航空摄影测量，快速获取地表现状的实景三维模型[10-11]。倾斜摄影的空三解算与密集点云生成均通过平差处理，使实景三维建模的成果更精确。

基于实景三维衍生的点云数据和DEM成果中包含树木、建筑物等非地表数据，若直接用于土方量算，必然会引入远超工程要求的量算误差[12-13]，因此应对实景三维模型的树木、建筑物进行处理，以获得较真实的地表信息模型。利用倾斜摄影测量实景三维建模软件空三加密解算获得密集点云，并导出点云数据；再利用Terra Solide软件进行点云分类处理，通过分析建筑物、树木等地物的特性和先验经验，建立分类规则集，实现点云分类，进而去除非地表信息[14]，获取真实地表模型。

2）真实地表模型对比分析。对施工现场进行无人机倾斜摄影，可获得各个施工进度下的真实地表模型，生成各阶段的真实地表DEM成果；再利用ArcGIS软件分析不同时期真实地表模型的差异，掌握工程现场的实际工程进度，对比工程进度安排，分析进度完成情况，为后续的工程进度调整提供一手资料。将不同时期的真实地表模型与BIM模型进行对比，可评价工程已完成部分的过程成果精度。利用ArcGIS等空间分析软件分析高程和位置，以BIM模型的数据为真实值，分析无人机倾斜摄影施工现场的真实地表模型偏差，进而计算和统计已完成部分的土方工程质量精度以及定位超出限差的位置。

3）无人机航测精度与道路工程施工精度分析。无人机倾斜摄影的飞行高度设计关系到地面分辨率和成果精度[7]。根据工程项目要求的地面分辨率和无人机倾斜相机的性能，其计算公式为：

$$\mathrm{GSD}=\frac{H}{f}\times\alpha \tag{1}$$

式中，GSD为地面分辨率，单位为m；H为航摄高度，单位为m；f为镜头焦距，单位为mm；α为像元尺寸，单位为mm。

根据地形、地物和相机分辨率设计无人机飞行高度，可提高地面实景三维模型的精度。参考文献[7]、[15]研究表明，无人机搭载单镜头2 400万分辨率的5镜头相机，飞行高度为80~100 m时，可获得地面分辨率优于1.5 cm的实景三维模型；经过精度分析，成果满足1∶500大比例尺地形图的精度要求，平面中误差优于±5 cm，高程中误差优于±15 cm，为本文研究提供了重要参考。

1.2　土方工程项目BIM模型

BIM技术是2002年Autodesk公司首先提出的概念，已在各行业中得到了广泛认可。BIM技术是从工程的设计、施工、运行直至终结全生命周期工程信息的集成，最终统一到三维模型信息数据库中。目前很多大型道路工程项目都要设计BIM，为工程项目建设提供一个直观的、全周期的虚拟三维模型[16]。BIM的核心在于建立虚拟的工程三维模型，利用数字化技术构建完整的、与实际情况一致的三维模型和工程信息库。工程信息库为设计单位、施工单位、业主单位以及第三方建立单位的相关信息存储、修改、管理、审批以及多方信息沟通和协调提供了一个基于工程信息的三维模型平台，也为工程项目直接或间接的相关利益方，提供了一个工程信息交换和共享的平台。

综上所述，无人机倾斜摄影与BIM技术相结合的方法中BIM为工程项目的基准，无人机建模提供的是工程现状模型，通过处理分析，可获得高精度的土方工程成果，快速掌握不同时期的工程状况，为工程项目提供第一手现场资料，及时检测施工过程质量，以提高道路土方工程的施工质量。

2　应用案例

2.1　测区概况

道路工程项目测区整体呈条带状，长约10 km、宽约300 m。测区地形起伏较大，地表树木、建筑物较少，覆盖植被多为杂草。根据测区整体情况，本文采用DjiM600多旋翼无人机，通过搭载5镜头倾斜相机进行航摄，设置相对航高为70 m，航向、旁向重叠度优于75%，像控点沿道路条带方向按照约200 m间

隔进行布设，每排40~50个点，共布设138个像控点，利用RTK采集三维坐标。

2.2 数据处理

实景三维模型制作选择Context Capture建模软件，根据无人机倾斜摄影影像、机载POS文件和像控点坐标数据进行空三解算处理，生成密集点云，并导出点云成果。测区的复杂地形以及植被、建筑物等非地表要素处理选择Terra Solide三维点云数据处理软件，对Context Capture导出的三维密集点云进行滤波分类，通过设置参数去除树木、建筑物以及杂草等地物点云，获得真实地表点云数据。在Global Mapper软件中制作真实地表DEM，为提高精度可设置DEM格网间隔为0.5 m[11]。利用ArcGIS对不同进度的DEM进行差值计算，可得到工程进展现状或完成情况。利用Civil 3D软件将BIM三维数据转换为DEM格式的三维模型，再将开工前原始地表的DEM与BIM进行差值计算，可获得工程项目的精确土方量。实景三维处理后的真实地表模型、道路BIM模型见图1。



