

# 基于近景摄影测量原理的地形变化监测系统

马亮军<sup>1</sup> 张茜茜<sup>2</sup>

1. 兰州理工大学 甘肃兰州 730050

2. 河北工程大学 河北邯郸 056038

**摘要:** 重力侵蚀过程观测技术是重力侵蚀机理研究的瓶颈, 其中高时空分辨率地形变化观测技术是开展重力侵蚀动态过程观测试验的基础。基于近景摄影测量原理构建时间分辨率为秒级、空间分辨率为毫米级的地形变化监测系统, 设置2种测站布设方式和2种表面纹理特征进行组合实验, 评价观测系统时间、空间上的精度及稳定性。结果表明:

(1) 综合考虑相机写入延迟、系统通讯延迟等, 不同相机之间的同步速度相差在1/1000秒级别, 系统整体重复工作间隔小于1秒。(2) 本系统理论空间分辨率高于0.75mm。(3) 测站布设方式、被测对象表面纹理特征对系统观测精度和稳定性有显著影响。(4) 据重力侵蚀过程中地形变化特点, 综合考虑精度和经济性, C14可以实现时间分辨率为秒级、空间分辨率为毫米级的重力侵蚀过程地形连续变化测量, 其统测量值和真实值的PBIAS值是6.20%, CV是5.39%, RMAE是0.1(10-3m<sup>3</sup>)。研究成果在重力侵蚀、溃坝、堤岸坍塌等地形变化的试验监测方面具有广阔的应用前景。

**关键词:** 摄影测量; 地形监测; 模型; 精度

## Terrain change monitoring system based on the principle of close-range photogrammetry

Liangjun Ma Qianqian Zhang

1.Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou, Gansu Province, 730050

2.Hebei University of Engineering, Handan City, Hebei Province, 056038

**Abstract:** Observation technology of gravitational erosion process is the bottleneck of research on gravitational erosion mechanism. Among them, high spatiotemporal resolution terrain deformation observation technology is the foundation for conducting dynamic observation experiments on gravitational erosion processes. Based on the principle of close-range photogrammetry, a terrain deformation monitoring system with a time resolution of seconds and a spatial resolution of millimeters is constructed. Two types of station layout and two surface texture features are combined for the experiment to evaluate the accuracy and stability of the observation system in time and space. The results show that: (1) considering camera write delay, system communication delay, and other factors, the synchronization speed difference between different cameras is in the order of 1/1000 seconds, and the overall system repeat work interval is less than 1 second. (2) The theoretical spatial resolution of the system is higher than 0.75mm. (3) Station layout and surface texture features of the measured objects have a significant impact on the observation accuracy and stability of the system. (4) Considering the characteristics of terrain changes during gravitational erosion, C14 can achieve continuous measurement of terrain changes in the gravitational erosion process with a time resolution of seconds and a spatial resolution of millimeters, with a PBIAS value of 6.20%, a CV of 5.39%, and an RMAE of 0.1 (10-3m<sup>3</sup>) between the measured values and true values. The research results have broad application prospects in experimental monitoring of terrain changes such as gravitational erosion, dam failure, and bank collapse.

**Key words:** photogrammetry; terrain monitoring; model; precision

### 引言

黄土高原区主要土壤侵蚀类型中<sup>[1]</sup>, 重力侵蚀是仅次于水力侵蚀的侵蚀类型, 由于其随机性、突发性、短历时性的特点<sup>[2]</sup>, 重力侵蚀过程以及机理的研究和认识仍然相对薄弱。其最主要的原因是地形变化观测技术难以满足重力侵蚀中过程地形随机性、快速性、突发性变

化的研究需求<sup>[3]</sup>。亟需探索一种行之有效的高时空分辨率的地形变化观测系统, 为重力侵蚀过程机理研究提供技术支撑。

近年来, 随着摄影观测技术的不断发展, 数字化近景摄影观测技术逐渐应用于土壤侵蚀地形变化的监测<sup>[4-5]</sup>。Mohamed Elbasit等<sup>[6]</sup>、Mark A Nearing<sup>[7]</sup>、M A Aguilar

