

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.031

土壤侵蚀形态演化数字摄影观测系统设计与实验

姜艳敏^{1,2} 郭明航^{1,3} 赵军^{1,3} 温仲明^{1,4} 林奇⁵ 史海静^{1,3}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西杨凌 712100;
5. 西安敦瑞测量技术有限公司, 西安 710065)

摘要: 为解决目前在连续降雨条件下尚无有效的观测技术与手段从时空两个维度对土壤侵蚀过程进行观测的问题, 设计了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进行数字影像的瞬时采集、雨滴噪声去除、点云匹配、三维重建等手段, 实现对土壤侵蚀坡面形态演化过程的动态监测。该系统的测量精度可达到亚毫米级, 最小测量误差为 0.006 2 mm; 凹槽尺寸测量值与实测值之间最大相对误差为 -2.968 3%。土壤侵蚀坡面观测实证表明, 土壤流失量估算平均相对误差为 -1.73%, 单次观测精度最高可达 99.26%。时间观测分辨率可达到分钟级别, 空间分辨率达到 2 mm。该系统能够准确获取土壤侵蚀坡面形态变化的精细信息, 可为土壤侵蚀过程研究提供新的方法和技术手段。

关键词: 土壤侵蚀; 数字近景摄影观测系统; 数字点云; 相机标定; 精度评价

中图分类号: P234.1; S157 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)07-0281-10

Digital Close Range Photogrammetry System for Soil Erosion

JIANG Yanmin^{1,2} GUO Minghang^{1,3} ZHAO Jun^{1,3} WEN Zhongming^{1,4} LIN Qi⁵ SHI Haijing^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

5. Xi'an Dunrui Surveying Technology Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: Observing soil erosion process at fine spatial and temporal scale is of great significance to the study of soil erosion mechanism. A digital close range photogrammetric observation system based on wireless networking technique was explored and established. The evolution of soil surface topography was dynamically monitored by instantaneous image acquisition at different time intervals during ongoing rainfall. Noises on the images such as raindrops was removed by K-means clustering, digital point clouds were calculated and digital elevation model (DEM) was then generated. The results showed that the measurement precision of the established system could reach a sub-millimeter level, and the minimum measurement error was 0.006 2 mm. The maximum relative error between the measured value and the actual value was -2.968 3%. According to the experimental observations, the average relative error of soil loss was -1.73%, and the accuracy of single observation was up to 99.26%. The established digital photogrammetric observation system could accurately calculate the digital point cloud from the underlying surface with 1 min time interval and 2 mm spatial resolution. The observation methods explored provided a reliable way to monitor soil erosion processes, especially under rainfall conditions, which was of great importance in understanding soil erosion mechanisms.

Key words: soil erosion; digital close range photogrammetry system; digital point cloud; camera calibration; accuracy evaluation

收稿日期: 2019-01-09 修回日期: 2019-03-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20040202)和国家自然科学基金项目(41571269)

作者简介: 姜艳敏(1994—),女,博士生,主要从事土壤侵蚀监测方法研究, E-mail: jiangyanmin17@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 史海静(1983—),女,副研究员,博士,主要从事水土保持与科研信息化研究, E-mail: shihaijingcn@nwfau.edu.cn

0 引言

中国是世界上水土流失最严重的国家之一,全国土壤侵蚀面积为 356 万 km^2 ,约占国土面积的 40%^[1],尤其是我国的黄土高原地区,水土流失情况十分严重,对生态环境及社会经济的可持续发展带来严重影响^[2-3]。土壤侵蚀是侵蚀力与下垫面相互作用的过程,下垫面既是侵蚀作用的对象又是侵蚀作用的结果^[4]。在侵蚀外力的作用下,土壤或其他地面组成物质被剥蚀、搬运以及沉积,从而产生侵蚀,而侵蚀作用的结果使得原来的下垫面形态及地表条件发生改变,从而引起新的侵蚀,如此反复,使得侵蚀作用不断发展。因此,土壤侵蚀过程是一个逐渐发展演化的过程。

长期以来,各国学者围绕土壤侵蚀量调查、侵蚀过程与机理,研发了很多的观测方法和技术手段^[5-9]。从传统的人工手动测量法^[10]、插钎法^[11]、示踪法^[12]、径流泥沙采样法^[13],到目前基于测绘、测量技术以及信息技术为基础的新的观测方法,如三维激光扫描法^[14]、高精度全球定位系统(Global positioning system, GPS)法^[15]、摄影测量法^[16]等,为土壤侵蚀观测研究提供了多样化的选择。尽管在坡面侵蚀发生发展过程方法和手段的研究方面取得了一定进展,但无论哪种方法,尚不能解决连续降雨条件下土壤侵蚀形态的观测问题,目前大多数研究集中在一次性降雨条件下侵蚀形态发育过程的主观描述。如激光扫描观测法虽有较高的空间定位精度,但不能在降雨过程中观测,且在沟蚀阶段会在沟道出现漏测^[17-18]。高精度 GPS 法虽然测量精度高,但在地形复杂情况下易受卫星信号的影响,稳定性差,且不能在连续降雨条件下观测。因此,目前土壤侵蚀坡面观测方法仍存在测量时空关系不一致、精度不高、实时性差等问题。研究更为先进的技术和手段对土壤坡面侵蚀演化过程进行观测,对于土壤侵蚀机理、土壤侵蚀演化过程等研究具有重要意义。

近年来,随着摄影观测技术的发展,数字化近景摄影观测技术逐渐应用于土壤侵蚀测量^[19-21]。文献[22-26]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。GUO 等^[27]研发了一种手持式数字化近景摄影观测系统,实现了连续降雨条件下的观测。该系统采用高帧率的电荷耦合装置(Charge coupled device, CCD)工业相机,快速获取高度重叠的影像,在获取地面信息的整个过程中利用手持式的垂直扫描采集

方式,巧妙避开了降雨过程中的大多数雨滴。但并未对影像中的雨滴噪声做直接处理,另外,手持式的扫描使得该系统影像获取的瞬时性低,限制了系统观测的时间分辨率,从而降低了系统的实用性。因此,在连续降雨条件下去除雨滴干扰,瞬时获取土壤侵蚀坡面形态变化的信息,是土壤侵蚀过程研究亟需解决的新问题。

