doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.008

基于激光雷达的农业耕作微地貌测量装置设计与试验

刘立超[1,2]　魏国梁[1,2]　张青松[1,2]　肖文立[1,2]　孙文成[1,2]　廖庆喜[1,2]
(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对现有地表微地貌测量装置难以兼顾农业耕种作业后地表微地貌测量的精度和效率、部分测量装置单次测量覆盖区域不能满足统计要求的问题,设计了一套由激光雷达、直线导轨、便携式计算机和支架等构成的非接触式地表微地貌测量装置,开发了以 STM32 单片机为核心的步进电机驱动控制器,并与上位机软件形成整套采集系统,可实现激光雷达精确定位并快速获取地表三维坐标。该装置典型分辨率在激光雷达扫描方向为 3.8 ~ 10 mm,垂直扫描方向可在毫米精度范围内任意设置,测距分辨率为 1 mm;测量区域覆盖面积典型值为 6.8 m^2,垂直扫描方向分辨率为 10 mm 时,单次测量时间低于 2.5 min。通过分析测量误差来源,建立了系统误差补偿模型,在 15 次均值滤波的条件下,该装置测量最大绝对误差为 2.7 mm,最大平均绝对误差为 0.9 mm。油菜机械直播后地表微地貌测量试验结果表明:利用 Matlab 生成的地表三维模型可以精确地重构原有地表微地貌特征,测量结果与实际地表高度变化吻合度较高;测量数据统计结果表明,固定区域内均方根高度和相关长度测量值需分别在 16 次和 64 次的等距采样下达到稳定均值,而畦沟相关评价参数也需要多组样本计算才具有统计意义。

关键词: 农业耕作地表; 微地貌; 激光雷达; 粗糙度
中图分类号: S237　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)07-0084-09

Design and Experiment of Microtopography Measuring Device for Agricultural Cultivation Based on LiDAR

LIU Lichao[1,2]　WEI Guoliang[1,2]　ZHANG Qingsong[1,2]　XIAO Wenli[1,2]　SUN Wencheng[1,2]　LIAO Qingxi[1,2]
(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Aiming at the fact that the existing surface microtopography measuring device is difficult to achieve the accuracy and efficiency of surface measurement simultaneously after mechanical cultivation operations, a non-contact surface microtopography measuring device composed of LiDAR, linear guide, portable computer and bracket was developed. The stepping motor drive controller based on STM32 single-chip microcomputer was developed, and a complete acquisition system was built up combined with the upper computer software. The system can realize precise positioning of the LiDAR and quickly obtain the three-dimensional coordinates of the surface. The typical resolution of the device was 3.8 ~ 10 mm in the LiDAR scanning direction, the vertical scanning direction can be arbitrarily set within the millimeter precision range, the ranging resolution was 1 mm; the coverage area was 6.8 m^2 typically, when the vertical scanning direction resolution was 10 mm, the single measurement time was less than 2.5 min. By analyzing the source of measurement error, the system error compensation model was established. Under the condition of 15 mean filtering, the maximum absolute error of the device was 2.7 mm and the maximum average absolute error was 0.9 mm. The device was investigated on rapeseed surface area after direct seeding of the crop. Test results revealed that the surface three-dimensional model generated by Matlab can accurately reconstruct the original microtopography surface features, and the measurement results were consistent with the actual surface height fluctuation. The statistical analysis showed that for attaining stable results, the root mean square height and the correlation length in the fixed size area needed to be sampled 16 times and 64 times, respectively.

Key words: agricultural cultivation surface; microtopography; LiDAR; roughness

收稿日期: 2019-03-05　修回日期: 2019-03-24
基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201503118-06)、湖北省农业科技创新行动项目和国家油菜产业技术体系专项(CARS-12)
作者简介: 刘立超(1989—),男,博士生,主要从事农业装备设计与测控研究,E-mail: llchao2012@163.com
通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

0　引言

微地貌或粗糙度反映了土壤表面高度的动态变化特性，是影响地表径流和侵蚀过程的重要因素[1-2]。农业地表微地貌在短期内的变化主要受农业耕作活动的影响，不同耕作工具对地表微地貌的改变尺度也存在较大差异[3-4]。根据不同机具的作业效果，地表高度特征主要分为耕作后地表的粗糙度特征以及开沟、起垄等作业的几何特征，这些特征参数可通过土壤表面的截面高度或地表的三维高程数据计算得到。

目前，对于农田耕种作业后地表粗糙度测量和开沟、起垄等几何特征的测量方式多数还局限于针板法等接触式测量方法[5-7]，其结构简单，但存在测量精度和效率低、测量范围受限、容易破坏原有地表等问题。而非接触式测量方法通过借助相机[8-9]、激光测距传感器[10]及声波传感器[11]等，能够实现较高精度的地表高度测量，且不会破坏原有地表，目前在微波遥感和农业耕作领域已有较多应用[12]。在非接触测量方法中，摄影测量技术应用较多，其通过区域地表面采样[13]和单截面地表线采样[14-15]的方式可获取连续地表高度数据，利用立体摄影技术获取的高分辨率地表高度数据还可用于评估土块颗粒大小[16]。摄影测量技术在光照均匀及无阴影环境下能达到较高的测量精度，目前多适用于尺度变化较小的地表粗糙度参数测量，在有垄、沟等高度特征变化较大环境下应用较少。