等<sup>[8]</sup>利用数字摄影近景观测技术,在室内模拟降雨条件下对土壤侵蚀的地形演变过程进行观测,但无法实现在连续降雨过程中对土壤坡面的观测。Minghang Guo等<sup>[9]</sup>、Yanmin Jiang等<sup>[10]</sup>综合无人机航测和手持式摄影测量原理构建了摄影测量观测系统,实现了降雨条件下的坡面细沟侵蚀过程的地形变化的近实时动态监测,实现时间间隔2min和空间分辨率1.5mm的地形变化监测。姜艳敏等<sup>[11]</sup>基于数字近景摄影观测技术和无线组网耦合技术,设计一种基于无线组网技术的数字近景摄影观测系统,该系统通过对连续降雨条件下不同时间节点的土壤侵蚀坡面地形变化过程进行监测,其观测分辨率可达到分钟级别,空间分辨率达到2mm。本文基于近景摄影测量系统物理特性,将相机阵列和同步器耦合起来,分析不同测站布设、表面纹理相似程度等对系统时、空精度的影响,以期突破重力侵蚀过程地形变化监测瓶颈,构建连续高效、高时空分辨率地形变化监测系统。

## 一、材料与方 法

### 1.1 重力侵蚀过程地形变化监测系统构成

地形变化监测系统主要由支架系统、尼康D810型相机阵列(图像的最大像素7360×4912;传感器尺寸35.9×24mm;相机镜头均为35mm定焦镜头;最大的物距是5.4m,最小的物距是3.0m);W-283型无线定时快门遥控器、摄影测量软件等构成。

### 1.2 摄影测量原理与数据处理方法

#### 1.2.1 摄影测量原理

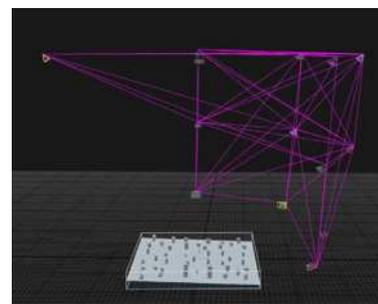
基本原理是利用相机阵列从不同视角对同一观测区域拍照,提取图像的特征点并进行同名点匹配,然后根据相机标定的参数经区域平差处理计算出同名点的三维坐标,最后插值重构出所拍摄物体的表面形态,实现立体重现<sup>[12-13]</sup>。相机倾斜安装以达到所拍摄的多张图像重合度最大,同时选择合适的焦距保证适合

#### 1.2.2 数据处理流程

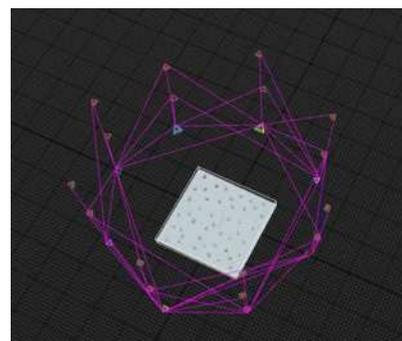
该试验观测系统数据处理流程:1)使用相机阵列采集地形的演变图像;2)将拍摄的图像导入到context capture软件中进行第一次粗对正的解译计算处理;3)添加控制点并定义绝对尺寸,进行第二次平差解译计算处理,获得3D点云模型;4)在ArcGIS软件中,对3D点云模型进行矢量化处理并生成DEM;5)通过比较前、后地形的变化,计算地形变化的体积。

### 1.3 验证试验布设方案

相机阵列采用14站(C14)和24站(C24)两种布置方式(如图3),其中考虑重力侵蚀主要发生在30°以上的陡坡上,背向坡度的一侧地形基本不发生变化,在24站方案的基础上减少背向测站数量,优化后形成14站观测方案。



C14



C24

图3 相机布设方案示意图

根据数码照相机的成像原理,考虑重力侵蚀过程中土壤表面粗糙度情况,光线主要以面散射为主。根据不同的表面粗糙程度可分为光滑表面与粗糙表面<sup>[14]</sup>,同一质地土壤其颗粒级组成配相似,纹理特征具有同质性,相似性的特性,因此,为了验证系统的适用性,本文主要考虑了同土壤质地纹理相似的粗糙纹理特征(R),以及含水量比较大时存在镜面反射的光滑纹理特征(S)两种被测对象纹理情况,其中平滑纹理为乳白色铝合金方管,粗糙纹理为铝合金方管表面粘上一层黄土泥浆后阴干。共3组试验组合,分别是C24-R、C24-S、C14-R。

### 1.4 验证试验数据情况

试验观察对象选取形状规整、大小不一的铝合金方管,观测区域2.5m×2.5m,考虑到相机阵列观测不同区域时的数量、重合度、光线明暗程度等差异,系统观测精度往往有一定的区域差异,因此,我们将整个研究区域分成9块,每块里面包含5个需要观测的铝合金方管。测得每个区的体积依次是2.069、1.998、1.690、1.770、1.879、1.879、1.666、1.460、2.031、1.783(单位是10<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)。