基于此,本文耦合数字近景摄影观测技术和无线组网技术,设计一套能够在连续降雨条件下对土壤侵蚀下垫面形态演变过程进行观测的系统。通过组网技术,并行拍摄、解算降雨过程中拍摄的下垫面的数字影像,提取具有高时间分辨率和高空间分辨率的下垫面土壤侵蚀形态演化信息,从而为土壤侵蚀过程研究提供新的途径和技术手段。

1 工作原理与系统组成

1.1 工作原理

系统基于无线网络技术对若干相机进行组网。相机基于无线网络命令,并行采集数据,数据采集时将各组传感器单次采集的数字影像按时间排序,逐像素按其灰度值做二分类处理,进而实现雨滴噪声的剔除。系统基于摄影测量技术完成下垫面对象的高精度、高密度三维点云重建。一场降雨可以获得多个时间点的三维场景数据,以达到动态的观测效果。

1.2 系统组成

数字近景摄影观测系统由影像采集、影像传输和影像解算 3 个功能子系统组成,且每个子系统由不同的软硬件单元组成(图 1)。系统的各功能子系统都在一台运行环境为 Windows 7 的高容量 PICO (Participant intervention comparison outcome) 计算机控制下运行。并针对各功能子系统开发了对应的软件系统,以 z-map 命名,其包括相机工作状态诊断、影像采集、影像解算及数字高程模型(Digital elevation model, DEM)生成等功能界面。

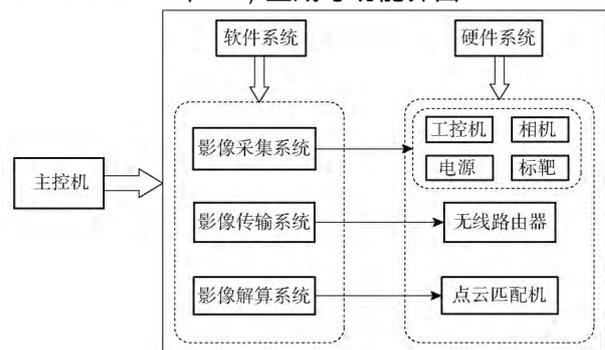


图 1 数字近景摄影观测系统的逻辑结构设计

Fig. 1 Structural design of digital close-range photogrammetry system

1.2.1 影像采集系统

影像采集系统负责土壤侵蚀下垫面数字影像的采集、触发信号的接收、雨滴去除等工作。该系统的硬件部分主要由 12 台索尼 CMOS (Complementary metal oxide semiconductor) 相机和工控机组成的相机组、直流电源、标靶、防水转接件等部件构成。软件部分由总控制 PICO 计算机 z-map 软件的影像采集单元组成。影像采集信号触发后,12 台相机组并行采集下垫面数字影像,通过工控机对各相机单次采集的多幅数字影像,按同一位置像素单元灰度大小排序,逐像素依据其灰度运用 K-means 算法进行聚类处理,去除雨滴在数字影像上所形成的噪声,获得去除雨滴后的下垫面的数字影像。

1.2.2 影像解算系统

影像解算系统主要负责影像数字点云的匹配、三维重建、DEM 生成以及土壤侵蚀量计算等。由超高容量的匹配机来实现数据的存储、匹配、三维重建等解算工作,与影像采集系统的软件部分一样,只需通过设置数据解算后存放的路径即可完成影像数据的解算。数字影像解算系统的软件有 3 个模块:并行计算管理模块、点云匹配和编辑模块、DEM 生成和土壤侵蚀量计算模块。在各模块算法开发过程中采用 python 语言配合 NumPy (Numerical python) 计算库来做原型的研发,之后再采用 C++ 语言重新实现。这样的流程减少了调试过程中的时间消耗,又能保证最终执行代码的效率。

1.2.3 影像传输系统

影像传输系统在采集系统和解算系统之间起连接作用,主要负责控制命令的发出、信号接收、影像数据的传输。无线路由器、网络协议 (Transmission control protocol/Internet protocol, TCP/IP)、千兆网硬件接口是影像传输系统的主要硬件单元。各子系统之间通过无线路由器组成一个局域网,控制和计算单元通过无线网络发布并发采集命令,影像采集系统采集影像后并发作业,再通过影像传输系统把采集到的影像传输给影像解算系统。

2 关键技术与实现方法

2.1 多影像采集器的组网及空间坐标系的建立

2.1.1 采集器的选取与组建

借助于无线路由器通过 TCP/IP 网络将若干组数字影像采集器进行组网,实现影像采集器的并发作业,获取同一时间节点下的土壤下垫面信息,每组数字影像采集器包括一个数码照相机和一个工业控制级别的计算机。本系统采用的相机是索尼 CMOS 相机,相机分辨率为 3 264 像素 \times 2 448 像素,配有

12 mm 镜头,实用光圈为 F1.2,相机帧率为 15 f/s,为保证更大的拍摄视角,共选取了 12 台相机。12 台相机共同组建在距离地面高 18 m 的钢筋板架上,且相机之间呈均匀排列,与地面土槽呈垂直方向布设。与每个相机相匹配工作的硬件单元是电源和工控机,电源负责给相机和工控机供电,工控机控制相机的影像采集、雨滴去除等工作。

2.1.2 空间坐标系的建立

空间坐标系的建立是将所有影像采集器的坐标进行统一。影像采集器所记录的是空间物体信息的二维图像,为了获取实际空间物体表面某点的三维几何位置,必须建立物体的三维空间坐标和对应的二维图像坐标之间的对应关系,影像采集器的几何成像模型决定了目标物体表面点的坐标与其在二维图像中的像素坐标的对应关系,而解算相机参数是建立几何成像模型的前提。参数的求解通过相机标定来完成^[28],相机的参数包括内部参数和外部参数。内部参数包括相机的焦距 f ,图像主点的 x 、 y 坐标 (c_x, c_y),畸变参数 K_1 、 K_2 和 K_3 ;外部参数是拍摄图像时相机的投影中心点坐标 (x_0, y_0, z_0) 和 3 个旋转角 (ψ, ω, κ)^[29]。本文以针孔模型为相机标定的理论基础,借助棋盘格和控制点作为相机标定参照物,以 Microsoft Visual Studio 为开发平台,采用开源计算机视觉库 (Open source computer vision library, OpenCV) 编译相机标定程序,求解相机的参数。

