

基于 ATP 的微地形三维建模方法研究

刘笑寒¹ 张青峰¹ 周小龙¹ 常琳山¹ 符欣彤¹ 刘 静¹

¹ 西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌,712100

3D Micro-topographic Modeling Based on Artificial Tilt Photogrammetry

LIU Xiaohan¹ ZHANG Qingfeng¹ ZHOU Xiaolong¹ CHANG Linshan¹ FU Xintong¹ LIU Jing¹

¹ College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

摘 要:基于人工倾斜摄影测量(artificial tilt photogrammetry, ATP)的方法,通过设置两种拍摄路径、3 种拍摄高度、3 种分辨率相机的组合,测量并建立微地形地表三维模型,并对其精度评价。结果表明,所有三维模型总体平面误差为±8.98 mm,高程误差为±7.79 mm;较“○”形路径、1.0 m 和 1.5 m 测量高度、1 230 万和 610 万像素相机的测量方法而言,“□”形路径、0.5 m 测量高度、2 430 万像素相机所生成的三维模型平面误差为±4.01 mm,高程误差为±1.81 mm,能够更加精确地表达地表的细节特征,为量化研究微地形侵蚀地表界面过程提供较高精度的数据支持和三维建模方法参考。

关键词:摄影测量与遥感;三维建模;人工摄影测量;微地形中图分类号:P208

文献标志码:A

Abstract: Based on the method of artificial tilt photogrammetry, the 3D model of micro-topography surface is measured and established by setting up two shooting paths, three shooting heights and three kinds of resolution cameras, and evaluated the model's accuracy. The results show the overall horizontal distance error of the 3D model is ±8.98mm and vertical distance error is ±7.79 mm. Comparing with the ○-path, 1.0 m and 1.5 m, 12.3 million and 6.1 million camera resolution, the method which uses □-path, 0.5 m shooting height, and 24.3 million camera resolution to take photos has better ability to represent the surface micro-topographic features more accurately, and the horizontal distance error of its 3D models is ±4.01mm and vertical distance error is ±1.81 mm. It provides sufficiently accurate data and the reference to establishing the 3D model for quantificational study of micro-topography soil erosion process.

Key words: photogrammetry and remote sensing; 3D modeling; artificial tilt photogrammetry; micro-topography

微地形是指较小限定面积范围内,由于人为耕作、降雨、地表径流等作用而形成的起伏地表形态

(相对高程通常不超过 25 cm)^[1-2]。它是一个能够反映坡面侵蚀动力学各要素及其相互作用的综合因素,通过必要的指标将其量化,并对其与坡面侵蚀的其他参量之间的关系进行分析,将有助于了解坡面侵蚀发生和发展过程,并对构建反映坡面各类侵蚀形态转化关系的预测模型提供数据支持^[1]。

农业耕作坡面微地形是黄土高原土壤侵蚀的主要物源地,也是侵蚀物质和能量交换的主要场所。随着科学家们对水蚀研究尺度转到微地形条件^[3],数据的精度也从 m 级、dm 级向 cm 级和 mm 级转变^[4],如何根据水蚀过程模型构建的目的、方式及微地形实际情况,构建高精度的微地形三维模型,就成为水蚀界面过程高度定量化研究的关键所在。

目前,微地形观测的主要方法有接触式(如测针法、链条法)和非接触式(如激光扫描法、近景摄影测量法)两大类^[5]。接触式测量方法测量时会扰动地表且容易受到不规则土壤颗粒的影响;非接触式测量方法虽能改变这种情况,但由于测量角度的限制,以及地表遮挡造成的测量盲区和无法对汇水表面进行精确观测等,还未能很好地反映微地形细节特征^[6-7]。尽管无人机倾斜摄影测量技术克服了传统正射摄影仅从垂直角度进行摄影的局限性^[6],通过不同角度的感光器件获取地面多方向的立体图像信息,并配合机身携带的高精度导航卫星定位接收机和惯性测量单元完成对被摄物体信息(包括大小、形状、位置等^[8])的获取,实现对真实场景的重建。本文在黄土坡面微地形条件下应用人工倾斜摄影测量(artificial tilt photogrammetry, ATP)技术进行探索性研究及其精度评价,以期获得高精度微地形 DEM 数据提供方法参考。