激光测距方法在非接触式地表粗糙度测量中也得到广泛运用[17-18]，目前应用较多的是将单点激光测距传感器或结构光传感器安装在单个或正交直线导轨的滑块上，通过电机带动滑块移动，实现单个断面或平面区域内的地表高程数据采集，能达到毫米或亚毫米级的测量精度。结构光传感器多安装于单个直线导轨上，可实现 1 m^2 内高分辨率覆盖测量[19-21]；单点激光测距传感器安装在长度 5 m 左右的导轨上，可实现较长距离采样[22]，在正交直线导轨上由于受到仪器结构限制，测量区域范围一般在 2 m^2 以内，且传感器需要经过所有采样点，较为耗时[23]。

鉴于现有测量方法在测量效率和测量地表适应性方面存在的问题，为满足农业耕种作业形成的不同尺度微地貌测量、进一步提高单次测量面积和效率，本文设计一种采用激光雷达与直线导轨组合的地表微地貌测量装置，通过测量系统自动获取地表的三维坐标，为耕种作业后地表作业质量和开沟起垄效果评价提供准确的计算数据。

1　微地貌测量装置设计

1.1　结构与工作过程

地表微地貌测量装置主要包括激光雷达、直线导轨、步进电机及编码器、驱动控制器、支架和便携式计算机等，其结构如图 1 所示。其中，激光雷达安装在直线导轨的滑块上，在步进电机带动下沿导轨直线移动，驱动控制器通过获取编码器信号控制步进电机按设定程序精确运转，便携式计算机分别与驱动控制器及激光雷达连接，通过安装的上位机软件实现人机交互、与驱动控制器通讯以及接收、存储激光雷达采集的数据。导轨和支架通过螺栓连接，可实现快速拆装和测量高度调节。

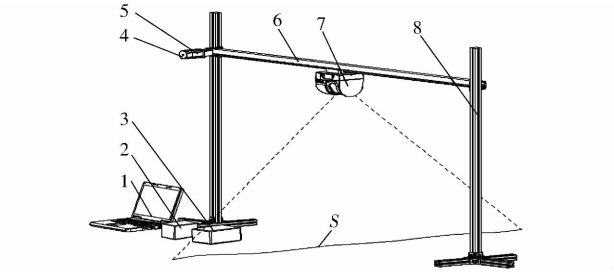


图 1　微地貌测量装置结构图

Fig. 1　Sketch map of soil surface microtopography measuring device

1. 便携式计算机　2. 驱动控制器　3. 电池　4. 编码器　5. 步进电机　6. 直线导轨　7. 激光雷达　8. 支架

便携式计算机与驱动控制器通过 RS232 连接，并与激光雷达通过以太网通讯，测量作业前，采用上位机软件进行电机运动参数和激光雷达采样参数的设置。激光雷达以线扫描方式对待测区域进行距离采样，其单帧采样数据与地表截面形成的测量曲线如图 1 中 S 所示，测量过程中激光雷达沿导轨一端间歇移动到另一端，并在各间歇位置开启数据采样，同时以极坐标形式返回各测量点与激光雷达扫描中心的距离数据。对测量数据进行误差补偿及坐标转换，即可得到完整的地表三维高程数据。

1.2　系统设计

测量装置田间作业需要考虑装置便携性及操作的简易性，同时还需满足一定的测量精度和效率。为此，采用上、下位机交互的工作模式进行测量系统开发，通过上位机软件完成参数设置和数据采集，下位机用于执行激光雷达直线移动及精确定位。

1.2.1　硬件设计

测量系统硬件结构如图 2 所示。其中，上位机硬件平台为通用便携式计算机，硬件配置要求能流畅运行上位机软件；下位机控制核心为 STM32F407 单片机，通过串口与上位机进行指令交互。单片机

的 TIM4 配置为编码器模式,用于接收编码器信号,为步进电机闭环控制与运动定位提供控制数据;TIM3 和部分 I/O 口分别产生 PWM 脉冲和电平信号,用于步进电机驱动器的控制信号输入。激光雷达通过以太网直接与便携式计算机连接,该连接方式可保证采集数据的高效率稳定传输。整个系统供电由 48 V 锂电池和电源转换模块提供,可实现对不同额定电压的用电设备分别供电。

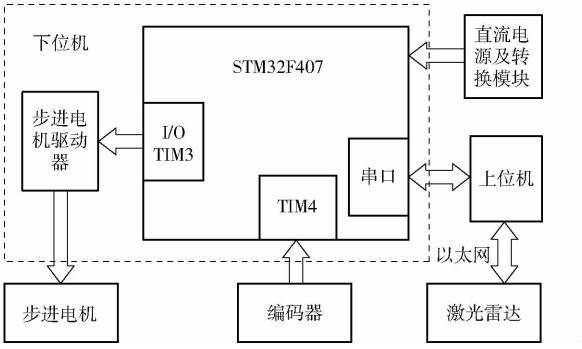


图 2 微地貌测量系统硬件结构原理图

Fig. 2 Hardware schematic of microtopography measurement system

1.2.2 软件设计

为实现地表高度数据的便捷采集和存储,采用 C++语言编写了数据采集上位机软件,可实时采集和显示单帧截面高度数据,并存储到文本文件中。采集过程数据可视化有利于操作人员监控系统运行状态,确保采集过程数据完整可用。

