

基于地基激光雷达的玉米株高与茎粗自动测量研究

苗艳龙¹ 彭程² 高阳² 仇瑞承¹ 李寒² 张漫¹

(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: 株高和茎粗是玉米株型中重要的表型参数,可以反映玉米的生长状况和活力,地基激光雷达可实现表型参数的快速自动测量。首先,使用地基激光雷达获取田间2个玉米品种在4个生长期的三维点云数据;其次,使用点云处理软件对采集的玉米点云数据进行匹配、分割,人工点云测量玉米表型;之后,对玉米点云进行下采样、直通滤波、基于随机采样一致性平面分割、统计滤波和圆柱分割等处理,分割单株玉米、去除地面点云、滤除离群点、植株点云分层和提取待测量茎秆点云;运用最高点提取和地面点分割,测量玉米株高,椭圆拟合测量茎横截面长轴和短轴长度。结果表明,与田间测量值相比,京农科728人工点云测量株高、茎横截面长轴和短轴长度的均方根误差分别为21.5、1.24、1.86 mm,农大84分别为23.6、1.56、1.23 mm。与人工点云测量值相比,京农科728自动点云测量值的均方根误差分别为10.2、6.65、3.45 mm,农大84分别为7.1、4.95、3.26 mm。研究表明,地基激光雷达点云数据测量株高、茎粗的方法,适用于不同生长期、不同品种的玉米,与人工田间测量方法具有高度的一致性,可以替代人工测量。

关键词: 玉米; 株高; 茎粗; 地基激光雷达; 点云

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0043-08

Automatic Measurement of Plant Height and Stem Thickness of Maize Based on Terrestrial Laser Scanning

MIAO Yanlong¹ PENG Cheng² GAO Yang² QIU Ruicheng¹ LI Han² ZHANG Man¹

(1. Key Laboratory of 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: Plant height and stem thickness are important phenotypic parameters in the plant type of maize, which can reflect the growth status and vigor of maize. Terrestrial laser scanning can realize the rapid and automatic measurement of phenotypic parameters. Firstly, the three-dimensional point cloud data of two varieties of maize in four growth periods were obtained by using terrestrial laser scanning. Secondly, the point cloud processing software was used to match and segment the collected maize point cloud data, artificial measurement of maize phenotype in point cloud. Then, the maize point cloud was processed by down sampling, through filtering, plane segmentation algorithm based on random sampling consistency, statistical filtering and cylinder segmentation. The results showed that the method can segment individual maize, remove ground point cloud, filter outliers, layer plant point cloud and extract stem point cloud to be measured. The highest point extraction and ground point segmentation were used to measure maize plant height, and the long axis and short axis of stem thickness were measured by ellipse fitting. Compared the artificial point cloud measurement value with the artificial field measurement value,

收稿日期: 2021-07-08 修回日期: 2021-08-09
基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0125500)、中国农业大学建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金项目(2021AC006)和中国农业大学研究生自主创新研究基金项目(2021TC111)
作者简介: 苗艳龙(1995—),男,博士生,主要从事激光雷达作物表型测量研究,E-mail: hua20102013@163.com
通信作者: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

the root mean square error (RMSE) of Jingnongke 728 plant height, long axis and short axis were 2.15 cm, 1.24 mm and 1.86 mm, respectively. The RMSE of Nongda 84 plant height, long axis and short axis were 2.36 cm, 1.56 mm and 1.23 mm, respectively. Compared the automatic point cloud measurement value with the artificial point cloud measurement value, the RMSE of Jingnongke 728 plant height, long axis and short axis were 1.02 cm, 6.65 mm and 3.45 mm, respectively. The RMSE of Nongda 84 plant height, long axis and short axis were 0.71 cm, 4.95 mm and 3.26 mm, respectively. The results showed that the method of measuring plant height and stem thickness with terrestrial laser scanning point cloud data can be widely used in different maize varieties with different growth periods. The result of this method was highly consistent with that of the artificial measurement method and it can replace the artificial measurement method. It can provide a fast, automatic and accurate measurement scheme for breeders and crop phenotypists.

