

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.009

耕作土壤沟形测量系统设计与试验

王伟^{1,2} 李俊¹ 王晴晴¹ 李兆东^{1,2} 武尧尧¹ 陈黎卿^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036)

摘要: 针对耕作部件作业后土壤表面沟形特征参数测量困难,以及传统测量方法存在测量效率、误差难以兼顾的问题,设计了一种基于激光三角法的耕作土壤沟形测量系统。该系统包括便携式硬件结构和交互式软件系统,硬件结构主要由X/Y轴电动导轨、激光测距传感器、旋转编码器、便携式计算机、水平仪和型材支架组成;基于LabView构建的交互式软件可根据运动控制器和旋转编码器信号对X/Y轴电动导轨实现高精度扫描定位,交互式界面实时显示沟宽、沟深及沟形断面轮廓曲线,获取的点云数据通过空间插值和曲面拟合算法得到沟形三维数字化模型。精度测量试验和田间应用试验结果表明:直径方向测量的平均绝对误差为0.59 mm,厚度方向测量的平均绝对误差为0.02 mm;与图像检测法对比,系统测量误差最大降低2.1%,同时随着沟形断面采样次数增加测量值趋于稳定,测量误差呈指数函数下降;与田间人工测量相比,该系统测量相对误差最大为5.86%,平均相对误差为3.37%,能够满足农田土壤耕后沟形自动化测量的需要。

关键词: 土壤; 耕作; 沟形特征; 激光三角法; 测量系统

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0093-07

Design and Experiment for Tillage Soil Groove Measurement System

WANG Weiwei^{1,2} LI Jun¹ WANG Qingqing¹ LI Zhaodong^{1,2} WU Yaoyao¹ CHEN Liqing^{1,2}

(1. College of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

2. Anhui Province Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment, Hefei 230036, China)

Abstract: In order to solve the problem that the characteristic parameters of soil surface groove are difficult to be measured after the operation of soil tillage parts, the traditional measurement methods have problems in measurement efficiency and error. A tillage soil groove measurement system based on laser triangulation was designed, the system included portable hardware structure and an interactive software system. The hardware structure was mainly composed of X/Y axis electric guides, laser range finder, rotary encoders, portable computer, level and aluminium profile. The interactive software based on LabView can realize high-precision scanning and positioning of X/Y electric guides based on motion controller and rotary encoder signals, the interactive interface displayed the groove width, groove depth, real-time plotting of soil disturbance and groove contour curve. The acquired points cloud was obtained by a spatial interpolation and the surface fitting algorithm to obtain a grooved 3-dimensional digital model. The field experiments and precision, method comparison experiments were conducted. The results showed that the measurement errors of horizontal direction and vertical direction were 0.59 mm and 0.02 mm, respectively. Compared with image detection method, the average relative errors of RMSH and CL were reduced by 2.1% and 1.1%, respectively. The measured value tended to be stable with the increase of sampling times, which can be used as the true value of measurement, and the measurement error was decreased exponentially. The average measuring time and relative error of the system measurement were 3.37% and 0.72 m², respectively. The measuring system had measuring accuracy and reliability, which can satisfy automatic measurement of furrow type after farmland soil tillage. The requirement of chemical measurement provided a new idea for the quality analysis of soil tillage components and evaluation of tillage machinery and equipment.

Key words: soil; tillage; grooved characteristics; laser triangulation; measurement system

收稿日期: 2018-12-03 修回日期: 2019-03-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301303)和安徽省自然科学基金项目(1808085QE170)

作者简介: 王伟(1989—),男,博士生,主要从事旱作农业装备设计与智能测控研究, E-mail: wangww0618@163.com

通信作者: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究, E-mail: lqchen@ahau.edu.cn

0 引言

开沟作业是农业耕种过程的重要环节,沟形轮廓特征参数测量是评估耕作部件作业品质的一个主要方面。近年国内外学者采用了虚拟仿真、试验测试以及传感器技术等方法对此进行了诸多研究^[1-10],取得了一定的研究成果。对现有文献分析得知,在沟形测量方面,传统的接触式沟形测量方法,如传统针板法、链条法、剖面法等,所需设备简单,其数值需要通过尺度测量得到,且测量过程中易破坏土壤微结构,测量精度和效率难以保证^[11-15];非接触式方法主要有图像法、超声波、高光谱仪等,此类方法往往以静态图像特性反映整体地表特性的动态,存在一定的局限性,同时测量设备现场安装复杂,测量精度受自身因素和环境因素的影响较大^[16-20]。激光扫描测距法采用结构光投影信息和三角法原理观测目标三维信息,目前大多应用于地质探测、机器人导航、逆向工程等领域的表面测量^[21-23],在农业上的应用尚不多见。