### 1.5 测量精度评价方法

本文采用指标RMSE、PBIAS和CV对模型误差进行统计分析,其中RMSE的值越接近0,说明系统测量误差越小,精确度越高。PBIAS越接近0,表示系统测量值与真实值差异越小,说明系统的观测精确度越高。当CV值越小,表示系统测量值与真实值之间误差值的变异程度越小,说明系统的稳定性越好。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2} \quad (1)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (2)$$

$$CV = \frac{S_D}{M_N} \times 100\% \quad (3)$$

式中：RMAE 为均方根误差；PBIAS 为偏差百分比；CV 为变异系数； $M_i$  和  $S_i$  分别为编号  $i$  的待测铝合金方管空间体积大小方面的系统测量值与真实值； $M_N$  为各个分区待测铝合金方管在空间体积大小方面系统测量值与真实值误差的平均值； $n$  为各个分区待测量的铝合金方管数量。

## 二、结果与讨论

### 2.1 系统的时间精度分析

本系统的时间分辨率主要受相机阵列和同步器性能影响，主要包括测光、快门速度和写入储存卡的时间、同步控制时间等。考虑到系统所采用的相机性能，自动模式下快门速度为 1/8000~30 秒。综合考虑相机写入延迟、系统通讯延迟等，不同相机之间的同步速度相差在 1/1000 秒级别，系统整体重复工作间隔小于 1 秒。

### 2.2 系统的空间测量精度分析

#### 2.2.1 系统的理论测量精度分析

生成三维模型的精度和分辨率与采集的影像精度直接相关，利用公式：像精度 × 焦距 × 图像的最大尺寸 = 传感器宽度 × 拍摄距离，算可得本系统空间上的理论精度最大是 0.42mm/像素、最小理论精度 0.75mm/像素。

#### 2.2.2 纹理特征对系统精度的影响分析

表 3 不同纹理特征条件下系统在空间体积方面的观测误差分析表

分区	CV/%		PBIAS/%		RMAE/(10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> )	
	C24-S	C24-R	C24-S	C24-R	C24-S	C24-R
1	5.38	3.08	7.92	4.45		
2	10.16	4.12	15.49	6.01		
3	9.43	3.67	14.29	5.33		
4	4.24	5.69	-5.82	8.38		
5	4.45	3.31	6.49	4.79	0.18	0.1
6	6.9	2.9	-9.3	-4.02		
7	4.25	7.35	-5.83	10.96		
8	8.87	5.16	-11.81	-7.04		
9	3.89	2.49	5.65	3.59		

如表 3 所示，对整个待测区域而言，当测站均为 24 时，情景 R 较 S，系统测量值和真实值的 CV 降低了 2.39%，

PBIAS 降低了 3.41%，RMAE 降低了 0.08 (10<sup>-3</sup>m<sup>3</sup>)，说明系统对情景 R 的测量精度更高；

其次，对于 9 个分区，当测站均为 24 时，情景 S 在空间体积方面系统测量值与真实值对应的 CV 介于 3.89~10.16%，PBIAS 介于 -11.81~15.49%；情景 R 在空间体积方面系统测量值与真实值的对应的 CV 介于 2.49~7.35%，PBIAS 介于 -7.04~10.96%。显然，情景 R 较 S，在空间体积方面系统测量值和真实值的 CV 变化区间分别缩小了 1.41%，PBIAS 变化区间缩小了 9.30%，说明系统对情景 R 测量的稳定性更好。综上，情景 R 较 S 的测量精度和稳定性更优，该系统更适用于测量表面纹理粗糙的物体。

### 2.2.3 测站布设方式对系统精度的影响

表 4 不同测站布设方式条件下系统在空间体积方面的观测误差分析表

分区	CV/(10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> )		PBIAS/%		RMAE/(10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> )	
	R-C14	R-C24	R-C14	R-C24	R-C14	R-C24
1	6.28	3.08	6.23	4.45		
2	5.06	4.12	-6.91	6.01		
3	3.99	3.67	5.03	5.33		
4	4.96	5.69	7.76	8.38		
5	3.82	3.31	-2.54	4.79	0.1	0.1
6	4.67	2.9	5.84	-4.02		
7	10.72	7.35	-11.36	10.96		
8	7.93	5.16	-7.69	-7.04		
9	4.72	2.49	6.9	3.59		

如表 3 所示，对整个待测区域而言，当物体表面均是经 R 处理的情景时，测站数量 24 较 14，系统测量值和真实值的 CV 降低了 1.38%，PBIAS 降低了 1.12%，RMAE 不变，说明系统的测站数量为 24 较 14 的测量精度更高；