标定实验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨实验大厅进行,实验场地为 10 m (长) \times 4 m (宽) 的液压式可调坡度钢制土槽。相机内部参数依据张正友棋盘格标定算法获取^[30]。首先,将小网格长和宽均为 0.05 m 的棋盘格面板平整地放置于标定实验场土槽平面 (图 2a)。采用所有相机拍摄多幅图像,改变棋盘格面板的方位及倾斜度,再次拍摄多幅图像。将图像导入算法中求解内部参数。相机的外姿态通过在标定实验场内布设控制点来获取。选取 102 个小方块标志作为标定控制点,将所有控制点均匀地布设于土槽表面 (图 2b)。采用所有相机拍摄多幅图



图 2 相机标定

Fig. 2 Calibration of camera

像,调整控制点的位置和距离,再次拍摄多幅图像。在相机内部参数已知的基础上,通过编制解算程序代码求解相机外部参数,从而得到每个控制点的 $x、y、z$ 坐标。

经过标定算法及编译程序的迭代运算,得到各参数的近似值。若近似值在一定的容许范围内收敛,则结束迭代运算,得到最终的参数值。实验中各相机内部参数的标定结果如表1所示。

表1 各相机的标定参数
Tab.1 Calibration parameters of each camera

相机标号	焦距 f/mm	主点坐标 $(c_x, c_y) /mm$	畸变系数 K_1	畸变系数 K_2	畸变系数 K_3
1	9 522.74	(32.026 9, -25.687 5)	-0.558 095	0.375 163	1.458 47
2	9 556.31	(26.239 6, -13.834 4)	-0.557 842	-0.989 929	27.176 10
3	9 599.97	(108.937 0, -123.078 0)	-0.539 151	-1.127 910	19.035 60
4	9 641.8	(-33.744 9, -22.413 0)	-0.582 485	1.085 950	-6.525 76
5	9 637.72	(49.301 8, 23.109 4)	-0.623 164	3.023 38	-36.972 70
6	9 546.84	(-93.448 3, -79.257 6)	-0.530 216	-0.557 424	8.231 85
7	9 577.84	(22.801 4, -143.266 0)	-0.590 964	1.090 93	-11.820 50
8	9 564.88	(-14.317 7, -29.702 9)	-0.546 152	-0.291 101	7.734 09
9	9 629.67	(-85.168 5, -152.822 0)	-0.566 489	0.117 823	3.645 60
10	9 663.17	(-99.930 8, -268.477 0)	-0.639 872	3.035 670	-29.651 80
11	9 587.77	(58.144 9, 40.524 6)	-0.625 316	2.365 350	-22.137 10
12	9 622.98	(48.826 3, -147.122 0)	-0.619 883	2.212 600	-20.599 30

2.2 数字影像中雨滴的去除

坡面数字影像的采集是在降雨条件下进行的,降雨过程中,雨滴在空间的场分布近似于随机场。相机拍摄得到的影像混合了雨滴和下垫面对象的两类信息。雨滴的去除是获取坡面物点精确信息的前提和必要工作。在短暂的时间段内,比如几秒的时间段内,下垫面对象可以认为是一个稳定的空间对象,主要变化的是随机性很高的雨场数据。根据这一思路,对各组传感器单次采集的数字影像按时间排序,逐像素按其灰度值做二分类处理,并通过 K-means^[31-32] 算法去除雨滴在数字影像上所形成的噪声。K-means 算法是一种基于形心划分的聚类算法^[33],它以数据到形心的距离作为目标函数,并以误差平方和准则函数作为聚类质量的度量函数,不断进行迭代计算求极值优化聚类结果^[34]。具体算法过程如下:

(1) 初始种子点确定。在数字近景摄影观测系统中,每台相机在 5 s 内连续采集 60 幅有雨雾的图像。相机机位固定,由此单相机影像序列中的像素 $P_{ix}(i, j)$ 构成序列: $P_{ix}(i, j)^1, P_{ix}(i, j)^2, \dots, P_{ix}(i, j)^n$, $n=1, 2, \dots, 60$, 一共有 $3\ 264 \times 2\ 448$ 个像素序列。确定的初始种子点为 C_0^0, C_1^0 和 C_2^0 。其中上标 0 为迭代次数,下标 0、1、2 为类别。

$$C_0^0 = \max(P_{ix}(i, j)^1, P_{ix}(i, j)^2, \dots, P_{ix}(i, j)^n) \quad (1)$$

$$C_1^0 = \min(P_{ix}(i, j)^1, P_{ix}(i, j)^2, \dots, P_{ix}(i, j)^n) \quad (2)$$

$$C_2^0 = (\max(P_{ix}(i, j)^1, P_{ix}(i, j)^2, \dots, P_{ix}(i, j)^n) + \min(P_{ix}(i, j)^1, P_{ix}(i, j)^2, \dots, P_{ix}(i, j)^n)) / 2 \quad (3)$$

式中 $i、j$ ——像素行、列数
 n ——迭代次数
 C_0^0 ——影像上像素亮度比较暗的一类
 C_1^0 ——影像上比较亮的一类
 C_2^0 ——影像上处于暗和亮中间的一类

(2) 以像素的灰度距离聚类,并且构造选择集

$$|P_{ix}(i, j) - C_0^0| = d_{is_0} \quad (4)$$

$$|P_{ix}(i, j) - C_1^0| = d_{is_1} \quad (5)$$

$$|P_{ix}(i, j) - C_2^0| = d_{is_2} \quad (6)$$

$$P_{ix} | P_{ix} = \min(d_{is_0}, d_{is_1}, d_{is_2}) \quad (7)$$

式中 d_{is_0} ——像素和类别中心 C_0^0 的距离
 d_{is_1} ——像素和类别中心 C_1^0 的距离
 d_{is_2} ——像素和类别中心 C_2^0 的距离