1 试验设计

在陕西省杨凌区一块坡度为 2°较为平坦的农耕地上进行原位裸地试验。杨凌区位于黄土高原南缘(108.72°E,34.36°N),年均降雨量约 637.6 mm,属温带半湿润大陆性季风气候。坡耕地土壤为壤土,土体较疏松,呈灰棕色,有粒状或团块状结构,土壤颗粒以粉沙为主。试验选用 200 cm×100 cm×30 cm 规格的铁皮框,将其嵌入地表 20 cm,露出地表10 cm,并保持水平和框边无变形。将 4 个角点作为控制点,左下角点定义为坐标原点,原点与相邻的控制点所在的边框定义为 x 、 y 轴,并在铁皮框内以 10 cm 为间距选取样本点共 171 个,如图 1(a)所示。通过 ATP 方式获取地面影像时,应保证拍摄方向重叠度大于 70%,旁向重叠度大于 65%,相同目标不同视角之间相差应小于 15°,拍摄区域大于边界,以保证原始数据的完整性。每个网格拍摄 5~18 次。交叉试验方案见表 1,所有试验均重复两次。

表 1 交叉试验方案

Tab. 1 Plans Cross-over Experiment

相机	高度/m	拍摄路径
索尼 ILCE-A5100L (2 430 万像素)	0.5	“○”形路径:以边框对角线中点为圆心,1.1 m 为半径的圆形为路径进行拍摄,如图 1(b)所示
尼康 D90 (1 230 万像素)	1.0	
尼康 D70S (610 万像素)	1.5	“[]”形路径:以长为 2 m,宽为 0.2 m 的路径进行拍摄,如图 1(c)所示

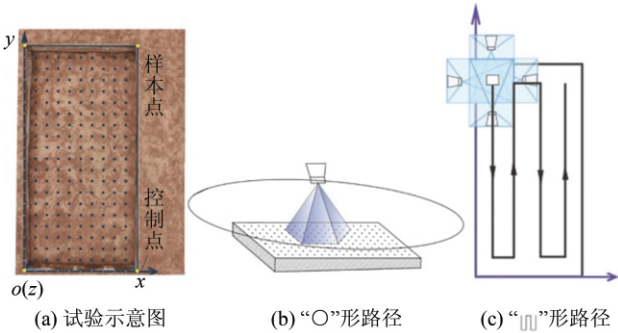


图 1 试验区及拍摄路径

Fig. 1 Experiment Area and Shooting Path

2 研究方法

1)相机检校。为易于推广应用,本试验所使用的相机为索尼 ILCE-A5100L(2 430 万像素)、尼康 D90(1 230 万像素)和尼康 D70S(610 万像素)。这 3 种非专业量测数码相机存在光学畸变,物点、像点和投影中心点不共线,影像的形状发生变形,导致摄影影像精度降低^[9]。因此在拍摄使用前,必须要对相机进行严格的检校^[10]。检校参数见表 2。

由表 2 可知,试验所选相机满足数据获取的精度和可靠性要求。

2)微地形三维模型建立。高精度微地形三维模型能细致地反映微地形的起伏变化和破碎状况^[11],可以作为土壤侵蚀研究的重要数据源。在本试验中,3 种不同组合共进行了 18 组试验,得到影像数量(0.5m、1.0 m、1.5 m 拍摄高度分别以 L、M、H 表

表 2 相机检校参数

Tab. 2 Calibration Parameters

相机	参数	像主点坐标		主距	径向畸变参数/(×10 ⁻¹⁰)			切向畸变参数/(×10 ⁻⁷)	
		x_0 /mm	y_0 /mm	f /mm	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
ILCE-A5100L		11.385	7.506	20.236	395	-4.05	-0.197	4.98	7.36
D90		0.054	-0.171	29.423	3 890	-27.1	1.66	-15.9	-29.4
D70S		0.027	-0.248	17.473	-23 700	—	—	—	—

示): ①-L-[]:147; ①-L-○:43; ①-M-[]:84; ①-M-○:39; ①-H-[]:58; ①-H-○:32; ②-L-[]-L-○:60; ②-M-[]:84; ②-M-○:34; ②-H-[]:70; ②-H-○:42; ③-L-[]:185; ③-L-○:46; ③-M-[]:73; ③-M-○:34; ③-H-[]:58; ③-H-○:33。