Key words: maize; plant height; stem thickness; terrestrial laser scanning; point cloud

0 引言

玉米是我国播种面积和产量最大的粮食作物,株高、茎粗与作物长势、生物量、光合作用、抗倒伏能力密切相关,是描述作物生长状况和活力的重要指标^[1-2];因此,获取其株高、茎粗等表型参数对培育高产玉米品种具有重要意义^[3-7]。株高、茎粗测量方法分为直接和间接两种,其中:直接测量是使用刻度尺或游标卡尺分别对株高和茎粗进行测量,测量精度较高,但消耗大量人力,且效率低,无法实现连续监测;间接测量是通过传感器获取作物高度和茎秆厚度信息,使用的传感器有彩色相机、深度相机和激光雷达。间接测量劳动强度小、测量效率高、没有主观误差、可以无损测量,提供了一种高通量的作物表型测量方法。三维激光雷达相对于其他传感器,具有测量精度高、受光照影响小、测量范围大、可以获取作物的三维数据等优点。

关于基于机器视觉进行株高和茎粗测量的研究相对较多,株高测量可以使用彩色相机获取作物图像,通过图像处理技术获取作物株高等信息^[8-10];或者使用 Kinect 相机获取彩色图像和深度图像,通过图像处理和点云处理技术获取作物株高等信息^[3,11-12]。关于茎粗测量,使用机器视觉技术,可获取作物的彩色图像和深度图像,进而分离出作物茎秆部分并提取茎秆边缘,实现作物茎粗测量^[4,13-15]。机器视觉为实现快速、无损测量作物株高、茎粗提供了一种可行的方案,但存在需要设置标定物、图像分割困难、受光照影响和测量精度较低等问题。

激光雷达受外界光照影响较小,具有分辨率高、扫描速度快等优点^[16-17],为作物株高、茎粗准确、无损测量提供了另一种解决方案。关于株高测量,郭新年等^[18]使用激光视觉组合系统,基于三角测量模型,获取作物顶点和作物底端点,实现作物株高测量。苏伟等^[19]使用地基激光雷达获取玉米抽雄期

的点云数据,手动提取单株玉米点云数据,获取玉米植株最高点和最低点,进而提取出株高。TILLY 等^[20]使用地基激光雷达获取玉米点云数据,并生成作物表面模型,实现玉米株高的测量。CHATZINIKOS 等^[21]使用激光雷达测量了群体向日葵、大豆和冬小麦的高度。EHLERT 等^[22]使用 4 线激光雷达实现了冬小麦的株高测量,没有实现单株株高自动化测量,且测量精度有待提高。关于茎粗测量,李抒昊^[23]使用手持三维扫描仪获取盆栽玉米植株三维点云数据,通过点云数据获取多个时期不同高度的茎秆直径。郭彩玲等^[24]使用地基激光雷达获取苹果树的三维点云数据,采用基于标靶球的 KD-trees-ICP 算法配准多站点云数据,并通过点云数据获取枝干直径。徐华东等^[25]使用地基激光雷达获取蒙古栎三维点云数据,提取树木的胸径。激光雷达测量实现了茎直径测量,但是没有很好地反馈出茎的长轴和短轴测量。使用激光雷达技术可以实现作物株高、茎粗的测量,但研究点云与作物实际三维形态的研究较少,人工点云测量是否可以代替人工田间测量值,作为表型参数自动测量的真值有待进一步研究;且现在表型测量算法相对复杂,难以实现单株自动化测量,对测量精度的分析也较少。

针对上述问题,本文以玉米为研究对象,探讨从人工测量到传感器自动测量表型参数转变的可行性。使用 Trimble TX8 型地基激光雷达采集多个生长期的不同品种玉米点云数据,通过 Trimble RealWorks 软件进行多站点云数据配准,并测量玉米株高、茎横截面长轴和短轴长度(简称茎长轴长度、短轴长度);与人工测量数据进行对比,分析直接使用原始点云数据的测量精度,提供一种在表型参数自动化测量研究中代替人工田间测量真值的方法;同时基于原始点云数据,编程实现玉米单株分割、点云去噪、下采样和分割,以期实现玉米株高、茎长轴和短轴长度自动测量。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

