

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105737

基于二维激光雷达植株高度测量系统的研究*

张宏群¹ 刘开辉¹ 郑峰² 陈佳力² 陈思¹

(1.南京信息工程大学 电子与信息工程学院 南京 210044; 2.航天新气象科技有限公司 无锡 214127)

摘要: 植株高度数据的获取主要依靠人工测量的方式,这种方式不仅费时费力,而且具有一定的主观性。为了解决这一问题,构建了一个植株高度测量系统,设计了一种能够俯仰扫描的激光雷达扫描装置,通过控制二维激光雷达旋转,实现植株的三维重现,进而得到其高度信息。使用该系统,对绿萝和万年青这种单株植株采用侧面整体轮廓扫描的方式,得到侧面投影,计算得到高度;对小叶黄杨绿篱和金叶女贞绿篱多株植株采用随机抽样一致性算法(RANSAC)拟合修正,再使用曲线检测—正态核密度检测方法滤除冠层部分的离群点,从而计算得到高度。实验结果表明,利用该系统获取的植株高度与人工测量值的相对偏差最大不超过6%。该系统在植株高度测量方面,具有良好的实用价值。

关键词: 植株高度;测量;二维激光雷达;点云处理;LiDAR

中图分类号: S24 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4030

Research on plant height measurement system based on two-dimensional LiDAR

Zhang Hongqun¹ Liu Kaihui¹ Zheng Feng² Chen Jiali² Chen Si¹

(1. School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Space New Meteorological Technology Co., Ltd., Wuxi 214127, China)

Abstract: The acquisition of plant height data mainly relies on manual measurement, which is not only time-consuming and labor-intensive, but also subjective. In order to solve this problem, a plant height measurement system was constructed, by controlling the rotation of the two-dimensional LiDAR, the three-dimensional reproduction of the plant is realized, and the height information is obtained. Using this system, for single plants such as green dill and evergreen, use the side overall contour scanning method to obtain the side projection and calculate the height; for the boxwood hedgerow and golden leaf ligustrum hedge, the random sampling consensus algorithm (RANSAC) is used to fit. The algorithm is revised, and then the curve detection-normal nuclear density detection method is used to filter out the outliers in the canopy, and the height is calculated. Experimental results show that the maximum relative deviation between the plant height obtained by this system and the manually measured value is less than 6%. This system has good practical value for plant height measurement.

Keywords: plant height; measurement; two-dimensional LiDAR; point cloud processing; LiDAR

0 引言

植株高度是衡量作物生长速度的标志之一,是农作物生长状况测定的一个主要方面。植株高度测定就是作物生长高度的测定,定期测定植株高度,可以了解作物的生长速度以及外界气象条件的关系,为农业和农业气象研究、服务工作提供资料。

目前,对植株高度测量的方法主要有人工测量、图像识

别检测、超声波测量和红外传感器测量等。人工测量就是人工利用尺子对植株测量,这种方法精度高,但耗时费力。利用图像识别检测技术,在拍摄前需要对相机校准^[1],再对拍得的图像进行分析^[2-5],这种方法得到的数据并非直接测量得到,不能完全反映植株的真实信息。超声波测量的方法^[6],其缺点是目标的反射率对测量精度有着很大的影响,测量精度受到测量距离和外界干扰的影响严重。

激光雷达(light detection and rang, LiDAR)和激光扫

收稿日期:2021-01-25

* 基金项目:无锡市现代产业发展资金项目(WX1811AG617)资助

描技术,具有机动性高、携带方便,操控性强的特点。近些年激光雷达在植株测量领域的应用愈加广泛。2015年,Chaudhury等^[7]率先提出了使用三维成像和激光扫描技术来辅助分析植物的生长,他们使用安装在机器臂上的激光扫描仪来实现植株的三维建模,获取三维植株数据,得到植株的高度。2017年,Detweiler等^[8]申请了无人机搭载激光雷达对农作物高度测量的技术专利。2019年,程曼等^[9]利用地面激光雷达设计了田间花生冠层高度测量系统,利用地面激光雷达获取花生冠层的高度特性。除此以外,激光雷达还被用于测量水稻、玉米和小麦等农作物高度信息^[10-16]。