本文采用激光三角测距法,设计一种快速获取耕作土壤沟形特征量的测量系统,系统包括便携式硬件结构和交互式软件系统,通过试验验证其可行性,为农业机械中土壤关键部件作业品质的评价提供一种新的方法。

1 耕作土壤沟形测量原理

1.1 三角法测量原理

激光成像单元由线光源激光器、汇聚/接收透镜、CCD 线性相机及信号处理器组成,测量原理如图 1 所示。其中线光源激光发射器通过汇聚透镜将可见红色激光射向土壤表面 A 点,经地表散射通过接收透镜汇聚在 CCD 线性相机感光单元形成像点 A',当土壤表面沟形变化时,入射光点 B 也随入射光轴移动,同样在感应单元形成像点 B',当光点在感应单元的位移变化为 h'时,基于激光三角测量法的直射式结构,根据相似三角形各边的几何比例关系原理可求得土壤表面沟形变化的距离 h 为

$$h = \frac{ah' \sin \theta_2}{b \sin \theta_1 - h' \sin (\theta_1 + \theta_2)} \quad (1)$$

式中 a——入射光轴和接收光轴的交点与接收透镜前主面的距离,mm

b——接收透镜后主面与成像面中心点距离,mm

θ_1 ——光轴与接收透镜光轴之间的夹角, (°)

θ_2 ——感应单元与接收透镜光轴之间的夹角, (°)

通常三角法原理的距离传感器内置的 CCD 线

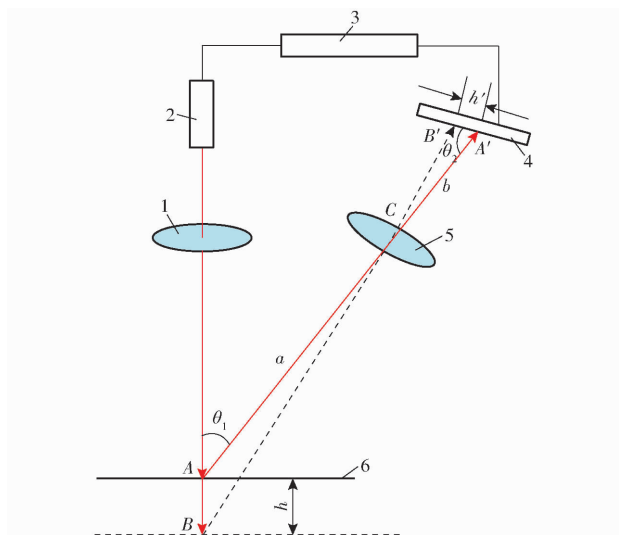


图 1 三角法测量原理图

Fig. 1 Measurement principle of laser triangulation

1. 汇聚透镜 2. 激光器 3. 信号处理器 4. CCD 线性相机 5. 接收透镜 6. 被测表面

性相机感光单元与接收透镜的夹角为 90° ,则测量土壤沟形值与感光单元尺寸、垂直光束与接收透镜光轴的夹角 θ_1 等因素有关。光束在接收元件的位置通过模拟和数字电路处理,并通过微处理器分析,计算出相应的输出电信号,并在构建的模拟量窗口内按比例输出标准数据信号。

1.2 沟形曲面拟合算法

表面沟形特征是耕整作业品质的宏观因子,由激光扫描的点云数据通过 Kriging 空间插值和曲面拟合算法得到地表三维表面模型^[24-25]。对于区域化变量 $Z(x_i, y_i)$,根据 n 个位置的点云值: $Z(x_1, y_1)$ 、 $Z(x_2, y_2)$, ..., $Z(x_i, y_i)$, ..., $Z(x_n, y_n)$,则点 (x_p, y_p) 处的估计值为

$$Z(x_p, y_p) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i, y_i) \quad (2)$$

式中 λ_i ——第 i 个位置处测量值的权重系数

为了满足线性、无偏、方差最小的条件,则

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \\ \text{Var} \left(Z(x_i, y_i) - \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i, y_i) \right) \rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i, x_j) - C(x_0, x_i) + \mu = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\text{Var}(\cdot)$ ——点云分布的离散化程度,即方差函数