选用美国 Trimble 公司的 Trimble TX8 型地基激光雷达采集玉米苗期、拔节期、小喇叭口期和大喇叭口期的三维点云数据,其性能参数如表 1 所示。该设备的 4 个可选扫描密度分别是 1 级、2 级、3 级和扩展模式,每个扫描密度等级参数如表 2 所示。在 Windows 7 操作系统下,安装 Trimble RealWorks 软件,进行点云数据的提取、拼接、分割、测量。以 Visual Studio 2013 为平台,安装点云库 PCL1.8.0 (Point Cloud Library,PCL)和 Cmake3.8.0,使用 C++ 语言进行软件编程实现基于点云数据的玉米株高、茎长轴和短轴长度测量。

表 1 Trimble TX8 型激光雷达性能参数

Tab.1 Performance parameters of Trimble TX8 LiDAR

参数	数值	参数	数值
视场角/((°)×(°))	360×317	测量范围/m	0.6~120
激光等级	1(人眼安全)	测角精度/(")	16
测量速率/MHz	1	测量精度/mm	2
扫描密度	1、2、3 级、 扩展模式	激光波长/μm	1.5
数据存储接口	USB3.0	功耗/W	72
工作温度/℃	0~40	存储温度/℃	-20~50

表 2 扫描密度等级参数

Tab.2 Scanning density level parameters

密度等级	最大 量程/ m	一站扫 描时间/ min	反射镜旋 转速度/ (r·s ⁻¹)	有效扫描 速度/ (点·s ⁻¹)	一站 总点数
1 级	120	2	60	5×10 ⁵	3.470×10 ⁷
2 级	120	3	60	1×10 ⁶	1.389×10 ⁸
3 级	120	10	30	1×10 ⁶	5.555×10 ⁸
扩展模式	340	14	16	4×10 ⁵	3.125×10 ⁸

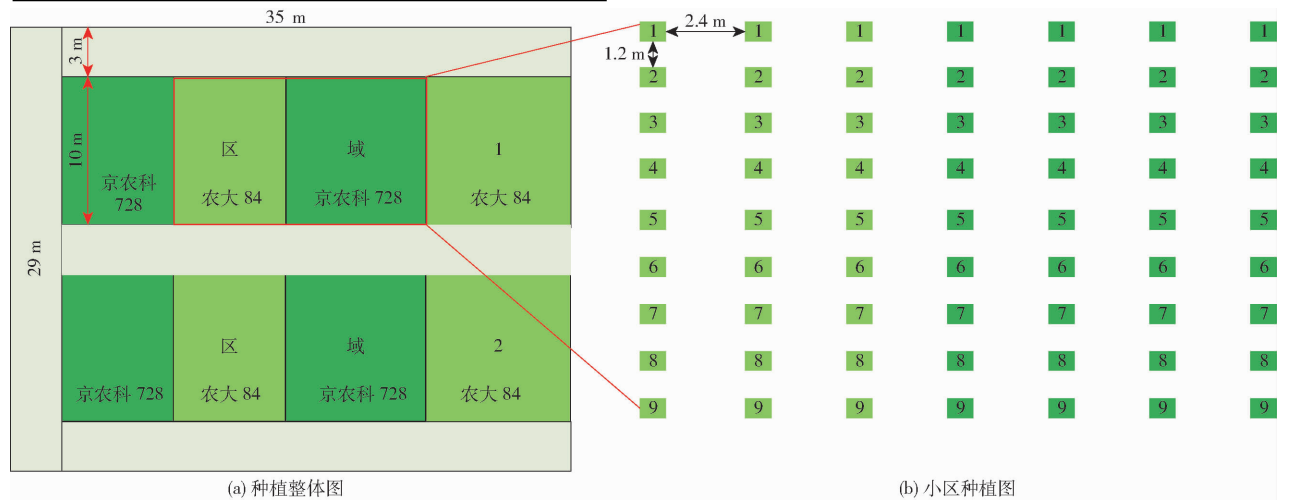


图 1 玉米种植图

Fig.1 Maize planting map

试验地点为中国农业大学上庄实验站,玉米品种为京农科 728 和农大 84,其中,京农科 728 为紧凑型品种,农大 84 为舒展型品种。玉米种植面积长 35 m,宽 29 m,共分为 2 个种植区域,每个区域分为 4 个种植小区,1 个小区种植 1 个玉米品种,2 个玉米品种交替种植,如图 1a 所示。小区种植行间距为 2.4 m,株间距为 1.2 m,每行种植 9 株玉米,其中,前两个小区宽 7.2 m,种植 3 行,后两个小区宽 9.6 m,种植 4 行,如图 1b 所示。