其次对 9 个分区而言，C14 较 C24 相比，局部区域的值存在一定范围的波动，对各个分区的 2 个指标 (CV、PBIAS) 统计值发现，测站数量没变的区域，CV 和 PBIAS 的均值分别是 4.50% 和 5.83%；在 6 区和 8 区 (测站数量减少了 2 个)，CV 分别是 4.67% 和 7.93%，PBIAS 分别是 5.84% 和 -7.69%；在 1 区和 7 区 (没有设置测站)，CV 分别是 6.28% 和 10.72%，PBIAS 分别是 6.23% 和 -11.36%，说明随着测站数量的减少，系统在空间体积方面的测量误差更大，稳定性下降，除局部区域外，系统体积的测量精度和稳定性基本呈现出 3 个测站 > 1 个测站 > 没测站。

综上所述，对于系统观测精度和稳定性的影响因素，观测表面纹理特征 > 测站布设方式；观测精度和稳定性，情景 R > S，3 个测站 > 1 个测站 > 无测站。考虑到该系统主要应用于重力侵蚀过程地形变化的监测，最优的试验组合式测站布设方式 C14，对应系统测量值和真实值的 PBIAS 值为 6.20%，CV 值集中在 5.39%，RMAE 值为 0.1

( $10^{-3}\text{m}^3$ )。

### 三、结论与展望

本文基于近景摄影和倾斜摄影测量原理, 构建了重力侵蚀过程地形变化监测系统, 分析系统时间分辨率特性, 验证了不同纹理条件、根据重力侵蚀地形特点优化测站条件下, 系统观测精度和稳定性。其结论如下:

1) 综合考虑相机写入延迟、系统通讯延迟等, 不同相机之间的同步速度相差在 1/1000 秒级别, 系统整体重复工作间隔小于 1 秒。

3) 本系统理论空间分辨率高于 0.75mm。

4) 被测对象表面纹理特征对系统精度和可靠性均有显著影响。测站数量均为 24 时, 情景 R 较 S 系统的度更高;

5) 基于本系统观测对象的纹理特性, C14 的布设方式最优。

综上所述, 根据重力侵蚀过程中地形变化特点, 综合考虑精度和经济性, C14 可以实现时间分辨率为秒级、空间分辨率为毫米级的重力侵蚀过程地形连续变化测量。

### 参考文献:

[1] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类 [J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99-115.

[2] 石迎春. 基于 GIS/RS 的砒砂岩区沟沿线演化影响因素及侵蚀风险度评价 [D]. 中国地质大学 (北京), 2012.

[3] Xu X Z, Zhang H W, Wang W L, et al. Quantitative monitoring of gravity erosion using a novel 3D surface measuring technique: validation and case study[J]. Natural Hazards, 2015, 75(2): 1927-1939.

[4] 李绍刚, 陶安利, 杨铁利, 吴晓明. 航空摄影测量数码相机的检校方法研究 [J]. 测绘科学, 2010, 35(06): 50-51+61.

[5] Zribi M, Ciarletti V, Taconet O, et al. Characterisation

of the soil structure and microwave backscattering based on numerical three-dimensional surface representation: Analysis with a fractional Brownian model [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 72(2):159-169.

[6] Elbasit M, Anyoji H, Yasuda H, et al. Potential of low cost close-range photogrammetry system in soil microtopography quantification[J]. Hydrological Processes, 2010, 23(10):1408-1417.

[7] Nearing M A, Rieke-Zapp D H. DIGITAL CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR MEASUREMENT OF SOIL EROSION.

[8] Aguilar M A, Aguilar F J, Agüera F, et al. The Evaluation of Close-range Photogrammetry for the Modelling of Mouldboard Plough Surfaces [J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(4):397-407.

[9] Guo M H, Shi H J, Zhao J, et al. Digital close range photogrammetry for the Study of rill development at flume scale[J]. Catena, 2016, 143.

[10] Jiang Y M, Shi H J, Wen Z M, et al. The dynamic process of slope rill erosion analyzed with a digital close range photogrammetry observation system under laboratory conditions [J]. Geomorphology, 2020, 350(C).

[11] 姜艳敏, 郭明航, 赵军, 等. 土壤侵蚀形态演化数字摄影观测系统设计与实验 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(07): 281-290.

[12] 张祖勋. 从数字摄影测量工作站 (DPW) 到数字摄影测量网格 (DPGrid)[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2007, 32(7): 565-571.

[13] 孟震, 李丹勋, 曹列凯, 等. 基于双目视觉和主动光源的河工模型三维地形测量方法 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(05): 901-913.

[14] 秦伟. 土壤微波散射特性实验研究 [D]. 四川: 电子科技大学, 2009.