

基于 PhotoScan 的径流小区三维重建参数优化

张兴义^{1,2} 甄怀才^{1,2} JAMES R Mike³ 杨 薇⁴ 张晟旻⁵ 李 浩²

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030;
2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态重点实验室, 哈尔滨 150081;
3. 兰卡斯特大学环境中心, 兰开夏郡 LA1 4YQ; 4. 黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 150081;
5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 提高径流小区数字地面模型精度是应用三维重建技术研究面蚀细沟间与细沟侵蚀过程的关键。以位于黑龙江省海伦市的中国科学院海伦水土保持监测研究站的裸地小区为研究对象,以验证点与控制点误差比和数字高程模型(Digital elevation model,DEM)误差为指标,优化 Agisoft PhotoScan 三维重建径流小区的处理参数,降低 DEM 误差。PhotoScan 的精度参数和相机模型设置对 DEM 误差有较大影响。优化后的验证点与控制点误差比降低 35%,改善了径流小区 DEM 对地面控制点的过度拟合。优化后的相机模型包含焦距、像主点、径向畸变、切向畸变等。基于单点和点云的验证结果表明,优化过程误差降低约 40%。相对于默认参数设置下的验证点误差(20.0 mm),优化后的验证点误差为 11.0 mm,与细沟侵蚀深度标准相当(沟深大于等于 10 mm),因此优化后的径流小区三维重建过程更适宜于细沟侵蚀过程的三维表达。

关键词: 径流小区; 三维重建; 参数优化; 误差; 黑土区

中图分类号: P231.2; S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0144-07

Process Optimization of Runoff Plot 3D Reconstruction Based on PhotoScan

ZHANG Xingyi^{1,2} ZHEN Huaicai^{1,2} JAMES R Mike³ YANG Wei⁴ ZHANG Shengmin⁵ LI Hao²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China
3. Lancaster Environment Centre, Lancaster University, Lancaster LA1 4YQ, UK
4. Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin 150081, China
5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Structure-from-motion with multi-view stereo (SfM – MVS) facilitates the acquisition of photos by unmanned aerial vehicle (UAV) to generate the DEM and has been gradually applied to research on surface change processes such as channel erosion and slope erosion. Improving the DEM accuracy of the runoff plot is essential for investigating the interrill and rill erosion process by using SfM – MVS 3D reconstruction technology. The runoff plot 3D reconstruction process using Agisoft PhotoScan was optimized to improve DEM accuracy. The study was carried out in the bare land plot (4.5 m wide and 20.0 m long) at the Hailun Soil and Water Conservation Monitoring and Research Station of Chinese Academy of Sciences. Before the ploughing in spring of 2019, totally 7 and 30 measured points were evenly distributed around the outside and inside the plot, and the 3D coordinates were measured by using differential global positioning system (dGPS). Using the Phantom 4 Pro UAV, 42 photos covering the runoff plot were taken, and the shooting height was 3.5 m. Each photo covered the width of the runoff and the UAV was gradually moved along the runoff to take the next photo. The results proved that potentially DEM accuracy improvement existed for the commercial SfM – MVS 3D reconstruction software by optimizing parameters. Within the PhotoScan, the appropriate processing setting parameters were

收稿日期: 2019-09-10 修回日期: 2019-10-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504200)和国家自然科学基金青年基金项目(41601289)

作者简介: 张兴义(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事土壤生态研究,E-mail: zhangxy@iga.ac.cn

通信作者: 李浩(1986—),男,助理研究员,博士,主要从事地理信息系统与土壤侵蚀过程研究,E-mail: lihao@iga.ac.cn

determined by evaluating the image observation accuracy of the tie point and the ground measurement point, in order to weaken the DEM's over-fitting to the tie points or the ground measurement point. For the default parameter, the check point to control point error ratio was 1.95, and the optimized value was 1.26, which was reduced by 35%. Then, the camera models in PhotoScan were evaluated and the results showed that the 3rd model could reduce the error ratio between the check points and the control points, although the difference among different camera models was small. After the optimization process implementation, the DEM error was reduced by about 40%, both by point verification or point cloud verification method. Compared with the DEM error (20.0 mm) under the default parameter setting, the optimized check point error was reduced to 11.0 mm, which was similar with the rill erosion depth standard (depth greater than 10 mm). Therefore, the optimized SfM - MVS 3D reconstruction process of runoff plot was more suitable for rill erosion research.

