

文章编号: 1008-2786-(2015)6-770-07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000093

# 一种基于线结构光技术的细沟形态测量系统

朱良君<sup>1 2 4</sup> 张光辉<sup>1 3 \*</sup> 李振炜<sup>3 4</sup> 耿 韧<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 陕西 杨凌 712100;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 细沟侵蚀形态的准确测量对解释坡面侵蚀产沙机理、促进侵蚀预报模型发展具有重要意义。基于线结构光技术在实验室可移动水槽上设计了方便组装拆卸、扫描配置灵活、亚毫米级精度的细沟侵蚀形态快速测量系统, 摄像机-激光器夹角、扫描速度灵活可调。本研究中, 有效测量范围为  $4.6\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ , 当摄像机-激光器夹角为  $25^\circ$ 、扫描速度为  $10\text{ mm/s}$  时, 横断面方向、扫描方向、垂直方向实测分辨率平均分别为  $0.44\text{ mm}$ 、 $0.50\text{ mm}$ 、 $0.51\text{ mm}$ , 横断面、垂直方向测量值绝对误差平均值分别为  $0.22\text{ mm}$ 、 $0.16\text{ mm}$ , 测量性能优于前人研究结果。同时, 坡面细沟测量实例表明本系统测量结果准确、可靠, 在土壤侵蚀相关领域中具有较高的实用价值。

**关键词:** 线结构光; 激光扫描; 精度评价; 细沟侵蚀

**中图分类号:** TN249 S157

**文献标志码:** A

细沟侵蚀是坡面水蚀的重要过程以及小流域泥沙的重要来源, 对流域坡面形态具有重要的潜在影响<sup>[1]</sup>, 因此, 准确测量细沟侵蚀形态对解释坡面侵蚀产沙机理、促进侵蚀预报模型的发展具有重要意义<sup>[2]</sup>。对细沟侵蚀形态描述的基础是快速、连续获取其表面 DEM (Digital Elevation Model), 从而可计算坡度、坡长及多流向坡长<sup>[3]</sup>、地表粗糙度指数<sup>[4-5]</sup>、水流动力指数<sup>[6]</sup>等地形因子以及细沟宽度、深度、密度、表面积等细沟形态特征因子<sup>[7]</sup>, 进而可探索坡面细沟侵蚀与地表填洼、产汇流、泥沙输移和沉积等坡面过程的交互作用, 进一步完善土壤侵蚀模型<sup>[8-11]</sup>。

常见的测量方法可分为接触式和非接触式两大类, 前者以测针法和差分 GPS 法为主, 后者以三维

激光扫描仪法、结构光激光扫描法和近景摄影测量法为主。朱良君和张光辉<sup>[12]</sup>系统分析、总结了常用测量方法的原理、优缺点及其应用范围, 发现结构光激光扫描法因具有高精度、经济、省时等优点<sup>[13]</sup>, 自 20 世纪 80 年代以来, 便被国外学者应用于土壤侵蚀领域的探索性研究, 并取得了一系列成果<sup>[14-18]</sup>, 然而国内将其用于坡面细沟侵蚀测量方面的研究尚鲜见报道<sup>[19-22]</sup>。

本文基于线结构光技术, 在实验室可移动水槽上建立可方便组装拆卸、扫描配置灵活、具有亚毫米精度的细沟侵蚀形态快速测量系统, 并利用已知尺寸的“U 型”、“V 型”、“梯型 (以下简称 T 型)”标准件, 对其稳定性和精度进行评价, 最后通过对人工模拟降雨后坡面细沟侵蚀的测量, 与传统测针法进行

收稿日期 (Received date): 2014-10-09; 修回日期 (Accepted): 2014-12-12。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金面上项目 (41271287), 中国科学院“百人计划”择优支持项目, 地表过程与资源生态国家重点实验室自主研究项目“土壤侵蚀实验技术研究” (2012-ZY-02) 联合资助。[This study was co-funded by General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 41271287), the Hundred Talents Programme of the Chinese Academy of Sciences, and Independent Research Project of State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (No. 2012-ZY-02).]