为了获取植株高度信息,在设计中有基于地面小车^[17-18]和基于无人机平台的方式。考虑到地面小车对扫描的地理环境要求严格,对地面平整程度,植物分布和小车推进速度都有很高的要求;无人机的方式,由于飞行过程中产生的气流会扰动植物,采集到的数据并不准确,且激光雷达的供电和数据传输也存在很大的问题,飞行的操控需要具备一定的熟练程度才能获得质量最优的数据。根据实际的测量条件,设计了一种对地形要求低,干扰小的激光雷达植物高度测量系统。

1 实验设计

1.1 实验装置设计

实验装置设计部分如图 1 所示。该系统的核心部分由两台高精度的伺服电机和一台二维激光雷达组成,通过两个弯曲的金属支架连接固定,如图 1(a)所示,实物如图 1(b)所示。激光雷达使用的是国产 SLAMTEC 公司研发的 RPLIDAR S1 型号激光雷达,属于二维激光雷达,具有 9 200 次/s 的激光雷达测距采样能力,测量精度 ± 5 cm,测量分辨率为 3 cm。使用的伺服电机为国产光毓 RMD-S-9010 型号电机,编码精度 16 bit,最小可调角度为 0.01° ,用于激光雷达的俯仰动作控制。激光雷达的供电和数据传输共用一条 USB 数据线,伺服电机由一个 12 V 的电池提供电源。

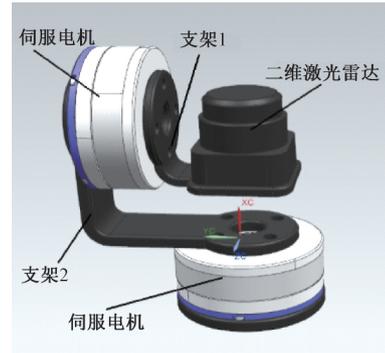
二维激光雷达每次扫描只能扫描出一个平面信息,为了获得三维空间中的数据,需要额外添加一个维度^[19],方案中添加一个旋转角度来实现三维扫描。

俯仰扫描的原理如图 1(c)所示,其中,雷达俯仰转动角度 α (绕 X 轴旋转),雷达每次扫描的数据输出包括雷达转动角度和与被测物体的距离,分别记为 η 和 r ,水平转台转动角度 θ (绕 Z 轴旋转), d 为雷达垂直偏移距离。将雷达输出数据转换到直角坐标,经过坐标旋转转换,得到全局坐标:

$$\begin{cases} x = r \cdot \sin\eta \cdot \cos\theta - r \cdot \cos\eta \cdot \cos\alpha \cdot \sin\theta \\ y = r \cdot \sin\eta \cdot \sin\theta + r \cdot \cos\eta \cdot \cos\alpha \cdot \cos\theta \\ z = r \cdot \cos\eta \cdot \sin\alpha + d \end{cases} \quad (1)$$