Key words: runoff plot; 3D reconstruction; parameter optimization; error; black soil region

0 引言

近年来,应用基于运动恢复结构和多视图立体视觉技术 (Structure-from-motion with multi-view-stereo, SfM - MVS) 的三维重建软件,从地面或无人机系统获取的高分辨率影像及衍生品已应用于与地表过程有关的环境科学^[1-2]。典型的处理过程是从多时段的影像中获取数字高程模型 (Digital elevation model, DEM),进而得到地表变化^[3-5]。相比其他数字测量方法, SfM - MVS 具有成本低、易于野外采集、能够生成全三维数据、精度高等特点^[6]。

尽管 SfM - MVS 方法易于使用,但实际应用中的精度差异较大。其主要原因是软件参数设置不当或直接采用默认参数,也可能与采用的误差评价方式有关^[7]。目前已有研究多在理论方面使用具有复杂参数的开源 SfM - MVS 程序,以评估处理参数的优化对 DEM 精度的影响。而应用型研究主要使用参数较少的商业 SfM - MVS 软件及默认参数,直接生成 DEM^[8-9],缺乏评估商业 SfM - MVS 软件中处理参数对点云精度影响的研究。大部分实际应用以后者为实施方案,因此需要评估商业 SfM - MVS 处理参数对数据误差的影响,评估结果亦有助于通过优化处理参数提高 DEM 精度。

坡面是土壤侵蚀发生的基本单元^[10-11],坡面土壤侵蚀过程主要包括细沟间和细沟侵蚀^[12]。径流小区是监测坡面侵蚀的常规方法^[13],该方法仅能通过径流桶收集产流确定产沙总量,而不能区分细沟间与细沟侵蚀的贡献。目前应用 SfM - MVS 技术获取侵蚀坡面的细沟体积及侵蚀量尚处于起步阶段^[14-16],对处理过程优化的研究较少。

本文以三维重建软件 Agisoft PhotoScan 为例,研究商业 SfM - MVS 软件的参数设置对坡面径流小区三维重建精度的影响,并通过参数优化,评估优化后的 DEM 精度。

1 原理

1.1 理论基础

SfM - MVS 方法主要采用尺度不变特征变换 (Scale-invariant feature transform, SIFT)^[17],在一系列不同的图像中检测和匹配特征点,并结合随机采样一致性算法 (Random sample and consensus, RANSAC)^[18]剔除误匹配的特征点。采用基于最小二乘网络优化的光束平差法 (Bundle adjustment) 处理,生成特征点的三维坐标及相机参数^[19]。在仅有图像时光束平差过程对点云赋予局部坐标系,无法量测三维点之间的绝对距离。当提供了外部控制信息时,光束平差将三维点云向外部控制信息做拟合匹配,并转换为世界坐标系。但如果对外部控制信息精度考虑不当,添加外部控制信息的过程也可能引入新的误差^[20-21]。

添加控制信息的过程会影响匹配点与控制信息间的相对权重,以及相机模型的选择,进而影响 DEM 精度。点云中每个点是对多幅图像中的特征点做匹配处理生成的,具有多余观测,因此点云有自身的精度估计。同时外部控制信息也有精度估计。当使用地面点为控制信息时,其精度包括控制点在图像中的刺点精度和控制点的地面实测精度。如果控制点精度被高估,三维点云形状可能因对控制点过度拟合而产生畸变,降低总体精度。相反地,控制点精度被低估会降低其在光束平差过程中的权重,弱化控制点在降低三维点误差中的作用,同样会影响 DEM 的总体精度。此外,不恰当的精度设置同时会对相机参数产生影响,进而影响 DEM 精度。因此,对匹配点、控制点及相机参数赋予恰当的数值,对得到合适的 DEM 精度十分重要。

传统立体摄影测量软件的光束平差过程能够自动调整匹配点和控制点间的相对权重,并选择最优的相机模型,从而确保生成的 DEM 精度最佳^[22]。尽管目前商业化 SfM - MVS 软件能够在项目执行结

束后的输出报告中得到上述参数的实际值,但多数仅能使用参数初始值执行光束平差,而不具备重新赋值的过程。因此,使用 SfM - MVS 输出报告中的实际参数,对软件的初始设置进行调整并重做三维重建过程,有可能改善 DEM 精度。

1.2 优化指标

控制点误差是配准误差,而验证点误差代表精度,验证点误差是通用的 DEM 精度评价方法。同时验证点与控制点误差比能够体现自动连接点与控制信息二者各自对 DEM 形态的控制性。误差比越低,表明 DEM 形态向自动连接点与控制点的拟合趋近平衡。因此选用的指标为:验证点误差和验证点与控制点误差比。

2 试验布设与优化过程

2.1 试验布设

试验选在位于黑龙江省海伦市的中国科学院海伦水土保持监测研究站的裸地径流小区(126°50'1.42" E, 47°21'12.61" N)进行。径流小区长 20.0 m,宽 4.5 m。于 2019 年 4 月春季翻耕前开展试验。