作者简介 (Biography): 朱良君 (1990-), 男, 山东滕州人, 博士研究生, 现从事 GIS/RS 与流域系统综合模拟研究。[Zhu Liangjun, Ph D Candidate, mainly engaged in GIS/RS and Integrating Simulation of Watershed System.] E-mail: zlj@reis.ac.cn

\* 通信作者 (Corresponding author): 张光辉 (1969-), 男, 甘肃静宁人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。[Zhang Guanghui, Ph D, Doctoral Supervisor, mainly engaged in Soil Erosion and Soil and Water Conservation.] E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn

比较,分析其应用性能。

## 1 线结构光激光扫描测量系统设计

根据激光器投射光束模式的不同,结构光一般可分为点、线、多线及网格结构光等<sup>[13]</sup>。激光投射在待测表面并被其调制变形,激光图像被摄像机拍摄记录,像机视线和激光光束相交于光点形成一种简单的三角几何约束关系,通过对摄像机内外参数及激光线方程的标定便可唯一确定光点在某一确定空间坐标系中的位置,因此结构光激光扫描法又称激光三角法<sup>[13]</sup>。线结构光可看成点结构光的扩展,测量信息的增加并未增加实现的复杂性;多线结构光是线结构光的扩展,但是测量效率的提高会带来标定复杂性和光条匹配难度的增加<sup>[13]</sup>。鉴于此,本研究选用线性结构光进行设计,其相关原理及计算公式在前人研究中已有详细介绍<sup>[12-13, 21, 23]</sup>,此处不再赘述。

测量系统架设在长5.0 m、宽1.0 m、高0.5 m的可移动实验水槽上,支架由方形不锈钢管焊接后通过螺丝等固定于水槽底部,组装拆卸简单方便。对于测量设备,选择 AVT Pike505B/C 工业摄像机,最大图像尺寸 2452 × 2054,全尺寸时最大帧率为 14 fps;镜头采用 Computar M1214 - MP2,视角为 49.2°;激光器选用 Z - Laser Z120M18B - F 型,波长 660 nm,扇角为 45°。对于运动装置,选用 TBI TR25

型直线导轨,单根长 3.0 m,行走精度 30  $\mu\text{m}/(3\text{ m})$ ;步进电机采用 Linix 57BYGHD276 - 08,步距角 1.8°,机械减速比 20,步进电机由 CNC 可编程控制器和 SH2034D 型驱动器控制。

图 1 为系统的设计图(A)和实物图(B),图中 WCS(World Coordinate System)为世界坐标系, $X_W O Y_W$ 平面与大地水平面平行, $Z_W$ 轴垂直于水平面构成右手系;SCS(Scanning Coordinate System)为扫描坐标系,由摄像机外部参数确定,即扫描后点云数据的坐标系,其坐标原点由第一张激光线和摄像机中心线的交点位置决定, $X_S$ 轴与水槽横断面方向平行, $Y_S$ 轴与扫描方向平行, $Z_S$ 轴垂直于水槽表面,同样构成右手系。扫描结束后,首先计算得到 SCS 下的三维点云数据,然后根据水槽坡度及偏移量 [ $\Delta X = 500\text{ mm}$ ,  $\Delta Y = 4700\text{ mm}$ ,  $\Delta Z = 1000\text{ mm}$ ] 将 SCS 旋转、平移至 WCS 下。

本研究根据水槽宽度和仪器参数确定系统架设高度为 1.8 m、摄像机 - 激光器间距为 700 mm(夹角为 25°),而对于其他应用场景则可灵活调整扫描配置,且根据需要也可在野外架设。由于水槽出水口及上边壁遮挡激光线,导致实际有效扫描范围为 4.6 m × 1.0 m。测量时,摄像机 - 激光器构成的测量系统整体在步进电机驱动的同步带的牵引下沿导轨做匀速直线运动,利用 StreamPix5 软件对激光线进行连续图像采集,通过 1394 b 高速接口进行高速图像数据传输。