激光雷达移动过程中依靠编码器精确定位,在每个间歇停止位置开始采样和记录数据。在数据采集过程中,测量装置的空间采样分辨率主要受激光雷达的安装高度、扫描方向的角度分辨率以及垂直扫描方向的采样间隔影响,为增大激光雷达的扫描覆盖区域并降低测量过程中的阴影效应,激光雷达需安装在距地表较高位置,本设计中依据选定的支架高度并考虑支架整体稳定性,设定激光雷达扫描中心离地高度范围为 1.3 ~ 1.5 m。激光雷达扫描方向采样间隔可通过设置采样角度分辨率进行调节,而垂直扫描方向的采样间隔则由步进电机单次移动距离控制。本设计中选用同步带式直线导轨,导轨上滑块的移动距离 l_s 与步进电机转过角度的对应关系为

$$l_s = \frac{q\theta_s}{360 n_s} p z_s \tag{1}$$

式中 q——单次移动脉冲数

n_s——细分倍数

θ_s——步距角,(°)

p——同步带节距,mm

z_s——同步带轮齿数

依据 Nyquist 采样定理[24]及文献[15]的研究结论,当采样间隔不高于 10 mm 时可以精确提取地表粗糙度剖面并准确计算粗糙度参数,因此确定激光雷达扫描方向的最大分辨率为 10 mm,由此可计算得到激光雷达扫描方向的最小分辨率为 3.8 mm,有效测量距离为 3.4 m,装置一次扫描覆盖区域为 6.8 m^2。

步进电机完成单次运转实现激光雷达移动设定采样间隔后,激光雷达开始数据采样。为使激光雷达移动过程平稳,且在雷达采样时保持固定位置,步进电机运转过程中采用 S 曲线柔性加减速算法以降低电机启停时引起的支架抖动[25-26]。

图 3 为步进电机运转过程中角速度和角加速度的变化曲线,其中,ω_m 和 a_m 分别为最大角速度和最大角加速度,0 ~ t_5 为步进电机单个加减速转动周期,包括加加速段(0 ~ t_1)、加减速段(t_1 ~ t_2)、匀速段(t_2 ~ t_3)、加减速段(t_3 ~ t_4)和减减速段(t_4 ~ t_5),t_5 ~ T 为激光雷达单个采样周期,T ~ $2T$ 为下一个步进电机转动和激光雷达采样周期。通过控制匀速段时间间隔,可以改变步进电机单个运转周期的转动角度,从而控制激光雷达垂直扫描方向的采样距离分辨率。系统运行过程中首先完成上、下位机通讯测试,在完成激光雷达初始位置记录和初始位置数据采样后进入系统循环,循环过程中上位机接收到下位机发送的单次运转完成指令后开始数据采样,采样数据完成后再发送相应指令给下位机软件,指示下位机软件控制步进电机进行下一采样位置移动,直至达到设定的总采样距离,即完成一次区域测量过程。单个区域地表数据的采集流程如图 4 所示。

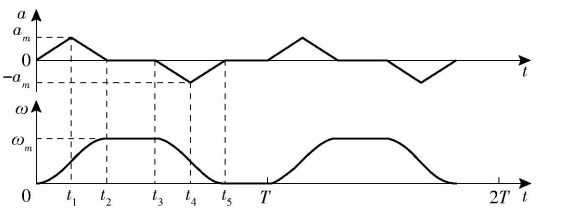


图 3 步进电机运转时序图

Fig. 3 Timing diagram of stepper motor motion

1.3 地表微地貌评价参数

农业耕种作业后的地表作业质量主要考察厢面地表粗糙度和开沟起垄作业质量,地表粗糙度参数常用均方根高度和表面相关长度表征,而开沟作业效果常用沟宽、沟深及其对应的沟宽、沟深稳定性系数进行评价。

1.3.1 均方根高度和相关长度

均方根高度反映了土壤高度偏离平均高度的程度,以区域内所有采样点为目标进行统计时,均方根高度表示为

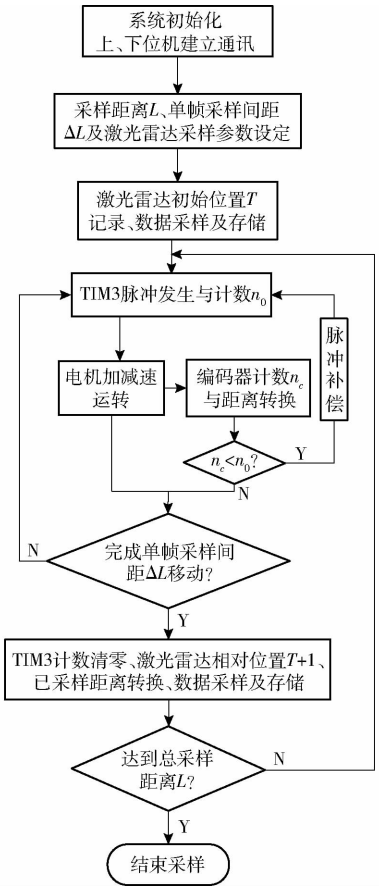


图 4　数据采集程序流程图

Fig. 4　Flow chart of data acquisition program

$$h_{rms}=\sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{c=0}^{M-1}\sum_{r=0}^{N-1}(z(x_c,y_r)-\bar{z})^2} \tag{2}$$

式中　h_{rms}——均方根高度

M——区域列数　　N——区域行数

c——列序号　　r——行序号

$z(x_c,y_r)$——(x_c,y_r)位置的高度

$\bar{z}$——$z(x_c,y_r)$的平均值

对于一维离散数据，均方根高度可表示为

$$h_{rms}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(z_i-\bar{z})^2}{n-1}} \tag{3}$$

式中　n——采样点个数

z_i——第 i 个采样点的高度

均方根高度只能描述垂直方向上各孤立点的高度特征，而表面相关长度则描述了高度在水平方向上的变化，反映了各采样点在不同位置之间的联系。表面相关长度通过求解一组数据的归一化自相关函数确定，对于离散数据，令 x 坐标方向上相邻两采样点间隔为 Δx，两采样点相距 $x_2-x_1=(m-1)\Delta x$，归一化自相关函数可定义为

$$\rho(x_2-x_1)=\frac{\sum_{i=1}^{n-m+1}z_iz_{i+m-1}}{\sum_{i=1}^{n}z_i^2} \tag{4}$$