$C(x_i, x_j)$ ——点 x_i 和 x_j 间的协方差函数

μ ——拉格朗日乘子

求出 λ_i 即可求出插值估计点高程,将其插值估计点的坐标代入空间曲面方程计算其函数值,并将

作为实际高程,当应用曲面拟合插值完成后,添加新一轮 Kriging 插值点,重新拟合空间曲面。

1.3 沟形参数计算

在农业遥感应用中,地表粗糙度常选取垂直方向均方根高度 (Root mean square height, RMSH) 和水平方向的表面相关长度 (Correlation length, CL) 这两个统计特征进行刻画^[26-27]。文中选取沟形断面轮廓线上 n 个扫描点,第 i 个采样点处的高程为 $h(i)$,其中 $\rho(k)$ 为自相关函数,表面相关长度为 $\rho=1/e$ (e 为对数常数) 与相关函数曲线交点对应的水平位置数值,系统通过求解二维土壤沟形断面扫描值来确定自相关函数,则均方根高度和自相关函数表示为

$$\left\{\begin{aligned}\sigma_H &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h(i) - \bar{h})^2}{n-1}} \\ \rho(k) &= \frac{\sum_{i=1}^{n-k-1} h(i)h(i+k)}{\sum_{i=1}^n h^2(i)}\end{aligned}\right. \quad (4)$$

式中 $\bar{h}$ ——扫描样本点的平均高度,mm
 σ_H ——垂直方向的均方根高度,mm

通过扫描的点云响应面计算沟宽、沟深和稳定性变异系数,具体求解公式为

$$\left\{\begin{aligned}b_j &= \frac{\sum_{i=1}^{N_j} b_{ij}}{N_j} \\ U_b &= \left(1 - \frac{S_{bj}}{b_j}\right) \times 100\%\end{aligned}\right. \quad (5)$$

式中 b_j ——第 j 测试区的平均沟宽,mm
 b_{ij} ——第 j 测试区的第 i 个沟形断面宽度,mm
 N_j ——沟形断面采样次数
 S_{bj} ——沟宽标准差,mm
 U_b ——沟宽稳定性变异系数, %

$$\left\{\begin{aligned}h_j &= \frac{\sum_{i=1}^{N_j} h_{ij}}{N_j} \\ U_h &= \left(1 - \frac{S_{hj}}{h_j}\right) \times 100\%\end{aligned}\right. \quad (6)$$

式中 h_j ——第 j 测试区的平均沟深,mm
 h_{ij} ——第 j 测试区的第 i 个沟形断面深度,mm
 S_{hj} ——沟深标准差,mm
 U_h ——沟深稳定性变异系数, %

2 耕作土壤沟形测量系统设计

2.1 硬件设计

耕作土壤表面沟形测试系统采用上、下位机模

式构建。上位机采用便携式计算机,下位机硬件以美国国家仪器公司的 NIcDAQ-9174 型便携式运动控制卡为核心。上位机向运动控制卡发送操纵指令和工作参数,实现对测试系统的 X/Y 运动轴控制、数据监测、处理及保存等;下位机由控制卡 NI9401、电流采集卡 NI9219、 X/Y 轴步进电机、驱动器、旋转编码器、激光测距传感器、电源转换模块等组成,上位机与下位机通过 USB/SPI 适配器进行通信。

如图 2 所示,步进电机和丝杆通过弹性联轴器连接同步传动,从而驱动丝杆导轨滑台运动,激光测距传感器通过滑块固定在 X 轴滑轨上,试验前,通过水平仪调整激光成像单元呈直射式状态,测量过程中 X/Y 轴电动滑轨按照预设的轨迹运动,一次可实现 $600\text{ mm} \times 1\,200\text{ mm}$ (测量面积 0.72 m^2) 区域的地表沟形特征参数测量。以模拟电流形式输出至采集卡 AI;运动控制卡 2 路 DIO 接口向 X/Y 轴驱动器发送脉冲电平实现步进电机转动控制,旋转编码器实时检测丝杆转速保证驱动转速稳定控制,2 路 DIO 接口发送高低电平实现步进电机正反转。

