引文格式：朱鹏程. 丘陵地 DEM 建模精度受像控点空间分布影响研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(5): 57-61. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.05.011

丘陵地 DEM 建模精度受像控点空间分布影响研究

朱鹏程[1]
（1. 陕西铁路工程职业技术学院，陕西 渭南 714000）

摘　要：为了探究像控点空间分布对 DEM 建模精度的影响，利用无人机摄影测量技术对 6.25 hm^2 丘陵区域进行 DEM 建模实验。通过在刺点过程中采用多种像控点平面和高程布设方式来研究 DEM 建模精度与像控点空间分布之间的关系。结果表明，在同等实验条件下，“边缘+中心”的平面布设方式和“高程梯次组合”的高程布设方式可获得更高的建模精度。实际应用中可参考研究结果优化像控点的空间布设方案。

关键词：丘陵地测量；DEM；像控点布设；近地摄影测量
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）05-0057-05

Research on the Accuracy of Hilly DEM Modeling Influenced by the Spatial Distribution of Ground Control Points

ZHU Pengcheng[1]
(1. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

Abstract: In order to explore the spatial distribution influence of ground control points on the accuracy of hilly DEM modeling, we used UAV photogrammetry technology to conduct DEM modeling experiment on a 6.25 hm^2 hilly area, and studied the relationship between DEM modeling accuracy and the spatial distribution of ground control points by using a variety of different ground control point plane and elevation distribution methods in the process of pricking points. The results show that under the same experimental condition, the plane distribution method of “edge+center” and the elevation distribution method of “elevation ladder combination” can obtain higher modeling accuracy. The spatial distribution scheme of ground control points can be optimized by referring to the above results in practical applications.

Key words: hilly measurement, DEM, ground control point distribution, near-ground photogrammetry

数字高程模型（DEM）作为重要的测绘数字产品，被广泛应用于地质勘察、环境保护、工程建设等领域[1-3]，而上述项目部分建设在丘陵地等地形起伏较大的区域，地形地势复杂陡峭，局部地区人类难以涉足，利用传统测绘仪器进行 DEM 建模，在获取效率、作业难度、人力耗损等方面均较难满足工程要求。近年来迅速发展的无人机摄影测量技术为该问题提供了新的解决方案。DEM 建模精度是衡量 DEM 产品质量的重要标准，已有大量学者对无人机摄影测量构建 DEM 模型的精度进行了研究，结果表明硬件设备[4]、航线控制[5]和像控点布设[6-8]是影响建模精度的 3 个重要因素。其中，硬件设备影响主要在于无人机所摄影像的 POS 数据、影像分辨率、影像倾斜角度等方面，研究表明高精度 POS 数据和高分辨率影像数据均会提高建模精度[9-10]，且当影像倾斜角度在 20°~35°时可有效提高建模的整体精度[11]；航线控制影响主要表现在航高和影像重叠率方面，航高影响影像的地面采样间隔（GSD），进而影响建模精度[12]，影像重叠率则影响影像匹配的成功率，同等条件下影像重叠率越高则匹配的重叠率越高[13]；上述两个影响因素在硬件设备和任务要求确定的情况下较难进行优化，因此目前优化建模精度的主要途径仍集中在像控点布设上。

针对像控点布设对建模精度的影响，目前学界已形成了 3 点共识：①像控点测量精度越高，建模精度越高[7,14]；②单位测区面积内像控点数量越多，建模精度越高，但增至一定数量后，其对建模精度的影响甚微[15-17]；③像控点的平面分布图形为“边缘+中心”时，建模精度最高[18-20]。上述结果往往基于平原或地形起伏较小的地区，而对于丘陵地这类范围小落差大的区域而言，像控点布设不仅需要考虑二维平面位置，还需考虑不同高程的垂直分布特征。因此，本文以丘陵地貌为例，针对像控点空间分布对 DEM 建模精

收稿日期：2022-12-23。
项目来源：陕西铁路工程职业技术学院 2021 年第二批科研基金研究生专项资助项目（KY2021-58）。
作者简介：朱鹏程（1995—），硕士研究生，助教，研究方向为无人机摄影测量与变形监测，E-mail：13813474141@163.com。