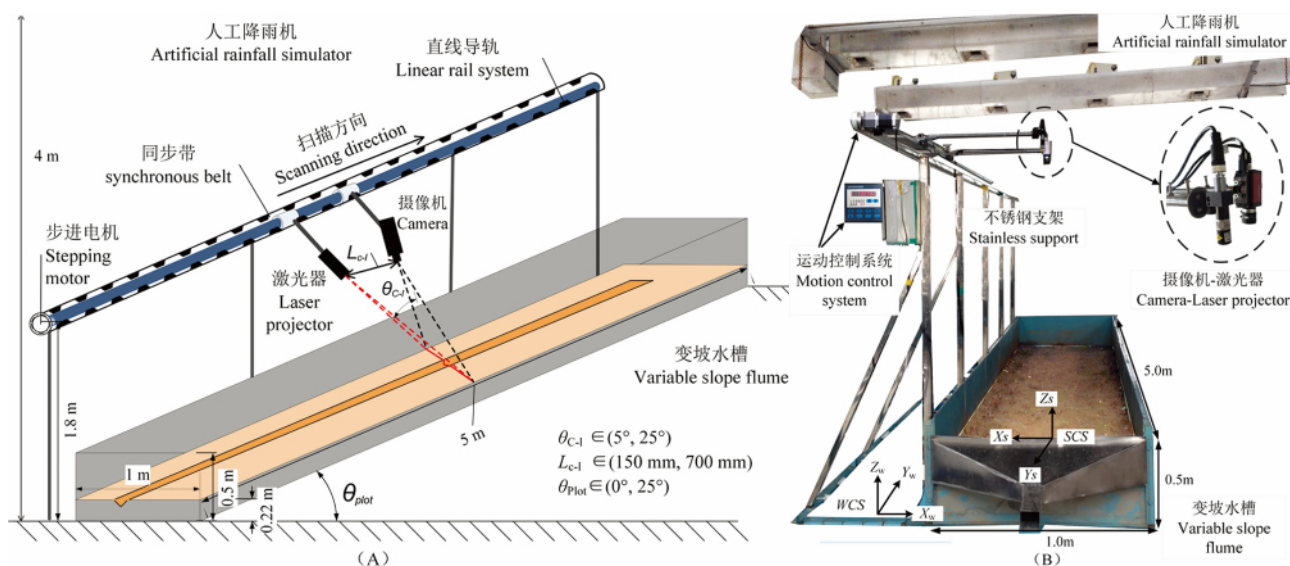


图 1 线结构光激光扫描系统设计图(A)及实物图(B)

Fig. 1 Design drawing (A) and real photos (B) of laser scanner system based on linear structured light

软件方面,利用机器视觉软件 Halcon 及 Matlab 软件编程实现了测量系统的标定及激光线图像的提取、坐标计算等,随后在 WCS 下利用 ArcGIS 生成 DEM。

2 系统稳定性和精度评价

测量系统位于水槽横断面中部的上方,由于摄像机成像存在径向畸变且激光线可能存在地表遮挡等,因此将水槽横断面沿  $X$  轴依次分为 10 个测量位置  $P1 \sim P10$ ,以期评价不同位置测量盲区出现的可能性。通过对铣床精确加工的铝制标准件的测量<sup>[24]</sup>,评价系统测量的稳定性(Stability)和精度(Accuracy)。稳定性是指多次测量值的稳定程度,用标准差来衡量;精度是指测量结果与真实值之间的接近程度,用相对误差或绝对误差来衡量<sup>[25]</sup>。

坡面细沟侵蚀的断面形状可概化为“V 型”、“U 型”和“T 型”三种,其侧视图如图 2 所示,在考虑宽度、高差及倾角的基础上,设计了 14 个不同尺寸的标准件,编号及具体尺寸见表 1。

测量时,将标准件放置在 SCS 的  $XOY$  平面上,并使断面方向与  $X$  轴(水槽横断面)方向平行,因此所有测量点在  $XOZ$  平面上投影即为标准件断面测量结果。对于斜边,从测量点向标准件斜边做垂线,测量点与交点的坐标变化量为  $\Delta X$ 、 $\Delta Z$ ,即分别为横

断面、垂直方向上的测量值精度;根据 U 型和 T 型的直边,则可计算高差和宽度测量误差。

3 应用实例

实验于 2013 年 8 月在北京师范大学房山综合实验基地人工模拟降雨大厅进行,分别利用本系统(Laser 法)和传统测针法(Pin 法)对人工降雨后的坡面进行测量。为便于计算,将 Laser 法测量结果抽稀后生成 2.5 mm 分辨率 DEM。测针法所用测针板长 0.98 m,均匀布设 46 根测针,沿水槽长度方向每 20 mm(平坦处 40 mm)测量一次断面,在距水槽出水口 910 mm 至 4 310 mm 内共测量 157 个断面,计 7 222 个高程点。选取若干同名点,将 Pin 法坐标点平移至 Laser 法坐标系下,并根据 Pin 法测点位置提取对应 Laser 法高程测量值,进行线性拟合,同时绘制并分析相对误差的频率直方图。