试验日期为 2019 年 6 月 14 日(苗期)、6 月 24 日(拔节期)、7 月 4 日(小喇叭口期)和 7 月 12 日(大喇叭口期),激光雷达采集数据时间为 07:00—09:00。如图 2a 所示,每次试验前,在采集点云数据区域放置标靶球,要求每站点云数据与其他站点云数据至少包括 3 个共同的标靶球,且标靶球不共线。Trimble TX8 型激光雷达安装在三脚架基座上,开机,设置扫描密度等级为 3 级,并调整设备下方的 3 个整平螺丝,使设备与水平面垂直,点击扫描键开始该站扫描。根据扫描玉米区域均匀分布扫描站位置,每次试验获取的玉米品种行数和点云站数,及人工采集的玉米植株的表型参数株高、茎长轴长度、短轴长度,如表 3 所示。使用卷尺测量玉米植株最高点到地面的垂直距离为玉米株高;游标卡尺测量玉米茎长轴长度、短轴长度,测量位置为叶鞘紧包茎秆的叶片下方约 1 cm 处。

1.2 玉米点云数据处理

玉米点云数据处理主要包括玉米点云数据预处理和玉米点云数据分割。预处理包括点云数据配准、去除背景点云数据,以及玉米行分割、下采样和数据格式转换等预处理;数据分割主要针对预处理后的点云数据,使用直通滤波算法实现单株玉米分割和植株点云分层,基于随机采样一致性平面分割

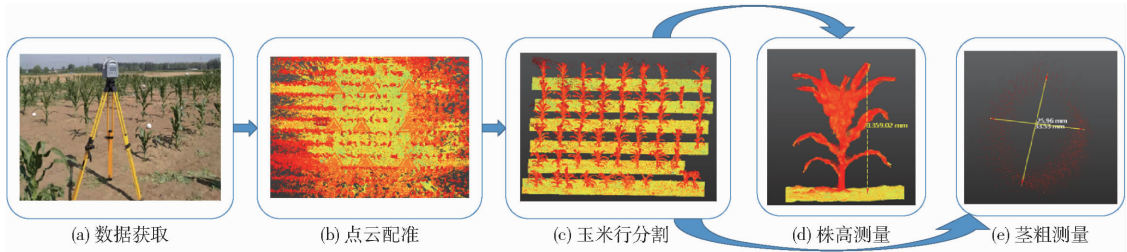


图 2 玉米点云数据处理流程

Fig. 2 Processing flow chart of maize point cloud data

表 3 点云数据及人工测量数据样本量

Tab.3 Sample size of point cloud data and artificial measurement data

试验时间	6 月 14 日	6 月 24 日	7 月 4 日	7 月 12 日	
点云数据站	6	14	6	9	
京农科 728	试验行	3	7	3	4
	株高	19	50	24	34
	茎粗	0	42	19	23
农大 84	试验行	3	5	0	2
	株高	15	29	0	13
	茎粗	0	14	0	12