将激光雷达采集得到的原始数据,经过上式变换,转换

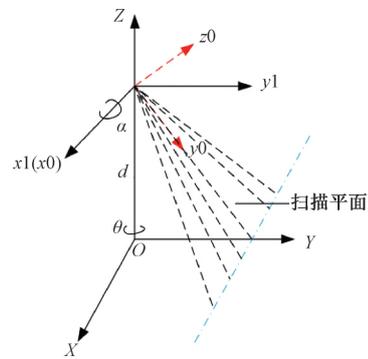
为直角空间中的位置信息。



(a) 扫描装置模型



(b) 扫描装置实物



(c) 扫描原理

图 1 实验装置设计

1.2 实验方案设计

实验对象分为单株和多株,选用绿萝和万年青单株植株,小叶黄杨绿篱和金叶女贞绿篱多株植株为实验对象,如图 2 所示。

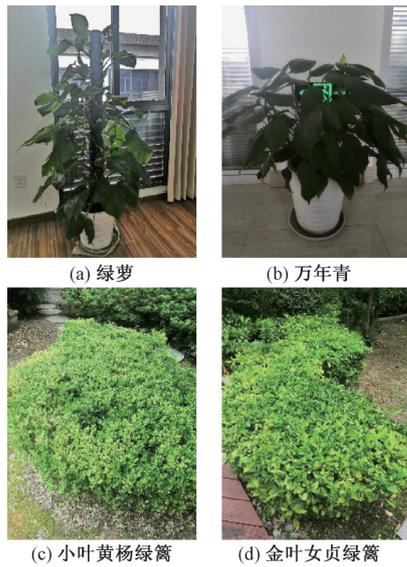


图2 实验对象

激光雷达控制软件和伺服电机控制软件由 VS2019, 使用 C++ 语言编写。测量时为了提高扫描点云的密度, 提高测量的准确度, 每一个俯仰角激光雷达扫描 3 次, 控制电机的俯仰每次递增 0.5° 。对如图 2(a) 和 (b) 所示植株, 采用的是侧面整体扫描, 目标区域为顶端的叶子到最低处地面, 从扫描得到的侧面轮廓图中计算出高度。图 2(c) 和 (d) 所示的植株, 采用的是俯视角扫描, 目标区域为冠层顶端和地面。得到的数据使用软件 MATLAB 2017b 进行处理。

人工采用卷尺测量的方式, 精度为 1 mm。多株植株采用对目标区域以 15 cm 为间隔采样, 测量叶片最高点到地面的距离, 测量方式如图 3 所示, 手动测量 10 个高度数据, 除去最大值和最小值后取均值, 并保留一位小数; 对单株植株采用从 4 个角度分别测量的方式, 结果取均值后保留一位小数。



图3 手动测量方式

为了验证激光雷达测量的精确度和稳定性, 具体实验如下:

1) 分别对上述 4 个对象使用激光雷达方式测量和人工方式测量, 以人工测量值为标称值, 计算系统测量与人工测量的偏差。

2) 为了验证测量的稳定性, 连续 4 天对绿萝、小叶黄杨绿篱和金叶女贞绿篱分别进行激光雷达系统测量和人工测量, 并记录数据。

2 植株高度数据处理

2.1 单株植物高度测量

图 2(a) 单株绿萝和图 2(b) 万年青扫描得到点云图后, 将三维图像投影到 $X-Z$ 面, 如图 4 所示, 其中图 4(a) 为绿萝 $X-Z$ 投影图像, 图 4(b) 为万年青 $X-Z$ 投影图像, 从两个投影图中可以明显看出的植株轮廓, 地面数据为明显的一条直线, 取水平地面数据的平均值为地面相对高度, 从投影中取得最高点值为植株相对高度, 计算得到高度值。

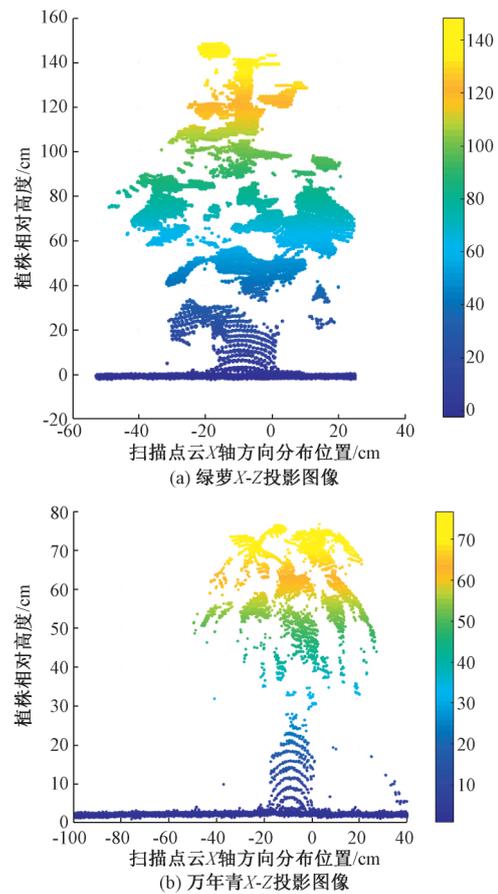


图4 X-Z 投影图像

2.2 多株植株高度测量

不同于单株植株的测量方式, 多株植株的扫描方式采用俯视角扫描, 扫描目标为植株的稠密顶层和地面, 即冠层和地面。

图 2(c) 中植物小叶黄杨绿篱的三维点云图如图 5 所示, 从点云的分布看, 其地面点云分布清晰, 冠层稠密, 点云分布密集, 适合进一步数据处理, 以此为例, 数据处理的具体流程如图 6 所示。

