

基于无人机 LiDAR 的农田平整地势测量方法

金志坤^{1,2} 景云鹏^{1,2} 刘刚^{1,2}

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了提高农田平整作业中地势测量速度与精度,本文提出一种基于无人机 LiDAR 的农田平整地势测量方法。通过无人机搭载 LiDAR 测量系统,获取高精度农田地势点云数据。对采集的点云数据进行预处理,通过直通滤波方法去除 z 轴方向上的大量噪点。使用渐进式形态学滤波算法,分割农田地面点与非地面点。在保留主要农田地势信息特征的基础上,使用基于 VoxelGrid 滤波器的农田地势点云精简方法对农田地势点云数据进行精简。在 4 块不同面积的农田中,分别使用无人机 LiDAR 测量方式与全球导航卫星系统(GNSS)测量方式进行地势测量试验,试验结果表明,与 GNSS 测量真值的平整度相比,其准确度分别为 94.681%、91.364%、90.588% 和 90.287%,与 GNSS 测量真值的最大高程差相比,其准确度分别为 99.391%、98.167%、97.025% 和 98.776%,与 GNSS 测量真值的高差分布列相比,其准确度分别为 99.307%、97.914%、98.673% 和 95.110%。本文提出的基于无人机 LiDAR 的农田地势测量方法可快速精准测量农田地势信息,可为下一步农田平整作业提供数据支持。

关键词: 农田平整; 无人机 LiDAR; 点云; 地势测量

中图分类号: S281; S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0051-07

Farmland Leveling Topography Measurement Method Based on UAV LiDAR

JIN Zhikun^{1,2} JING Yunpeng^{1,2} LIU Gang^{1,2}

(1. Key Laboratory for Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the speed and accuracy of terrain measurement in farmland leveling operation, a method of farmland leveling terrain measurement was proposed based on UAV LiDAR. Firstly, high-precision farmland terrain point cloud data was obtained by using LiDAR measurement system equipped with UAV. After preprocessing the collected point cloud data, a large number of noise points along the z -axis were removed by direct filtering. Then, the progressive morphological filtering algorithm was used to segment farmland surface points and non surface points. Finally, on the basis of retaining the main farmland terrain information features, the farmland terrain point cloud reduction method based on VoxelGrid filter was used to simplify the farmland terrain point cloud data. The results showed that compared with the flatness of GNSS, the accuracy was 94.681%, 91.364%, 90.588% and 90.287% respectively; compared with the maximum elevation difference of GNSS, the accuracy was 99.391%, 98.167%, 97.025% and 98.776% respectively. Compared with the height difference distribution of GNSS, the accuracy was 99.307%, 97.914%, 98.673% and 95.110% respectively. The farmland terrain measurement method proposed based on UAV LiDAR can quickly and accurately measure the farmland terrain information, and provide data support for the next farmland leveling operation.

Key words: farmland leveling; UAV LiDAR; point cloud; topographic survey

收稿日期: 2021-07-02 修回日期: 2021-08-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701100-2017YFD0701105)

作者简介: 金志坤(1997—),男,硕士生,主要从事 GNSS 农田平整及无人机 LiDAR 地势测量技术研究,E-mail: 1456167036@qq.com

通信作者: 刘刚(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事精细农业及其支持技术研究,E-mail: pac@cau.edu.cn

0 引言

农田平整可以改变农田表面微地形,提高农田表面灌溉水分的均匀程度和灌溉质量,实现节水增产^[1-2]。农田地势测量是 GNSS 农田平整作业的基础,不仅仅是用于农田平整前的土方量估计、待平整地块分区和自动平整路径规划,还可用于农田平整后平整效果的评价分析^[3]。李宏鹏等^[4]提出一种农田地形快速测量方法,基于 GNSS 差分定位技术获取农田地势数据,采用均值滤波和拉依达准则对数据误差进行处理,计算农田面积和挖填土方量等农田基本信息,实时显示测量轨迹。夏友祥等^[5]针对现有农田平整技术中农田地势信息分析方法比较简单等问题,结合农田平整作业的实际需求,提出基于 GNSS 农田平整的三维地势测量方法,旨在提高农田三维地势分布成图精度,为后续路径规划自动平整提供有效的数据支持。景云鹏等^[6]采用 GNSS 双天线定位定向结合 AHRS 技术获取农田三维地形信息,提高数据获取精度,分析地势信息采集过程中的误差来源,提出一种将农田地势信息与误差信息分离的误差处理方法,对数据进行分析校正,提高了数据采集的稳定性,得到了更高精度的农田地势数据。目前农田平整作业过程中的地势测量方法,机载 GNSS 测量过程中农机和铲车自身振动会引发测量误差,而且当前机载 GNSS 测量方式通常按照一定路线在农田中进行驾驶测量,不仅耗费时间长,所得数据也不够准确。