4 结果与分析

4.1 系统测量稳定性

4.1.1 静态稳定性

在整个测量系统静止状态下,对 T1 标准件某一断面进行了连续 1 000 次测量,得到  $X$ (横断面方向)、 $Y$ (扫描方向)、 $Z$ (垂直方向)轴测量值标准差的

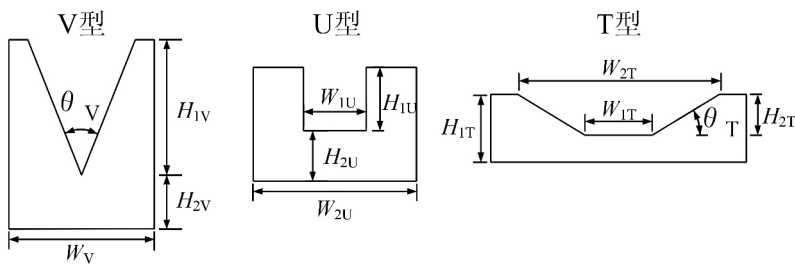


图 2 三种精确加工的标准件侧视图示例

Fig. 2 Profile views of three kinds of precision-milled blocks

表 1 三种精确加工的标准件编号及尺寸

Table 1 Identifiers and Dimensions of three kinds of precision-milled blocks

V 型	$\theta_V/^\circ$	$W_V/\text{mm}$	$H_{1V}/\text{mm}$	$H_{2V}/\text{mm}$	U 型	$W_{1U}/\text{mm}$	$W_{2U}/\text{mm}$	$H_{1U}/\text{mm}$	$H_{2U}/\text{mm}$	T 型	$W_{1T}/\text{mm}$	$W_{2T}/\text{mm}$	$H_{1T}/\text{mm}$	$H_{2T}/\text{mm}$	$\theta_T/^\circ$
V1	45	40	25	10	U1	25	65	25	20	T1	25	77	25	15	30
V2	30	40	50	20	U2	50	90	25	20	T2	50	80	25	15	45
V3	45	60	50	20	U3	50	90	50	20	T3	50	100	35	25	45
V4	60	70	50	20	U4	100	140	25	20	T4	25	111	35	25	30
V5	45	100	100	10	U5	50	90	100	20						

平均值分别为 0.004 mm、0.025 mm、0.052 mm,最大值分别为 0.036 mm、0.170 mm、0.355 mm,最小值均为 0 mm。Darboux 和 Huang<sup>[25]</sup>的研究中用类似方法得到的静态稳定性为 0~0.37 像素(该研究中,成像元件 CCD 上不同位置处像素对应的分辨率不同,垂直方向为 0.23~1.1 mm,断面方向为 0.24~0.57 mm)。系统静态稳定性主要受摄像机和激光器自身稳定性、外界光源变化、支架稳定性以及图像处理程序等因素影响<sup>[24-25]</sup>,因此,本系统具有很高的静态稳定性。

#### 4.1.2 动态稳定性

对于 Y 轴(扫描)方向,在水槽下中上部分别标定 5 种速度(2.5 mm/s、5 mm/s、10 mm/s、15 mm/s、20 mm/s)往返运动下 Y 轴方向的分辨率,结果表明其变异系数( $n=6$ )分别为 5.17%、4.70%、0.74%、1.36%、1.12%。因此, Y 轴方向具有很高的动态稳定性,且 10 mm/s 时最佳,此时 X、Y、Z 轴实测分辨率平均值分别为 0.44 mm、0.50 mm、0.51 mm。

对于 X 轴(横断面)、Z 轴(垂直)方向,以 U2 标准件为例,对其在断面不同位置处的 X、Z 测量值标准差进行统计,结果如图 3 所示, X 轴方向的动态稳定性在 0.011~0.243 mm 间,平均为 0.084 mm, Z 轴方向在 0.124~0.727 mm 间,平均为 0.390 mm, Z 轴方向稳定性接近点结构光研究结果<sup>[26]</sup>。由图可知, X 轴方向动态稳定性沿水槽横断面呈现先降低后增加的趋势,在中部位置达到最低,这与图像的畸变规律一致,即图像中心畸变小,越往边缘畸变越大;而 Z 轴方向的动态稳定性存在波动,原因可能是图像处理程序中激光线中心的自动识别存在