(3) 以三分类选择集内元素聚合,平均得到新的类中心

$$C_0^1 = \frac{\sum \{P_{ix}\}_0}{|\{P_{ix}\}_0|} \quad (8)$$

$$C_1^1 = \frac{\sum \{P_{ix}\}_1}{|\{P_{ix}\}_1|} \quad (9)$$

$$C_2^1 = \frac{\sum \{P_{ix}\}_2}{|\{P_{ix}\}_2|} \quad (10)$$

$$C_i^n = \frac{\sum \{P_{ix}\}_i^n}{|\{P_{ix}\}_i^n|} \quad (11)$$

式中 C_i^n ——对聚类后第 i 类的所有像素取和后再用该类的像素总数平均,从而构造出下一次迭代的类中心

(4) 重复步骤 (2)、(3), 直到 $|C_i^n - C_i^{n-1}| \leq 10^{-6}$ 或者 $n \geq 2000$ 。

对每个工控机采集的 60 幅原始影像像素灰度进行方差分析。结果显示, 60 幅原始影像的方差在 28.96 ~ 29.95 之间, 而去除雨滴后的影像方差为 24.14, 由此可知 K-means 算法能够较好地去除雨滴噪声。

2.3 点云匹配

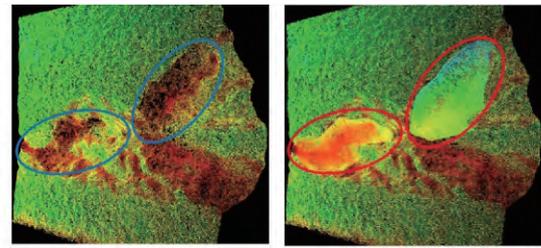
数字点云匹配是将多幅影像进行匹配得到同名点的过程。在匹配过程中首先提取影像上的 SIFT (Scale invariant feature transform) 特征^[35], SIFT 特征的提取主要是依据多幅影像上具有明显特征的点, 包括边缘点, 具有明显特征的点、孤立的点^[36], 以 SIFT 算子作为特征提取的工具, 获取多幅影像的 SIFT 特征。通过 SIFT 特征匹配影像之间的同名点, 同名点匹配是基于特征点及其描述子的相似性来进行的。获得同名点后, 以光束法区域网平差原理^[37]进行平差处理, 以单幅影像的光线束为平差单元, 以中心投影的共线方程作为平差的基础方程, 将相机摄影点、相机成像点及其相应地面物点坐标作为一个整体, 组建共线误差方程, 通过迭代计算求出该匹配点的坐标。再通过空间前方交会计算同名点的三维坐标, 所有匹配成功的同名点都计算完毕后, 可获得土壤侵蚀坡面的三维点云。

2.4 点云的修补和 DEM 生成

当土壤侵蚀出现沟道后, 径流就会沿沟道汇集, 数字影像难以拍摄到水流下方物点的影像, 即难以得到水流下方物点对应的像点信息, 这给水流下方数字点云的匹配带来了困难。通过对沟道存在水流情形下数字影像的分析以及匹配解算发现, 由于沟底凸凹不平, 总能匹配出一些稀疏的点云。基于这种客观存在, 根据地形变化的连续性, 利用地学普遍采用的反距离权重法^[38] (Inverse distance weighted, IDW), 依据水流周边和水流区域稀疏的点云坐标, 便可内插得到水淹区域空缺物点的三维坐标, 从而拟合出其数字点云 (图 3)。修补后的点云, 利用同样的距离平方反比法, 在系统软件模块下插值便可生成下垫面 DEM。反距离权重法计算式为

$$V = \sum_a^m \frac{V_a}{d_a^2 \sum_a^m \frac{1}{d_a^2}} \quad (12)$$

- 式中 a ——参与计算的像素点数
- m ——像素点总数
- V_a ——控制点的属性值
- d_a ——控制点与当前计算点间的距离
- V ——计算所得当前点的属性值



(a) 修补前 (b) 修补后

图 3 沟道底部数字点云修补

Fig. 3 Digital point cloud reparation at bottom of flow channel

3 实例分析

3.1 实验布设

应用实验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨实验大厅进行。实验小区为可调坡度钢制土槽, 小区规格: 长 × 宽 × 深为 10 m × 1.0 m × 0.5 m, 土槽坡度为 20° (图 4a), 土槽下端设置集流装置, 用于收集径流泥沙。供试土壤为黄绵土, 装填土容重为 1.3 g/cm³。小区布设后, 正式降雨前在实验土槽表面均匀撒水, 再静置 24 h, 使土槽内部土壤水分的再分配达到应力均匀、土壤结构稳定。降雨强度设置为 120 mm/h, 降雨历时为 150 min。至坡面产流后开始收集径流含沙量全样, 每隔 5 min 采样 1 次 (图 4b)。降雨结束后, 采用便携式径流泥沙仪测量泥沙含量。在收集径流泥沙的同时, 对土壤侵蚀坡面进行全覆盖的数字影像采集, 降雨开始前采集第 1 次坡面的数字影像, 降雨开始后每隔 5 min 采集 1 次, 直至降雨结束。所采集图像的重叠度至少为 4°, 采集帧率不少于 15 f/s。



(a) 实验土槽 (b) 径流泥沙采集

图 4 实验布设

Fig. 4 Parallel experiments and layout

3.2 精度检测

精度是指对同一对象多次测量值的稳定程度, 选用标准差来衡量。为检测数字近景摄影观测系统的测量精度, 将具有标准尺寸的标尺均匀地布设于土槽表面, 并在土槽表面任意位置布设 2 个标靶以进行长度约束。采用数字近景摄影观测法, 在相同的光照和纹理条件下重复拍照 60 次, 单独对每次的图像集合进行匹配计算, 测量每把标尺的尺寸, 对 60 次测量的结果进行统计分析并选取中误差作为