2.2 数据获取

首先在径流小区内均匀布设 37 个地面点(图 1)。其中外部 7 个地面点,包括顶部一个,小区每侧各 3 个。径流小区内部均匀布设 30 个地面点。使用南方测绘公司银河 6 的差分 GPS(±(8 mm + 1 × 10⁻⁶ D), D 表示以 GPS 为中心的方圆直径)获取每个地面点的三维坐标,建立独立坐标系。应用大疆公司的精灵 4 Pro 无人机(1 英寸 2 000 万像素 CMOS)航拍获取小区图像。飞行高度 3.5 m,拍摄时确保图像的宽度方向能够覆盖小区的短边及外部地面点,并手动依次沿小区长边移动无人机拍摄,相邻图像的覆盖度约 85%。共拍摄图像 42 幅。

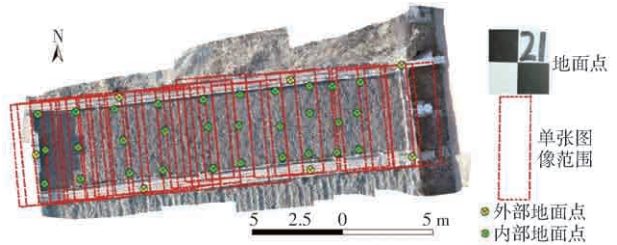


图 1 试验小区及拍摄方案

Fig.1 Overview of research plot with image distributions and ground point locations

2.3 三维重建基本流程

本文应用 Agisoft PhotoScan Professional (V1.2.6) 执行 SfM - MVS 流程。使用 Matlab 相机标定工具箱 (Camera Calibration Toolbox for Matlab)^[24] 检测相机镜头畸变,以明确相机个体误

差对三维重建结果的影响。在 PhotoScan 中运行蒙特卡洛 Python 脚本^[20],以执行不同参数设置对 DEM 精度影响的批处理。使用 ArcGIS V10.2 对 DEM 做剪切、相减等栅格处理。

2.4 优化流程

PhotoScan 默认设置中,自动连接点刺点精度 (Tie point accuracy)、地面点刺点精度 (Projection accuracy) 以及地面点精度 (Marker accuracy) 分别为 1.0 像素、0.1 像素及 5 mm。而相机模型的参数较多,如表 1 所示。

表 1 相机模型与参数

Tab.1 Camera models and their parameters

相机模型	参数
A	焦距
B	焦距、像主点、径向畸变
C	焦距、像主点、径向畸变、切向畸变
D	焦距、像主点、径向畸变、切向畸变、纵横比、扭曲度

优化过程 1 确定自动连接点与地面点二者的实际刺点精度。首先使用 PhotoScan 将图像自动匹配定向(使用‘Align images’功能,参数设置为‘High’精度,‘Generic pair’图像对,单张图像关键点和连接点分别限制为 40 000 和 1 000),以生成稀疏点云。然后将所有地面点在潜在图像中刺出,即刺点。之后执行“Optimization”,即光束平差。此时 PhotoScan 的“Reference”界面能够获取自动连接点与地面点二者的实际刺点精度,即优化后的刺点精度。将其输入到“Reference setting”中,重新运行光束平差。

优化过程 2 确定相机模型和参数以及地面点的实测精度。相机模型有 4 种(表 1)。地面点的实测精度测试范围设置为 1、2、5、10、20、50、100、200、500、1 000、2 000 mm。每次执行时随机选择一半数目的地面点为控制点,另一半为验证点,以评估相机模型和地面实测精度的每种组合下验证点和控制点的误差,以及二者的比值。判断标准是前两者能够显著降低,或二者的比值降低。确定了相机模型和地面点实测精度组合后,将所有地面点作为控制点,确定此种相机模型的各个参数值。

在确定优化过程 1 和 2 中的参数后,生成 DEM。在 PhotoScan 中使用“High”质量和“Aggressive”深度过滤生成密集点云。使用“High”面数生成网格,并生成 2 mm 分辨率 DEM。

2.5 误差评估

首先使用软件的默认设置(图 2),以及小区外围地面点为控制点、内部地面点为验证点生成 DEM1;然后采用优化后的参数设置,以及全部地面点为控制点生成 DEM2;采用优化后的参数设置,以

及小区外围地面点为控制点、内部地面点为验证点生成 DEM3。将 DEM2 与 DEM1 做栅格相减生成 DoD1 (DEMs of difference, DoD), DEM3 与 DEM2 做栅格相减生成 DoD2。通过对比验证点误差,以及 DoD1 与 DoD2 的差异评估优化过程对 DEM 精度的影响。