度的影响展开研究，主要内容包括：①在已有研究的基础上，验证“边缘+中心”的像控点平面布设图案是否对丘陵地貌具有适用性；②考虑丘陵地貌垂直落差大的特点，尝试新的像控点布设思路，研究将像控点布设在不同高程上对建模精度的影响。

1 研究区概况

研究区位于安徽省淮北市萧县郭庄牛头山，测区中心位于34°08′34″N、116°53′56″E。实验选取一块250 m×250 m的正方形区域（图1），地形类别属于丘陵地，地表多为裸露岩石，植被覆盖较少；平均海拔为200 m，地表最大落差约为56 m。

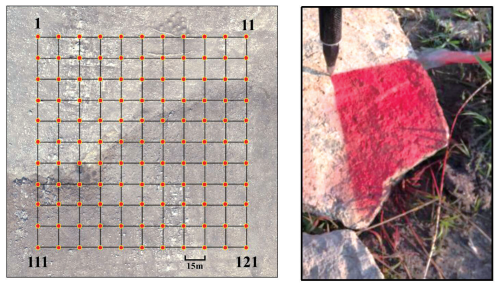


图1 研究区位置

2 数据获取与处理

2.1 像控点坐标获取

在测区内共布设121个像控点，相邻两点间距25 m（图2）。利用南方测绘银河1号RTK设备获取像控点坐标，接收机链接千寻网络CORS网在固定解状态下可获得平面精度2 cm、高程精度2 cm的测点坐标，最终获得121个测点的平面坐标和高程。



a 像控点相对位置 b 像控点制作

图2 像控点布设示意图

2.2 无人机影像获取

实验采用DJI Phantom RTK四旋翼无人机进行测区航摄影像数据采集。该款无人机拥有空中组合导航定位系统，卫星定位模块为BDS+GPS+Galileo，能为拍摄影像提供厘米级的POS数据，重量为1.4 kg，飞行时间为25 min。启用RTK且RTK固定时，水平与垂直空中定位精度均能达到±0.1 m。影像系统挂载有效像素2 000万的CMOS传感器，配套遥控器装有GS RTK App，是一套能够在作业前预规划作业区域、作业航高、影像重叠率、镜头参数以及在作业过程中实时查看作业进度、无人机状态、电池电量的地面站系统。

实验当天天气晴朗，西南风1~2级，空气能见度良好，所有架次的影像均在无人机处于启用RTK且为固定解的状态下摄取，无人机起飞点选择在测区内最大落差的1/2处，航向、旁向重叠率分别为80%、70%，镜头倾斜角度为90°，平均GSD为1.4 cm/pixel，使用两架次共获取作业高度50 m的影像460张。

2.3 数据处理

本文采用Pix4Dmapper软件进行数据处理（图3），主要包括数据准备、数据处理、成果输出和结果计算等步骤。本文共采集121个测点，在所有实验方案中，除被选为像控点的测点外其余测点均作为检查点，用作建模精度评估。

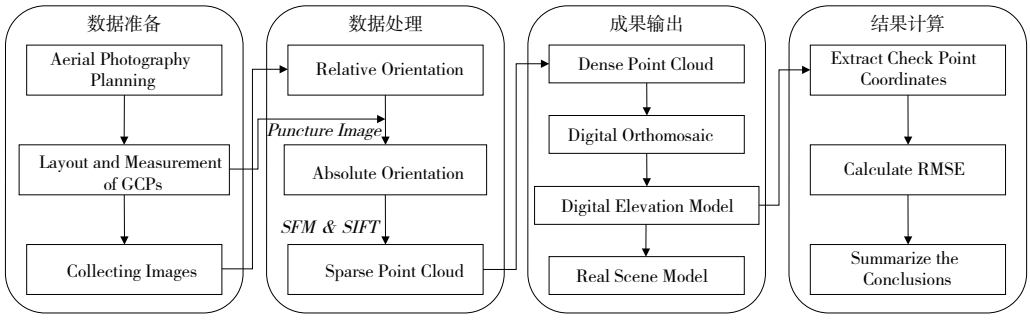


图3 数据处理流程图

2.4 精度评价

实验通过DEM建模软件对影像数据进行处理获得精度报告，得到检查点的平面和高程误差，并采用均方根误差（RMSE）评价所有方案生产的DEM精度。其计算公式为：

$$\mathrm{RMSE}_h=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(H_{\mathrm{D}i}-H_{\mathrm{R}i}\right)^2}{n}} \quad (1)$$