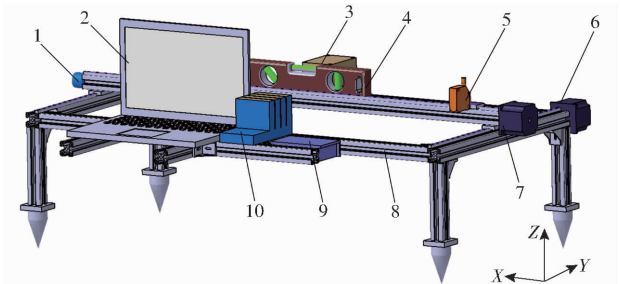


图 2 土壤沟形测量装置结构示意图

Fig.2 Schematic of soil groove measuring device

1. 旋转编码器 2. 计算机 3. 直流电源 4. 水平仪 5. 激光测距传感器 6. Y轴步进电机 7. X轴步进电机 8. 调整支架 9. 驱动器 10. 核心控制器

激光测距传感器采用 SensoPART 公司生产的 FT50RLA-220 型传感器,测量范围为 $80 \sim 500\text{ mm}$,对应的线性模拟量输出为 $4 \sim 20\text{ mA}$,分辨率达到 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。试验过程中激光测距传感器水平扫描速度为 $0.01 \sim 0.1\text{ m/s}$ 可调,空间采样间隔为 $1 \sim 10\text{ mm}$ 可调。

2.2 软件设计

2.2.1 测控界面设计

上位机测控软件基于 LabView 平台开发,采用交互式 G 语言编写,主要包括测控界面和控制程序。其中,测控软件界面主要包括 X/Y 轴驱动电机工作参数设置、路径通道选择以及土壤沟形特征参数图形化显示等功能,如图 3 所示。界面设置了多个布尔控件、2 个波形图表和 4 个性能参数显示单元,布尔控件主要调节 PWM 占空比及电机正反转,

波形图表 1 可显示单一沟形断面拟合轮廓曲线,波形图表 2 显示测量区域内三维土壤表面沟形点云图,通道选择可以设置设备 AI、DIO 接口索引;通过沟形响应面模型统计计算,显示出被测沟形表面粗糙度、沟形宽度、沟形深度及稳定性变异系数等参数。

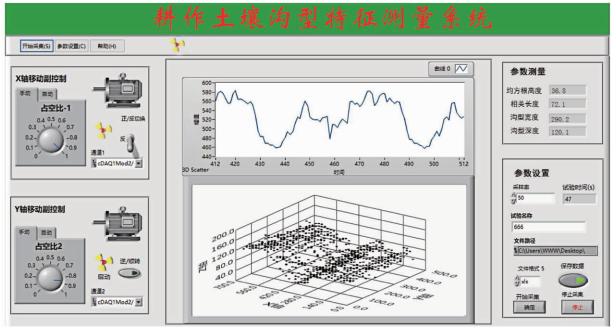


图 3 土壤沟形测控系统主界面

Fig. 3 Main interface of soil groove measurement system

2.2.2 系统程序设计

X/Y 运动轴均采用两相步进电机,其步进角 1.8° ,选用 FMDD50 型驱动器,脉冲响应频率可达 50 kHz,细分范围 200 ~ 40 000;为了保证被测区域变量 $Z(x_i, y_i)$ 点空间坐标的同一性,采用编码器丢步反馈补偿脉冲控制来保证采样间隔稳定。假设 X/Y 轴单向运行全程一次停止所需的时间为 T_x, T_y , Y 轴正向运行 1 s 停止后 X 轴反转再次进行扫描,设 Y 轴上电 k 次循环后整个被测区域扫描结束,测控系统程序流程如图 4 所示。