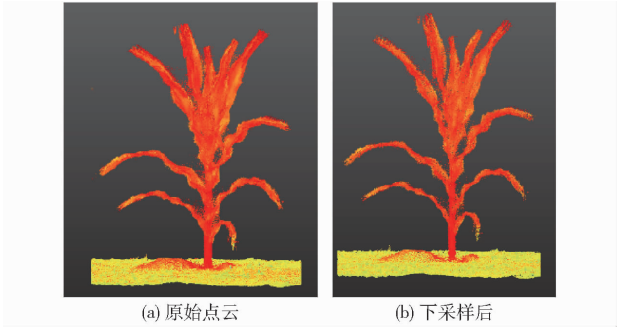


图 3 下采样玉米点云

Fig. 3 Sampling under maize point cloud

算法去除地面点云和统计滤波算法滤除离群点。

1.2.1 预处理

首先使用 Trimble RealWorks 软件读入田间试验获取的玉米点云数据,在配准模式下,建立测站点云,获得每站扫描的点云数据;其次,进行点云配准,选择基于自提目标的配准方法,目标类型选择球状目标,进行点云数据配准,结果如图 2b 所示。使用裁剪盒提取试验区域玉米的点云数据,选择步长采样,步长设置为 1,获得试验区域的高密度点云数据。工作模式改为分析建模,选择高密度点云根据作物行进行分割,如图 2c 所示,为后续人工在点云上测量玉米株高和茎粗做准备。由于步长为 1 的原始点云数据量特别大,为了节约程序运行时间,对点云数据使用空间采样进行下采样,精简点云数据,采样距离设置为 3 mm,数量降低了 90%,达到了精简点云数据、提高程序运行速度的目的。下采样后玉米单株的外轮廓几乎没有变化,不影响性状参数的提取,如图 3 所示,点云数据保存数据格式为 .las。

为了提高数据处理效率,适应 PCL 应用程序,把三维点云数据格式从 .las 格式转换为 .pcd 格式。

1.2.2 数据分割

玉米点云数据分割主要包括点云单株分割、地面分割和植株点云分层。

(1)点云单株分割。种植的株间距为 1.2 m,使用阈值分割方法对玉米点云进行单株分割,生成单株点云数据。使用统计分析滤波方法,对生成的单株点云数据进行滤波处理,去除玉米点云中的离群点,如图 4b 所示。去除的点在图 4a 用红色矩形框标出,可以去除玉米植株上方的离群点,排除它们对株高测量的影响,同时去除叶片与茎秆之间的噪声点。

(2)分割玉米植株点云和地面点云。地面点云组成一个近似平面的形状,符合平面模型。选择基于随机采样一致性平面分割算法对点云数据进行分割。一部分为分割平面点,即地面点云,另一部分为非平面点云,即植株点和凹陷地面点。对非平面点云 Z 轴数据与地面点最大值和最小值的平均值比

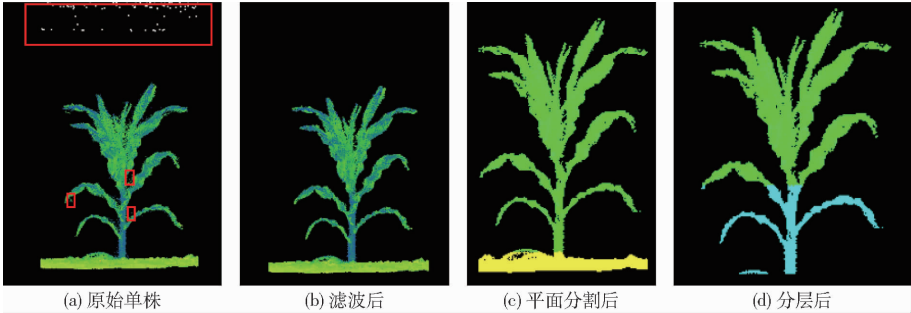


图 4 玉米点云分割过程

Fig. 4 Segmentation process of maize point cloud

较,小于平均值即为地面点插入平面点云,得到最终的地面点云,结果如图 4c 所示,黄色点云为地面,绿色点云为植株。

(3)植株点云分层。使用直通滤波对植株点云进行分层处理,上层点云用于植株最高点的获取,下层用于植株茎粗测量,分割结果如图 4d 所示,绿色点云为植株上层,青色点云为植株下层。

1.3 株高茎粗测量方法

株高茎粗测量方法主要包括人工测量和程序自动测量两部分内容。

1.3.1 人工点云株高、茎粗测量

在分析建模工作模式下,使用分割后的点云数据,通过裁剪盒功能提取单株玉米和地面点云数据,使用测量功能中的垂直向下测量,选中植株的最高点,测量该点至其垂直向下对应地面点的距离,即植株高度,如图 2d 所示。

同样在分析建模工作模式下,使用分割后的点云数据通过裁剪盒功能提取人工测量位置处茎秆点云数据,使用测量工具的水平测量工具,测量玉米茎长轴和短轴长度,如图 2e 所示。