近年来,无人机激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)技术在农业生产中开始得到广泛应用^[7]。无人机 LiDAR 技术可以在空中获取多维度和高精度的农田信息,克服在地面上测量速度慢、易受田间作物影响等问题^[8]。汤伏全等^[9]利用无人机 LiDAR 测量技术对矿区进行扫描,可以快速获取矿区的三维空间模型。高兴国等^[10]基于海岸动态变化的研究现状和传统监测模式,提出了借助无人机搭载 LiDAR 系统的监测方法,阐述了其基本原理和监测流程,并以海阳万米沙滩海岸为例,获取了海岸带区域数字高程模型(Digital elevation model, DEM),从固定地面特征点和岸滩剖面两方面进行了精度验证。孙权等^[11]提出了一种基于低空无人机 LiDAR 技术沥青路面病害监测方法,采用无人机平台搭载 LiDAR 设备,采集道路的点云数据,垂直方向点云高程精度为 0.5 ~ 1.5 cm。JEMERMY 等^[12]通过无人机搭载激光雷达监测澳大利亚昆士兰州布里比岛的海岸沙丘地貌变化,证明了无人机激光雷达适合于在微空间和时间尺度上探测和评估

海岸地貌的变化。杜蒙蒙等^[13]提出了一种基于多旋翼无人机与激光测距技术的农田地形测绘方法,通过无人机搭载激光测距序列,测量农田地形。当前应用无人机 LiDAR 技术进行农田地势测量研究较少,且搭载 LiDAR 设备可快速扫描整个农田地势面,相较于搭载激光测距模块,数据量更多,精度更高。

本文通过无人机 LiDAR 技术实现农田三维地势的快速精确测量,研究农田地势点云数据处理方法,得到更为准确的农田三维地形图,为后续农田平整作业提供准确的数据支持。

1 材料与方法

1.1 无人机 LiDAR 地势测量

无人机 LiDAR 测量系统主要由无人机平台、LiDAR 测量系统、GNSS 定位定向系统、协调控制模块以及数据处理模块 5 部分构成^[14]。无人机起降迅速、操作方便、投入成本低,可以进行测区内数据快速获取。因此在农田地势测量中可通过无人机平台搭载 LiDAR 测量系统实现农田地势数据快速获取。

本文采用的无人机 LiDAR 测量系统为 LiAir 220 型无人机 LiDAR 测量系统,如图 1 所示,该测量系统主要由大疆 DJI M600 PRO 型无人机平台和 LiDAR 测量系统组成,DJI M600 PRO 型无人机平台最大起飞质量可达 15.5 kg,搭载专业级飞行控制系统,可有效保障稳定的飞行表现和精准操控。LiDAR 测量系统使用 40 线激光雷达,可对水平方向进行 360°扫描。LiAir 220 型无人机 LiDAR 测量系统可实时采集高精度农田地势点云数据,测距可达 200 m,飞行安全更有保障,高点密度,同样环境下,地物呈现更清晰^[15]。设备扫描过程中,可实时测量地物坐标、距离及高程。



图 1 LiAir 220 型无人机 LiDAR 测量系统

Fig. 1 LiDAR measurement system of LiAir 220 UAV

GNSS 定位定向系统不仅能够提供 LiDAR 测量

系统激光发射点的空间坐标,还可计算出无人机飞行时的导航数据^[16]。无人机 LiDAR 测量系统通过结合 GNSS 定位数据,获取测量点的空间位置信息。惯性导航系统可对 GPS 的信号中断情况进行补偿,从而获取高精度的定位定向数据^[17]。无人机 LiDAR 测量系统点云数据生成过程涉及多个坐标系之间的转换,结合无人机 IMU 姿态信息和无人机 GNSS 定位信息将地面反射点的三维坐标进行解算和坐标转换^[18]。其中坐标解算示意图如图 2 所示。

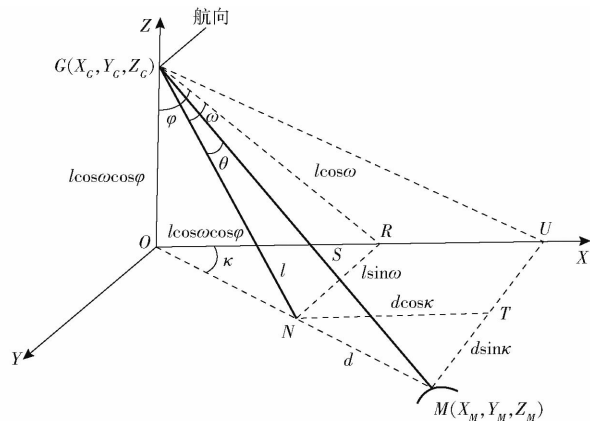


图 2 无人机 LiDAR 测量系统坐标解算示意图

Fig. 2 Schematic of coordinate solution for LiDAR measurement system of UAV

图 2 中点 G 为 LiDAR 测量系统的投影中心,位置信息由 GNSS 定位定向系统提供; φ 、 ω 、 κ 分别代表俯仰角、翻滚角及偏航角;点 M 表示需要求解的目标位置点,基于无人机 LiDAR 测量系统坐标解算示意图进行目标点位置解算的计算公式为

$$\begin{cases} X_M = X_G + \sin\varphi\cos\omega\left(d\cos\theta - \frac{d\sin\theta}{\sqrt{1-b^2}}b\right) + \cos\kappa\frac{d\sin\theta}{\sqrt{1-b^2}} \\ Y_M = Y_G + \sin\omega\left(d\cos\theta - \frac{d\sin\theta}{\sqrt{1-b^2}}b\right) + \sin\kappa\frac{d\sin\theta}{\sqrt{1-b^2}} \\ Z_M = Z_G + \cos\varphi\cos\omega\left(d\cos\theta - \frac{d\sin\theta}{\sqrt{1-b^2}}b\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $b = \sin\varphi\cos\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\kappa$