1) 数据分割

数据分割包括原始数据的分割, 以及地面数据与冠层数据的分割。由于在实际扫描中, 激光雷达扫描得到的原

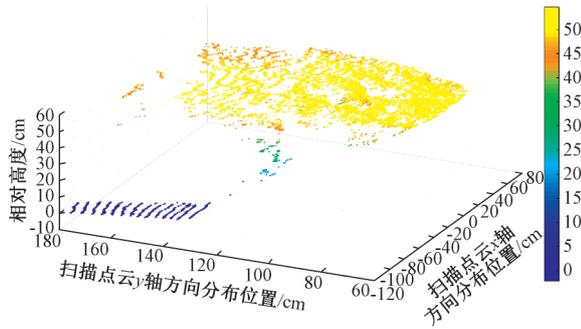


图 5 小叶黄杨绿篱的三维点云数据图

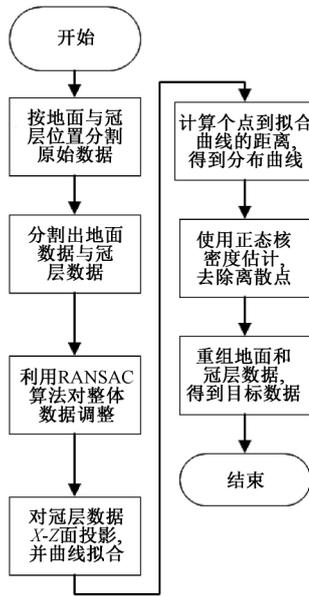


图 6 算法流程

始数据是 360°的全方位点云数据, 数据中包含其他不属于目标植株数据, 通过向 X-Y 面投影, 从投影中切割、裁剪出有效区域, 有效区域包含冠层数据和地面数据, 再将冠层数据与地面数据进一步分割, 用于下一步处理。

2) 整体数据修正

将扫描得到的数据进行分割、裁剪后, 得到的点云数据由于扫描过程并非绝对水平, 存在整体倾斜, 影响三维呈现效果。为了修正这种倾斜, 采用随机抽样一致性算法 (radom sampling consensus, RANSAC)。

正确的地面数据记为内点 (inliers), 异常数据记为外点 (outliers)。假设内点在整个数据集中的概率为 P_1 , 即:

$$P_1 = \frac{n_{inliers}}{n_{inliers} + n_{outliers}} \quad (2)$$

拟合直线所需的两个点都是内点的概率为 P_1^2 , 两个点中至少有一个是外点的概率为 $1 - P_1^2$, k 次随机抽样中都没有找到一次全是内点的情况的概率为 $(1 - P_1^2)^k$, 则正确解为:

$$P_2 = 1 - (1 - P_1^2)^k \quad (3)$$

k 的表达式为:

$$k = \frac{\log(1 - P_2)}{\log(1 - P_1^2)} \quad (4)$$

为了提高正确解的概率 P_2 , 多次迭代 k 的值。对地面的投影数据进行 k 次迭代直线拟合后, 得到拟合直线, 拟合直线即为拟合地面, 由拟合直线的倾斜度对整体点云进行修正。

以小叶黄杨绿篱三维点云为例的数据修正过程如图 7 所示, 将小叶黄杨绿篱点云的地面与冠层分割后, 原始地面数据点云如图 7(a)所示, 图 7(b)为使用 RANSAC 算法迭代 200 次拟合后的直线, 将拟合的直线重新旋转修正后的小叶黄绿篱点云投影, 如图 7(c)所示。