$$\mathrm{RMSE}_{xy}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{\mathrm{D}i}-X_{\mathrm{R}i})^2+\sum_{i=1}^{n}(Y_{\mathrm{D}i}-Y_{\mathrm{R}i})^2}{n}} \quad (2)$$

式中，n 为各方案的检查点数量；$X_{\mathrm{D}i}$、$Y_{\mathrm{D}i}$、$H_{\mathrm{D}i}$ 分别为第 i 个检查点在DEM中的 x、y 坐标和高程；$X_{\mathrm{R}i}$、$Y_{\mathrm{R}i}$、$H_{\mathrm{R}i}$ 分别为第 i 个检查点野外实测的 x、y 坐标和高程。

3　实验结果与分析

首先分析了已有研究结果“边缘+中心”的布设图案对丘陵地貌是否具有适用性；然后针对丘陵地貌提出了新的像控点布设方案，即将像控点布设在测区内同一高程上，并分析了该布设方案对DEM建模精度的影响。

3.1　像控点布设图案对DEM建模精度的影响

已有研究表明，利用无人机摄影测量技术对测区进行DEM建模时，像控点采用“边缘+中心”的布设方式可获得较高的建模精度，但该成果一般是在地势相对平坦、高差较小的地貌环境中取得，其在丘陵等地势起伏较大的环境中是否适用未有验证。因此，本文设计了7种常见的像控点平面布设方式（图4）对上述成果进行验证：①Corner分布将像控点布设在测区的4个角上；②Internal分布将像控点布设为3条航带；③Edge+Center分布将像控点分成测区边缘与测区中心两部分布设；④Center分布将像控点布设在测区中心；⑤Cross分布在测区内将像控点布设成“×”形；⑥Edge分布将像控点布设在测区边缘；⑦Average分布将像控点按等间距均匀布设在测区内。为减小像控点测量粗差对整体结果的影响，每种布设方式又设计了 R_1~R_5 五种方案（图5），所有方案均采用20个像控点，5种方案的误差均值为该布设方式的最终结果。

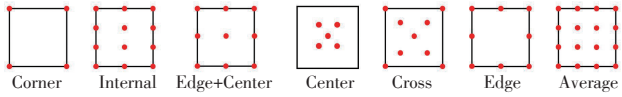


图4　7种分布方式示意图

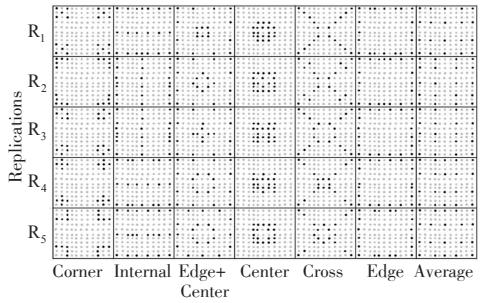


图5　像控点布设具体分布图

各布设方式对应的建模平面精度和高程精度见表1，对应的DEM建模精度见图6，可以看出：①在同一布设方式下，平面建模精度均大于高程建模精度；②不同布设方式对平面、高程建模精度均有影响，其中“边缘+中心”的布设方式可获得最高的平面和高程精度。上述结果与已有研究结果基本一致，说明“边缘+中心”的像控点布设方式在丘陵地区等地形起伏较大的区域也具有适用性，该方式在绝大部分地形中均有优势。