由式(1)即可获取目标点 M 的三维信息。

在农田三维地势测量过程中,无人机 LiDAR 测量系统可以采集高精度的农田三维地势信息。为了保证无人机 LiDAR 数据的可用性,根据试验目的、测量面积和无人机性能等需求,规划无人机飞行区域并设计航线。此外,多旋翼无人机具有良好的飞行能力,稳定性能良好,可在任意高度,较低的航速下进行飞行试验,其中采用无人机 LiDAR 测量系统进行农田地势测量作业的总体流程如图 3 所示。

1.2 农田地势点云数据处理

无人机 LiDAR 测量系统采集多组农田地势点

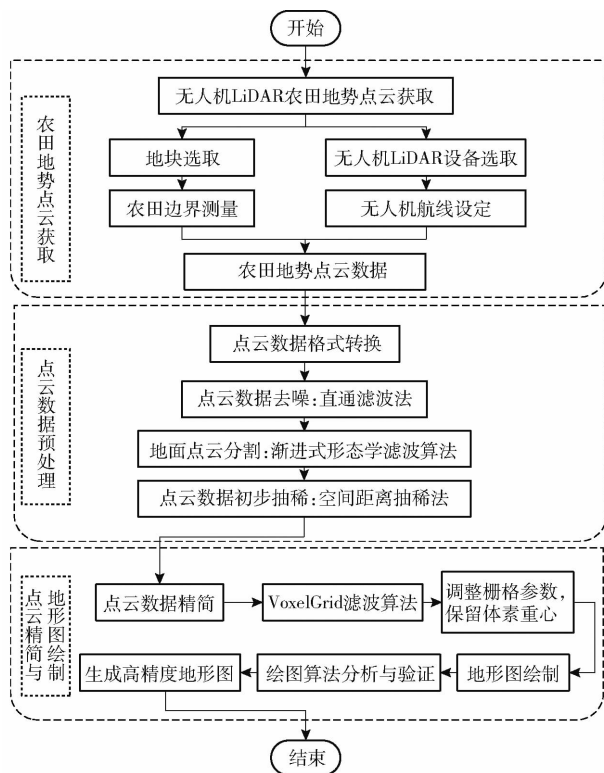


图 3 无人机 LiDAR 测量系统测量作业流程图

Fig. 3 Flow chart of LiDAR measurement system for UAV

云数据,原始点云数据包括测量点的三维空间坐标、点云数量等属性。所获取的原始农田地势点云数据空间坐标采用质心坐标系,且原始点云数据中存在大量噪声,不能直接进行农田三维地势表面模型的构建^[19]。结合图 3 可知,农田地势点云主要处理流程包括:农田地势点云数据去噪、农田地面点云分割、农田地势点云精简。

1.2.1 农田地势点云去噪与分割

在无人机 LiDAR 系统测量农田地势点云数据过程中,系统误差和外界环境引起的随机误差会导致采集的点云数据中存在大量的噪点。噪点无法消除,只能通过后续的去噪处理减小影响^[20]。如图 4 所示,可以看到采集的农田地势点云数据中存在大量离散噪点,此类噪点处于地面点下方,需要对其进行剔除,才能对点云数据进行下一步处理。

对于有一定空间分布特征的点云数据,可使用直通滤波器,确定点云数据在指定方向上的范围,快

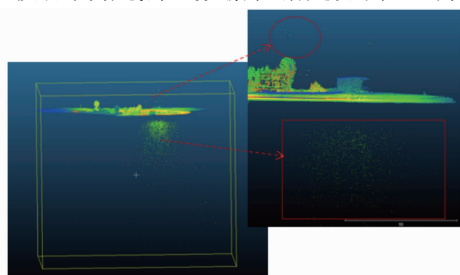


图 4 点云数据及噪声点

Fig. 4 Point cloud data and noise points

速剔除离群噪声点^[21]。通过确定点云数据 z 轴方向上的阈值,使用直通滤波方法快速去除农田地势点云数据中的离群噪声点。

无人机 LiDAR 测量系统采集到的点云数据主要有树木、杂草以及大片裸露农田。通过渐进式形态学滤波算法对点云数据进行处理,分离点云数据中的地面点和非地面点。首先找到原始点云中 x 、 y 的边界,即 x 、 y 的最大值和最小值,然后对点云数据进行网格化处理,通过线性增长的方式,计算一系列滤波窗口。最后,通过逐渐变化的滤波窗口,将采集到的农田地势点云数据中的农田地面点和非地面点逐渐进行分离。

1.2.2 农田地势点云精简

现有的 GNSS 农田平整系统核心处理平台很难处理几十万的点云数据,无法进行地块划分以及路径规划,因此需要继续对点云数据进行精简,利用基于 VoxelGrid 滤波器的农田地势点云精简方法对农田地势点云数据进行精简,可以在保留农田地势特征的基础上,大大减少点云数据量。

基于 VoxelGrid 滤波器的农田地势点云精简方法实现步骤如下:

(1)根据农田地势点云数据,求取点云数据的最小包围盒,此时点云数据的最小包围盒的体积

$$V = l_x l_y l_z \tag{2}$$

式中 l_x ——最小包围盒沿着 x 轴方向的边长
 l_y ——最小包围盒沿着 y 轴方向的边长
 l_z ——最小包围盒沿着 z 轴方向的边长

对最小包围盒的边长进行适当的调整,确保所有点都被包含在最小包围盒内,不会出现在包围盒边框上,此时最小包围盒边长分别为

$$\begin{cases} l_x = x_{\max} - x_{\min} + l \\ l_y = y_{\max} - y_{\min} + l \\ l_z = z_{\max} - z_{\min} + l \end{cases} \tag{3}$$

式中 l ——对最小包围盒边长增加的距离
(2)设置体素栅格边长 l_s ,将农田地势点云数据最小包围盒 x 、 y 、 z 坐标轴均等划分为 n_x 、 n_y 、 n_z 份,此时体素栅格总数 $s = n_x n_y n_z$ 。此时最小包围盒 x 、 y 、 z 坐标轴方向上均等划分的份数为

$$\begin{cases} n_x = \left\lfloor \frac{l_x}{l_s} \right\rfloor \\ n_y = \left\lfloor \frac{l_y}{l_s} \right\rfloor \\ n_z = \left\lfloor \frac{l_z}{l_s} \right\rfloor \end{cases} \tag{4}$$

式中 $\lfloor \cdot \rfloor$ ——向下取整运算符号
(3)计算每个体素栅格中的重心为

$$\begin{cases} O_x = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m} \\ O_y = \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{m} \\ O_z = \frac{\sum_{i=1}^m z_i}{m} \end{cases} \tag{5}$$

式中 m ——体素栅格内的点云数据个数
(4)保留每个三维体素栅格的重心,来近似表征体素栅格中的其他点,以此达到农田地势点云精简的目的。

2 试验与结果分析

2.1 农田地势点云数据处理试验

为验证本文提出的农田地势点云数据处理方法,选取无人机 LiDAR 测量系统采集到的点云数据进行试验验证。通过直通滤波方法,对 z 轴方向阈值进行调整,选取阈值为 32 ~ 50 m,经过试验验证,点云数据中 z 轴方向上的大量噪点能有效去除,去噪效果如图 5 所示。

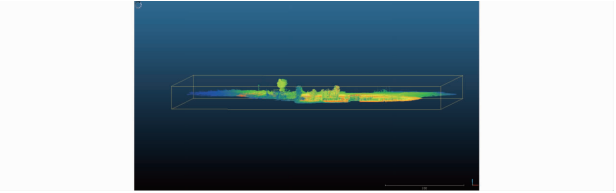


图 5 去噪效果图
Fig.5 Manic effect picture

通过渐进式形态学滤波算法对点云数据进行处理,逐渐分离点云数据中的地面点和非地面点,可有效去除系统获取的非地面点,得到目标农田地势点云数据,农田地势点云地面分割结果如图 6 所示。

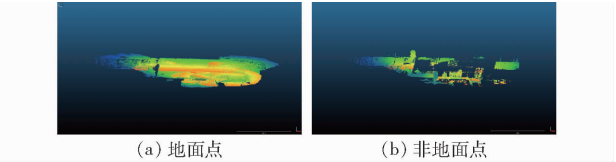


图 6 渐进式形态学滤波农田地势点云分割结果
Fig.6 Segmentation results of farmland terrain point cloud based on progressive morphological filtering

选取经过去噪与分割处理的目标地块 A 的点云数据,如图 7 所示。此时目标地块 A 的点云数为 576 803 个,高程均值为 32.592 m,高程标准差为 0.124 m。

通过修改 VoxelGrid 滤波器体素栅格参数,选择一个最优的点云精简尺度,对农田地势点云数据

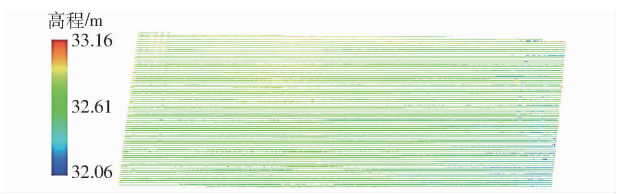


图7 目标地块 A 的点云效果图

Fig.7 Rendering of point cloud of target plot A

进行精简,图 8 中分别为体素栅格边长设为 0.05、0.1、0.2、0.25、0.3、0.5 m 的情况下,目标地块点云的精简效果。结合表 1 可知,当栅格参数逐渐增大