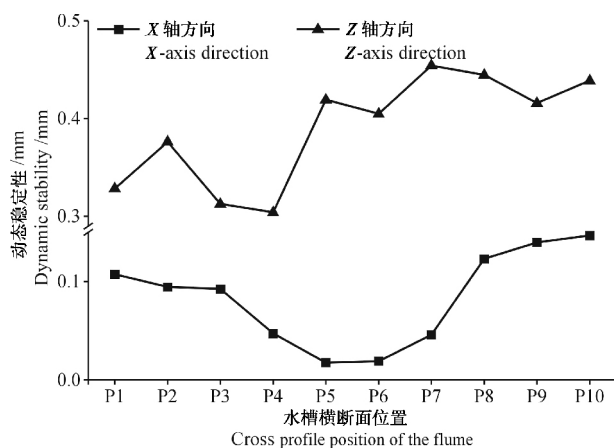


图3 水槽横断面不同位置处系统测量 X、Z 轴动态稳定性

Fig. 3 Dynamic measuremental stability of X and Z-axis in different cross profile positions

像元级波动,导致 Z 值稳定性的不规律分布。

#### 4.2 系统测量精度

##### 4.2.1 高差、宽度测量精度

在水槽横断面不同位置处测量具有不同高差、不同宽度的标准件,并计算高差、宽度测量相对误差,结果如图 4 所示。

由图 4A 可知,除 15 mm 高差个别位置相对误差在 2% 左右,其余均低于 1%,总体平均为 0.61%,说明在水槽横断面各个位置处高差测量精度较为一致,且略优于前人研究,如 Wilson 等<sup>[24]</sup>获得的高差测量精度在 20 mm 时约为 2%,50 mm 时约为 1%,李晓洁等<sup>[21]</sup>在测量 49.44 mm 高差时平均相对误差为 1.12%,74.11 mm 高差时平均相对误差为 2.93%。

由图 4B 可知,绝大多数情况下宽度测量相对误差在 1% 以内,全部平均为 0.56%,与前人研究结果相比,精度较好,如李晓洁等<sup>[21]</sup>测量 117.32 mm 宽度时平均相对误差为 2.02%,且整体沿断面呈先减小后增加的趋势,这与 X 轴方向测量动态稳定性规律一致。

##### 4.2.2 横断面、垂直方向测量精度

测量不同位置处不同倾角的标准件,并计算 X 轴(横断面)、Z 轴(垂直)方向的测量精度,结果如图 5 所示。由图可知,对于 X 轴,在 P1~P3 位置处 60°、67.5°、75°斜面上测量值误差较大,而 P1 位置上 75°斜面上由于激光线能量很弱而没有得到测量数据,其余均在 0.4 mm 以下,对于 Z 轴也有类似规律。整体来看, X 轴和 Z 轴方向误差沿断面分布规律一致,呈先减小后增大的趋势, X 轴方向测量值误差在 0.10~0.88 mm 间,平均为 0.22 mm, Z 轴方向在 0.03~0.51 mm 间,平均为 0.16 mm。由此可见,横断面、垂直方向测量值精度优于前人线结构光结果<sup>[24-25]</sup>。

对于测量盲区,仅有水槽断面边界处,狭窄且深切的表面会有部分遮挡,对实验结果影响较小。

#### 4.3 坡面细沟测量应用实例

图 6 为结构光激光扫描法和传统测针法获得的坡面细沟三维表面图,可以看出 Laser 法结果更加精细。将 Laser 法测量值与 Pin 法实测高程点做线性拟合,如式所示,决定系数高达 0.997;图 7 为二者测量相对误差的频率分布图,±1 cm 之内占 79.09%,±2 cm 之内占 95.16%,误差来源可能有坐标平移误差、沟缘线处测量位置的差异及 DEM 生