式中 m 为大于等于 1 的整数，相关函数$\rho(x_2-x_1)=1/e$时的间隔 x_2-x_1，被称为表面相关长度。

1.3.2　沟宽及沟深稳定性系数

单个行程的开畦沟宽度或深度平均值可表示为

$$a=\frac{\sum_{i=1}^{w}a_i}{w} \tag{5}$$

式中　a——行程的沟深或沟宽平均值，mm

a_i——该行程中第 i 个测点沟深或沟宽，mm

w——该行程的测点个数

则沟深或沟宽稳定性系数 U 可表示为

$$U=\left[1-\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{w}(a_i-a)^2/(w-1)}}{a}\right]\times 100\% \tag{6}$$

2　微地貌测量装置误差补偿与精度测试

2.1　设备选型与参数设定

试验选用德国 SICK 公司的二维单线激光雷达 LMS511－10100 PRO 型，其扫描角度为 190°，测距分辨率为 1 mm，采样角度分辨率为 0.166 7°～1°，采样频率为 25～100 Hz；选用 57 型步进电机（北京时代超群电器科技有限公司，步距角 1.8°）配合同步带直线导轨（北京时代超群电器科技有限公司，节距 3 mm，带轮齿数 24）实现滑块的运动控制，直线导轨安装激光雷达后的有效行程为 2 m。为使测量系统具有较高的采样分辨率和测量效率，测量中设置激光雷达角度分辨率为 0.166 7°，采样频率为 100 Hz。

2.2　误差测量试验

由于激光雷达在 0～10 m 测距范围内存在 ±25 mm 的系统误差和 ±6 mm 的随机误差，直接用于地表测量无法满足精度要求。为此，对测量装置开展了精度测量试验，测量现场如图 5 所示。

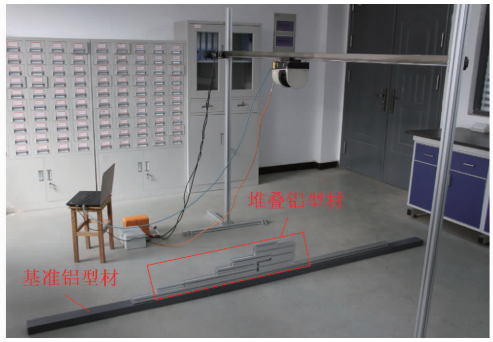


图 5　测量现场

Fig. 5　Scene of measurement test

首先开展激光雷达不同均值滤波次数对测量误

差的影响试验,测量对象为水平放置的基准铝型材上表面。测量前将激光雷达调整至与铝型材表面垂直距离为 1.3 m。选取其中 3 组不同均值滤波处理的测量数据,经坐标转换和基准参考面变换后的高度曲线如图 6 所示,其中基准参考面为水平地表,距基准铝型材上表面为 40 mm。可以看出,不同均值滤波次数下的测量数据随着采样点位置的变化呈现统一的变化趋势,且采样点数据波动随均值滤波次数增加而减小。由于均值滤波处理会增加单帧数据的采样时间,为兼顾采集系统测量精度和效率,确定 15 次均值滤波为系统采集时的滤波次数。统计 200 次均值滤波后各相邻数据点差值的平均值仅为 0.2 mm,可认为已消除随机误差,因此可使用 200 次均值滤波后的测量数据作为系统误差修正的补偿基准数据。

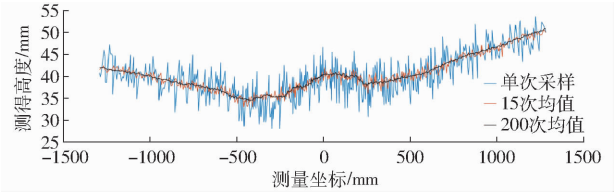


图 6 不同均值滤波次数时的采样数据

Fig. 6 Sampling data corresponding to different mean filtering times

由于农业耕作后地表存在垄、沟等地表高度差值较大的区域,为研究激光雷达在不同测量高度下的系统误差分布规律,分别以 15 次和 200 次均值滤波对依次垫高 40、60、80、100、120、140、180 mm 的基准铝型材上表面进行测距试验。对测得的数据进行坐标转换及基准参考面变换后得到的不同测量高度曲线如图 7 所示,可以看出,不同测量高度对应的测量结果同样具有统一的变化趋势。

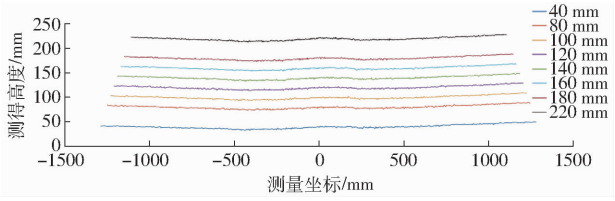


图 7 不同测量高度下的测量结果

Fig. 7 Measurement result at different heights

2.3 系统误差补偿处理

根据以上测量分析结果,建立系统误差补偿模型,如图 8 所示,以激光雷达扫描中心为原点建立极坐标系,x 方向水平向右,取顺时针方向为角度的正方向。B 为基准参考面上的水平基准线,$B_1 \sim B_k$ 为不同测量平面上的水平线,$L_{a1} \sim L_{ak}$ 为对应测量平面上经 200 次均值滤波后的测量曲线,$s_{1i} \sim s_{ki}$ 为对应的系统误差。