衡量测量精度的指标。

通过 SPSS 18 软件对标尺的 60 次测量结果统计分析可知, 标尺测量的平均长度为 309.2703 mm, 测量的标准差为 1.7113 mm, 单次最小测量误差为 0.0062 mm, 说明该观测的精度达到毫米级。经过 K-S(Kolmogorov-Smirnov) 检验, 得出该标尺尺寸测量结果的 Z 值为 0.392, P 值为 0.999, 大于 0.05, 由此可知该标尺尺寸的测量结果均服从正态分布, 测量数据的分布如图 5 所示。

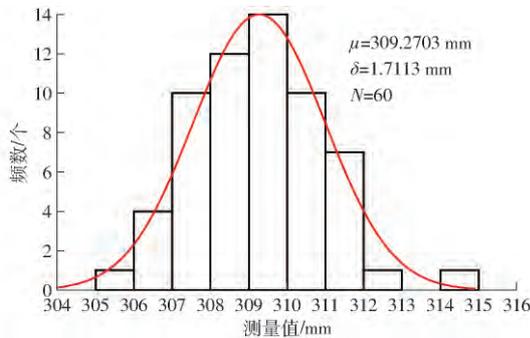


图 5 标尺测量数据分布图

Fig. 5 Histogram of measured results of ruler

3.3 准确度检测

3.3.1 凹槽尺寸观测法

准确度是测量值与实际值之间的偏差, 以相对误差来衡量。在人工模拟降雨条件下, 通过不同雨强(30、60、90、120 mm/h)、土槽坡度(0°、5°、10°、15°) 共 20 种组合条件下, 采用数字近景摄影观测系统获取土槽坡面 3 个已知凹槽长、宽、深的尺寸, 并计算其与实际值之间的相对误差, 从而评估数字近景摄影观测系统对土壤侵蚀坡面几何尺寸的观测准确度。

(1) 同雨强不同坡度观测

对数字近景摄影观测系统在雨强 60 mm/h, 0°、5°、10°、15° 共 4 个不同坡度条件下的观测准确度进行检测(表 2)。测量值与实际值两者之间的最大相对误差为 -2.5562%, 最高精度可达到 99.9968%; 4 个不同坡度下的平均相对误差分别为 0.0050%、-0.2513%、-0.3539%、-0.3965%。对相对误差进行频率分布分析(图 6a), 发现大部分观测的相对误差都较小且在 0 附近分布, 相对误差为 -0.5% ~

表 2 同雨强不同坡度观测结果

Tab. 2 Observation results of same rain intensity and different slopes

凹槽形体	实际值/ mm	0°		5°		10°		15°		
		测量值/mm	相对误差/%	测量值/mm	相对误差/%	测量值/mm	相对误差/%	测量值/mm	相对误差/%	
V 型凹槽	长	2 992	2 992.096	0.003 2	2 993.838	0.061 4	2 991.53	-0.015 7	2 993.128	0.037 7
	宽	292	292.697 5	0.238 9	293.487 7	0.509 5	295.346 6	1.146 1	293.260 5	0.431 7
	深	235	233.926 5	-0.456 8	230.529 1	-1.902 5	229.139 3	-2.493 9	228.992 8	-2.556 2
矩形凹槽 1	长	1 500	1 501.038	0.069 2	1 499.869	-0.008 7	1 503.803	0.253 5	1 499.369	-0.042 1
	宽	298	300.046 3	0.686 7	297.109 3	-0.298 9	297.604 1	-0.132 9	299.922 4	0.645 1
	深	448	446.320 2	-0.374 9	446.665 8	-0.297 8	449.838 1	0.410 3	446.246 5	-0.391 4
矩形凹槽 2	长	1 997	1 996.669	-0.016 6	1 997.376	0.018 8	1 995.302	-0.085 0	2 000.131	0.156 8
	宽	797	797.630 5	0.079 1	797.834 4	0.104 7	795.775 5	-0.153 6	799.965 8	0.372 1
	深	96	95.823 8	-0.183 5	95.569 9	-0.447 9	93.970 8	-2.113 8	93.866 7	-2.222 2
均值			0.005 0		-0.251 3		-0.353 9		-0.396 5	

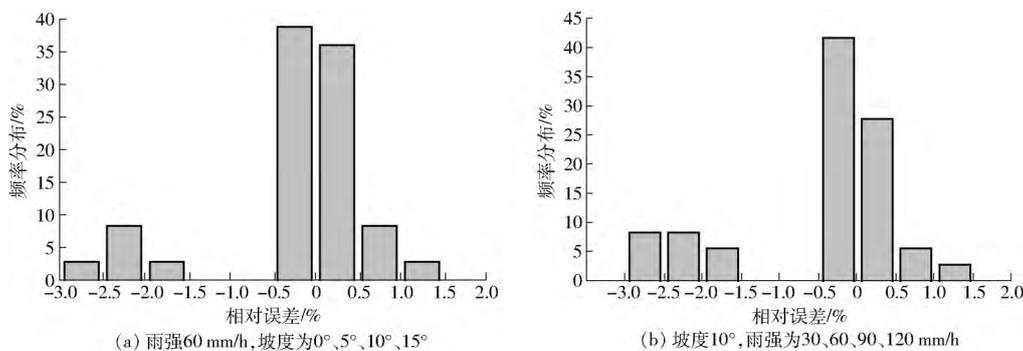


图 6 测量值与实际值相对误差分布

Fig. 6 Distributions of relative error between measured and actual values

1% 约占 85%。以上结果表明数字化摄影观测系统对土壤侵蚀坡面的几何尺寸的观测是准确的, 且坡度对该系统的观测准确度无显著影响。

(2) 同坡度不同雨强观测

对数字近景摄影观测系统在坡度为 10°, 雨强为 30、60、90、120 mm/h 条件下的观测准确度进行

检测(表 3)。数字近景摄影观测系统得测量值与实际值两者之间的最大相对误差为 -2.968 3%, 最高精度可达到 99.990 1%; 不同雨强条件下观测的平均相对误差分别为 -0.495 8%、-0.353 9%、-0.475 1%、-0.637 6%。对相对误差进行频率分