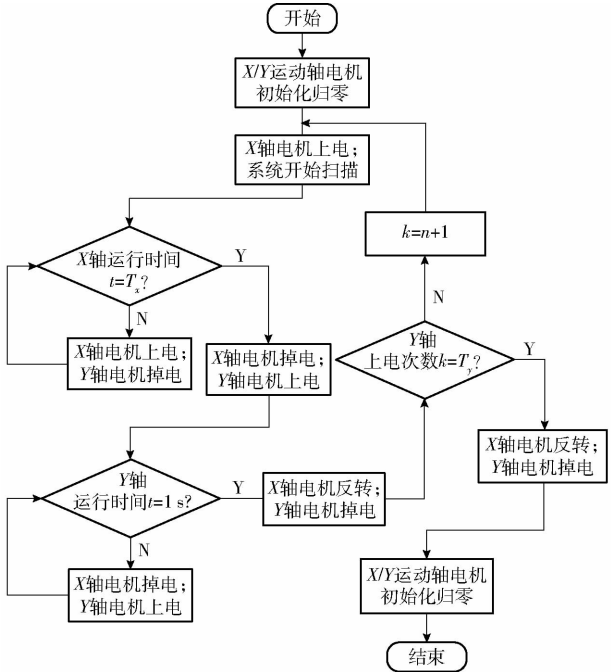


图 4 测控系统程序流程图

Fig. 4 Program flow chart of measurement and control system

3 试验与结果分析

3.1 精度测量试验

为了验证该系统的测量精度,以 1 元硬币作为标准模板进行扫描测试。选取硬币直径方向二维截面高度点云轮廓与其真实值进行比较分析,进行 3 次测量取平均值,测量误差及结果如表 1 所示,直径和厚度两个方向测量的平均绝对误差为 0.59 mm 和 0.02 mm,平均相对误差分别为 2.36% 和 1.08%。

表 1 尺寸测量结果

Tab. 1 Results of size measurement					
参数	实际值/ mm	测量平均 值/mm	方差/ mm ²	平均绝对 误差/mm	平均相对 误差/%
厚度	1.85	1.83	0.13	0.02	1.08
直径	25.00	25.59	0.35	0.59	2.36

3.2 对比试验

为了进一步对该系统测量性能进行分析,选取传统针板法、图像检测法进行对比。由于传统针板法操作时探针末端与土壤接触,不可避免地对沟形轮廓造成一定的破坏,因此先进行图像检测法和本文方法进行测量后再进行针板法测量。图 5 所示为图像检测法和针板法获取的沟形,经 Matlab 分析处理后得到图 6 所示 3 种方法相关函数曲线。

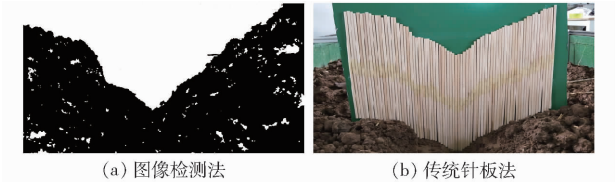


图 5 2 种方法获取的沟形轮廓

Fig. 5 Groove profile obtained by tradition pin-profiler and image recognition method

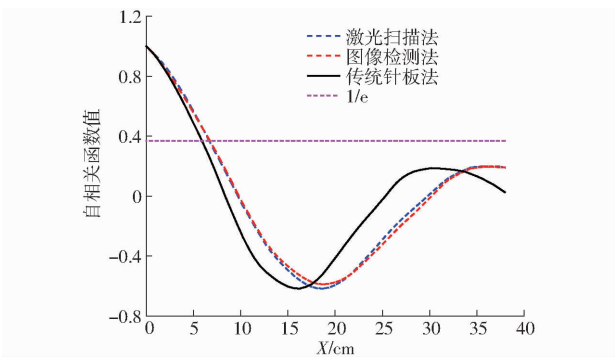


图 6 沟形轮廓相关函数曲线对比

Fig. 6 Contrast of correlation function curves of groove contour

由图 6 分析得知:① 3 种方法的自相关函数趋势基本相同,说明被测轮廓在该方向的分布具有一

定的规律性,这与被测土壤沟形结构的事实吻合。
② 图像检测法与激光扫描法自相关系数值比较集中,传统针板法的自相关长度计算结果存在明显的差异。

进一步分析得到 3 种测量方法重复采样对比试验的统计结果,如表 2 所示。由表 2 得知,传统针板法测量的均方根高度和相关长度较激光扫描法偏小,平均绝对误差分别为 3.1、3.9 mm,测量相对误差分别为 8.4%、5.7%,沟宽、沟深测量值的标准差

分别为 1.13、2.65 mm。原因为人工参与导致测量的不稳定性及接触破坏地表微结构^[27]。图像检测法测量的沟宽、沟深分别为 306.8、143.4 mm,均方根高度和相关长度为 36.1、71.3 mm,与传统针板法相比,测量结果差异较小,且均方根高度和相关长度测量相对误差分别为 2.1%、1.1%。由于精度更高的图像检测法在室外农田受拍摄光线等环境因素的影响也会造成检测误差。本系统一次测量可完成多断面采样,满足农田耕作土壤测量效率与精度要求。

