引文格式：许赟. 利用倾斜摄影测量公路工程土石方数字化校核[J]. 地理空间信息, 2024, 22(12): 83-86. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.12.019

利用倾斜摄影测量公路工程土石方数字化校核

许　赟[1]
（1. 杭州市交通规划设计研究院有限公司，浙江 杭州 310006）

摘　要：土石方精度校核在公路建设过程中具有重要意义。为解决传统土石方校核外业数据采集困难、内业处理分析工作量大等问题，以320国道下涯至寿昌段过境改建工程（YK30+823-YK31+811）路段为研究对象，提出通过重建场地实景三维模型并提取检核高程数据，上传至云平台自动校核断面高程及土石方精度。利用数字化手段得到校核结果：断面高程中误差0.057 m，土石填方差值比率3.58%，土石挖方差值比率2.52%。实验结果符合公路土石方计量精度要求，表明该校核方法具有较高的准确度，并显著提高了检测的效率。

关键词：倾斜摄影；实景三维；云平台；土石方；数字化校核
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）12-0083-04

Digital Verification of Highway Engineering Earthwork Based on Oblique Photogrammetry

XU Yun[1]
(1. Hangzhou Institute of Communications Planning Design & Research Co., Ltd., Hangzhou 310006, China)

Abstract: The accuracy verification of earthwork is of great significance in the process of highway construction. In order to solve the problems of traditional earthwork verification, such as difficulty in collecting field data and heavy workload in internal processing and analysis, taking the transit reconstruction project of Xiaya to Shouchang section of National Highway 320 (YK30+823-YK31+811) as the research object, we reconstructed 3D model of the site scene, extracted elevation data, and uploaded it to the cloud platform to automatically verify the section elevation and earthwork accuracy. The verification results show that the error in section elevation is 0.057 m, the difference ratio between soil and rock filling is 3.58%, and the difference ratio between soil and rock excavation is 2.52%. The experimental results meet the accuracy requirements for highway earthwork measurement, indicating that the calibration method has high accuracy and significantly improves the verification efficiency.

Key words: oblique photography, real scene 3D, cloud platform, earthwork, digital verification

公路工程项目建设过程中，土石方量测量是一项重要的工作内容，其计量精度是项目工程造价的重要影响因素，因此在施工前需要对土石方结果反复测算以保证精度[1-2]。公路土石方精度校核主要分成外业数据采集和内业精度校核2个部分。传统的外业数据采集一般是测量人员利用RTK、全站仪等测绘仪器在项目现场采集检查点高程信息，内业再将检查数据和原始测量数据套合分析，并基于设计断面高程分别计算两者土石填、挖方差额，以此验证土石方计量精度。这种传统土石方校核方法外业采集数据时容易受到地形复杂程度影响，特别在高落差山区采集数据非常困难，人员野外作业安全性难以保障，同时测量精度也会受到人为因素的影响[3]，内业数据处理分析需要技术人员对数据逐一比对计算，工作效率低下。近年来也有很多关于土石方计算精度的研究，董丽娟[4]针对带状工程和场地类工程得出了对应推荐的土石方量计算方法，张宁[5]等在确保公路土石方精度的基础上减少外业工作量，张珊珊[6]等用无人机数据重建了场地三维模型，利用智能化手段计算土石方。以上研究推动了土石方计算精度和智能化的发展，但是在外业数据获取的效率和安全性上并没有实质性提升，且目前对断面法计算土石方结果进行自动化精度校核的研究较少。针对以上传统方法亟待解决的问题，本文提出一种基于倾斜摄影测量的公路断面、土石方数字化校核方法，包含了运用无人机平台搭载测绘相机采集测区数据，结合建模软件重建测区数字化实景三维模型，利用立体采集软件获取校核数据，通过云平台自动校准断面、土石方数据精度的智慧化校核4个方面。该数字化校核方法能够根据不同规范要求设置相应限差参数，自动计算断面高差和土石方差值结果，

收稿日期：2023-08-29。
项目来源：杭州市交通运输学会科技资助项目（Hzjt202316）。
作者简介：许赟（1992—），硕士，工程师，研究方向为摄影测量与遥感，E-mail：whuxuyun@163.com。

使得校核结果在平台端可视化展示，并极大提升整个校核工作的效率。

1 数字化校核方案研究

1.1 测区外业调查

项目前期需对项目测区内范围外业踏勘，根据实地情况划分航带，布设影像控制点。前期外业踏勘可以了解路线的走势及高程变化情况，并依此设计划分航带[7]，为提高航摄采集效率和精度，应尽量保证每一航带方向一致，航带内地形高差起伏不大于50 m。布设像控点应在测区内均匀布设，宜布设在高程起伏变化不大的区域，同时周围应开阔、无遮挡[8]，使得像控点在影像上能清晰成像，每个像控点至少在3张影像上拍摄成像，像控点间距为200~300 m/个可满足1∶500地形图测量精度要求[9]。