1.3.2 自动点云株高、茎粗测量

定义玉米植株最高点与其垂直向下的地面在 Z 轴方向的距离为玉米植株株高。首先读入植株上层点云数据,遍历所有点,找到植株最高点的坐标 (x_1, y_1, z_{max}) ,使用直通滤波提取地面点云在 X 轴的 $[x_1 - 0.05\text{ m}, x_1 + 0.05\text{ m}]$ 和 Y 轴的 $[y_1 - 0.05\text{ m}, y_1 + 0.05\text{ m}]$ 范围内的点云数据,结果如图 5a 所示,红色点云为分割出的地面点。计算分割地面点云的 Z 坐标平均值即为地面高度 z_g ,株高 H 为 $z_{max} - z_g$,如图 5b 所示。

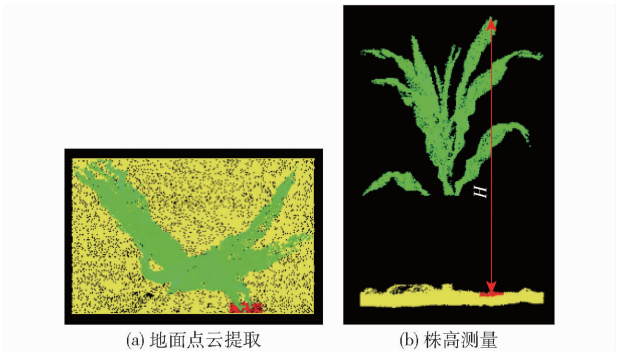


图 5 玉米株高测量

Fig. 5 Measurement of maize plant height

读入植株下层点云数据,获取点云在 Z 轴最小值 z_{min} ,使用直通滤波提取直通在 Z 轴 $[z_{min} + 0.01\text{ m}, z_{min} + 0.04\text{ m}]$ 范围内的固定高度点云数据,使用欧氏聚类算法处理固定高度点云数据,聚类数量为 0,茎粗测量失败;如果聚类数量大于 1,提取每类点云

的 X 轴和 Y 轴的范围,并获取这个范围内植株下层点云的 Z 轴最大值和数量,满足 Z 轴最大值大于植株下层 Z 轴最大值减 0.02 m 且数量最多的类,提取为待测量的玉米茎秆点云,结果如图 6a 所示。图 6b 为提取待测的玉米茎秆点云的俯视图,可以发现点云厚度较大,对点云数据使用移动最小二乘 (Moving least squares, MLS) 算法实现点云平滑,平滑结果如图 6c 所示。对平滑后的点云数据使用随机一致性圆柱提取点云,然后进行椭圆拟合,测量玉米植株的茎长轴和短轴长度。

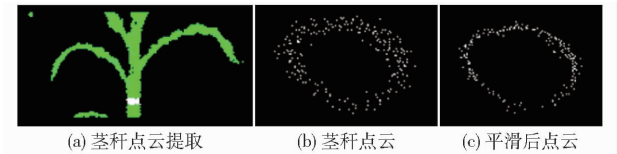


图 6 玉米茎粗测量点云处理

Fig. 6 Point cloud processing of maize stem thickness measurement

1.4 评价指标

对样本数据的人工田间测量真实值、人工点云测量值和自动点云测量值进行误差分析,使用决定系数 (Determination coefficient, R^2)、均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 和相对均方根误差 (Relative root mean square error, rRMSE) 作为评价本文方法测量精度的指标。

2 结果与分析

2.1 株高测量

京农科 728 和农大 84 株高人工点云测量值与人工田间测量值对比如图 7 所示,自动点云测量值与人工点云测量值对比如图 8 所示。从图 7、8 可以看出,人工点云测量值与人工田间测量值有很好的 consistency,自动点云测量值与人工点云测量值同样也有很好的一致性,表明使用地基激光雷达点云数据测量不同株型、不同生长期玉米株高是可行的。不同测量方法的评价指标如表 4 所示。