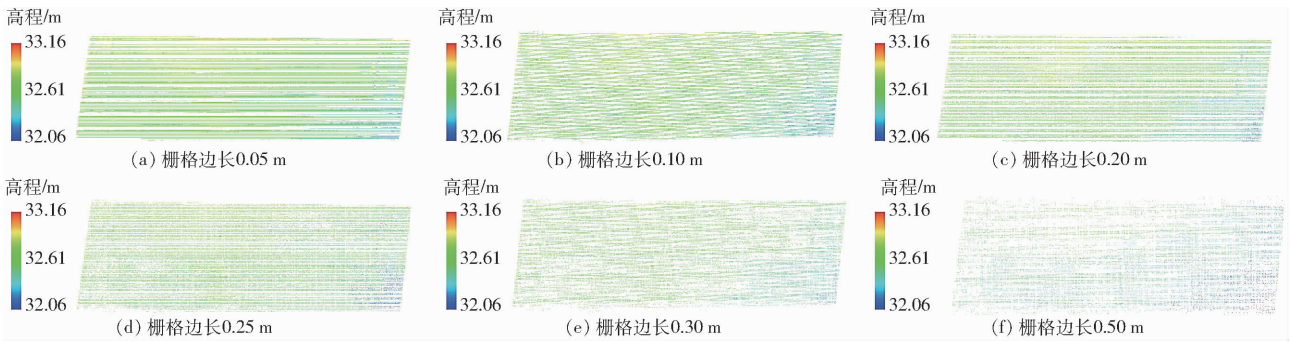


图 8 不同栅格边长对点云精简结果的影响

Fig.8 Influence of different grid edge lengths on point cloud reduction

表 1 精简效果对比

Tab.1 Contrast of reduction effect

栅格边长/ m	点云数	精简率/ %	高程均值/ m	高程标 准差/m
0.05	358 449	62.144	32.588	0.129
0.10	209 986	36.405	32.585	0.127
0.20	81 086	14.058	32.588	0.125
0.25	61 863	10.725	32.590	0.128
0.30	46 093	7.991	32.603	0.129
0.50	25 892	4.489	32.560	0.108

2.2 无人机 LiDAR 地势测量精度验证试验

2.2.1 无人机 LiDAR 地势测量试验

为验证无人机 LiDAR 测量系统的测量精度,选取合适地块,通过无人机 LiDAR 测量方式测量农田地势。试验场地如图 9 所示,地块 A 旋耕区域面积 111 m×19.5 m,未旋耕区域面积 111 m×16.5 m。地块 B 与地块 C 全部进行旋耕,面积分别为 113 m×60 m、90 m×60 m。



图 9 试验场地

Fig.9 Test sites

无人机 LiDAR 农田地势测量试验流程如下:

(1) 选定目标农田,对农田面积进行测量,划定

时,点云数量逐渐减少,当栅格边长增大到 0.3 ~ 0.5 m 时,点云数据边界开始出现离散点,数据发生偏差。当栅格边长为 0.25 m 时,点云精简率为 10.725%,此时点云图像分布均匀,无明显离散点,且点云数据量较小。同时,点云数据高程均值及高程标准差同精简前的原始点云数据准确性分别为 99.99% 和 96.774%。因此,考虑 GNSS 农田平整作业中数据处理平台的运算速度,选择栅格边长为 0.25 m 对点云数据进行精简,可在保证农田地势点云数据特征精度的同时,大大减少点云数据量。

本次无人机 LiDAR 测量试验的测区范围。在无人机 LiDAR 测量系统配套的无人机飞行航线规划软件中,找到目标农田以及测区位置,并进行航线的设定,同时设置对无人机飞行高度、飞行速度等参数。

(2) 建立无人机 LiDAR 与组合导航测量单元的通讯,无人机进入预设航线后开始无人机测量作业。全程无人机 LiDAR 测量系统进行激光扫描并记录数据。扫描结束后,停止采集 LiDAR 数据,将无人机 LiDAR 测量系统静置 3 min,停止记录组合导航数据,保存数据。

(3) 航飞过程结束后应先对点云数据进行现场质量检查,其中点云数据的现场检查通常可通过相关软件进行快速检查。如果检查时发现农田地势点云数据存在严重的缺失,需进行重新测量作业直至获取符合要求的农田地势点云数据。图 10 为无人机 LiDAR 测量系统采集的农田点云数据效果图。



图 10 无人机 LiDAR 测量试验结果

Fig.10 LiDAR measurement test results of UAV

2.2.2 农田地势测量试验

为验证无人机 LiDAR 测量系统的测量精度,通过 GNSS 测量方式对测量地块进行重复测量,采集

农地势信息。农田地势信息采集过程如图 11 所示。



图 11 农田真实地势信息采集过程

Fig. 11 Collection process of real terrain information of farmland

农田真实地势信息测量试验步骤如下：①在测量之前,首先对农田边界进行测量,并做好标记。②架设 GNSS 基站设备,标定此次测量作业原点,设置 GNSS 农田测量程序参数。③分别对地块 A 旋耕部分、地块 A 未旋耕部分、地块 B 以及地块 C 进行真实地势信息测量。测量过程中,按照“蛇形”路线,尽可能地遍历整块农田,并记录测量数据。农田真实地势信息采集轨迹如图 12 所示。

2.2.3 农田地势测量试验结果与分析

将采集的农田地势点云数据进行处理,在保留农田地势信息特征的基础上,降低点云数据量,最后将不同测量方式得到的地势信息通过反距离加权插值法绘制农田三维地形图,结果如图 13 所示。采用地势测量方法评价标准^[22-24]对测量结果进行评价,GNSS 测量方法和无人机 LiDAR 测量得到的农田地势结果如表 2 所示。