表 2 3 种方法测量结果统计

Tab.2 Statistical result of measurement results by three methods

测量方法	沟宽/mm		沟深/mm		均方根高度			相关长度		
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值/ mm	平均绝对 误差/mm	测量相对 误差/%	平均值/ mm	平均绝对 误差/mm	测量相对 误差/%
激光扫描法	304.3	0.11	142.8	0.14	36.9			72.1		
传统针板法	306.6	1.13	146.6	2.65	33.8	3.1	8.4	68.2	3.9	5.7
图像检测法	306.8	0.27	143.4	0.24	36.1	0.8	2.1	71.3	0.8	1.1

4 田间试验

为了验证本文设计测量系统的田间应用效果,选择安徽农业大学农萃园试验基地进行田间应用试验,选取 3 种不同开沟机具进行耕作:包括滑刀式开沟器、深松铲和起垄铲。试验现场如图 7 所示。



图 7 田间试验现场

Fig.7 Field test site

应用人工测量与系统测量对耕作土壤表面沟形特征参数测量,单次测量面积为 0.72 m²。测量前利用水平仪调整系统处于水平位置,点击软件界面“开始采集”按钮,采集过程为自动扫描被测区域,系统拟合得到地表三维数字化结果如图 8 所示。通

过统计学分析 3 组试验不同断面采样次数下的沟形粗糙度参数的误差,由统计分析可知,测量参数误差随采样次数增加呈指数函数规律降低,拟合度决定系数 R^2 不小于 0.895,如图 9 所示。随着采样次数的增加,3 种沟形区域的均方根高度测量误差分别下降 22%、25%、13%,相关长度测量误差分别下降 15%、28%、8%。表 3 为沟形特性参数中沟宽、沟深及沟深稳定性变异系数对比分析结果,系统测量相对误差最大为 5.86%,平均相对误差为 3.37%,满足农田土壤耕后沟形自动化测量的需要。

5 结论

(1)设计了一种基于激光三角法的耕作土壤沟形测量系统,该系统通过便携式硬件结构和交互式软件界面实现采样速度与间隔可调、准确扫描耕作土壤沟形地貌,有效解决了接触式测量法破坏地表微结构及图像检测法受拍摄光线等受环境因素影响造成的测量误差。