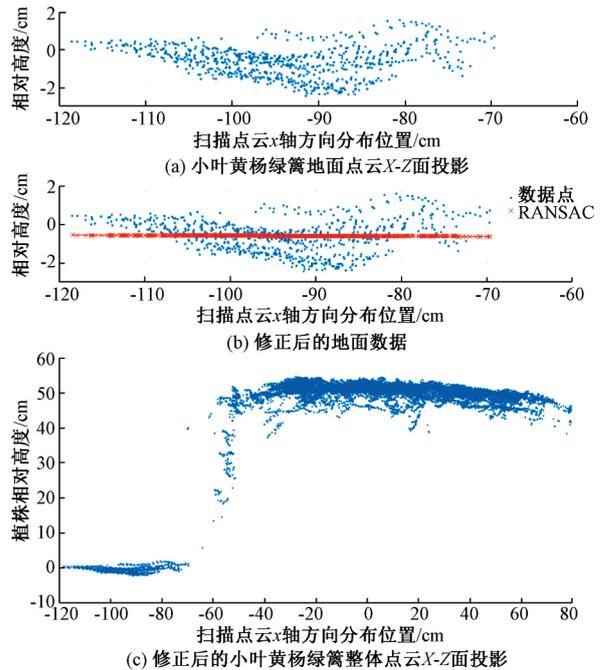


图 7 点云数据修正

3) 冠层离群点滤除

由于受到客观环境的影响, 如地形地貌、天气因素, 植株之间不可能高度完全一致, 分布会存在间隙, 扫描过程中不可避免的会出现冠层表型特征数据错漏的情况。对错误和无用的数据需要滤除。

考虑到相邻的植株有着相同的表现型, 高度相似, 整体的冠层面近似为平面的特点, 将图 7(c)修正好的小叶黄杨绿篱的冠层点云采用曲线检测—正态核密度检测方法滤除离群点, 过程如图 8 所示, 其中原始冠层如图 8(a)所示, 具体算法流程为:

如图 8(b)所示, 对小叶黄杨绿篱的冠层投影数据进行 3 阶拟合, 大于 3 阶的高阶拟合会出现过度拟合的现象, 滤除效果并不好。通过实验, 3 阶的拟合效果较为适合。拟合公式为:

$$f(x) = \sum_{i=0}^n p_i x^i, n = 3 \quad (5)$$

式中: p_i 为拟合系数。

计算冠层点云各点到拟合曲线的最短距离,绘制出各点到曲线最短距离的分布情况图和分布统计直方图,如图8(c)和(d)所示。

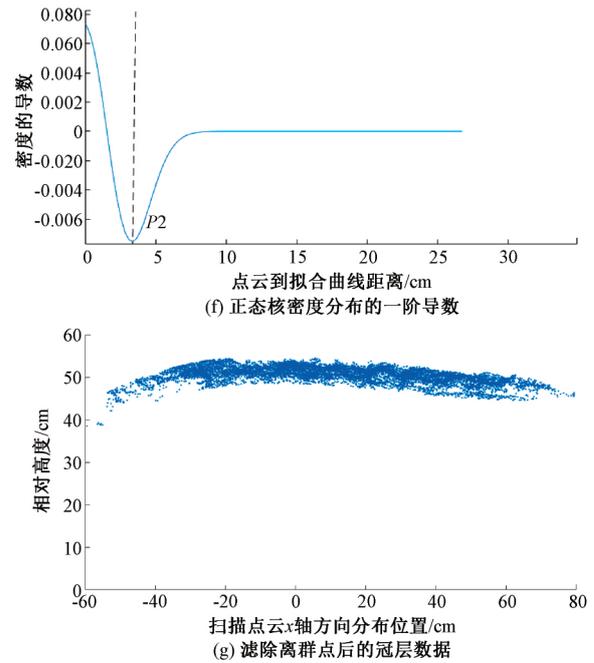
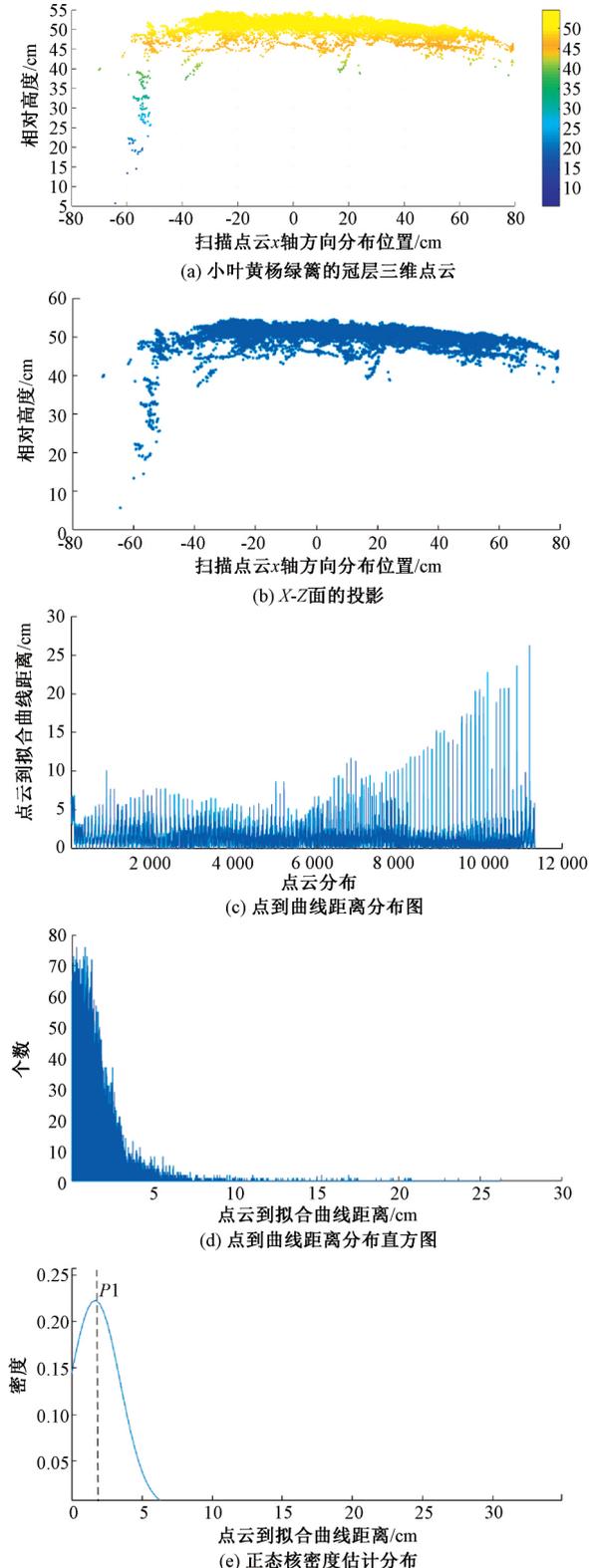