由图 13 和表 2 可知,在 4 块不同面积的农田中,使用无人机 LiDAR 测量方式与 GNSS 测量方式得到的农田三维地形图其地势变化基本一致。与 GNSS 测量真值的平整度相比,其准确度分别为 94.681%、91.364%、90.588% 和 90.287%,与 GNSS

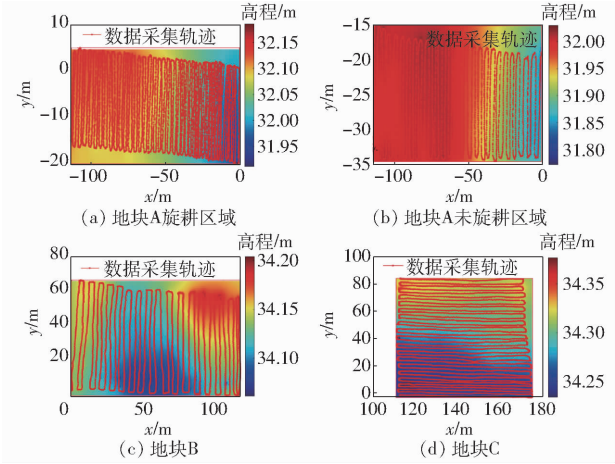


图 12 农田地势信息采集轨迹

Fig. 12 Real terrain information collection track of farmland

测量真值的最大高程差相比,其准确度分别为 99.391%、98.167%、97.025% 和 98.776%,与 GNSS 测量真值的高差分布列相比,其准确度分别为 99.307%、97.914%、98.673% 和 95.110%。试验结果表明,使用基于无人机 LiDAR 的农田地势测量方法所采集的农田地势信息,满足农田平整系统的数据精度要求。

3 结论

(1)提出了基于无人机 LiDAR 的农田地势点云获取与预处理方法。通过无人机 LiDAR 对农田地势进行测量,获取农田地势点云数据;对农田地势点云数据进行预处理,提出的点云数据的预处理方法有效提高了点云的质量。

(2)提出了基于无人机 LiDAR 的农田地势点云数据的精简方法。以预处理后的目标地块点云数据为研究对象,结合 GNSS 农田平整数据需求,提出了

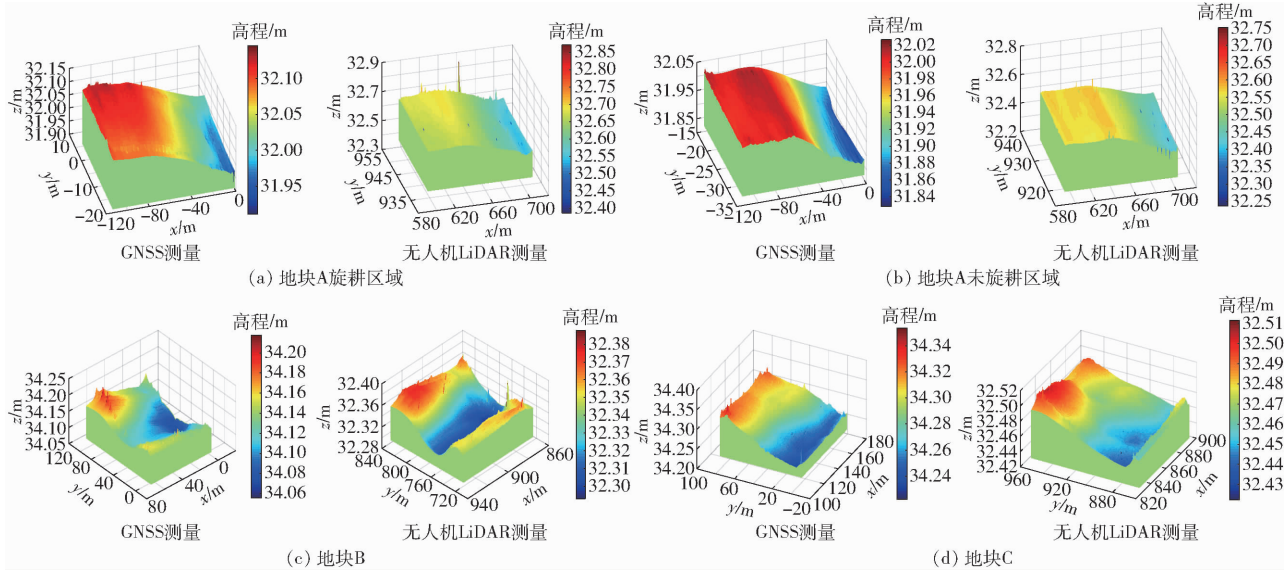


图 13 GNSS 和无人机 LiDAR 农田地势测量结果对比

Fig. 13 Comparison of farmland topography measurement results between GNSS and LiDAR

表 2 GNSS 和无人机 LiDAR 测量农田的地势信息
Tab.2 Terrain information of farmland measured
by GNSS and LiDAR

测量方式	地块	平整 度/m	最大高 程差/m	高差分布列 (<0.05 m)/%
GNSS	地块 A 未旋耕区域	0.094	0.492	63.779
	地块 A 旋耕区域	0.104	0.709	65.202
	地块 B	0.085	0.605	70.325
	地块 C	0.072	0.490	72.747
无人机 LiDAR	地块 A 未旋耕区域	0.089	0.489	64.221
	地块 A 旋耕区域	0.113	0.696	63.842
	地块 B	0.093	0.587	69.392
	地块 C	0.079	0.496	76.304