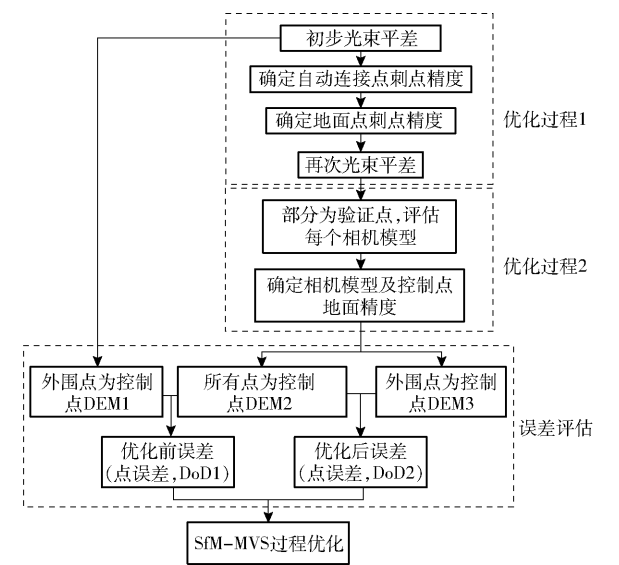


图 2 SfM-MVS 优化流程图

Fig.2 SfM-MVS optimization workflow

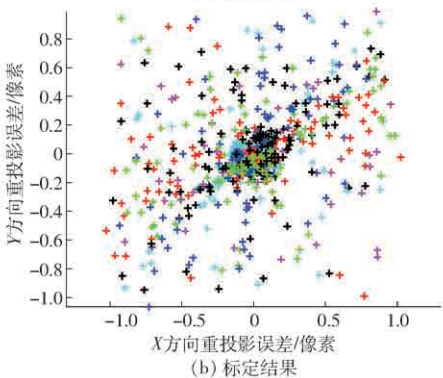
3 结果与分析

3.1 相机标定

基于 Matlab 相机标定工具箱的传统标定方法表明,精灵 4 Pro 无人机镜头的畸变较小。本实例共拍摄了 28 幅校正图像(图 3a)。图 3b 表明几乎



(a) 相机标定



(b) 标定结果

图 3 相机标定及标定结果

Fig.3 Camera calibration photo and results

所有的标志点在 X、Y 方向的重投影误差均小于 1 像素,平均值分别为 0.29、0.25 像素(表 2),且在每个方向上的分布密度均相似。此外,焦距、焦点、斜率与畸变系数的变异系数均小于 3%,因此本试验采用的精灵 4 Pro 镜头的畸变系数较小,排除相机个体差异。

表 2 相机参数

Tab.2 Camera parameters

参数	数值
焦距	[3 652. 421 3 654. 310] ± [2. 218 2. 343]
焦点	[2 714. 208 1 458. 201] ± [3. 899 4. 520]
斜率	0. 000 04 ± 0. 000 21
畸变系数	[- 0. 026 0. 165 - 0. 007 0. 001 - 0. 320] ± [0. 003 0. 018 0. 000 0. 000 0. 031]
像素误差	[0. 286 0. 246]

3.2 刺点精度参数优化

为了明晰 DEM 误差对软件精度设置的敏感度,首先检验了自动连接点和地面点的刺点精度以及地面点的实测精度对验证点/控制点误差的影响。设置如下:自动连接点刺点精度为 0.1~4.0 像素,地面点刺点精度为 0.1~1.0 像素,地面点实测精度为 1~50 mm。每次执行光束平差时,随机选择一半数目的地面点为控制点,另一半为验证点,以消除特定地面点误差的影响。

以地面点实测精度为基础,软件精度设置对验证点与控制点的影响如表 3 所示。软件的精度设置对控制点影响较大(11~26 mm),对验证点误差影响较小(24~26 mm),表明软件参数设置对控制信息拟合程度影响的差异较大。当地面点精度为 1 mm 时,不同的自动连接点和地面点刺点精度组合下,控制点误差为 11~26 mm;而当地面点精度为 50 mm,控制点误差减小为 22~23 mm。

表 3 软件精度设置对控制点和验证点误差的影响

Tab.3 PhotoScan settings effect on control and

check points error			mm
地面点实测精度	控制点误差	验证点误差	
1	11 ~ 26	25 ~ 26	
5	17 ~ 24	24 ~ 25	
10	20 ~ 23	24	
50	22 ~ 23	24	

设置参数时对验证点与控制点误差比的综合影响如图 4 所示。由图 4 可知,验证点与控制点误差比范围较大(1.0~2.4),同时在默认参数设置下,即自动连接点刺点精度 1.0 像素、地面点实测精度 0.1 像素,误差比为 1.95。PhotoScan 给出的二者精度分别为 0.33、0.26 像素,并应用其重新运行光束

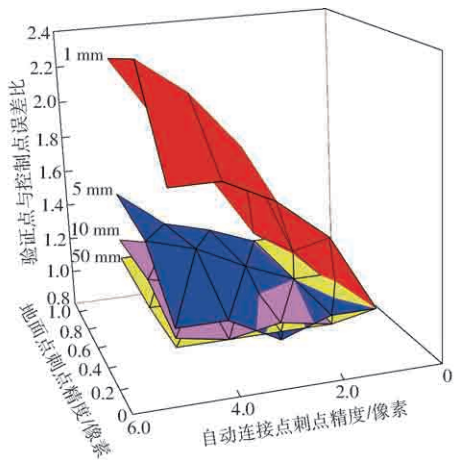


图 4 设置参数对验证点与控制点误差比的综合影响
Fig. 4 Effect of varying projection accuracy, tie-point accuracy and marker accuracy on check to control point error ratio