图1 真实地表模型与道路工程BIM

2.3 应用分析

2.3.1 真实地表模型精度分析

模型精度是土方量算的基础，若模型精度超限，势必会造成土方量算精度超限，因此需对模型精度进行检测、验证。为保证模型精度检测的科学性、严谨性，外业采集50个检查点均匀覆盖整个任务区域，且尽量远离像控点，并在地形起伏、高差较大的区域重点采集。利用RTK外业采集三维坐标，再根据实地采集的位置，利用EPS软件在模型上采集三维坐标，最后计算并统计分析偏差。计算结果见表1，均满足GB 50026-2020《工程测量标准》规定的平面中误差小于±40 cm，高程中误差小于±17 cm的要求。

表1 真实地表DEM精度检测

项目	平面误差/cm	高程误差/cm
最大值	16.00	25.00
最小值	0.00	0.00
平均值	7.72	15.39
中误差	6.91	11.08
方差	2.58	4.17

2.3.2 土方量算精度分析

验证真实地表三维DEM的高程精度后，分别将BIM的DEM和道路工程区原始真实地表三维DEM导入ArcGIS软件，利用空间分析工具计算整个道路工程项目区的土方量。土方量算对比分析结果见表2，可以看出，模型计算土方量与设计土方量很接近，相对误差在1.4%以内，表明该方法能精确计算土方量。

表2 土方量算对比分析

项目	工程设计土方/m^3	模型计算土方/m^3	偏差/m^3	偏差率/%
填方	1 249 436.710	1 262 056.021	12 619.311	1.01
挖方	9 057.740	9 177.300	119.560	1.32

2.3.3 土方量算方法对比

道路工程的土方量算具有鲜明特点，通常以断面形式的测量点构建设计断面与实地曲线的偏差面积，再根据断面间距计算土方量，不同的仪器设备和测量方法效率相差较大。传统测量通常采用水准仪、全站仪、RTK等仪器设备，以断面测量的方式进行外业测量，采集点数量有限且密度较小，作业跨度约为10 km；无人机倾斜摄影测量的仪器设备先进、操作简单，外业内业可单人操作，但需具有无人机操控经验的驾驶员资格，能熟练操作相关处理软件。土方量算方法对比分析见表3，可以看出，传统方法需较多人员、较长时间，测量技术难度较大；无人机倾斜摄影测量方法在各方面都具有较大优势，甚至无需测绘专业技术人员参与，但需无人机驾驶员的参与，劳动强度低，作业效率高。

表3 土方量算方法对比分析

测量方法	人数	测量形式	工作效率/d	劳动强度	工作量	技术难度
水准仪	3~4	断面	10~15	非常强	非常大	非常难
全站仪	2~3	断面	5~7	较强	较大	困难
RTK	1~2	断面	2~3	一般	一般	较难
无人机	1	全场	1	很小	较小	简单

2.3.4 土方工程质量检测分析

通过无人机倾斜摄影测量可获得工程竣工影像，经数据处理，得到竣工时的真实地表DEM；再将竣工DEM模型与设计的BIM进行偏差分析，利用软件Global Mapper和ArcGIS处理，设置允许偏差阈值，可得到道路的偏差云图。偏差云图通过不同颜色表示土方工程施工的超限量。叠加现场影像后可直接获得路面工程质量存在问题的位置和范围（图2），为土方工程检验提供一种高效准确的方法。

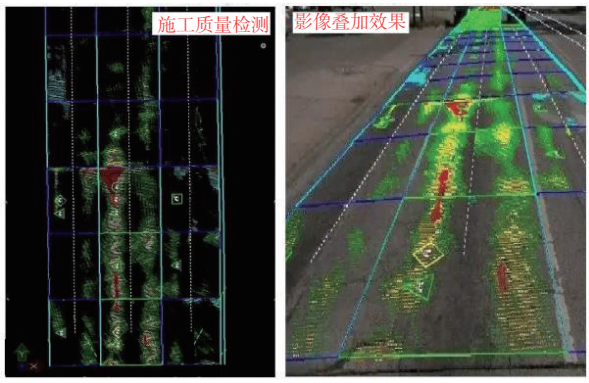


图2　工程土方工程质量分析结果

3　结　语

本文通过分析无人机倾斜摄影和BIM技术，结合道路工程土方量算的应用发现，BIM与真实地表模型相结合不仅可获取高精度的土方量算成果，而且可跟踪道路施工不同阶段的项目进度，还可利用无人机倾斜摄影测量成果进行竣工成果的检验与分析，极大地提高了作业效率，节约了施工成本，保证了工程质量。然而，该方法仍存在影像、点云等数据量较大，对数据处理设备和作业人员要求较高，不但要熟悉各种数据处理软件，而且要熟练融合多种数据格式，集成化程度较低等问题。