布分析(图 6b), 发现大部分观测的相对误差在 0 附近分布, 相对误差为 -0.5% ~ 1% 约占 75%。以上结果表明数字化摄影观测系统对土壤侵蚀坡面的几何尺寸的观测是准确的, 且雨强对该系统的观测准确度无显著影响。

表 3 同坡度不同雨强观测结果

Tab. 3 Observation results of same slope and different rain intensities

凹槽形体	实际值/ mm	30 mm/h		60 mm/h		90 mm/h		120 mm/h		
		测量值/mm	相对误差/%	测量值/mm	相对误差/%	测量值/mm	相对误差/%	测量值/mm	相对误差/%	
V 型凹槽	长	2 992	2 993.577 0	0.052 6	2 991.530 0	-0.015 7	2 994.212 0	0.073 9	2 993.290 0	0.043 1
	宽	292	290.681 9	-0.451 4	295.346 6	1.146 1	293.211 3	0.414 8	294.064 9	0.707 1
	深	235	230.700 7	-1.829 4	229.139 3	-2.493 9	230.516 4	-1.907 9	228.047 2	-2.958 6
矩形凹槽 1	长	1 500	1 498.913 0	-0.072 4	1 503.803 0	0.253 5	1 503.663 0	0.244 2	1 499.353 0	-0.043 1
	宽	298	299.708 0	0.573 2	297.604 1	-0.132 9	296.535 8	-0.491 3	296.832 2	-0.391 9
	深	448	447.562 9	-0.097 6	449.838 1	0.410 3	448.167 4	0.037 3	446.231 8	-0.394 7
矩形凹槽 2	长	1 997	1 993.983 0	-0.151 1	1 995.302 0	-0.085 0	1 998.214 0	0.060 8	1 996.802 0	-0.009 9
	宽	797	793.882 7	-0.391 1	795.775 5	-0.153 6	796.557 0	-0.055 0	799.214 3	0.277 8
	深	96	93.988 3	-2.095 5	93.970 7	-2.113 8	93.454 1	-2.652 0	93.150 4	-2.968 3
均值			-0.495 8		-0.353 9		-0.475 1		-0.637 6	

3.3.2 三维激光扫描法

采用激光扫描仪观测降雨前后侵蚀坡面的三维数字地形, 解算观测所得到的土壤侵蚀量(表 4)。结果表明, 数字近景摄影测量的土壤侵蚀总量为 452 180 cm³, 激光扫描观测的土壤侵蚀总量为 407 971.36 cm³, 由此可得数字近景摄影测量和激光扫描相对于径流泥沙法的土壤侵蚀总量观测误差分别为 3.87% 和 6.28%, 数字近景摄影测量系统可以更加精确地量化侵蚀坡面的土壤侵蚀量。激光扫描仪由于受扫描视角的限制, 测量时存在扫描盲区、漏

测的问题; 而数字摄影观测系统由于采用多影像采集器组网技术, 增大了影像采集的视野范围, 可采集到足够数量沟道底部、沟壁的数字影像, 从而弥补了激光扫描法在沟道观测时存在的数据缺失等缺陷。

3.3.3 径流泥沙观测法

采集径流泥沙全样, 是观测土壤流失量最为可靠的方法, 在本次检测中以径流泥沙观测法得到的结果作为实际值。采用数字摄影观测系统将降雨过程中不同时间点的数字影像进行体积解算得到土壤流失量结果, 并与相同时间段收集的径流泥沙含量进行对比(表 5)。结果表明, 两种观测方法的平均相对误差为 -1.73%; 从不同侵蚀阶段两种观测方法的相对误差来看, 在降雨初期, 两种观测方法相对误差比较大, 在降雨历时达到 50 min 时, 观测精度开始变高, 说明此时正是坡面沟道快速发育的明显分界点, 沟道快速发育前后两种观测方法观测的相对误差分别为 20.85% 和 3.47%; 随着降雨历时的延长, 土壤坡面侵蚀沟发育形态的变化越来越明显, 数字近景摄影观测系统的观测精度逐渐提高, 观测精度最高可达 99.26%。

数字点云密度代表着数字点云对坡面地表形态表达的准确程度, 高密度的数字点云可以更加精确地表达坡面侵蚀沟的形态信息。通过不同时间节点侵蚀坡面数字点云的数量和坡面观测面积计算数字点云密度。结果表明, 数字点云的平均数量为 1.335 1 × 10⁶ 个, 平均点云密度为 0.134 个/mm²。表 5 中列出了由不同时间节点侵蚀坡面的高密度数字点云转换生成的 DEM, 其空间分辨率可达到 2 mm,

表 4 数字摄影测量与激光扫描观测对比

Tab. 4 Comparison of digital photogrammetry and laser scanning observation

项目	观测方法	
	数字近景摄影观测法	激光扫描法
观测面积 /m ²	10	10
土壤侵蚀总量/cm ³	452 180.00	407 971.36
相对误差/%	3.87	6.28

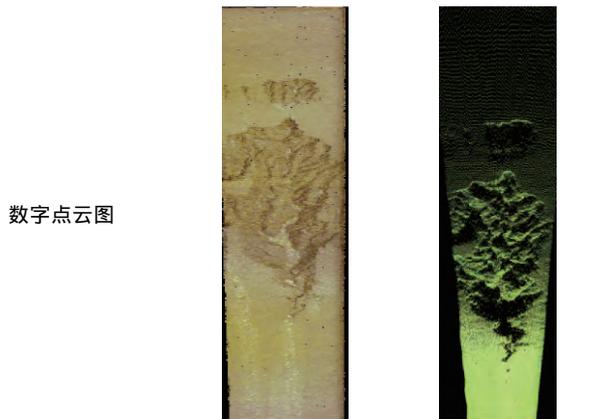


表5 不同时间点土壤流失量的观测结果
Tab.5 Observation results of soil loss at different times

项目	降雨历时/min									均值
	5	45	50	70	90	110	130	140	150	
径流泥沙量/cm ³	1 635.30	15 945.41	21 156.33	62 555.02	116 617.61	200 231.90	316 922.87	379 013.92	435 322.51	
摄影测量解算土壤流失量/cm ³	1 070	19 270	21 890	58 930	102 210	198 760	338 290	390 240	452 180	
相对误差/%	-34.57	20.85	3.47	-5.79	-12.35	-0.74	6.74	2.96	3.87	-1.73
点云数量/个	1.290 4 × 10 ⁶	1.280 2 × 10 ⁶	1.285 9 × 10 ⁶	1.310 6 × 10 ⁶	1.318 3 × 10 ⁶	1.335 7 × 10 ⁶	1.406 8 × 10 ⁶	1.409 1 × 10 ⁶	1.378 8 × 10 ⁶	1.335 1 × 10 ⁶
点云密度/(个·mm ⁻²)	0.129	0.128	0.129	0.132	0.132	0.134	0.141	0.141	0.138	0.134
DEM/mm										