平差后,验证点与控制点误差比为 1.26,即优化后误差比降低了 35%。

3.3 相机模型选择

不同相机模型下的误差特征差异如图 5 所示。地面点实测精度对垂直方向误差有较大影响,而对水平方向误差影响较弱。当相机模型仅包含焦距信息(相机模型 A)时,地面点实测精度变化对误差几乎无影响。当相机模型包含像主点、径向畸变、切向畸变及纵横比和扭曲度参数时,随着参数的增加,验证点误差以及验证点与控制点误差比随地面点实测精度的变化趋势与取值均类似(图 6)。相对于相机模型 B,相机模型 C 的控制点和验证点的 RMSE 稍低。然而相对于相机模型 C,更复杂的相机模型 D 并没有表现出明显的优势,控制点和验证点的 RMSE 以及验证点与控制点误差比均类似。考虑到复杂的相机模型需更长的处理时间,因此选择包含焦距、像主点、径向畸变、切向畸变参数的相机模型 C 作为相机模型。

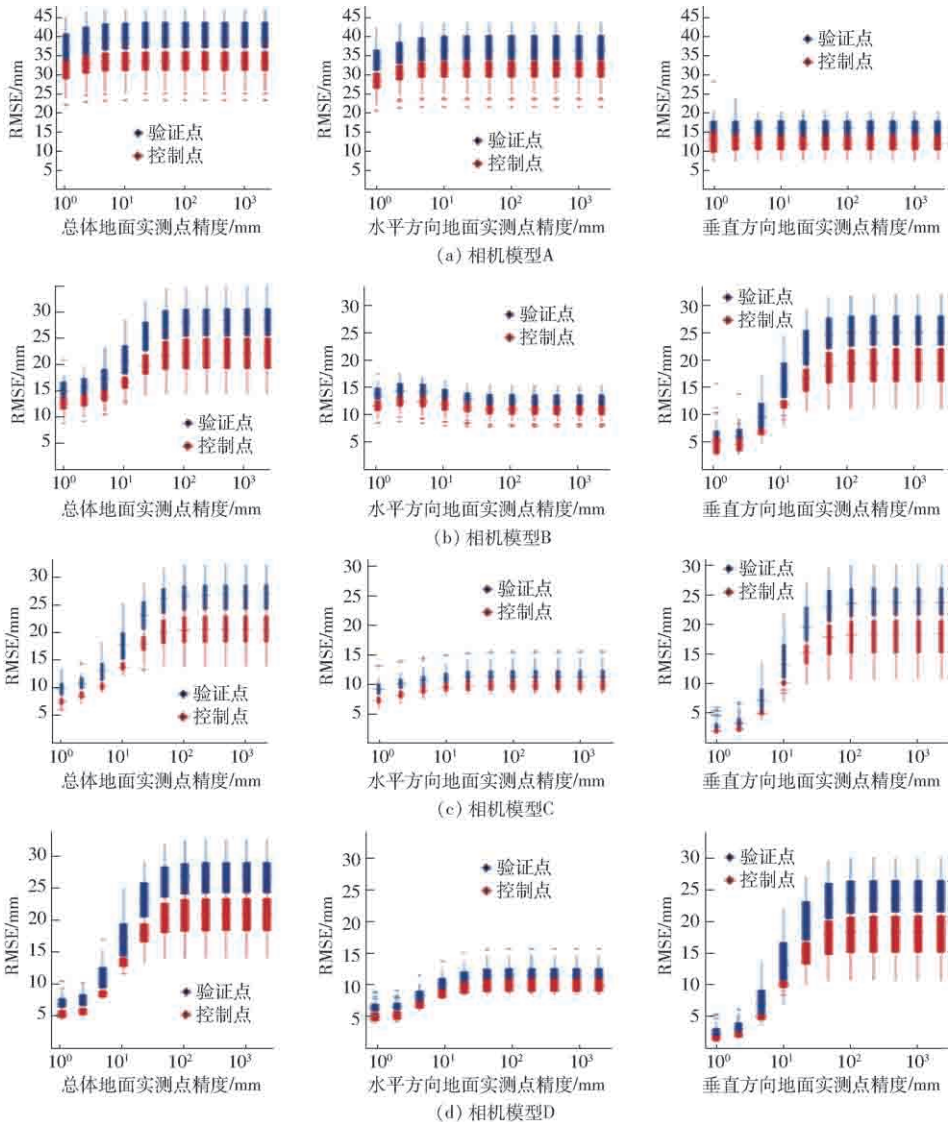


图 5 不同相机模型的控制点与验证点误差

Fig. 5 RMSE of control and check points by using different camera models

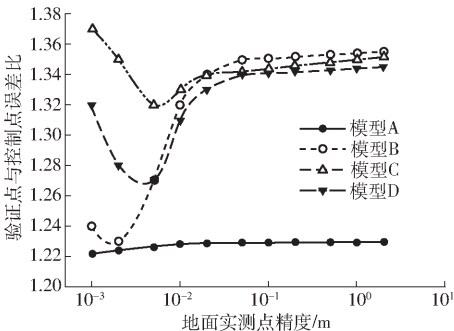


图 6 不同相机模型验证点与控制点误差曲线

Fig. 6 Effect of varying camera models on error ratios of check to control point

4 误差分析

4.1 DEM 表面形态差异

图 7a 为优化前后的 DEM 表面形态。从 DEM 表面形态上难以看出优化过程对 DEM 形态的影响。在 DEM 表面绘制剖面参考线(图 7b),结果表明优化前后 DEM 表面形态有变化,不同 DEM 间高程差异小于 10 mm。

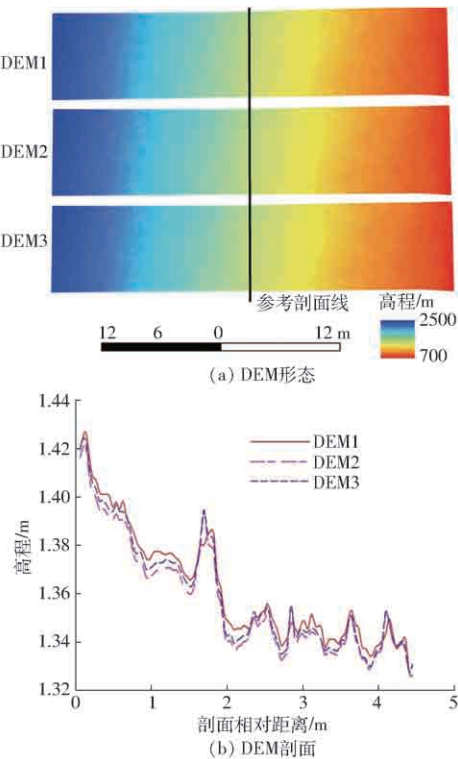


图 7 优化前后 DEM 形态及剖面

Fig. 7 DEM surfaces and corresponding profiles

4.2 DEM 误差

SfM - MVS 获取的 DEM 误差通常随控制点数量或布设均匀度增加而降低^[20]。对于径流小区,控制点只能布设在小区外围,而难以布设在小区内部。因此理论上应用全部地面点为控制点且采用优化流程后生成的 DEM 的误差最小。在仅使用外围地面