1.2 实景三维模型重建及精度评价

倾斜摄影作为近年来发展颇受关注的一项测绘技术[10]，通过在同一飞行平台搭载多个传感器，从垂直和倾斜的不同角度曝光采集影像，从而获取到真实的地表信息，并通过倾斜影像后处理软件从影像中提取丰富的地物顶面及侧面的高分辨率纹理，构建实景三维模型，具有高精度、大尺度、效率高、可视化性强的特点[11]。倾斜摄影实景三维重建技术生成公路带状三维模型，主要分为外业无人机数据采集和内业航片三维重构2个步骤。

数据采集要先明确测区范围，无人机的航拍范围应比测区进行5%~10%外扩，以保证模型边缘质量。在地面站软件中导入测区范围，规划飞行高度、航向旁向重叠度、飞行速度等飞行参数。最后根据指定的航摄计划，即可对地表数据源进行拍摄采集。通过带有定姿定位（POS）系统的无人机携带多镜头倾斜相机，即可获取带有空间位置信息的照片。

完成图像采集后，使用Bentley公司的ContextCapture建模软件[12]对无人机航拍的垂直、倾斜影像进行空中加密三角测量，通过区域网联合平差得到影像外方位元素，并对多视影像进行密集匹配，生成地物特征点三维密集点云。利用三维点云构建不规则三角网（TIN）,对纹理网格数据进行三维构建，最终重建得到数字化实景三维模型。

在重构公路实景三维模型上采集桥头、房角、陡坎等特征点和路桥、沟渠等特征线的起终点或拐点的三维坐标，与野外RTK实测检查点坐标进行比对，评价模型整体精度。无人机倾斜摄影三维建模的具体工作流程如图1所示。

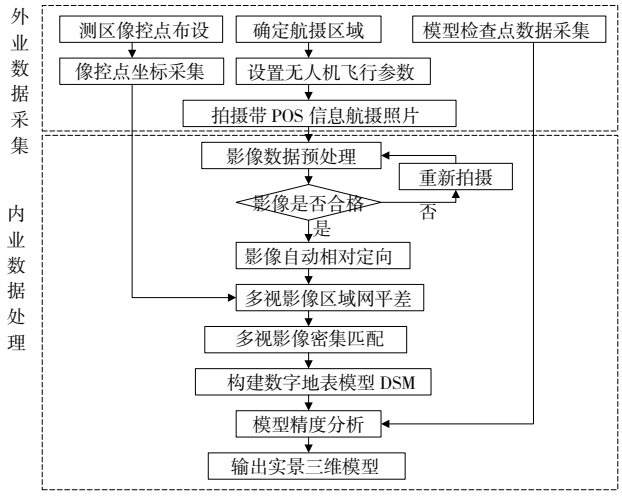


图1 倾斜摄影三维建模流程

1.3 空间数据立体采集

实景三维模型精度具有连续性，可以排除立体数据采集时粗差对数字化校核结果产生影响。空间数据采集采用清华山维公司的EPS软件V6.0版本[13]，将倾斜摄影实景三维数据导入EPS地理信息平台，同时加载测区的横断面位置数据和RTK测量的横断面高程数据。为方便空间数据立体采集，调整断面位置文件高程至贴合模型表面，依据模型三维坐标信息，采集RTK野外测量点位置对应的模型高程信息。

1.4 土石方数字化校核

公路工程土石方量的准确度取决于路线横断面高程的测量精度，因此在校核土石方量的基础在于公路横断面高程的精度。传统的土石方量校核受测量技术限制，外业数据测量难度高，内业人员检核工作量大，效率低下。与传统检核方法相比，数字化校核是利用无人机平台搭载测绘相机，通过建模软件三维重构得到数字化地表模型，并将提取断面数据传输至数字化校核云平台，利用平台设置阈值并对断面数据进行校核，若断面精度不符合规范要求则直接判定数据不合格；若断面数据符合限差要求，则自动计算土石方量并比对其差值。具体计算方法如下。

1）利用RTK野外实测断面高程和三维模型立体采集校核断面高程两份数据，根据公路里程桩号自动提取相同桩号的断面，再根据距离最近原则匹配断面上相同位置的高程点，根据距离计算:

$$D=\sqrt{(X_1-X_2)^2-(Y_1-Y_2)^2} \tag{1}$$

式中，X_1、X_2、Y_1、Y_2分别为实测与三维采集高程的平面坐标，当D达到最小值时判定实测点与校核点在同一位置。计算机遍历所有高程数据，将实测点和

校核点的高程互相对应，并计算高差 $\Delta H=H_i-H_j$（H_i 为三维模型数字采集高程，H_j 为同一位置RTK测量高程），即可得到野外实测断面高程精度。