可准确表达侵蚀形态的空间变化,实现了对土壤侵蚀坡面形态变化过程的动态监测。

4 结论

(1) 提出了一种在连续降雨过程中对土壤侵蚀坡面动态监测的数字近景摄影观测方法,通过无线组网技术,并行拍摄、解算降雨过程中下垫面的数字影像,提取坡面精细地貌动态变化的信息。该系统时间观测分辨率可达到分钟级别,空间分辨率达到2 mm。可从时间和空间尺度上更加准确地描述土壤侵蚀过程,解决了侵蚀观测中时空不一致的问题。

(2) 与传统径流泥沙法的平行观测结果比较表

明,数字化摄影观测法在坡面土壤侵蚀过程的不同阶段其准确度不同,随降雨历时的延长,数字近景摄影观测系统的观测精度逐渐提高,土壤流失量估算平均相对误差为-1.73%,单次观测精度最高可达99.26%。

(3) 与激光扫描法平行观测结果比较表明,数字近景摄影测量系统对坡面土壤侵蚀量的观测精度高于激光扫描仪。数字近景摄影观测法采用多影像采集器组网技术,增大了影像采集的视野范围,克服了激光扫描仪观测时沟道底部激光线不能投射到位而造成的漏测现象,实现了全覆盖的数字影像采集。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. 中国水土保持, 2013(10): 2-3, 11.
- [2] 李景玉, 张楠, 王荣彬. 黄河流域土壤侵蚀产沙模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2006, 25(2): 103-111. LI Jingyu, ZHANG Nan, WANG Rongbin. Soil erosion and sedimentation model in the Yellow River Basin: state-of-the-art review [J]. Progress in Geography, 2006, 25(2): 103-111. (in Chinese)
- [3] 郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 48-59, 116. ZHENG Fenli, XU Ximeng, QIN Chao. A review of gully erosion process research [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 48-59, 116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160808&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.008. (in Chinese)
- [4] 史培军, 刘宝元, 张科利, 等. 土壤侵蚀过程与模型研究[J]. 资源科学, 1999(5): 11-20. SHI Peijun, LIU Baoyuan, ZHANG Keli, et al. Soil erosion process and model studies [J]. Resources Science, 1999(5): 11-20. (in Chinese)
- [5] 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的探讨[J]. 水土保持通报, 1989, 9(4): 41-45, 49.

- ZHENG Fenli. A research on method of measuring rill erosion amount [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1989, 9(4): 41–45, 49. (in Chinese)
- [6] 霍云云, 吴淑芳, 冯浩, 等. 基于三维激光扫描仪的坡面细沟侵蚀动态过程研究 [J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(2): 32–37.
- HUO Yunyun, WU Shufang, FENG Hao, et al. Dynamic process of slope rill erosion based on three-dimensional laser scanner [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(2): 32–37. (in Chinese)
- [7] 张鹏, 郑粉莉, 王彬, 等. 高精度 GPS, 三维激光扫描和测针板三种测量技术监测沟蚀过程的对比研究 [J]. *水土保持通报*, 2008, 28(5): 11–15.
- ZHANG Peng, ZHENG Fenli, WANG Bin, et al. Comparative study of monitoring gully erosion morphology change process by using high precision GPS, Leica HDS 3000 laser scanner and needle board method [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(5): 11–15. (in Chinese)
- [8] 杨建英, 祁有祥, 赵廷宁, 等. 基于侵蚀针和近景摄影测量的侵蚀速率测定方法试验研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(3): 90–94.
- YANG Jianying, QI Youxiang, ZHAO Tingning, et al. Measuring soil erosion rate using digital close range photogrammetry and erosion pin techniques [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(3): 90–94. (in Chinese)
- [9] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 稀土元素(REE)示踪土壤侵蚀动态过程的降雨模拟试验研究 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(3): 32–35.
- TANG Zejun, LEI Tingwu, ZHANG Qingwen, et al. Rain simulation of dynamic soil erosion processes with rare earth element tracers [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(3): 32–35. (in Chinese)
- [10] 雷廷武, 赵军, 袁建平, 等. 利用 γ 射线透射法测量径流含沙量及算法 [J]. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 18–21.
- LEI Tingwu, ZHAO Jun, YUAN Jianping, et al. Determining sediment concentration in runoff flow with γ ray attenuation and the related theoretical algorithm [J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(1): 18–21. (in Chinese)
- [11] KUIPERS H. A relief meter for soil cultivation studies [J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1957, 5(4): 255–262.
- [12] 唐翔宇, 杨浩, 赵其国, 等. ^{137}Cs 示踪技术在土壤侵蚀估算中的应用研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2000, 15(5): 576–582.
- TANG Xiangyu, YANG Hao, ZHAO Qiguo, et al. Review of progresses in application of ^{137}Cs tracer technique to the estimate of soil erosion [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(5): 576–582. (in Chinese)
- [13] 郑粉莉, 唐克丽, 白红英. 标准小区和大型坡面径流场径流泥沙监测方法分析 [J]. *人民黄河*, 1994, 17(7): 19–22.
- ZHENG Fenli, TANG Keli, BAI Hongying. Analysis of monitoring methods of runoff and sediment in standard plot and large sloping runoff fields [J]. *Yellow River*, 1994, 17(7): 19–22. (in Chinese)
- [14] 林善志, 喻娇. 三维激光扫描仪在地形测绘中的应用 [J]. *资源信息与工程*, 2018, 33(3): 124–125.
- LIN Shanzhi, YU Jiao. Application of 3D laser scanner in topographic surveying and mapping [J]. *Resource Information and Engineering*, 2018, 33(3): 124–125. (in Chinese)
- [15] 代传超. 地质灾害高精度 GPS 监测关键技术分析 [J]. *有色金属文摘*, 2016, 31(1): 129–130.
- DAI Chuanchao. Analysis of key techniques of high precision GPS monitoring of geological hazards [J]. *Nonferrous Metals Abstract*, 2016, 31(1): 129–130. (in Chinese)
- [16] WELCH R, JORDAN T, THOMAS A. A photogrammetric technique for measuring soil erosion [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1984, 39(3): 191–194.
- [17] EITEL J U H, WILLIAMS C J, VIERLING L A, et al. Suitability of terrestrial laser scanning for studying surface roughness effects on concentrated flow erosion processes in rangelands [J]. *Catena*, 2011, 87(3): 398–407.
- [18] 张姣, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 利用三维激光扫描技术动态监测沟蚀发育过程的方法研究 [J]. *水土保持通报*, 2012, 31(6): 89–94.
- ZHANG Jiao, ZHENG Fenli, WEN Leilei, et al. Methodology of dynamic monitoring of gully erosion process using 3D laser scanning technology [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 31(6): 89–94. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] TACONET O, CIARLETTI V. Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93(1): 64–76.
- [21] BLAES X, DEFOURNY P. Characterizing bidimensional roughness of agricultural soil surfaces for sar modeling [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(12): 4050–4061.
- [22] ABD ELBASIT M A M, ANYOJI H, YASUDA H, et al. Potential of low cost close-range photogrammetry system in soil microtopography quantification [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(10): 1408–1417.
- [23] NOUWAKPO S K, HUANG C H. A simplified close-range photogrammetric technique for soil erosion assessment [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(1): 70.
- [24] RIEKE-ZAPP D H, NEARING M A. Digital close range photogrammetry for measurement of soil erosion [J]. *The Photogrammetric Record*, 2005, 20(109): 69–87.