表1　各平面布设方案对应的建模平面精度和高程精度/cm

方案	指标	Corner	Internal	Edge+Center	Center	Cross	Edge	Average
R_1	RMSE_{xy}	3.4	3.1	2.6	3.7	3.5	3.3	3.0
	RMSE_{h}	3.7	3.9	3.2	4.1	4.2	3.4	4.1
R_2	RMSE_{xy}	2.9	3.2	3.0	3.4	3.4	3.4	3.4
	RMSE_{h}	4.2	4.5	3.7	3.7	3.4	3.7	3.2
R_3	RMSE_{xy}	2.8	2.8	2.9	3.2	2.9	3.1	2.8
	RMSE_{h}	4.1	4.4	3.3	3.6	3.7	3.5	3.5
R_4	RMSE_{xy}	3.1	2.6	2.5	3.4	3.0	2.9	2.9
	RMSE_{h}	3.6	4.9	3.6	4.4	4.0	4.4	3.9
R_5	RMSE_{xy}	2.8	2.8	2.5	4.3	3.7	3.3	3.4
	RMSE_{h}	4.4	4.3	3.2	3.7	3.7	3.5	3.3
RMSE	RMSE_{xy}	3.0	2.9	2.7	3.6	3.3	3.2	3.1
	RMSE_{h}	4.0	4.4	3.4	3.9	3.8	3.7	3.6

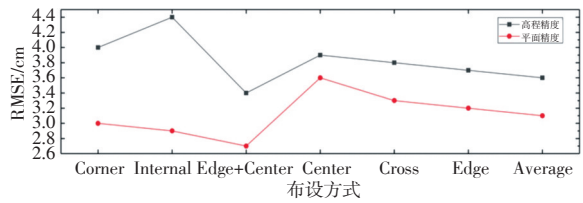


图6　不同像控点布设方式对应DEM建模精度

3.2　像控点布设高程对DEM建模精度的影响

前人已对像控点布设方式对DEM建模精度的影响进行了大量研究，本文也已对“边缘+中心”的布设方式在丘陵地区的适用性进行了验证；但这些研究均是建立在像控点布设方式俯视图形之上的，在地形起伏平缓的区域进行DEM建模是可行的，而对于丘陵地这种地形起伏较大的区域，像控点按一定形状布设时，其在测区内的高程分布存在很大区别，因此讨论像控点在高程上应该如何分布是很有必要的。由于实验布设的121个像控点分布在最大垂直落差为56 m的区域内，因此在垂直分布实验中为避免出现像控点高程跨度过大的问题，在保证精度的前提下，每种垂直布设方案采用5个像控点。垂直分布实验共设计7种布设方案（图7），每种布设方案给出了三维模型示意图和基于等高线的准确布设位置，将5个像控点按照不同高程布设在测区内，再对测区进行DEM建模，进