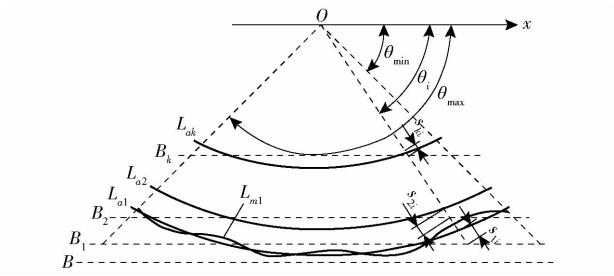


图 8 误差补偿原理示意图

Fig. 8 Schematic of error compensation principle

根据几何关系,激光雷达扫描中心沿某一角度 θ_i 到水平线 B_1 上 i 点的实际距离 l_{b1i} 可表示为

$$l_{b1i} = \frac{l_{h1}}{\cos(\theta_{\min} + i\delta)}$$
$$(i = 0, 1, \cdots, \mathrm{round}((\theta_{\max} - \theta_{\min})/\delta)) \quad (7)$$

式中 l_{h1}——扫描中心距 B_1 所在测量平面的垂直距离,mm

$\theta_{\min}$、$\theta_{\max}$——激光雷达扫描开启角度和终止角度,(°)

δ——扫描角度分辨率,(°)

round——四舍五入取整函数

L_{a1} 曲线上角度 θ_i 对应的测量基准值用 l_{t1i} 表示,则 i 点的系统误差 s_{1i} 可表示为

$$s_{1i} = l_{b1i} - l_{t1i} \quad (8)$$

B_1 所在测量平面上 15 次均值采样的测量曲线用 L_{m1} 表示,将该曲线上 i 点测量值 l_{1i} 与对应点的系统误差 s_{1i} 相加,得到补偿后测量点数值 l'_{1i} 为

$$l'_{1i} = l_{1i} + s_{1i} \quad (9)$$

取水平地表为基准参考平面,激光雷达扫描中心与该平面上基准线 B 的垂直距离为 l_b,对补偿后数据点进行坐标转换和基准变换,得到转换后直角坐标系坐标值

$$\begin{cases} x_{1i} = l'_{1i}\cos(\theta_{\min} + i\delta) \\ y_{1i} = l_b - l'_{1i}\sin(\theta_{\min} + i\delta) \end{cases} \quad (10)$$

通过对各测量高度下相同采样角度的系统误差数据分析可知,同一采样角度下的系统误差在小范围内随机分布,因此,对所获取不同高度数据的系统误差进行均值处理,得到均值补偿误差

$$\bar{s}_i = \frac{\sum_{j=1}^{k} s_{ji}}{k} \quad (11)$$

将同一测量角度下不同高度的测量数据,用均值处理后的误差补偿数据进行补偿处理可得

$$\begin{cases} l'_{1i} = l_{1i} + \bar{s}_i \\ l'_{2i} = l_{2i} + \bar{s}_i \\ \vdots \\ l'_{ki} = l_{ki} + \bar{s}_i \end{cases} \quad (12)$$

式中　$l'_{1i}\sim l'_{ki}$——不同测量高度对应补偿后数值，mm

$l_{1i}\sim l_{ki}$——不同高度的测量值，mm

通过式(10)将均值补偿后得到的数据进行坐标转换和基准参考变换，得到图 9 所示的高度数据曲线，对比图 7 可以看出，测量数据的弯曲程度得到修正，修正后的不同高度测量曲线近似水平，可明显降低系统误差。

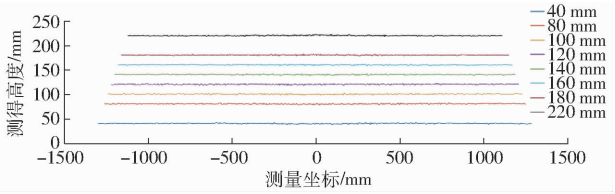


图 9　系统误差补偿处理结果

Fig. 9　System error compensation results

为进一步验证装置测量精度，将不同规格的标准铝型材有序堆叠在基准型材上(图 5)，形成距激光雷达不同高度的测量平面。对数据进行误差补偿后，分别在各测量平面上随机选取 20 个测量数据进行处理，得到的测量和计算结果如表 1 所示。由计算结果可知，测得数据的方差最大值为 1.9 mm^2，绝对误差最大值为 2.7 mm，平均绝对误差最大值为 0.9 mm，测量精度较高。

表 1　高度测量结果

Tab. 1　Results of height measurement　mm

平面高度	测量结果均值	最小值	最大值	绝对误差	平均绝对误差
1 340	1 340.3 ± 1.1	1 338.4	1 341.7	1.7	0.6
1 300	1 299.1 ± 1.3	1 297.5	1 301.4	2.5	0.9
1 270	1 270.5 ± 1.3	1 268.9	1 272.1	2.1	0.8
1 260	1 260.9 ± 1.0	1 259.3	1 261.9	1.9	0.7
1 220	1 220.6 ± 1.4	1 218.7	1 222.7	2.7	0.9
1 180	1 179.8 ± 0.8	1 178.9	1 180.9	1.1	0.4
1 140	1 139.9 ± 0.9	1 138.8	1 141.6	1.6	0.5