利用 Smart3DCapture4.0 软件分别对地表影像进行处理,其具体流程如下:

①通过空中三角测量计算,匹配影像中同名点的信息,以确定不同影像之间的关系,得到一个粗糙的三维地表模型;

②设置比例因子,将解算出的控制点间距修改

为实际距离(单位设置为 cm),初步得到精度不高的立体模型;

③导入控制点坐标,添加三维坐标轴,人工修正导入控制点位置,确保模型上解算出的控制点与导入的控制点位置一致;

④再次进行空三加密解算,最终得到试验区具有真实纹理的高精度微地形实景三维模型。

3)三维模型精度评价。使用电子测距(博世 GLM500,精度±1.5 mm)对已知(x , y)样本点的高程 z 值进行观测。将样点实测坐标值与计算坐标值进行比较,评价样本点精度。

3 结果分析

1)试验结果。试验区部分原始影像、实景三维模型图、数字高程模型图见图 2。从土壤微地形空间各点位置可以看出,所获得的三维模型和 DEM 符合自然状态下的地表特征。

2)控制点可靠性分析。控制点的可靠性是定量描述 ATP 技术获取的模型精度的前提。经统计,每组实验 4 个控制点,2 次重复实验共得到 144 个控制点的坐标(x,y,z),中误差分别为 $\pm 0.16\text{ mm}$ 、 $\pm 0.13\text{ mm}$ 、 $\pm 0.20\text{ mm}$,这说明控制点的相对位置精度在亚 mm 级水平上,位置基本保持不变,能够作为基准点。基准点的稳定保证了坐标轴的可靠性,为空间各点的三维相对坐标的准确性提供了保证。