基于 VoxelGrid 滤波器的农田地势点云精简方法,通

过修改体素栅格参数,改进 VoxelGrid 滤波算法,选择一个最优的点云精简尺度,保留体素栅格重心点来近似表征体素栅格中的其它点,大大减少了点云数量,同时很好地保留了农田地势信息特征。

(3)利用 GNSS 测量方式采集地势信息作为地势信息真值数据,与无人机 LiDAR 测量系统采集农田地势数据进行对比试验,试验结果表明,提出的基于无人机 LiDAR 的农田平整地势测量方法,与 GNSS 测量的真实地势数据相比,在 4 块不同面积的农田中其平整度、最大高程差和高差分布列准确度均值分别为 91.730%、98.340% 和 97.751%,满足农田平整数据精度需求,为农田地势快速精准测量提供了新方法,可为后续 GNSS 农田平整提供可靠的数据支持。

参 考 文 献

[1] 张发顺. 农田激光平整效果评价方法与试验研究[D]. 泰安:山东农业大学,2011.
ZHANG Fashun. Evaluation method and experimental study on farmland laser leveling effect [D]. Taian;Shandong Agricultural University, 2011. (in Chinese)

[2] 李益农,许迪,李福祥,等. GPS 在农田土地平整地形测量中应用的初步研究[J]. 农业工程学报,2005,21(1): 66 – 70.
LI Yinong, XU Di, LI Fuxiang, et al. GPS application in agricultural land levelling survey [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 66 – 70. (in Chinese)

[3] 夏友祥. 基于 GNSS 农田平整的三维地势测量技术研究[D]. 北京:中国农业大学, 2018.
XIA Youxiang. Research on improving the accuracy of 3D terrain measurement for GNSS-controlled land leveling system [D]. Beijing:China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[4] 李宏鹏,牛东岭,王岩,等. 基于 RTK – GNSS 定位的农田地形快速测量技术[J]. 中国农业大学学报,2014,19(6):188 – 194.
LI Hongpeng, NIU Dongling, WANG Yan, et al. Rapid survey technology of farmland terrain based on RTK – GNSS [J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(6): 188 – 194. (in Chinese)

[5] 夏友祥,刘刚,康熙,等. 基于 GNSS 的农田平整定位精度优化与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(增刊):40 – 44.
XIA Youxiang, LIU Gang, KANG Xi, et al. Optimization and analysis of location accuracy based on GNSS-controlled precise land leveling system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 40 – 44. (in Chinese)

[6] 景云鹏,刘刚,金志坤. GNSS 双天线结合 AHRS 测量农田地形[J]. 农业工程学报,2019,35(21):166 – 174.
JING Yunpeng, LIU Gang, JIN Zhikun. Topographic survey of farmland based on GNSS dual antenna combined with AHRS [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21):166 – 174. (in Chinese)

[7] 纪景纯,赵原,邹晓娟,等. 无人机遥感在农田信息监测中的应用进展[J]. 土壤学报,2019,56(4):773 – 784.
JI Jingchun, ZHAO Yuan, ZOU Xiaojuan, et al. Application progress of UAV remote sensing in farmland to monitoring of farmlands [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(4): 773 – 784. (in Chinese)

[8] 苏瑞东. 无人机在现代农业中的应用综述[J]. 江苏农业科学,2019,47(21):75 – 79.
SU Ruidong. Review of UAV application in modern agriculture [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(21): 75 – 79. (in Chinese)

[9] 汤伏全,芦家欣,韦书平,等. 基于无人机 LiDAR 的榆神矿区采煤沉陷建模方法改进[J]. 煤炭学报,2020,45(7):2655 – 2666.
TANG Fuquan, LU Jiaxin, WEI Shuping, et al. Improvement of mining subsidence modeling method in Yushen mining area based on UAV LiDAR [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2655 – 2666. (in Chinese)

[10] 高兴国,田梓文,麻德明,等. 无人机 LiDAR 系统在砂质海岸监测中的应用[J]. 海洋环境科学,2020,39(3):468 – 472.
GAO Xingguo, TIAN Ziwen, MA Deming, et al. Application of UAV LiDAR system in sandy coast monitoring [J]. Marine Environmental Science, 2020, 39(3): 468 – 472. (in Chinese)

[11] 孙权,程俊毅,田绍鸿,等. 基于无人机 LiDAR 数据多尺度特征的沥青路面病害提取方法[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2019,37(1):1 – 11.
SUN Quan, CHENG Junyi, TIAN Shaohong, et al. Asphalt pavement disease extraction method based on multi-scale features of UAV LiDAR data [J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2019, 37(1): 1 – 11. (in Chinese)

[12] JEMERMY S, STUART P, CHRIS R, et al. Observing geomorphological change on an evolving coastal sand dune using SLAM-based UAV LiDAR [J]. Remote Sensing in Earth Systems Sciences, 2019, 2(Supp.1): 273 – 291.