图8 冠层离群点滤除

使用正态核密度估计的方法,假设距离的分布为正态分布,估计式为:

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^N \phi\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (6)$$

其中, $\phi(x)$ 为标准正态概率密度函数, h 为平滑参数。

$\phi(x)$ 的表达式为:

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (7)$$

由式(7)得到距离分布的核密度图,可以从核密度图中观察到一个主峰 $P1$,如图8(e)所示。再求核密度的一阶导数,导数的极小值 $P2$ 点对应横坐标的值为 $\mu + \sigma$, μ 为期望值, σ 为标准差,如图8(f)所示。

对于正态分布,在 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 范围包括 68.26% 的值,这里保留到拟合曲线距离为 $[0, \mu + \sigma]$ 范围内的点,最终滤除效果如图8(g)所示。

将滤除后的小叶黄杨绿篱的冠层数据与地面数据重新整合,点云分布如图9所示。

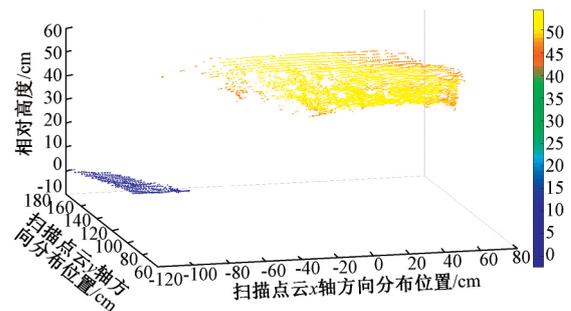


图9 重新整合的小叶黄杨绿篱三维点云图

3 结果与讨论

从激光雷达获取到的数据经上述算法处理后,对采集到的数据取均值,并保留小数点后一位,即 0.1 mm。系统测量数据与人工测量数据如表 1 所示,各品种的激光雷达测量与人工测量高度柱形图如图 10 所示。表 2 所示为 7 月 30 日~8 月 2 日连续 4 天测量数据,对应的点线图如图 11 所示,偏差值的点线图如图 12 所示。

表 1 不同植株平均高度测量值与手工测量值对比

测试对象	激光雷达 测量高度/mm	人工测量 高度/mm	相对偏差/ %
绿萝	1 495.3	1 480.0	1.04
万年青	746.3	735.0	1.50
小叶黄杨绿篱	514.3	538.3	4.45
金叶女贞绿篱	763.5	733.8	4.04