3)三维模型样本点坐标精度评价。基于本方法得到的样本点在 x,y,z 方向上的误差如图 3 所示。

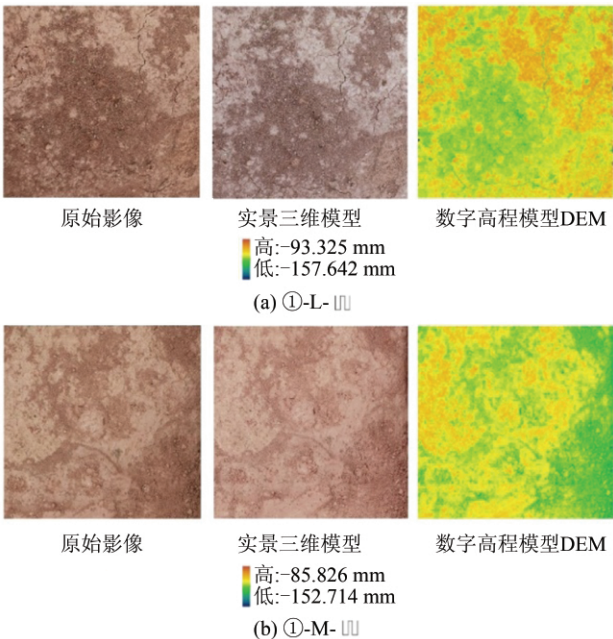


图 2 局部区域试验结果
Fig. 2 Part of Experiment Result

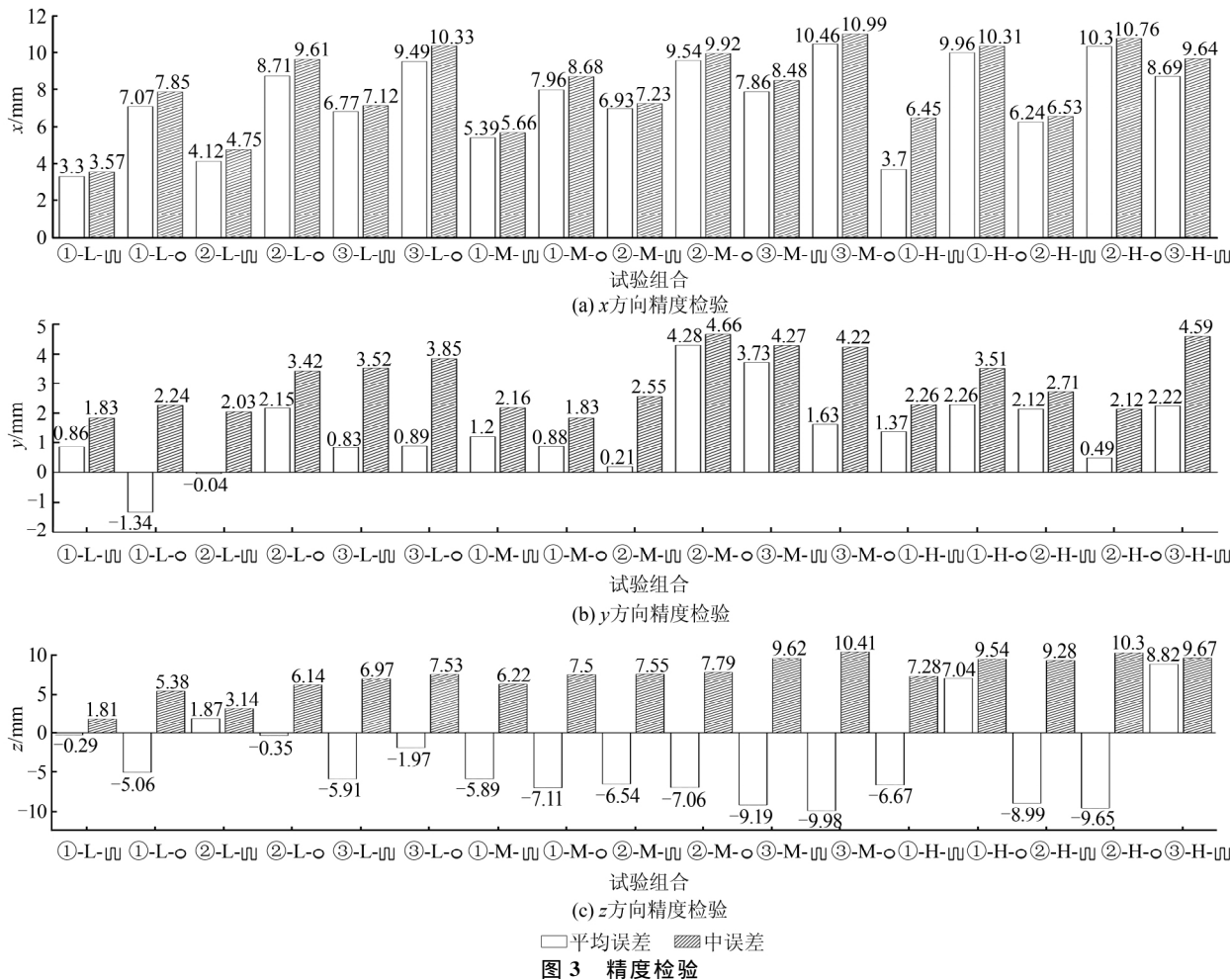


图 3 精度检验
Fig. 3 Accuracy Test

样本点在试验区均匀分布,其准确性在一定程度上表明所在区域所有点坐标的准确性。试验所得所有样本点的总体平面误差为 $\pm 8.98\text{ mm}$,高程误

差为 $\pm 7.79\text{ mm}$ 。这说明样本点三维坐标精度在 mm 级水平上。其中,①-L-∩组合所拍摄影像生成的三维模型平面误差和高程误差均最低,分别为

±4.01 mm和±1.81 mm,这说明,“□”形拍摄路径、2 430 万像素、0.5 m 拍摄高度的组合是最佳的 ATP 测量方案,能够很好地反映地表的细节特征。

由图 3 可以看出,保持相机分辨率和拍摄路径不变,三维模型精度总体上随拍摄高度增高而降低;保持相机分辨率和相机拍摄高度不变,所得三维模型精度总体表现出“□”形拍摄路径较“○”形拍摄路径精度更高;保持拍摄路径和相机拍摄高度不变的情况下,模型精度表现出随相机分辨率增高而增高的趋势。此外,采用“○”形拍摄路径获取影像更