(2)基于 LabView 构建的交互式软件可根据运

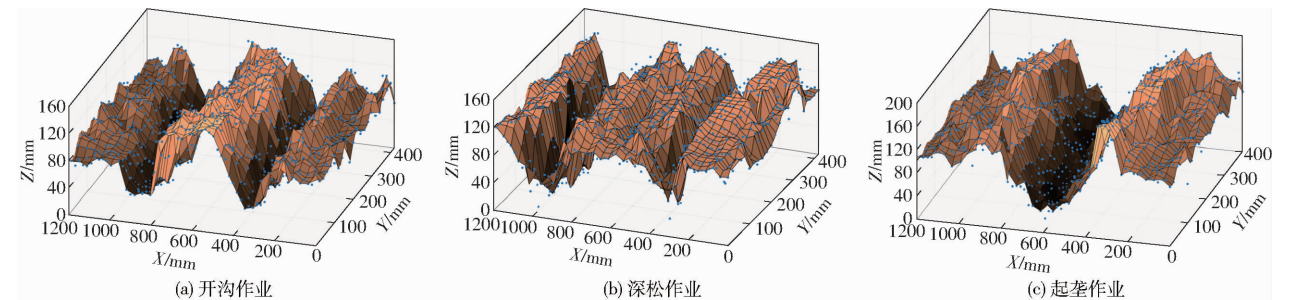


图 8 耕作土壤沟形三维模型

Fig.8 Three-dimensional model of tillage soil groove

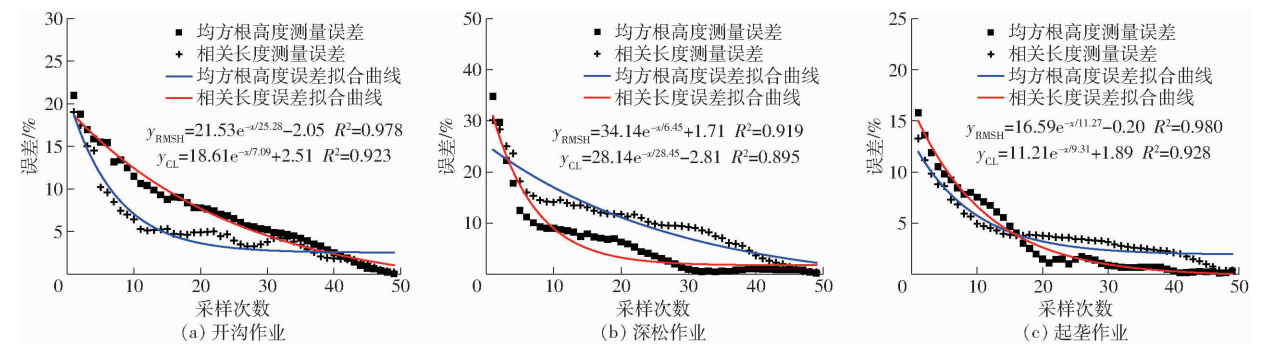


图9 不同采样次数的参数测量误差

Fig.9 Measurement errors of parameters with different sampling numbers

表3 沟形特征参数人工与系统测量结果比较

试验机具	沟宽			沟深			沟深稳定性变异系数/%		
	人工测量/mm	系统测量/mm	相对误差/%	人工测量/mm	系统测量/mm	相对误差/%	人工测量	系统测量	相对误差
开沟器	88.5	85.3	3.75	74.8	78.5	4.71	91.2	92.6	1.51
深松铲	54.2	56.8	1.67	119.3	123.2	3.16	78.6	83.5	5.86
起垄铲	363.5	380.7	4.51	103.6	108.5	4.51	98.2	97.6	0.61
平均值			3.31			4.13			2.66

动控制器和旋转编码器信号对 X/Y 轴电动导轨实现高精度扫描定位,获取的点云数据通过空间插值和曲面拟合算法得到沟形三维数字化模型,软件系统运行稳定可靠,交互式界面实时显示沟形粗糙度、沟宽、沟深及稳定性变异系数。

(3)测量试验数据表明:该系统平均相对测量误差为 3.37%,单次测量面积为 0.72 m²。田间动态测量随着沟形断面采样次数增加测量值趋于稳定,测量误差呈指数函数下降,能够满足农田土壤耕后沟形自动化测量的需要。

参 考 文 献

[1] 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.
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. (in Chinese)

[2] 王晓燕,高焕文,李洪文,等. 保护性耕作对农田地表径流与土壤水蚀影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(3):66-69.
WANG Xiaoyan, GAO Huanwen, LI Hongwen, et al. Experimental study on runoff and erosion under conservative tillage[J]. Transactions of the CSAE,2000,16(3):66-69. (in Chinese)

[3] 刘晓鹏,肖文立,刘立超,等. 油菜联合直播机组合式船形开沟器设计与开沟质量试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):79-87.
LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, LIU Lichao, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):79-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171110&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.010. (in Chinese)

[4] 郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):62-72.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline poil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(9):62-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160910&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010. (in Chinese)

[5] 秦宽,丁为民,方志超,等. 复式耕整机耕深与耕宽稳定性分析与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(9):1-8.
QIN Kuan, DING Weiming, FANG Zhichao, et al. Analysis and experiment of tillage depth and width stability for plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(9):1-8. (in Chinese)

[6] 黄玉祥,杭程光,苑梦婵,等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):80-88.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):80-88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160712&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012. (in Chinese)

[7] 赵金辉,杨学军,刘立晶,等. 基于 PLC 的播种机开沟器力学性能测试装置[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(增刊):29-34.
ZHAO Jinhui, YANG Xuejun, LIU Lijin, et al. Mechanical performance testing device for planter openers based on PLC[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(Supp.):29-34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2014s105&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.005. (in Chinese)