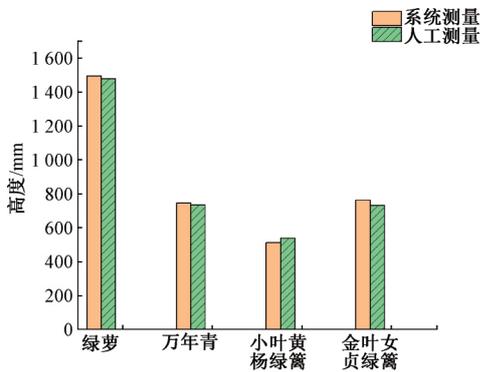


图 10 各品种的激光雷达测量与人工测量高度柱形图

表 2 不同时间系统测量与手工测量数据

测量 时间	测量方法	植株品种		
		绿萝	小叶黄 杨绿篱	金叶女 贞绿篱
7.30	雷达测量	1 514.9	514.3	763.5
	手工测量	1 511.0	538.3	733.8
7.31	雷达测量	1 516.9	525.9	728.9
	手工测量	1 506.0	558.4	754.7
8.1	雷达测量	1 514.1	533.5	728.5
	手工测量	1 514.0	545.2	773.0
8.2	雷达测量	1 514.2	545.2	745.5
	手动测量	1 510.0	530.7	722.3

从表 1 和图 10 中可以看出,使用俯仰式扫描在单株植物绿萝和万年青的高度测量上的偏差很小,仅有 1.5% 左右,具有很高的精度,完全可以替代人工测量。对多株植物的高度测量,相对偏差小于 6%。造成这一结果的原因是在实际手工测量时,地面并非是一个绝对平面,手工测量的

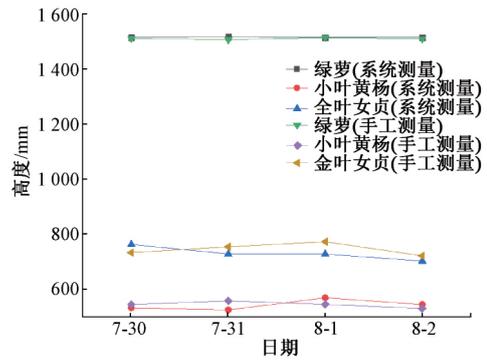


图 11 不同时间系统测量与手工测量数据点线图

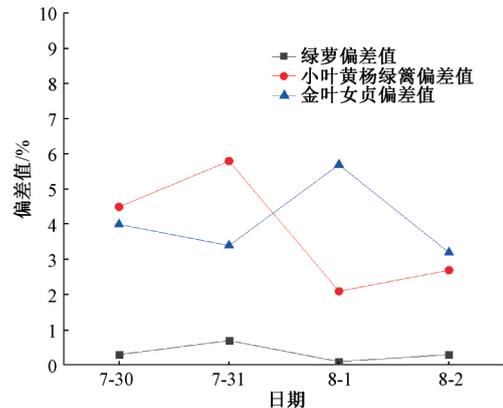


图 12 不同时间系统测量与手工测量数据偏差值点线图

实际地面与扫描的地面高度存在差异。根据表 2 中连续 4 天的测量数据绘制成点线图,如图 12 所示,可以看出激光雷达测量方式有着较好的稳定性,最大偏差低于 6%,尤其是在对单株植株测量上,多次测量几乎不受影响;在对多株植株测量时,由于每次的扫描角度,摆放位置不同,扫描生成的点云图也有所不同,导致了偏差上的波动。单株高度测量偏差很小的原因是将整个植株的侧面数据完整扫描出来,基本还原植株的整个侧面轮廓信息,得到的高度数据也就更加准确。多株扫描的目标为部分冠层和地面,偏差值也就比单株测量的偏差要大。

通过实验结果分析,本文研究相对于现阶段已有的研究成果,既能大大降低了测量成本,又能保证测量的高精度。现有的研究成果,多使用无人机和无人小车为载体,对设备的运动和测量环境有着很高的要求,而本研究的设备使用三脚架架设,扫描动作由电机和激光雷达自身完成,设备成本低,对测量环境要求低,在野外测量有着明显的优势。现阶段扫描和数据处理是分开进行的,未来可以在扫描设备和数据处理一体化方面上开展。