而评价7种布设方案对DEM建模精度影响。图7中GCPs Site表示像控点布设的高程。

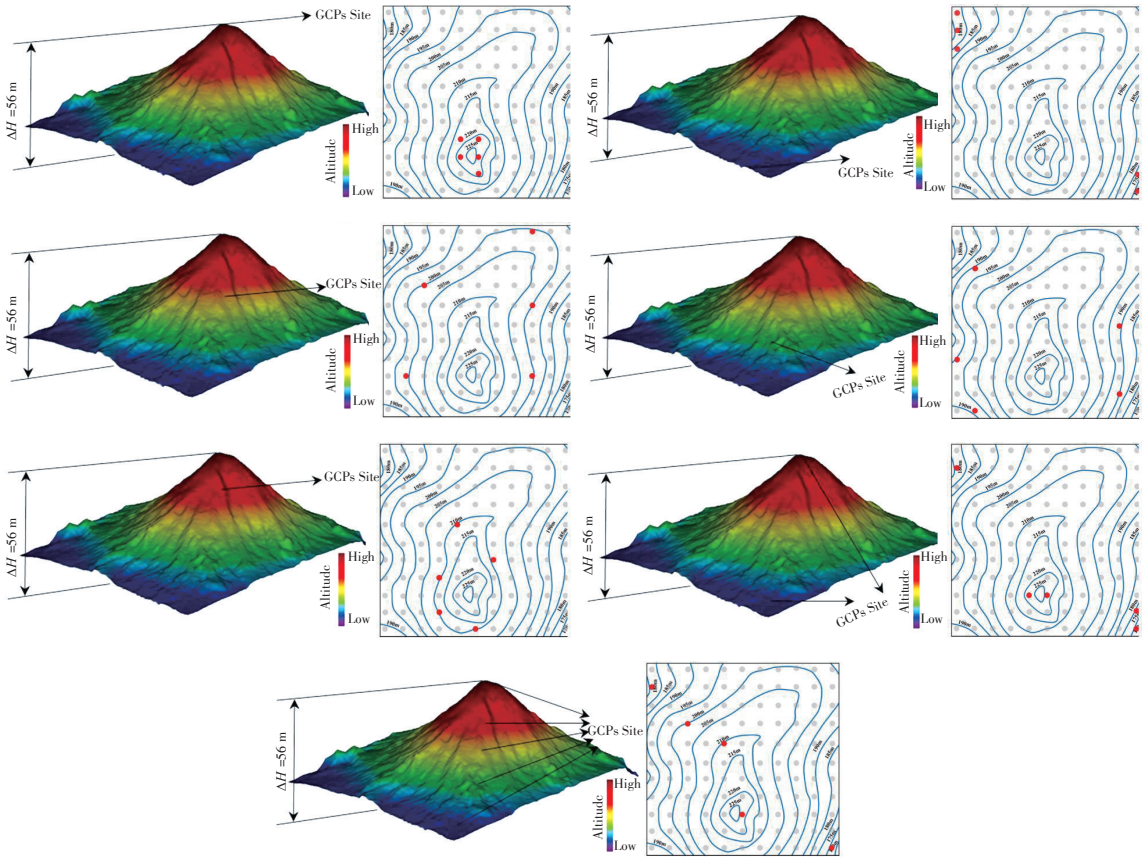


图7 不同像控点布设高程

各高程布设方案对应的建模平面和高程精度见表2，不同像控点布设高程对应的DEM建模精度见图8，可

表2 各高程布设方案对应的建模平面精度和高程精度/cm

指标	Max	Min	Middle	1/4ΔH	3/4ΔH	Max+Min	Max+3/4ΔH+Middle+1/4ΔH+Min
$RMSE_{xy}$	3.8	3.3	3.0	3.5	3.0	3.0	2.9
$RMSE_h$	4.2	9.1	4.0	5.9	4.0	3.9	3.7

以看出：①平面坐标精度依然高于高程精度，这与前述实验结果相符，说明在有像控点的条件下，DEM建模通常平面精度高于高程精度；②平面精度比高程精度稳定，在7种高度条件下，平面坐标中误差分布在2.9~3.8 cm，而高程中误差分布在3.5~9.1 cm，变化范围更大，起伏更加明显，说明像控点布设高程对高程建模精度的影响大于平面精度；③像控点布设在同一高程和不同高程两种情况，后者高程精度明显优于前者，但平面精度影响甚微，说明将像控点按照不同高

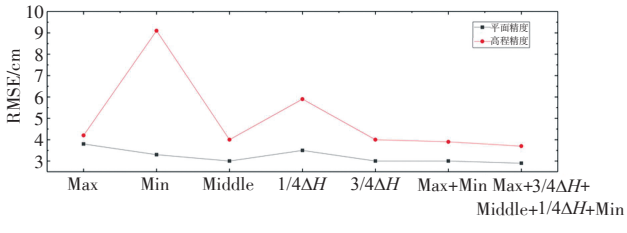


图8 不同像控点布设高程对应的DEM建模精度

程梯次布设可以做到更好的控制，获得更高的高程建模精度，但对平面建模精度影响不大。

4 结 语

本文通过设计多种像控点空间布设方案研究了丘陵地貌环境中像控点的平面布设方式与高程布设方式对摄影测量DEM建模精度的影响，得出以下结论：

1）较之其他像控点布设方式，“边缘+中心”的布设方式在丘陵地貌环境中仍可获得较高精度的结果，在本文实验条件下，平面坐标中误差为2.7 cm，高程中误差为3.4 cm，这与在平原地区的相关研究结果基本一致，说明该布设方式在起伏较大的丘陵地区仍具有适用性。