点的情形下,采用了优化流程,生成的 DEM 也存在一定的误差。因此本文以使用全部地面点作为控制点、采用优化流程后的 DEM 作为基准,评估在仅应用外围地面点为控制点时,优化流程前后 DEM 误差的变化,优化前后 DEM 误差如表 4 所示。

表 4 优化前后 DEM 误差

Tab. 4 DEM error before and after optimization

参数设置	验证点 误差	点云验证			
		误差范围	MAE	RMSE	SD
外围控制点,优化前	20.0	-40 ~ 40	4.8	5.4	4.4
外围控制点,优化后	11.0	-20 ~ 20	2.8	3.7	3.7

由表 4 可知,优化过程降低了 DEM 误差。验证点误差为基于单点位置的 DEM 验证方法,而平均绝对误差 (Mean absolute error, MAE)、均方根误差 (Root mean squard error, RMSE) 及标准差 (Standard deviation, SD) 为基于点云的 DEM 验证方法^[25]。优化后验证点误差从 20.0 mm 降低至 11.0 mm,精度提高了 45%,DEM 误差范围从 (-40,40) mm 降低到 (-20,20) mm。平均绝对误差从 4.8 mm 降低至 2.8 mm,均方根误差从 5.4 mm 降低至 3.7 mm,均降低约 40%。标准差反映误差的离散程度。优化前后误差离散程度从 4.4 mm 降低至 3.7 mm。由于优化后的验证点误差(11 mm)与细沟侵蚀深度标准相当^[26](沟深大于等于 10 mm),因此优化后的径流小区三维重建过程更适宜于细沟侵蚀过程的三维表达。

从误差空间分布看(图 8),优化前后误差正负值呈现出一定的“碗”状分布。优化前正值误差集中于研究区域的右上部,负值误差分散于左下部;优化后该“碗”状被加强,正值误差集中于研究区域的中上部,负值误差分布于两侧。表明优化过程并没有降低“碗”状效应。这可能与图像拍摄方向均垂直于地表有关。已有研究指出当所有拍摄方向均平行时易于出现“碗效应”^[21],应增加不同拍摄角度图像最小化“碗效应”的影响,从而产生收敛的成像效