2）依据横断面计算土石方，首先要计算每个里程桩处地形横断面和设计横断面围成的面积，并根据每2个相邻桩号间的距离计算出该区间的体积，并将每个桩号间的体积相加得到整个公路路线的填、挖方量[14]。

$$V=\sum_{i}^{n-1}\frac{S_i+S_{i+1}}{2}\times L_i \tag{2}$$

式中，V 为整个公路的土石方量；n 为总断面数；S_i、S_{i+1} 为相邻断面的面积；L_i 为第 i 和 $i+1$ 断面间距。

3）计算得到RTK实测土石方量和三维模型检核土石方量后，比对两者数据填、挖方量的差值，以此分析工程实测土石方量的精度。数字化校核流程如图2所示。

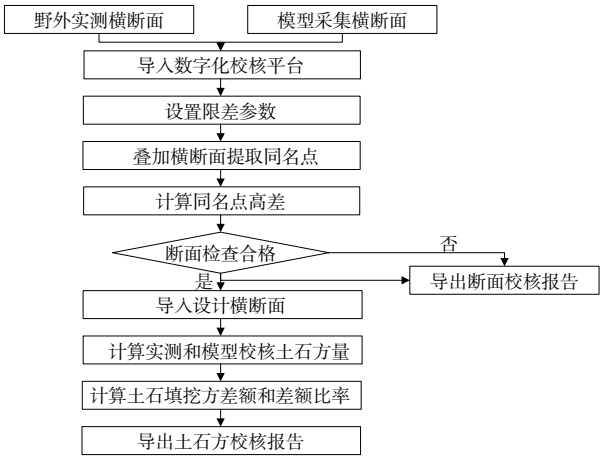


图2　土石填、挖方数字化校核流程

2　实验结果与分析

2.1　项目概述

320国道下涯至寿昌段过境改建工程起于杨梅公路与现状320国道交叉口，终点位于320国道杭州建德与衢州交界处，主线路线里程长58.7 km。本文选取桩号YK30+823–YK31+811区间作为本次数字化校核应用路段，测区具体线位布设如图3。



图3　320国道建德段线位图

本项目属山地地形，测区高差比较大，路线设计高程在39 m至200 m之间运行，人工地物地貌复杂，且道路上人车通行频繁，给人工野外测绘工作带来较大困难，难以保证外业测量精度。此次三维建模路段长度约1 km，带宽400 m，局部实景三维模型如图4所示。

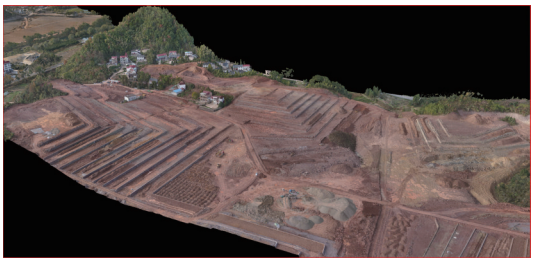


图4　320国道建德部分路段实景三维模型

2.2　断面高程误差分析

EPS软件V6.0版本中导入三维模型和实测数据断面线，并在三维模型上根据实测点的位置联动提取出高程数据，并尽量满足两者点位重合，如图5所示。

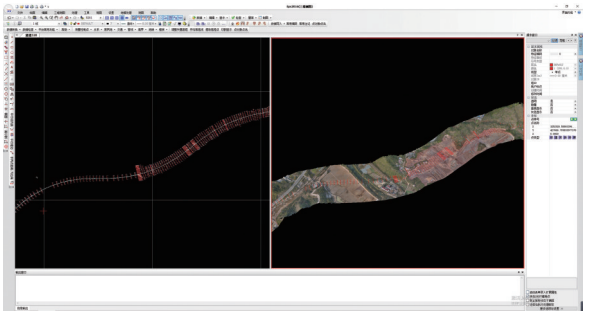


图5　三维模型断面高程提取

在数字化校核平台新建校核项目，将RTK野外测绘断面数据与实景三维模型提取断面数据上传至云平台，并设置项目断面合格率、有效点选取范围、高差阈值、高差极值、断面高程点合格率等断面校核参数。设置好参数后，平台自动计算出每个断面上高差超限的高程点个数，从而计算断面高程点合格率判断该断面是否合格，并依此统计得到项目总体断面合格率。

计算得到实验路段的断面整体的高程中误差为0.057 m，其中YK31+557的断面误差极值最大为0.18 m，YK31+275断面的平均校核高差最大，为0.11 m，YK31+448的平均校核高差最小，为0.014 m。实验路段共64根断面，平均高差值均较小，整体高差波动起伏不大，本次断面校核高差均小于设定限差，满足一级公路断面测量的精度要求。