2）在丘陵地貌环境中，可将像控点按最大落差进行梯次布设，本文中将5个像控点分别布设在测区

最低处、1/4最大落差处、半山腰、3/4最大落差处和最高处。较之其他布设方案，该方案可获得最高的平面和高程建模精度，平面坐标中误差为2.9 cm，高程中误差为3.7 cm。

3）在各类地形布设像控点时，为获得较高的DEM建模精度，应综合考虑“边缘+中心”与“高程梯次布设”两种方式。

本文利用中误差指标对多种像控点布设方案的DEM建模进行了精度评价。事实上，像控点对建模精度的影响在测区不同位置影响不同，在后续研究中将针对测区内不同位置的误差空间分布展开深入研究，分析像控点空间分布与误差空间分布之间的关系。

参考文献

[1] 王延寿. 无人机航空摄影技术在三维边坡建模中的应用[J]. 遥感信息,2022,37(5):51-55

[2] 于书媛,杨源源,丁娟,等. 基于InSAR技术的大别山DEM提取及地貌特征分析[J]. 地理空间信息,2020,18(8):41-43

[3] 刘天雪,王瑛,陈笑娟,等. DEM分辨率对山洪淹没模拟影响[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(4):156-163

[4] 马国吉,马国斌,马国宝,等. 消费型无人机倾斜序列影像三维重建研究[J]. 地理空间信息,2021,19(7):31-35

[5] 毕瑞,甘淑,袁希平,等. 不同地形环境下无人机航线规划及三维建模分析[J]. 测绘通报,2022(4):83-89

[6] Martínez-Carricondo P,Mesas-Carrascosa F J,García-Ferrer A,et al. Assessment of UAV-photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation of Ground Control Points[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2018,72:1-10

[7] Agüera-Vega F, Carvajal-Ramírez F, Martínez-Carricondo P. Assessment of Photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation Ground Control Points Number Using Unmanned Aerial Vehicle[J]. Measurement, 2017, 98:221-227

[8] Tsai M L, Chiang K W, Lo C F, et al. Directly Georeferenced Ground Feature Points with UAV Borne Photogrammetric Platform Without Ground Control[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,284/287:1 523-1 527

[9] 薛武,张永生,赵玲,等. 增量式SFM与POS辅助光束法平差精度比较[J]. 测绘学报,2017,46(2):198-207

[10] Xu Z,Chen Z,Yi W,et al. Deep Gradient Prior Network for DEM Super-resolution: Transfer Learning from Image to DEM: Science Direct[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2019,150:80-90

[11] Nesbit P, Hugenholtz C. Enhancing UAV-SFM 3D Model Accuracy in High-relief Landscapes by Incorporating Oblique Images[J]. Remote Sensing,2019,11(3):239

[12] Smith M W, Vericat D. From Experimental Plots to Experimental Landscapes: Topography, Erosion and Deposition in Sub-humid Badlands from Structure-from-Motion Photogrammetry[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015,40(12):1 656-1 671

[13] 邢诚. 基于简化SIFT算法的无人机影像重叠度分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2012,33(2):221-225

[14] 张力,刘玉轩,孙洋杰,等. 数字航空摄影三维重建理论与技术发展综述[J]. 测绘学报,2022,51(7):1 437-1 457

[15] 席思远,张西童,王宁,等. 倾斜摄影设备选型及像控点布设对高精度实景三维模型重建的影响[J]. 测绘通报,2022(10):86-92

[16] 王朝辉,吴昊,孟将. 无人机倾斜摄影像控布点方案研究及精度分析[J]. 测绘通报,2021(5):102-105

[17] 李万能,唐庆忠,陈黎. 无人机航摄像控点数量对空三解算精度的影响[J]. 测绘通报,2017(增刊1):84-89

[18] Han X,Thomasson J A,Xiang Y,et al. Multifunctional Ground Control Points with a Wireless Network for Communication with a UAV[J]. Sensors (Basel),2019,19(13):236-245

[19] 张光祖,王春,徐燕,等. 像控点布设对无人机小范围非规则区域实景建模精度的影响[J]. 全球定位系统,2020,45(2):60-67

[20] 朱进,丁亚洲,陈攀杰,等. 控制点布设对无人机影像空三精度的影响[J]. 测绘科学,2016,41(5):116-120