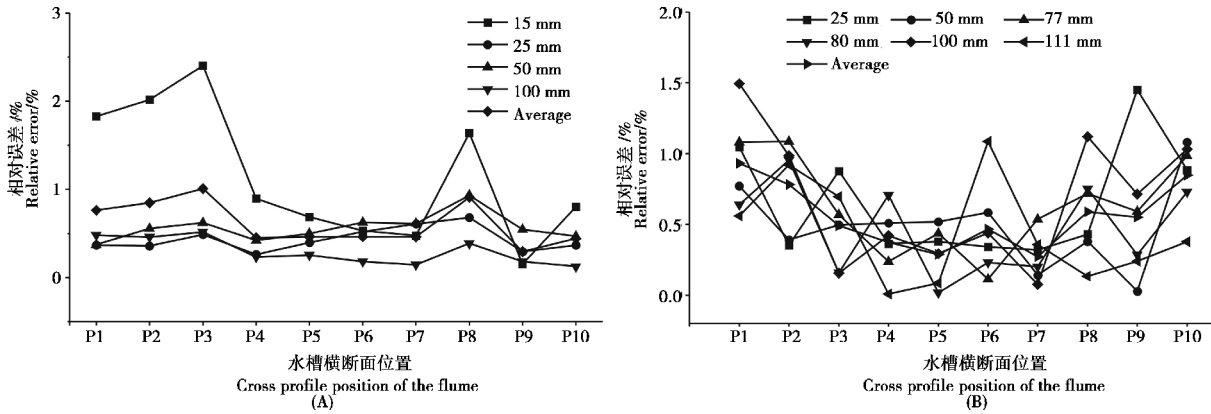


图 4 水槽横断面不同位置处高差 (A)、宽度 (B) 测量相对误差

Fig. 4 Height (A) and width (B) measuremental relative error in different cross profile positions

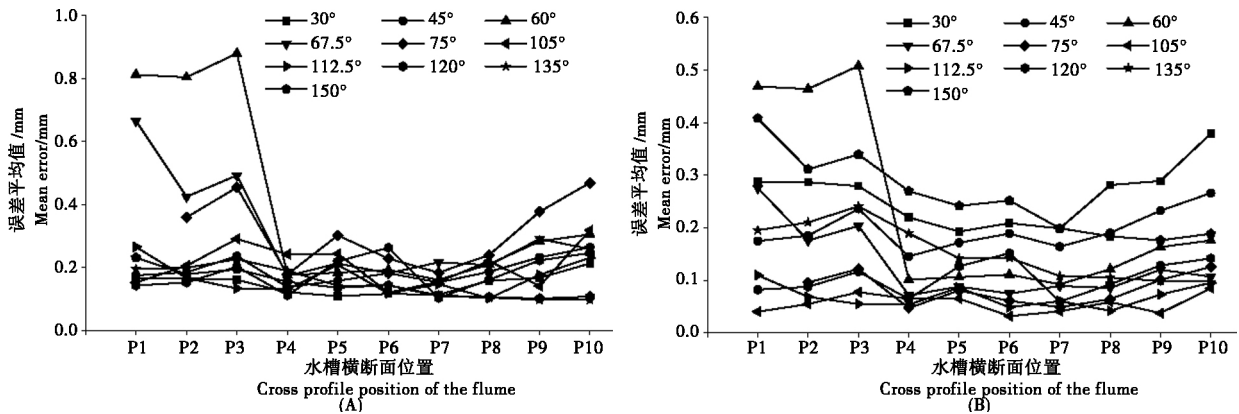


图 5 水槽断面不同位置处 X 轴 (A) 及 Z 轴 (B) 方向测量绝对误差平均值

Fig. 5 Mean measuremental absolute error along X - axis ( left ) and Z - axis ( right ) in different cross profile positions

成算法的不确定性等。由此说明 ,本系统测量结果准确、可靠 ,具有较高的实用价值

$$Laser = 0.9859Pin + 8.5845 \quad R^2 = 0.997 \quad (1)$$

式中  $Laser$ —结构光激光扫描法测量值  $Pin$ —传统测针法测量值。

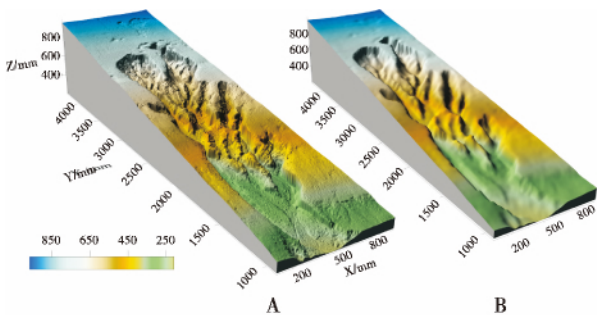


图 6 测量结果三维表面: (A) 结构光扫描法; (B) 传统测针法

Fig. 6 3D surface of measurements: (A) Laser scanner based on structured light; (B) Classic pin method