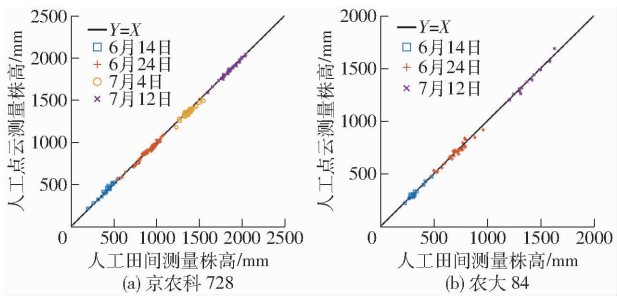


图 7 人工点云株高测量和人工田间株高测量对比

Fig. 7 Comparison of artificial point cloud height measurement and artificial field height measurement

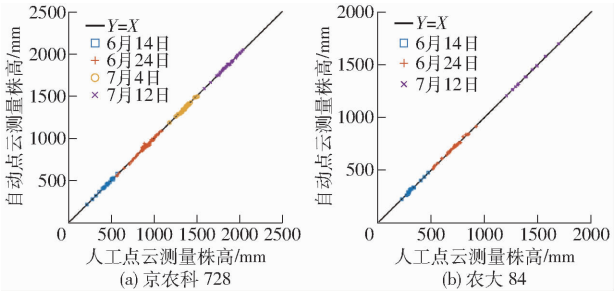


图8 自动点云株高测量和人工点云株高测量对比

Fig. 8 Comparison of automatic point cloud height measurement and artificial point cloud height measurement

表4 株高评价指标

Tab. 4 Plant height evaluation index

玉米品种	方法	R^2	RMSE/cm	rRMSE
京农科 728	人工点云测量	0.998 6	2.15	0.026 3
	自动点云测量	0.999 6	1.02	0.007 6
农大 84	人工点云测量	0.996 6	2.36	0.030 2
	自动点云测量	0.999 6	0.71	0.014 5

从表4可以看出,不同玉米品种使用人工点云测量方法和自动点云测量方法测量株高决定系数 R^2 都在0.99以上,人工点云测量方法RMSE都控制在2.4 cm以内,rRMSE在0.04以内,说明地基激光雷达点云数据可以准确地保存田间玉米的株高信息。自动点云测量方法RMSE控制在1.1 cm以内,rRMSE在0.02以内。测量精度高于人工点云测量方法,主要是因为:自动点云测量算法识别玉米最高点和对应地面点精度高,测量误差小;人工田间测量由于人的主观性、卷尺与地面垂直存在偏差等。评价指标表明本文方法具有较高的准确性,且算法测量值与真值一致性较高。

2.2 茎粗测量

京农科 728 和农大 84 茎长轴和短轴长度人工点云测量值与人工田间测量值对比如图 9、10 所示,自动点云测量值与人工点云测量值对比如图 11、12 所示。从图中可以看出,人工点云测量值与人工田间测量值有很好的-致性,表明地基激光雷达获取的玉米茎秆点云数据可以重现玉米茎秆的真实形态。自动点云测量值与人工点云测量值基本一致,部分数据存在一定的偏差,主要原因是固定高度点云数据存在叶片干扰,导致测量误差较大。不同测量方法的评价指标如表 5、6 所示。

从表 5 中可以看出,不同玉米品种使用人工点云测量方法测量茎长轴长度决定系数 R^2 在0.90以上, RMSE 都控制在1.6 mm以内, rRMSE 在0.05以内,说明人工点云测量准确度高,可以代替人工田间测量。自动点云测量方法测量茎长轴长度决定系数

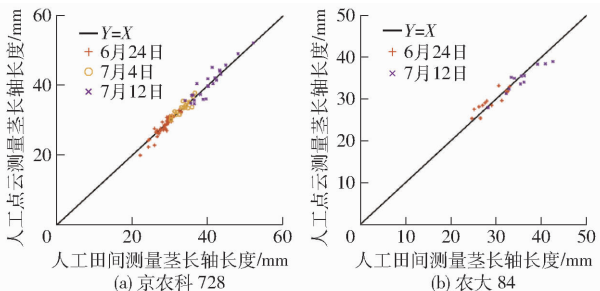


图9 人工点云茎长轴长度测量和人工田间茎长轴长度测量对比

Fig. 9 Comparison of artificial point cloud stem thickness' long axis measurement and artificial field stem thickness' long axis measurement