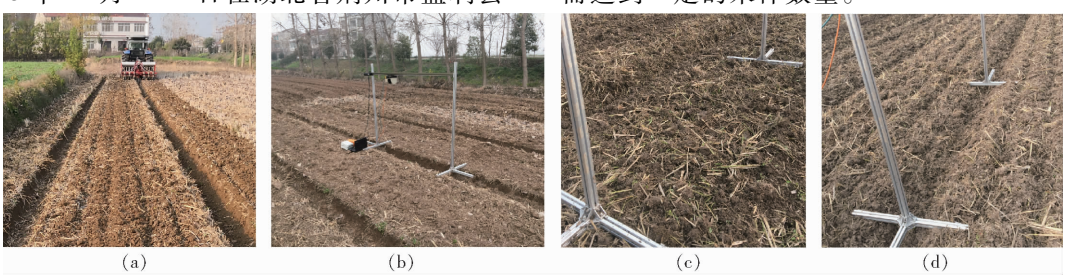
3　油菜机械直播地表测量试验

为验证所设计地表微地貌测量装置的适用效果，于 2018 年 12 月 1—2 日在湖北省荆州市监利县开展了田间测量试验，测量对象为华中农业大学工学院研制的 2 种不同结构形式的油菜直播机[27-28]播种后作业地表，如图 10 所示，其中图 10a、10b 为油菜免耕精量直播机作业后地表，其开畦沟部件为旋转开沟刀盘，图 10c、10d 为油菜精量联合直播机作业后地表，其开畦沟部件为铧式犁。将测量装置安放在待测地表，借助水平尺调整安装激光雷达的直线导轨至水平，试验中激光雷达安装高度距地表约为 1.5 m，扫描仪的角度分辨率设置为 0.166 7°，采样频率为 100 Hz，垂直扫描方向采样分辨率设置范围为 6 ~ 10 mm，采样角度范围为 45° ~ 135°，即每帧采样数据共有 541 个采样点；垂直扫描方向采样分辨率为 10 mm 时，实际单个区域最快采样时间低于 2.5 min。

对获取的测量数据进行有效区域提取和误差补偿处理后，得到图 10 所示各土壤所对应 Matlab 三维数字化模型如图 11 所示，标尺中不同颜色对应数值表示不同微地表高度。可以看出，在两个测量方向采样分辨率均不超过 10 mm 的情况下，地表三维数字化高程模型可以精确地重构原有地表粗糙度和沟型特征，测量结果与实际地表高度变化吻合度高，且单次测量区域可覆盖完整厢面和畦沟区域，为进一步分析计算地表特征参数提供了较为准确的高度数据。

3.1　作业厢面土壤粗糙度统计分析

相关研究表明，增加采样长度可提高地表粗糙度测量的准确性[17]，但在实际测量过程中采样长度受测量仪器限制，难以达到理想的长度需求。而通过在同一区域增加采样次数、提高采样分辨率可提高地表粗糙度参数的测量精度[15,17,29]。表 2 分别统计了 2 种油菜直播机播种作业后的 2 组地表粗糙度信息。从表中可以看出，4 组测量数据中均方根高度和相关长度的均值与最值之间的差值明显，且每组测量数据均较为离散，相关长度的标准差最大达到 12.52 mm。由此可见，同一区域不同位置的粗糙度参数也存在较大波动，为使测量结果接近真实值，需达到一定的采样数量。



(a)　(b)　(c)　(d)

图 10　测量工况及测量现场

Fig. 10　Measuring conditions and site

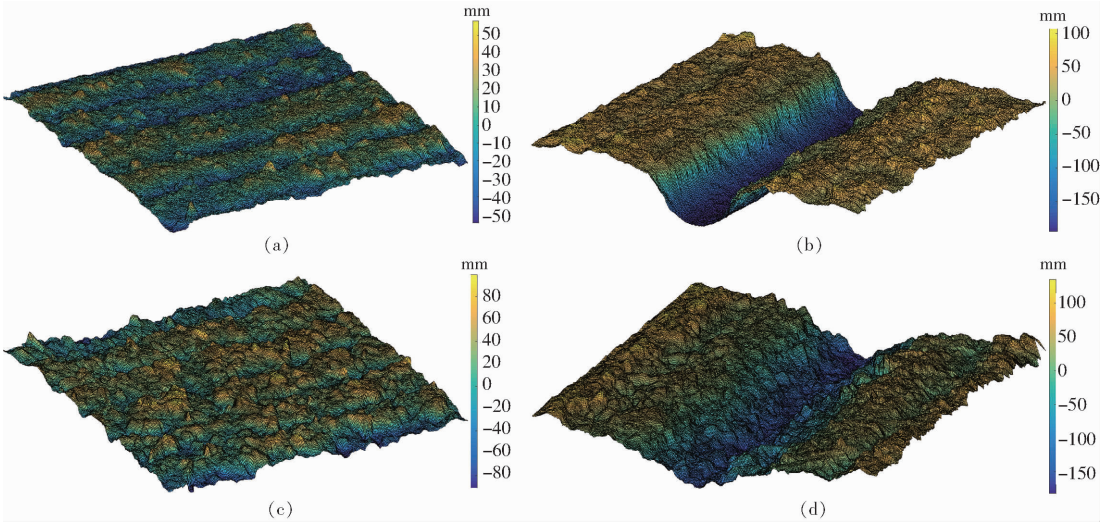


图 11 土壤表面三维数字化模型

Fig. 11 Three-dimensional digital models of soil surface

表 2 不同测量环境下均方根高度和相关长度统计结果

Tab. 2 Statistics results of RMS height and correlation length in different measuring environments mm

作业机具	测量序号	均方根高度			相关长度		
		均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值
油菜免耕精量直播机	1	16.82 ± 2.03	23.39	12.56	63.99 ± 9.93	79.13	49.90
	2	15.03 ± 2.55	22.16	11.80	61.47 ± 8.70	78.81	47.24
油菜精量联合直播机	1	26.32 ± 3.79	34.96	17.02	55.96 ± 12.52	91.95	26.69
	2	24.53 ± 3.24	33.78	14.26	57.14 ± 10.79	86.30	30.26