- [8] 王超,刘从京,李洪文,等. 非对称式大小圆盘开沟器装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(18):28-36.
WANG Chao,LIU Congjing,LI Hongwen,et al. Design and experiment of asymmetric large-small double discs ditching device [J]. Transactions of the CSAE,2018,34(18):28-36. (in Chinese)
- [9] BARBER M E,GRINGS F M,ALVAREZ-MOZOS J,et al. Effects of spatial sampling interval on roughness parameters and microwave backscatter over agricultural soil surfaces[J]. Remote Sensing,2016,8(6):42-58.
- [10] 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.
LI Xiaojie,ZHAO Kai,ZHENG Xingming. Development of surface roughness tester based on laser triangulation method[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(8):116-121. (in Chinese)
- [11] BOGEL T,OSINENKO P,HERLITZIUS T H. Assessment of soil roughness after tillage using spectral analysis[J]. Soil & Tillage Research,2016,159:73-82.
- [12] THOMSEN L M,BAARTMAN J E M,BARNEVELD R J,et al. Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model[J]. Soil,2015,1(1):399-410.
- [13] ZHENG Xingming,ZHAO Kai,LI Xiaojie,et al. Improvements in farmland surface roughness measurement by employing a new laser scanner[J]. Soil & Tillage Research,2014,143:137-144.
- [14] 郑兴明,赵凯,李晓洁. 农田表面粗糙度参数的测量与精度分析[J]. 地球信息科学学报,2013,15(5):752-760.
ZHENG Xingming,ZHAO Kai,LI Xiaojie. Accuracy analysis of agriculture soil surface roughness parameter[J]. Journal of Geo-Information Science,2013,15(5):752-760. (in Chinese)
- [15] MARTINEZ-AGIRRE A,ALVAREZ-MOZOS J,GIMENEZ R. Evaluation of surface roughness parameters in agricultural soils with different tillage conditions using a laser profile meter[J]. Soil & Tillage Research,2016,161:19-30.
- [16] MARZAHN P,RIEKE-ZAPP D,LUDWIG R. Assessment of soil surface roughness statistics for microwave remote sensing application using a simple photo grammetric acquisition system[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2012,72:80-89.
- [17] MILENKOVIC M,PFEIFER N,GLIRA P. Applying terrestrial laser scanning for soil surface roughness assessment[J]. Remote Sensing,2015,7(2):2007-2045.
- [18] 杨洋,苗伟,张铁,等. 基于图像自适应分类算法的花生出苗质量评价方法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):28-35.
YANG Yang,MIAO Wei,ZHANG Tie,et al. Quality evaluation method of peanut seeding based on image adaptive classification algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(3):28-35. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180303&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.003. (in Chinese)
- [19] 陶浩然,陈权,李震,等. 近景摄影测量提高裸露地表粗糙度测量精度[J]. 农业工程学报,2017,33(15):162-167.
TAO Haoran,CHEN Quan,LI Zhen,et al. Improvement of soil surface roughness measurement accuracy by close-range photogrammetry[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(15):162-167. (in Chinese)
- [20] 孙诚达,邱威,丁为民,等. 农作物几何特征量测量系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(12):1-10.
SUN Chengda,QIU Wei,DING Weimin,et al. Design and experiment for crops geometrical feature measuring system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(12):1-10. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151201&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.001. (in Chinese)
- [21] 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.
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 CSAE,2013,29(21):137-142. (in Chinese)
- [22] 郭新年,周恒瑞,张国良,等. 基于激光视觉的农作物株高测量系统[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):22-27.
GUO Xinnian,ZHOU Hengrui,ZHANG Guoliang,et al. Crop height measurement system based on laser vision [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(2):22-27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180203&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.003. (in Chinese)
- [23] 蔡祥,孙宇瑞,林剑辉,等. 基于激光反射的土壤表面粗糙度测量装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(1):70-76.
CAI Xiang,SUN Yurui,LIN Jianhui,et al. Design of a laser lanner for characterizing soil surface roughness [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(1):70-76. (in Chinese)
- [24] 侯占峰,鲁植雄,赵兰英. 耕作土壤沟形不平度的分形特性[J]. 农业机械学报,2007,38(4):50-53.
HOU Zhanfeng,LU Zhixiong,ZHAO Lanying. Fractal behavior of tillage soil surface roughness[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(4):50-53. (in Chinese)
- [25] 冯旭刚,冯同磊,章家岩,等. 纳米级Z轴坐标测量系统设计与实验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):417-422.
FENG Xugang,FENG Tonglei,ZHANG Jiayan,et al. Design and experiment of nano-resolution Z-axis coordinate measuring system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):417-422. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171151&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.051. (in Chinese)
- [26] 李俐,王荻,潘彩霞,等. 基于神经网络与决策树的土壤粗糙度测量[J]. 农业工程学报,2015,31(14):132-138.
LI Li,WANG Di,PAN Caixia,et al. Soil surface roughness measuring method based on neural network and decision tree[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(14):132-138. (in Chinese)
- [27] 李俐,王荻,王鹏新,等. 基于色彩运算和混沌粒子群滤波的土壤粗糙度测算[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):158-165.
LI Li,WANG Di,WANG Pengxin,et al. Soil surface roughness measurement based on color operation and chaotic particle swarm filtering[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(3):158-165. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150322&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.022. (in Chinese)