- [25] HENG B C P, CHANDLER J H, ARMSTRONG A. Applying close range digital photogrammetry in soil erosion studies [J]. *Photogrammetric Record*, 2010, 25(131): 240–265.
- [26] AGUILAR M A, AGUILAR F J, AGERA F, et al. The evaluation of close-range photogrammetry for the modelling of mouldboard plough surfaces [J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(4): 397–407.
- [27] 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: 265–274.
- [28] 李启源, 王明常, 王凤艳, 等. 用于普通相机标定的三维控制架测量方法 [J]. *测绘科学*, 2017, 42(5): 113–117.
LI Qiyuan, WANG Mingchang, WANG Fengyan, et al. 3D control frame measuring method for ordinary camera calibration [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(5): 113–117. (in Chinese)
- [29] 张洪龙, 陈涛, 庄培钦, 等. 基于立体视觉的水下三维测量系统研究 [J]. *集成技术*, 2018, 7(3): 1–14.
ZHANG Honglong, CHEN Tao, ZHUANG Peiqin, et al. A binocular stereo vision system for underwater 3D measurement [J]. *Journal of Integration Technology*, 2018, 7(3): 1–14. (in Chinese)
- [30] 李莉. OpenCV 耦合改进张正友算法的相机标定算法 [J]. *轻工机械*, 2015, 33(4): 60–63.
LI Li. Camera calibration algorithm based on OpenCV and improved Zhang Zhengyou algorithm [J]. *Light Industry Machinery*, 2015, 33(4): 60–63. (in Chinese)
- [31] WANG K J, QI X X, LIU H D, et al. Deep belief network based K-means cluster approach for short-term wind power forecasting [J]. *Energy*, 2018, 165: 840–852.
- [32] WANGCHAMHAN T, CHIEWCHANWATTANA S, SUNAT K. Efficient algorithms based on the K-means and Chaotic League Championship Algorithm for numeric, categorical, and mixed-type data clustering [J]. *Expert Systems with Applications*, 2017, 90: 146–167.
- [33] 苏本跃, 马金宇, 彭玉升, 等. 基于 K-means 聚类的 RGBD 点云去噪和精简算法 [J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(10): 2329–2334.
SU Benyue, MA Jinyu, PENG Yusheng, et al. Algorithm for RGBD point cloud denoising and simplification based on K-means clustering [J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(10): 2329–2334. (in Chinese)
- [34] 冯波, 郝文宁, 陈刚, 等. K-means 算法初始聚类中心选择的优化 [J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(14): 182–185.
FENG Bo, HAO Wenning, CHEN Gang, et al. Optimization to K-means initial cluster centers [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(14): 182–185. (in Chinese)
- [35] 完文韬, 杨成禹. 改进的 SIFT 算法在图像特征点匹配中的应用 [J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(1): 44–47 52.
WAN Wentao, YANG Chengyu. Application of improved SIFT algorithm in image feature point matching [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2018, 41(1): 44–47 52. (in Chinese)
- [36] 赵凯, 朱愿, 谢枫. 基于改进 RANSAC 的点云关键点匹配 [J]. *智能计算机与应用*, 2018, 8(6): 18–21.
ZHAO Kai, ZHU Yuan, XIE Feng. Point cloud keypoint matching based on improved RANSAC [J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2018, 8(6): 18–21. (in Chinese)
- [37] 卫苗苗, 曹鸿, 霍晓龙. 基于近景影像自检校光束法平差的数码相机检校 [J]. *科技创新导报*, 2018, 15(5): 159–162.
WEI Miaomiao, CAO Hong, HUO Xiaolong. Digital camera calibration based on self-calibration beam adjustment for close-range images [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2018, 15(5): 159–162. (in Chinese)
- [38] 张子昕, 周强波. 空间插值算法在 GIS 中的应用 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2015, 38(2): 103–107.
ZHANG Zixin, ZHOU Qiangbo. Application of the spatial interpolation methods in GIS [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2015, 38(2): 103–107. (in Chinese)