为研究采样次数对测量精度的影响,对测得的其中 2 组地表三维数据进行插值处理,分别得到 1001 组间距为 2 mm 的插值后地表高度截面数据,并从中等距抽取一定数量的插值数据进行地表粗糙度计算。如图 12 所示,区域 1 为油菜免耕精量直播机作业后的厢面粗糙度统计数据,区域 2 为油菜精量联合直播机作业后的厢面粗糙度统计数据,两个区域的均方根高度及相关长度测量值均随着采样次数的增加逐步趋于稳定,高于 16 次后,均方根高度数值变化趋缓,在达到 64 次之后,均方根高度和相关长度数值基本保持不变。由此可见,对于本次试验选择的测量地表,在 2 m 长的采样距离内,至少需要进行 64 次的等距采样才能得到稳定的地表粗糙度参数。若采用针板法等接触式测量方法在 2 m 范围内进行 64 次左右的等距采样,则会因耗费过多的精力和时间而难以实现。可见由于采样次数的限制,采用接触式测量方法测得的地表粗糙度参数与真实值之间的误差难以避免。而本文设计的测量装置在空间采样分辨率和采样效率方面均有较大提升,满足地表粗糙度参数准确获取对采样次数的统计要求。

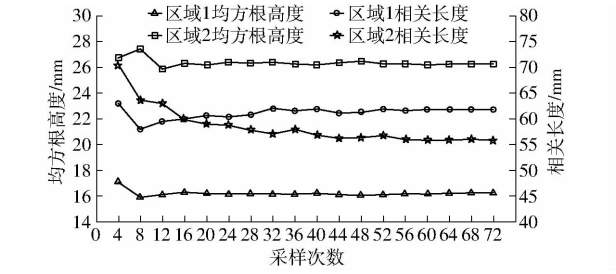


图 12 粗糙度参数变化曲线

Fig. 12 RMS height and correlation length varied curves

3.2 畦沟参数测量结果分析

根据获取的畦沟三维数据,对两种油菜机械直播作业后畦沟质量进行了分析,图 13 为两种油菜直播机开畦沟后的沟型断面,从图中可以看出,通过微地貌测量装置测得的具有较大高度变化的沟型断面能够真实反映地表高度变化特征,绘制的旋转开沟刀盘作业断面与刀盘作业回转轮廓吻合度高。从沟型断面可看出,旋转开沟刀盘作业后的沟型完整,下端呈半圆形,且多个截面叠加后重合度较高,而铧式犁开沟后由于土块回流导致沟底不平整,且各沟型截面的形状差异较大。

表 3 统计了 2 种油菜直播机的开沟作业效果数据,每种开沟部件选取 2 个行程,根据对不同样本数量沟型数据计算结果的误差影响分析,确定以每个测量区域等距选取 20 个测量断面作为沟型参数的计算数据。从计算结果可以看出,不同开畦沟部件

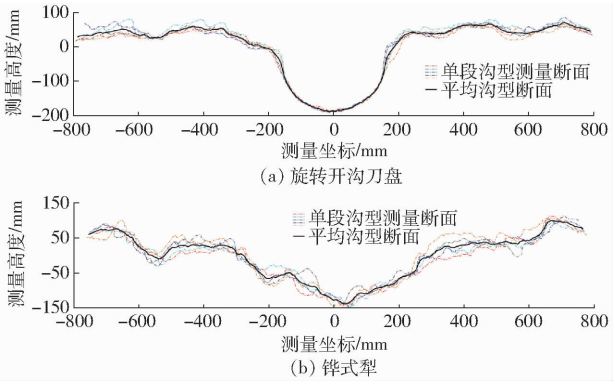


图 13　不同直播机作业后的畦沟断面

Fig. 13　Cross section of furrows after operation of different direct seeding machines

表 3　不同开沟部件的作业效果对比

Tab. 3　Comparison of operation results of different ditching components

开沟部件	测量序号	平均沟宽 $\overline{W}$/mm	沟宽稳定性系数 U_W/%	平均沟深 $\overline{H}$/mm	沟深稳定性系数 U_H/%	沟型断面面积 $\overline{S}$/mm²
旋转开沟刀盘	1	356.6	95.3	181.1	93.8	48 283
	2	348.8	94.7	185.5	95.4	46 982
铧式犁	1	378.7	90.1	92.4	87.9	17 391
	2	368.8	91.3	106.3	89.3	20 355

由于结构形式和工作原理的不同，使开畦沟效果存在一定的差异，沟宽和沟深稳定性系数可以定量评价开畦沟部件作业过程的稳定性，而沟型断面的面积参数可以评估畦沟的排水能力。畦沟参数的准确量化可为油菜直播机开沟部件的优化改进和作业参数调整提供评价依据。

4　结论

（1）设计了一套地表微地貌测量装置，其典型分辨率在激光雷达扫描方向为 3.8 ~ 10 mm，垂直扫描方向可在毫米精度范围内任意设置，测量区域覆盖面积典型值为 6.8 m^2，最快单次测量时间低于 2.5 min。该装置适用于农业耕种作业后厢面和垄沟等微地貌特征提取，在测量效率和测量地表适应性方面比现有测量方法具有明显优势。

（2）通过分析测量误差来源，建立了系统误差补偿模型，在 15 次均值滤波的条件下，该装置测量最大绝对误差为 2.7 mm，最大平均绝对误差为0.9 mm，符合农业耕种作业后地表微地貌测量的精度要求。

（3）进行了油菜机械直播后地表微地貌测量试验，试验结果表明，利用 Matlab 生成的地表三维模型可以精确重构原有地表微地貌特征；测量数据统计结果表明，在固定区域内均方根高度和相关长度测量值分别需要进行 16 次和 64 次的等距采样才能使测量结果趋于稳定值，而畦沟相关评价参数也需要多组样本计算才具有统计意义。本研究可为农业耕种作业后厢面作业质量和开沟起垄效果评价提供准确的计算数据。

参　考　文　献

[1] HELMING K, ROMKENS M J M, PRASAD S N. Surface roughness related processes of runoff and soil loss: a flume study[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(1):243 - 250.