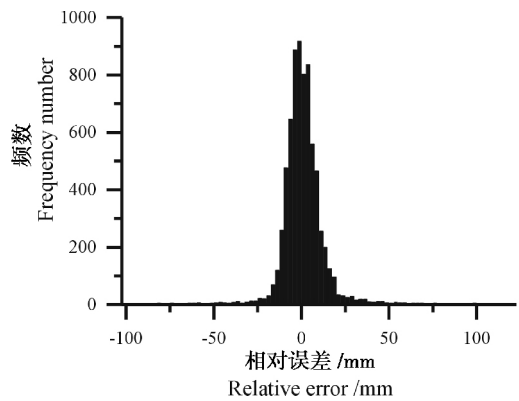


图 7 本系统与测针法测量值相对误差频率分布图

Fig. 7 Frequency distribution diagram of relative error between Laser and Pin method

## 5 结论

所设计的线结构光坡面细沟侵蚀形态测量系统由一台摄像机、一个线性激光器和一套运动控制系

统组成,可方便架设在实验室可移动水槽或其他应用场景。摄像机-激光器夹角、扫描速度可灵活调节。

在摄像机-激光器夹角为 $25^{\circ}$ 、扫描速度为10 mm/s配置下,横断面方向、扫描方向、垂直方向实测分辨率平均分别为0.44 mm、0.50 mm、0.51 mm,静态稳定性分别为0.004 mm、0.025 mm、0.052 mm,横断面和垂直方向动态稳定性分别为0.084 mm、0.390 mm,而扫描方向分辨率变异系数为0.74%;高差、宽度测量的平均相对误差分别为0.61%、0.56%,垂直、横断面方向测量值绝对误差平均分别为0.16 mm、0.22 mm。因此,本文测量系统在配置灵活性、测量范围、分辨率和精度等测量性能方面优于前人研究结果。

通过对人工降雨后坡面细沟的测量,表明本文设计测量系统可快速、精细、准确地测定坡面DEM数据,为坡面细沟侵蚀相关研究提供了可靠的技术方法。今后将继续完善测量系统数据处理软件一体化及细沟侵蚀形态参数定量化研究,并将本技术应用到输沙对坡面侵蚀的影响等研究中。

## 参考文献(References)

- [1] Cai Qiangguo, Zhu Yuanda, Wang Shiyang. Research on processes and factors of rill erosion [J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(1): 12-18 [蔡强国, 朱远达, 王石英. 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[J]. *水科学进展*, 2004, 15(1): 12-18]
- [2] Gessesse G D, Fuchs H, Mansberger R, et al. Assessment of erosion, deposition and rill development on irregular soil surfaces using close range digital photogrammetry [J]. *The Photogrammetric Record*. 2010, 25(131): 299-318
- [3] Qin Chengzhi, Zhu A-Xing, Pei Tao, et al. An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm [J]. *International Journal of Geographical Information Science*. 2007, 21(4): 443-458
- [4] Zhang Huijuan, Sun Yurui. Soil surface roughness indices, interpretation and application [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(3): 33-39 [张慧娟, 孙宇瑞. 农田土壤表层粗糙度信息解析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3): 33-39]
- [5] Govers G, Takken I, Helming K. Soil roughness and overland flow [J]. *Agronomie*, 2000, 20(2): 131-146
- [6] Moore I D, Gessler P E, Nielsen G A, et al. Soil attribute prediction using terrain analysis [J]. *Soil Science Society of America Journal*. 1993, 57(2): 443-452
- [7] Di Stefano C, Ferro V, Pampaloni V, et al. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia Experimental Area, South Italy [J]. *Catena*. 2013, 101: 226-234
- [8] De Roo A, Wesseling C G, Ritsema C J. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, Input and Output [J]. *Hydrological Processes*. 1996, 10(8): 1107-1117
- [9] Favis - Mortlock D T, Boardman J, Parsons A J, et al. Emergence and Erosion: A Model for Rill Initiation and Development [J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(11-12): 2173-2205
- [10] Strohmeyer S M, Nouwakpo S K, Huang C, et al. Flume experimental evaluation of the effect of rill flow path tortuosity on rill roughness based on the Manning - Strickler Equation [J]. *Catena*, 2014, 118: 226-233
- [11] Tang Zhenghong, Cai Qiangguo. Review on the studies of Chinese main soil erosion and sediment yield models [J]. *Mountain Research*, 2002, 20(4): 466-475 [唐政洪, 蔡强国. 我国主要土壤侵蚀产沙模型研究评述[J]. *山地学报*, 2002, 20(4): 466-475]
- [12] Zhu Liangjun, Zhang Guanghui. Review of measurement and quantification of surface microtopography [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(5): 114-122 [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]
- [13] Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008: 175-206 [张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 175-206]
- [14] Rice C, Wilson B N, Appleman M. Soil topography measurements using image processing techniques [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1988, 3(2): 97-107
- [15] Darboux F, Huang Chi - Hua. Contrasting effects of surface roughness on erosion and runoff [G]//*Soil Erosion Research for the 21st Century*. Ascough II J C, Flanagan D C. St. Joseph, MI: ASAE, 2001: 143-146
- [16] Romkens M J M, Wang J Y. Soil roughness changes from rainfall [J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(1): 101-107
- [17] Giménez R, Govers G. Interaction between bed roughness and flow hydraulics in eroding rills [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 791-799
- [18] Huang Chi - Hua. Quantification of soil microtopography and surface roughness [M]. Baveye P, Parlange J Y, Stewart B A, Fractals in soil science, Boca Raton, Florida: CRC Press, 1998: 153-168
- [19] Zhao Jun, Lei Tingwu, Zhang Qingwen, et al. Development of topographical laser scanner and application to soil erosion research on slope land [J]. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*, 2001, 32(2): 201-206 [赵军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 激光微地貌扫描仪的开发研制及在坡面侵蚀研究应用初步[J]. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 2001, 32(2): 201-206]
- [20] Li Xiaojie, Zhao Kai, Zheng Xingming. Development of surface roughness tester based on laser triangulation method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 116-121 [李晓洁, 赵凯, 郑兴明. 基于激光三角法的地表粗糙度测试仪的研制[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 116-121]