4 结 论

本文提出的方案核心思路是使用二维激光雷达传感器配合伺服电机实现三维空间扫描的功能,对植株进行扫描,

数据处理后得到植株高度。技术难点在于伺服电机与激光雷达的配合控制、扫描数据的坐标转换和点云数据的处理。

利用俯仰扫描方式的激光雷达对植物高度的检测有着很大的优势,在保证较高精度的同时,有着很好的稳定性,对测量环境的要求低,装置架设简单。相对于人工测量的方式,激光雷达测量提高测量效率,减少人工劳动力的投入,具有很高的实用性。由于采用俯仰扫描,俯仰扫描的角度精度和递增角度有所要求,角度精度不足,会导致得到的数据有偏差,扫描递增角度过大,扫描得到的点云数据量就会较少,导致测量结果不准确。试验中只使用了俯仰电机,水平旋转电机并没用工作,若想要扩大扫描范围,还需要配合水平扫描。

参考文献

- [1] 黄志清,苏毅,王庆文,等. 二维激光雷达与可见光相机外参标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 121-129.
- [2] 阙玲丽. 基于计算机视觉技术的玉米植株高度检测的研究[J]. 农业化研究, 2017, 12: 219-223.
- [3] 佟庆彬,张晓东,丁振良,等. 基于激光视觉的石英摆片厚度精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(6): 1358-1363.
- [4] 沈彤,刘文波,王京. 基于双目立体视觉的目标测距系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4): 58-60.
- [5] 康国华,张琪,张晗,等. 基于点云中心的激光雷达与相机联合标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 118-126.
- [6] YUAN W AN, LI J T, MADHAV B, et al. Wheat height estimation using LiDAR in comparison to ultrasonic sensor and UAS [J]. Sensors, 2018, 18(3731): 1-20.
- [7] CHAUDHURY A, WARD C, TALASAZ A, et al. Computer vision based autonomous robotic system for 3D plant growth measurement [J]. Conference Publishing Services, 2015, 45: 290-296.
- [8] DETWEILER C, ANTHONY D, ELBAUM S. Crop height estimation with unmanned aerial vehicles: US00969492B2[P]. 2018-05-15.
- [9] 程曼,蔡振江, WANG N, 等. 基于地面雷达的田间花生冠成高度测量系统研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 180-187.
- [10] 王安. 基于地面 LiDAR 的冬小麦生长参数提取研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [11] 王红丽. 基于地面 LiDAR 的水稻生物量高精度反演[D]. 新疆: 新疆大学, 2017.
- [12] 刘立超,魏国梁,张青松,等. 基于激光雷达的农业耕作微地貌测量装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 84-92.
- [13] 苏伟,蒋坤萍,郭浩,等. 地基激光雷达提取大田玉米植株表型信息[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 125-130.
- [14] WALTER, JAMES D C E, JAMES, et al. Estimating biomass and canopy height with LiDAR for field crop breeding[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10(1145): 1-16.
- [15] MICHAEL T, SCHAEFER D W. Lamb a combination of plant NDVI and LiDAR measurements improve the estimation of pasture biomass in tall fescue (fescua arundinacea var. fletcher) [J]. Remote Sensing, 2016, 8(109): 1-10.
- [16] GUO T, FANG Y, CHENG T, et al. Detection of wheat height using optimized multi-scan mode of LiDAR during the entire growth stages[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 165(104959): 1-9.
- [17] 张漫,苗艳龙,邱瑞承,等. 基于车载三维激光雷达的玉米点云数据滤波算法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 170-178.
- [18] 王春梅,黄凤山,薛泽. 装车机器人激光雷达测量系统及其标定方法[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 1-8.
- [19] 杨怀义,杨荐胜. MATLAB 软件基于激光雷达的三维成像实验研究[J]. 电脑知识与技术, 2015, 11(18): 195-199.

作者简介

张宏群,副教授,主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail: 835274814@qq.com

刘开辉,硕士研究生,主要研究方向为智能仪器研究。

E-mail: 1398069832@qq.com

郑峰,工学博士,主要研究方向为光度探测与仪器建模评估。

E-mail: zheng.feng@js1959.com

陈佳力,工学硕士,主要研究方向为通信与信号处理。

E-mail: chen.jiali@js1959.com

陈思,硕士研究生,主要研究方向为信息处理。

E-mail: 775824729@qq.com