加方便快捷,且可应用数量较少的照片建立完整的地表三维模型,尽管模型精度与“□”形路径所获模型精度相比较低,但在应用过程中可以根据精度需要进行选择。

4)本方法和以往研究的比较。基于 ATP 获得的三维模型和以往基于无人机倾斜摄影测量所获得的三维模型精度进行对比,结果如表 3。

从表 3 可以看出,本文方法获得的地表三维模型较以往研究成果精度提升了一到两个数量级,实现了由 dm 级到 mm 级的转变,具有较大的应用价值。

表 3 不同方法精度对比
Tab. 3 Accuracy Contrast of Different Method

试验条件	试验方法	模型数据精度/mm	
		平面精度	高程精度
杨凌原位裸地(200 cm×100 cm×30 cm)	人工倾斜摄影测量	±8.98	±7.79
资阳城市区	相对航高 750 m,采用 SWDC-5 相机采集 ^[12]	±230	±179
清城区南部经济开发区(约 20 km ²)	无人机航高 200 m ^[13]	±710	±610
丹阳市试验区(约 120 km ²)	AMC580 多视角航空照相机系统 ^[14]	270~470	150~380

4 结束语

本试验利用交叉试验建立并测量微地形地表三维模型的坐标数据,通过计算获取其与实测数据之间的中误差和平均误差,对该方法获取的三维数据的精度作出量化评估。探索非量测相机分辨率、拍摄高度、拍摄路径对于微地形地表三维模型的精度的影响,为此方法在推广应用过程中根据不同精度要求选择不同的相机、拍摄高度、拍摄路径提供参考。精确测量微地形空间各点的位置、高度变化对于了解坡面侵蚀发生发展过程具有重要意义,本方法可以为构建反映坡面各类侵蚀形态转化关系的预测模型提供高精度的数据支持,有助于科学家更加直观地了解在不同时间土壤侵蚀的发展变化。本文仅采用一种规格的试验面积探究微地形三维模型精度的影响因素及其精度的变化规律,而获得不同规格试验区下微地形三维模型的精度对本技术在不同范围的推广具有重要意义,将有待于今后深入研究。

参考文献

[1] 张青峰,王健,赵龙山,等. 基于 M-DEM 黄土人工锄耕坡面微地形特征研究[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(9):149-153

[2] Cheng W, Zhou C, Li B, et al. Structure and Contents of Layered Classification System of Digital Geomorphology for China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(5):771-790

[3] 夏积德,吴发启,张青峰,等. 基于 GIS 技术的降雨对微地形地表糙度的影响[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(4):75-80

[4] Zhang Qingfeng, Wang Jian, Zhao Longshan, et al.

Spatial Heterogeneity of Surface Roughness During Different Erosive Stages of Tilled Loess Slopes Under a Rainfall Intensity of 1.5 mm min⁻¹[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 153:95-103

[5] 朱良君,张光辉. 地表微地形测量及定量化方法研究综述[J]. 中国水土保持科学,2013,11(5):114-122

[6] 李德仁,刘立坤,邵振峰. 集成倾斜航空摄影测量和地面移动测量技术的城市环境监测[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2015,40(4):427-435

[7] 李艳,宿勇军. 三维激光扫描技术在古建筑园林建模与系统开发中的应用[J]. 测绘地理信息,2018,43(2):35-37

[8] 邹进贵,孟丽媛. 近景摄影测量控制点快速自动识别与定位[J]. 测绘地理信息,2018,43(6):70-73

[9] 庄利有,方德涛,刘珊珊,等. 提高非量测相机高程精度关键技术分析[J]. 测绘通报,2018(7):133-136

[10] 崔瑞兵,靳国旺,刘辉,等. 空间序列影像共面条件的非量测相机标定方法[J]. 测绘科学,2016,41(7):131-137

[11] 张莉,张青峰,郑子成,等. 基于 M-DEM 的黄土人工锄耕坡面水系分维特征研究[J]. 水土保持研究,2012,19(5):7-11

[12] 张平,刘怡,蒋红兵. 基于倾斜摄影测量技术的“数字资阳”三维建模及精度评定[J]. 测绘,2014,37(3):115-118

[13] 谭金石,黄正忠. 基于倾斜摄影测量技术的实景三维建模及精度评估[J]. 现代测绘,2015,38(5):21-24

[14] 王丙涛,王继. 基于倾斜摄影技术的三维建模生产与质量分析[J]. 城市勘测,2015(5):80-82

收稿日期:2019-03-26
第一作者:刘笑寒,研究方向为地理信息科学. E-mail:504755064@qq.com
通讯作者:张青峰,教授,主要从事土地资源与空间信息技术方面的研究. E-mail:zhqf@nwsuaf.edu.cn