2.3　土石方精度分析

在横断面高程数据校核精度过验证合格基础上，将公路设计横断面数据上传至云平台，与实测断面和三维模型采集断面数据叠加分析，分别计算出场地红线内实测和三维采集的土石方量，对比两份数据的土石填、挖方结果，即可得到校核土石方的误差率。文

中土石填、挖方差额比率设置阈值为5%，试验路段土石填、挖方差额信息如图6所示。



图6 土石填、挖方数字化校核结果

图中蓝色表示2个断面所在场地区间内填、挖方差额比率例均小于限差，玫红色表示断面区间内至少有填方或挖方其中一项超过阈值。实验路段内共有K30+894~K31+008等6处断面区间填方或挖方误差率超过设定的5%限差，其中K31+730~K31+752断面区间的填、挖方差额比率超过限差最大，挖方差额值为9.17 m^3，挖方差额比率为7.54%；填方差额值29.27 m^3，填方差额比为0.98%，符合限差要求。整个路段场地内填方差额4 178.61 m^3，差额率3.58%，挖方差额1 015.62 m^3，差额率2.52%，均符合土石方计量规范要求。

2.4 效率对比评价

通过基于倾斜摄影测量和数字化手段校核公路断面和土石方测量成果，相比于传统人工检查手段，内外业所需的人员数量和工作时长，效率变化对比如表1。

表1 人工校核和数字化校核对比

校核类型	人员数量/人	外业天数/d	内业时长/h
人工校核	6	4	15
数字化校核	2	1	2

表1中数字化校核相较于传统人工校核所需人员数量，内、外业所需时长都大幅度缩短，极大提升了土石方量校核的作业效率。

3 结 语

土石方量精度校核在公路工程建设中具有重要意义，传统人工校核方法外业测量难度大，野外作业易产生粗差，内业校核工作量巨大。本研究方案通过倾斜摄影技术手段建立测区实景三维模型，对于因地形限制难以施测的地带也能轻松获取高程数据，在保证校核精度条件下有效提高了外业测量的效率。本研究提出的数字化校核方案，大幅减轻了内业质量检查人员的工作强度，为海量大数据的质量校核提供智能云计算平台。

倾斜摄影虽然极大提高了外业数据采集效率，但是本文在模型检查数据提取上还存在不足：人工立体采集倾斜模型空间高程数据时仍存在误差，并且在植被覆盖区域难以准确采集到地表高程信息。在后续研究中可以利用机载激光雷达穿透性强的特点，分离出植被数据并剔除，得到地表真实高程点云数据，自动提取出断面线上高程信息，进一步提高土石方校核的精度和效率。

参考文献

[1] 左健扬,倪万魁. 快速实现三维可视化土石方量精确计算的方法与应用[J]. 水土保持通报,2016,36(6):136-138

[2] 陈鹏,胡玉祥,尹相宝,等. 土石方工程多手段测量及计算方法对比分析[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(11):213-216

[3] 李天子,刘志奇,杨振明,等. 基于近景摄影测量的基坑土方量计算及精度评价[J]. 测绘工程,2017,26(9):36-40

[4] 董丽娟. 道路土石方数量计算精度的敏感性分析[J]. 公路,2021,66(9):135-139

[5] 张宁,陈曙霞,肖来兵. 提高路基土石方量测量标准与计算的精度[J]. 新型建材与施工技术,2017(20):181-182

[6] 张珊珊,苏义坤,苏伟胜,等. 应用无人机系统对高速公路土石方的智能化计量[J]. 东北林业大学学报,2021,49(7):122-126

[7] Chen H,Lu P. Real-time Identification and Avoidance of Simultaneous Static and Dynamic Obstacles on Point Cloud for UAVs Navigation[J]. Robotics and Autonomous Systems,2022,154(32):104-124

[8] 陈郭钢,李维平. 无人机倾斜摄影在土石方测量中的应用与研究[J]. 测绘通报,2021(增刊):83-86

[9] 常利军,娄佳慧. 浅析像控点数目对正射影像图精度的影响[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(6):212-214

[10] Wang Fei, Zhu H C, Cai H L, et al. A Parallel Method for Texture Reconstruction in Large-scale 3D Automatic Modeling Based on Oblique Photography[J]. Remote Sensing, 2022,14(9):2 160-2 165

[11] Che D F, He K, Qiu K H, et al. Edge Restoration of a 3D Building Model Based on Oblique Photography[J]. Applied Sciences,2022,12(24):12 911-12 918

[12] 王强. 基于已有资料的倾斜摄影实景建模及BIM应用[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(2):219-224

[13] 赵欣. 基于EPS地理信息系统在大比例尺地形图信息化测绘中的应用[J]. 经天纬地,2023(2):94-100

[14] 靳战刚. 道路工程土石方的测量与计算[J]. 工程技术,2021(5):113-115