[2] VIDAL V E, MIRANDA J G V, PAZ G A. Characterizing anisotropy and heterogeneity of soil surface microtopography using fractal models[J]. Ecological Modelling, 2005, 182(3 - 4):337 - 353.

[3] TACONET O, CIRALETTI V. Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(1):64 - 76.

[4] MORENO R G, ALVAREZ M C D, TARQUIS A A, et al. Tillage and soil type effects on soil surface roughness at semiarid climatic conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1):35 - 44.

[5] MORENO R G, ALVAREZ M C D, REQUEJO A S, et al. Multiscaling analysis of soil roughness variability[J]. Geoderma, 2010, 160(1):22 - 30.

[6] 刘晓鹏，肖文立，马磊，等. 油菜联合直播机组合式船型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, MA Lei, 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 = 20150108&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.008. (in Chinese)

[7] 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 Weimin, 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)

[8] SNAPIR B, HOBBS S, WAINE T W. Roughness measurements over an agricultural soil surface with structure from motion[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 96:210 - 223.

[9] MORENO R G, REQUEJO A S, ALONSO A M T, et al. Shadow analysis: a method for measuring soil surface roughness[J]. Geoderma, 2008, 146(1):201 - 208.

[10] HAUBROCK S N, KUHNERT M, CHABRILLAT S, et al. Spatiotemporal variations of soil surface roughness from in-situ laser scanning[J]. CATENA, 2009, 79(2):128 - 139.

[11] OELEZ M L, SABATIER J M, RASPET R. Roughness measurements of soil surfaces by acoustic backscatter[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(1):241 - 250.

[12] 江冲亚,方红亮,魏珊珊. 地表粗糙度参数化研究综述[J]. 地球科学进展,2012,27(3):292 - 303.
JIANG Chongya, FANG Hongliang, WEI Shanshan. Review of land surface roughness parameterization study[J]. Advances in Earth Sciences, 2012,27(3):292 - 303. (in Chinese)

[13] GILLIOT J M, VAUDOUR E, MICHELIN J. Soil surface roughness measurement: a new fully automatic photogrammetric approach applied to agricultural bare fields[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2017, 134:63 - 78.

[14] 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)

[15] 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)

[16] JENSEN T, GREEN O, MUNKHOLM L J, et al. Fourier and granulometry methods on 3D images of soil surfaces for evaluating soil aggregate size distribution[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2016, 32(5):609 - 615.

[17] ZHENG X M, ZHAO K, LI X J, et al. Improvements in farmland surface roughness measurement by employing a new laser scanner[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 143:137 - 144.

[18] JENSEN T, KARSTOFT H, GREEN O, et al. Assessing the effect of the seedbed cultivator leveling tines on soil surface properties using laser range scanners[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 167:54 - 60.

[19] 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)

[20] 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)

[21] 刘洁,杨晓菊,廖宜涛,等. 基于线结构激光传感器的土壤表面粗糙度测量方法研究[J]. 农业工程学报,2019,35(3):134 - 140.
LIU Jie, YANG Xiaoju, LIAO Yitao, et al. Study on soil surface roughness measuring method based on line structured light sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 134 - 140. (in Chinese)

[22] 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 and Tillage Research, 2016, 161:19 - 30.

[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 scanner for characterizing soil surface roughness[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(1):70 - 76. (in Chinese)

[24] NYQUIST H. Certain topics in telegraph transmission theory[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1928, 47(2): 617 - 644.

[25] 宋清玉,郭宝峰,李建,等. 伺服压力机柔性加减速控制算法[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(6):269 - 273.
SONG Qingyu, GUO Baofeng, LI Jian, et al. Flexible acceleration and deceleration control algorithm for servo press[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(6):269 - 273. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130647&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.047. (in Chinese)

[26] 李小虎,王鹤,许家林. 基于新型加减速曲线和实时控制方案的步进电机运行平稳性及噪声研究[J]. 中国机械工程,2012,23(16):1907 - 1911.
LI Xiaohu, WANG He, XU Jialin. Research on operation smoothness and noise of stepping motor based on new type acceleration/deceleration curve and real-time control scheme[J]. China Mechanical Engineering, 2012,23(16):1907 - 1911. (in Chinese)

[27] 田波平,廖庆喜,黄海东,等. 2BFQ - 6 型油菜精量联合直播机的设计[J]. 农业机械学报,2008,39(10):211 - 213.
TIAN Boping, LIAO Qingxi, HUANG Haidong, et al. Design of 2BFQ - 6 precision planter for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10):211 - 213. (in Chinese)

[28] 华中农业大学. 稻茬田油菜免耕精量直播机:201810178346.9[P]. 2018 - 11 - 02.

[29] LU Z X, NAN C, PERDOK U D, et al. Characterisation of soil profile roughness[J]. Biosystems Engineering,2005,91(3):369 - 377.