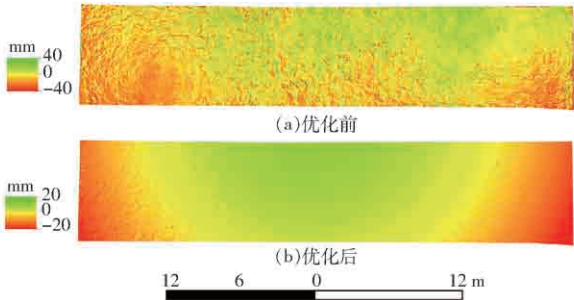


图 8 优化前后 DEM 误差空间分布

Fig. 8 DEM error spatial distribution before and after optimization

果。此外,相对于 PhotoScan, MicMac 具有包含 5 个径向失真系数的布朗畸变模型 (Brown's distortion model), 有可能消除“碗效应”产生的系统误差^[27]。

5 结论

(1) 商业 SfM-MVS 三维重建软件能够通过优化参数, 提高 DEM 精度。

(2) PhotoScan 的精度参数和相机模型设置对 DEM 误差有较大影响。默认设置下生成的径流小区 DEM 趋于对地面控制点的过度拟合, 而弱化了自动连接点的准确性在 DEM 误差控制中的作用。可以使用 PhotoScan 输出报告给出的自动连接点与地

面点刺点精度代替软件默认值, 并使用相机模型 C, 执行优化过程, 以改善径流小区 DEM 对地面控制点的过度拟合。

(3) 实施优化过程后, 验证点与控制点误差比降低了 35%。基于单点和点云二者的验证误差降低约 40%。验证点误差从 20.0 mm 降至 11.0 mm, MAE 和 RMSE 分别从 4.8 mm 与 5.4 mm 降至 2.8 mm 与 3.7 mm, SD 从 4.4 mm 降至 3.7 mm。

(4) 优化后的验证点误差 (11 mm) 与细沟侵蚀深度标准相当 (沟深大于等于 10 mm), 因此经过优化后的径流小区三维重建过程更适宜于细沟侵蚀过程的三维表达。

参 考 文 献

- [1] DUFFY J P, SHUTLER J D, WITT M J, et al. Tracking fine-scale structural changes in coastal dune morphology using kite aerial photography and uncertainty-assessed structure-from-motion photogrammetry[J]. Remote Sensing, 2018, 10(9): 1494 – 1515.
- [2] WATSON C S, QUINCEY D J, SMITH M W, et al. Quantifying ice cliff evolution with multi-temporal point clouds on the debris-covered Khumbu Glacier, Nepal[J]. Journal of Glaciology, 2017, 63(241): 1 – 15.
- [3] PINEUX N, LISEIN J, SWERTS G, et al. Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed? [J]. Geomorphology, 2017, 280: 122 – 136.
- [4] 李俊利, 李斌兵, 柳方明, 等. 利用照片重建技术生成坡面侵蚀沟三维模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 125 – 132. LI Junli, LI Binbing, LIU Fangming, et al. Generating 3D model of slope eroded gully based on photo reconstruction technique [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 125 – 132. (in Chinese)
- [5] 徐锡蒙, 郑粉莉, 覃超, 等. 黄土丘陵沟壑区浅沟发育动态监测与形态定量研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 274 – 282. XU Ximeng, ZHENG Fenli, QIN Chao, et al. Dynamic monitoring of ephemeral gully development and its morphology quantification in loess hilly-gully region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 274 – 282. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190431&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.031. (in Chinese)
- [6] ELTNER A, KAISER A, CASTILLO C, et al. Image-based surface reconstruction in geomorphometry—merits, limits and developments[J]. Earth Surface Dynamics, 2016, 4(4): 359 – 389.
- [7] 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): 1656 – 1671.
- [8] WELLS R R, MOMM H G, CASTILLO C. Quantifying uncertainty in high-resolution remotely sensed topographic surveys for ephemeral gully channel monitoring[J]. Earth Surface Dynamics, 2017, 5(3): 347 – 367.
- [9] GESCH K R, WELLS R R, CRUSE R M, et al. Quantifying uncertainty of measuring gully morphological evolution with close-range digital photogrammetry[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(2): 650 – 659.
- [10] 刘森, 杨明义, 张凤宝. 黄土坡面细沟发育及细沟与细沟间侵蚀比率研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 12 – 16. LIU Miao, YANG Mingyi, ZHANG Fengbao. Research on rill development and proportions of inter rill and rill erosion from loess soil slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 12 – 16. (in Chinese)
- [11] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99 – 115. ZHU Xianmo. Classification on the soil erosion in the loess region[J]. Acta Pedologica Sinica, 1956, 4(2): 99 – 115. (in Chinese)
- [12] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 95 – 101. ZHENG Fenli. Effects of land-use types on the vertical distribution of fractions of oxidizable organic carbon on the Loess Plateau, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1): 95 – 101. (in Chinese)
- [13] 卜兆宏, 孙金庄, 周伏建, 等. 水土流失定量遥感方法及其应用的研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(3): 235 – 245. BU Zhaohong, SUN Jinzhuang, ZHOU Fujian, et al. A study on quantitative remote sensing method of soil erosion and its application[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(3): 235 – 245. (in Chinese)
- [14] 覃超, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 基于立体摄影技术的细沟与细沟水流参数测量[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 150 – 156. QIN Chao, ZHENG Fenli, XU Ximeng, et al. Measurement and characteristics of rill geometry and flow parameter based on photogrammetry[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 150 – 156. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161120&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.020. (in Chinese)