- [21] Li Zongnan , Chen Zhongxin , Wang Limin , et al. A measuring method of soil surface roughness using infrared structured light 3D technology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering , 2013 , 29( 21) : 137 – 142 [李宗南, 陈仲新, 王利民, 等. 基于红外结构光三维技术的土壤表面粗糙度测量 [J]. 农业工程学报, 2013 , 29( 21) : 137 – 142]
- [22] Huang Chi – Hua , White I , Thwaite E G , et al. A noncontact laser system for measuring soil surface topography [J]. Soil Science Society of America Journal , 1988 , 52( 2) : 350 – 355
- [23] Wilson B N , Leaf R B , Hansen B J. Microrelief meter for field topography measurements [J]. Transactions of the ASAE , 2001 , 44 ( 2) : 289 – 295
- [24] Darboux F , Huang Chi – Hua. An instantaneous – profile laser scanner to measure soil surface microtopography [J]. Soil Science Society of America Journal , 2003 , 67( 1) : 92 – 99
- [25] Flanagan D C , Huang Chi – Hua , Norton L D , et al. Laser scanner for erosion plot measurements [J]. Transactions of the ASAE , 1995 , 38( 3) : 703 – 710

## A Laser Scanner System for Rill Morphology Measurement Based on Linear Structured Light

ZHU Liangjun<sup>1 2 4</sup> , ZHANG Guanghui<sup>1 3</sup> , LI Zhenwei<sup>3 4</sup> , GENG Ren<sup>1</sup>

( 1. School of Geography , Beijing Normal University , Beijing 100875 , China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research , CAS , Beijing 100101 , China;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau , Institute of Soil and Water Conservation , Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource , Yangling 712100 , Shaanxi , China;

4. University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)

**Abstract:** The rapid and precise measurement of rill erosion morphology is extremely essential for understanding the hillslope hydrological processes and soil erosion modeling. Measuring surface microtopography is the first and foremost. This paper proposed and designed an easy assembling and flexible configuring laser scanner system with large effective area , sub-millimeter precision and quick data collecting. With the help of Halcon , Matlab and ArcGIS , we implemented the scanner with a 4.6 m × 1.0 m scanning area , resolution and precisions better than 0.50 mm , which is better than previous research. For instance , the average relative error for height and width measurement are 0.61% and 0.56% , the average absolute error measured in cross and vertical direction are 0.03 ~ 0.51 mm and 0.10 ~ 0.88 mm with an average of 0.16 mm and 0.22 mm , respectively. ( See Fig. 3 ~ 5 for details) . Besides , the compare with classic pin method implied an excellent accuracy and reliability with a linear fitting coefficient of 0.997 ( Eq. 1) and 95.16% frequency percentage of relative error between ± 20 mm. Further work may focus on the integration of data processing , quantification of rill morphological indexes and the application of the effect of sediment transportation on soil erosion.

**Key words:** Linear structured light; laser scanner; accuracy evaluation; rill erosion