参考文献

[1] 秦超红. 基于倾斜摄影技术的土方算量在公路工程塌方路段的应用研究[J]. 工程建设与设计,2020(10):271-272

[2] 侯飞. 基于BIM的高精度塑石工程特征统计方法研究[J]. 地理空间信息,2021,19(7):116-118

[3] 程圆娥,吕志慧,袁春琦,等. 基于无人机倾斜摄影测量的土石方量计算[J]. 地理空间信息,2021,19(8):70-73

[4] 张洪飞,周朝慧,宋云龙,等. 多元数据耦合的岩土勘察BIM模型技术研究[J]. 地理空间信息,2021,19(6):86-88

[5] 徐海楠. 无人机倾斜摄影结合BIM技术在公路设计中的应用[J]. 北方交通,2022(5):61-63

[6] 黄悦,焦汉科,赵元,等. 三维建模技术在市政设计可视化中的应用初探[J]. 地理空间信息,2022,20(5):54-56

[7] 石磊. 无人机倾斜摄影测量技术在道路工程测量中的应用研究[J]. 水利技术监督,2022(2):218-222

[8] 孟凡臣,高俊斌,郭嘉,等. 基于ArcGIS土方量计算原理的挖填土方施工图绘制方法研究[J]. 北京水务,2022(2):25-29

[9] 白晓慧,侯占东. 基于ArcGIS的土地整治项目土方量计算及三维可视化[J]. 安徽农业科学,2020,48(8):204-206

[10] 李博,徐敬海. 无人机倾斜摄影测量土方计算及精度评定[J]. 测绘通报,2020(2):102-106

[11] 乔天荣,马培果,许连峰,等. 基于无人机倾斜摄影测量的关键技术及应用分析[J]. 矿产勘查,2020,11(12):2 698-2 704

[12] 宋鹤宁,唐春晓. HERON背包SLAM激光扫描系统在建筑规划测量中的应用[J]. 北京测绘,2021,35(4):485-488

[13] 高永涛,张寅,胡洋. 基于单镜头的无人机倾斜摄影测量方法及其精度分析[J]. 能源与环保,2021,43(4):115-118

[14] 邹娟茹,孙兴华. 多源数据融合构建精细三维模型的关键技术[J]. 地理空间信息,2021,19(12):131-134

[15] 赵国梁,李士杰,马军伟. 基于无人机单镜头绕飞倾斜摄影的1∶500不动产测量技术研究[J]. 测绘地理信息,2021,46(6):78-80

[16] 张鹏鹏,王世东. 基于全站仪的道路纵断面测量研究[J]. 地理空间信息,2020,18(8):76-78

（上接第55页）

究了点云数据的分区域采样方法，并通过实例验证了分区域采样能更大程度地保留点云局部特征，参照采样后点云构建的三维模型能精准真实地反映地下实际情况，且利用多边形建模法构建的模型精度满足规范要求。然而，相较于数据的快速获取，人工建模仍会耗费大量劳动力，因此研究点云分类，对墙体等规则物体分割后进行自动建模将是后续研究的重点。

参考文献

[1] 方剑强. 浅谈浙江省城市地下市政基础设施普查的实施模式[J]. 浙江国土资源,2021(12):24-26

[2] 杨华勇,江媛,李喆,等. 地下空间开发综合治理发展战略研究[J]. 中国工程科学,2021,23(4):126-136

[3] 张照杰,张宏波,李娜. 基于三维激光扫描技术的城市地下空间三维建模[J]. 地理空间信息,2021,19(6):89-91

[4] 李效超,王智,孙晓丽,等. 手持式移动三维激光扫描仪在地下空间普查中的应用研究[J]. 城市勘测,2020(2):62-65

[5] 张亚,山锋,王涛. 三维激光扫描技术点云数据采集与配准研究[J]. 地理空间信息,2021,19(3):24-27

[6] 赵丹丹. 三维点云配准算法的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2018

[7] 刘迎,王朝阳,高楠,等. 特征提取的点云自适应精简[J]. 光学精密工程,2017,25(1):245-254

[8] 许艳博,马金荣,李毅,等. 站式三维激光扫描技术在地下空间测绘中的应用[J]. 北京测绘,2021,35(9):1 187-1 190

[9] 刘谜. 3Dmax中多边形建模使用技巧解析[J]. 现代装饰(理论),2016(3):226

[10] 夏磊凯,高华,汪成成,等. 基于3Dmax和Skyline三维数字校园精建模技术研究[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(6):138-140