- [27] FLYNN T, TABB M, CARANDE R. Coherence region shape extraction for vegetation parameter estimation in polarimetric SAR interferometry [C]//IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 2002:1-3.
- [28] ROSEN P A, HENSLEY S, WHEELER K, et al. UAVSAR: new NASA airborne SAR system for research[J]. Aerospace & Electronic Systems Magazine IEEE, 2007, 22(11): 21-28.
- [29] FORE A G, CHAPMAN B D, HAWKINS B P, et al. UAVSAR polarimetric calibration [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(6): 3481-3491.
- [30] KUMAR S, RAGHAVENDRA S, JENIA S, et al. Spaceborne PolInSAR and ground-based TLS data modeling for characterization of forest structural and biophysical parameters [J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2018.
- [31] TABB M, ORREY J, FLYNN T, et al. Phase diversity: a decomposition for vegetation parameter estimation using polarimetric SAR interferometry [C]//Fourth European Synthetic Aperture RADAR Conference, 2002: 721-724.
- [32] YI C, YAMAGUCHI Y, YAMADA H, et al. PolInSAR coherence region modeling and inversion: the best normal matrix approximation solution [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014, 52(2): 1048-1060.
- [33] LOPEZ-MARTINEZ C, ALONSO-GONZALEZ A. Assessment and estimation of the RVoG model in polarimetric SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3091-3106.
- [34] 张建双, 范文义, 毛学刚, 等. 单基线 PolInSAR 森林高度反演方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 220-229. ZHANG Jianshuang, FAN Wenyi, MAO Xuegang, et al. Comparison of five methods to inverse forest height from single-baseline PolInSAR data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 220-229. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.025. (in Chinese)
- [35] 罗环敏, 陈尔学, 程建, 等. 极化干涉 SAR 森林高度反演方法研究[J]. 遥感学报, 2010, 14(4): 806-821. LUO Huanmin, CHEN Erxue, CHENG Jian, et al. Forest height estimation methods using polarimetric SAR interferometry [J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(4): 806-821. (in Chinese)

(上接第 150 页)

- [15] ELTNER A, BAUMGART P, MAAS H G, et al. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(6): 741-755.
- [16] 吴淑芳, 刘勃洋, 雷琪, 等. 基于三维重建技术的坡面细沟侵蚀演变过程研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 114-120. WU Shufang, LIU Boyang, LEI Qi, et al. Evolution process of slope rill erosion based on 3D photo reconstruction technique [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 114-120. (in Chinese)
- [17] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features[J]. ICCV, 1999, 99(2): 1150-1157.
- [18] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [19] GRANSHAW S I. Bundle adjustment methods in engineering photogrammetry [J]. The Photogrammetric Record, 1980, 10(56): 181-207.
- [20] JAMES M R, ROBSON S, D'OLEIRE-OLTMANN S, et al. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: ground control quality, quantity and bundle adjustment[J]. Geomorphology, 2017, 280: 51-66.
- [21] JAMES M R, ROBSON S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39(10): 1413-1420.
- [22] GRANSHAW S I. Close range photogrammetry: principles, methods and applications [J]. The Photogrammetric Record, 2010, 25(130): 203-204.
- [23] FETIC A, JURIC D, OSMANKOVIC D. The procedure of a camera calibration using Camera Calibration Toolbox for Matlab [C]//Proceedings of the 35th International Convention MIPRO. IEEE, 2012.
- [24] WHEATON J M, BRASINGTON J, DARBY S E, et al. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(2): 136-156.
- [25] 张科利, 秋吉康宏. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 41-46. ZHANG Keli, AKIYOSHI Yasuhiro. Critical hydraulic condition of rill erosion on sloping surface [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1998, 4(1): 41-46. (in Chinese)
- [26] STUMPF A, MALET J P, ALLEMAND P, et al. Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion[J]. Geomorphology, 2015, 231: 130-145.