[13] 杜蒙蒙,刘颖超,姬江涛,等. 基于无人机与激光测距技术的农田地形测绘[J]. 农业工程学报,2020,36(22):60 – 67.
DU Mengmeng, LIU Yingchao, JI Jiangtao, et al. Farmland topographic mapping based on UAV and LiDAR technology [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(22): 60 – 67. (in Chinese)

- 2012,12(2):1473.
- [16] YANG L, ZHANG L, DONG H, et al. Evaluating and improving the depth accuracy of Kinect v2 for windows[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(8):4275–4285.
- [17] ELISE L, TANIA L. Assessment and calibration of a RGB-D camera (Kinect v2 sensor) towards a potential use for close-range 3D modeling[J]. Remote Sensing, 2015, 7(10):13070–13097.
- [18] ROSELL-POLO J R, AUAT-CHEEIN F, GREGORIO E, et al. Advances in structured light sensors applications in precision agriculture and livestock farming[J]. Advances in Agronomy, 2015, 133:71–112.
- [19] 牛振岐, 刘阔, 王月敏, 等. 基于像素级别的 Kinect 深度测量误差补偿方法[J]. 光电子·激光, 2016, 27(11):1169–1175.
- NIU Zhenqi, LIU Kuo, WANG Yuemin, et al. Kinect depth measurement error compensation method based on pixel level[J]. Optoelectronics Laser, 2016, 27(11):1169–1175. (in Chinese)
- [20] HE Ying, LIANG Bin, ZOU Yu, et al. Depth errors analysis and correction for time-of-flight (ToF) cameras[J]. Sensors, 2017, 17(1):92.
- [21] 刘刚, 张雪, 宗泽, 等. 基于深度信息的草莓三维重建技术[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4):160–165, 172.
- LIU Gang, ZHANG Xue, ZONG Ze, et al. 3D reconstruction of strawberry based on depth information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4):160–165, 172. (in Chinese)
- [22] 沈跃, 潘成凯, 刘慧, 等. 基于改进 SIFT-ICP 算法的 Kinect 植株点云配准方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12):183–189.
- SHEN Yue, PAN Chengkai, LIU Hui, et al. Method of plant point cloud registration based on Kinect of improved SIFT-ICP[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):183–189. (in Chinese)
-

(上接第 57 页)

- [14] 胡小青, 程朋根, 聂运菊, 等. 无人机 LiDAR 在山洪灾害调查中的关键技术及应用[J]. 江西科学, 2016, 34(4):470–474.
- HU Xiaoqing, CHENG Penggen, NIE Yunju, et al. Key technology and application of UAV LiDAR in mountain flood disaster investigation[J]. Jiangxi Science, 2016, 34(4):470–474. (in Chinese)
- [15] 程溪. 微小型多旋翼无人机激光雷达 SLAM 算法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2018.
- CHENG Xi. Research on laser radar SLAM algorithm of micro multi rotor UAV[D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [16] 王凯龙. GNSS 和 IMU 的室内外行人无缝导航方法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- WANG Kailong. Research on indoor and outdoor pedestrian seamless navigation method based on GNSS and IMU[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018. (in Chinese)
- [17] 朱晓飞, 张连环. 飞行中惯导定位误差的修正方法研究[J]. 电子世界, 2012(23):92–93.
- ZHU Xiaofei, ZHANG Lianhuan. Research on correction method of INS positioning error in flight[J]. Electronic World, 2012(23):92–93. (in Chinese)
- [18] 阚旋, 林杨正, 辛宪会, 等. 多视几何中外参数与航测外方位元素的相互转化[J]. 海洋测绘, 2016, 36(6):75–78.
- ZHA Xuan, LIN Yangzheng, XIN Xianhui, et al. Mutual transformation between Chinese and foreign parameters in multi view geometry and exterior orientation elements in aerial survey[J]. Marine Surveying and Mapping, 2016, 36(6):75–78. (in Chinese)
- [19] WISE S M. Effect of differing DEM creation methods on the results from a hydrological model[J]. Computers and Geosciences, 2007, 33(10):1351–1365.
- [20] LI H, XU P, SHEN Y. A self-adaption fast point cloud simplification algorithm based on normal eigenvalues[C]//2014 7th International Congress on Image and Signal Processing (CISP 2014), 2014:852–856.
- [21] ZHAO L, WEI Q, EQUIPMENT A O. Research and improvement of point clouds reducing algorithm based on a set of images in progress of 3D-reconstruction[J]. Computer Engineering & Applications, 2016, 52(8):211–216, 8.
- [22] 李笑, 李宏鹏, 牛东岭, 等. 基于全球导航卫星系统的智能化精细平地系统优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3):48–55.
- LI Xiao, LI Hongpeng, NIU Dongling, et al. Optimization of GNSS-controlled land leveling system and related experiments[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3):48–55. (in Chinese)
- [23] 牛东岭, 李笑, 康熙, 等. 基于空间聚类的农田土地平整区域规划方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊):57–62.
- NIU Dongling, LI Xiao, KANG Xi, et al. Regional planning in GNSS-controlled land leveling based on spatial clustering method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.):57–62. (in Chinese)
- [24] 胡炼, 杨伟伟, 许奕, 等. 基于 GPS 技术的水田平地机的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(5):130–134.
- HU Lian, YANG Weiwei, XU Yi, et al. Design and experiment of paddy field leveler based on GPS[J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36(5):130–134. (in Chinese)