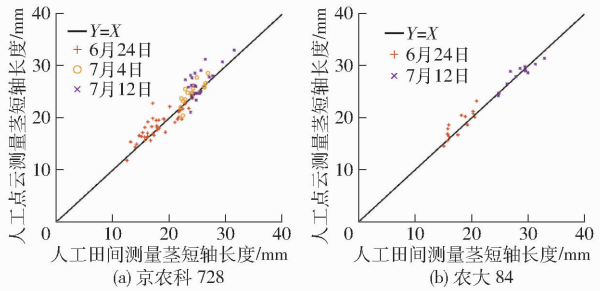


图10 人工点云茎短轴长度测量和人工田间茎短轴长度测量对比

Fig. 10 Comparison of artificial point cloud stem thickness' short axis measurement and artificial field stem thickness' short axis measurement

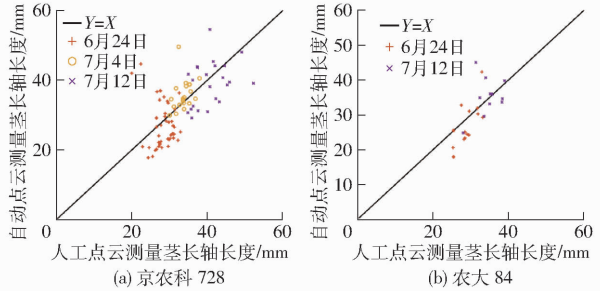


图11 自动点云茎长轴长度测量和人工点云茎长轴长度测量对比

Fig. 11 Comparison of automatic point cloud stem thickness' long axis measurement and artificial point cloud stem thickness' long axis measurement

R^2 在0.35以上, RMSE 都控制在6.7 mm以内, rRMSE 误差在0.24以内。存在几个测量值误差较大,导致 R^2 较低, RMSE 偏大,主要是因为椭圆拟合的点云数据有叶片点云干扰,导致自动测量偏大。评价指标表明人工点云测量方法具有较高的准确性,且算法测量值与真值一致性高。自动点云测量方法由于叶片干扰对本文测量方法精度影响较大。

从表 6 中可以看出,不同玉米品种使用人工点云测量方法测量茎短轴长度决定系数 R^2 在0.85以

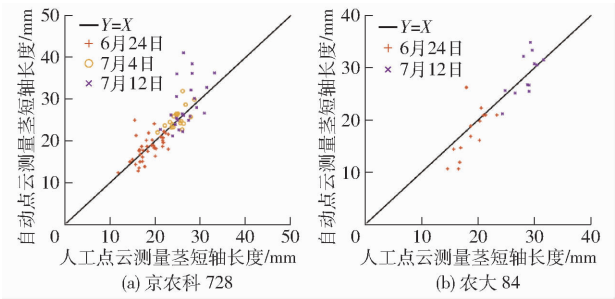


图 12 自动点云茎短轴长度测量和人工点云茎短轴长度测量对比

Fig. 12 Comparison of automatic point cloud stem thickness' short axis measurement and artificial point cloud stem thickness' short axis measurement

表 5 茎长轴长度评价指标

Tab. 5 Stem thickness' long axis evaluation index				
玉米品种	方法	R^2	RMSE/mm	rRMSE
京农科 728	人工点云测量	0.960 6	1.24	0.038 4
	自动点云测量	0.354 3	6.65	0.239 3
农大 84	人工点云测量	0.907 6	1.56	0.048 6
	自动点云测量	0.503 1	4.95	0.162 6

表 6 茎短轴长度评价指标

Tab. 6 Stem thickness' short axis evaluation index				
玉米品种	方法	R^2	RMSE/mm	rRMSE
京农科 728	人工点云测量	0.855 8	1.86	0.090 5
	自动点云测量	0.672 1	3.45	0.154 0
农大 84	人工点云测量	0.961 6	1.23	0.064 0
	自动点云测量	0.808 0	3.26	0.165 4

上, RMSE 都控制在 1.9 mm 以内, rRMSE 在 0.10 以内, 说明人工点云测量准确度高, 可以代替人工田间测量。自动点云测量方法测量茎长轴长度决定系数 R^2 在 0.67 以上, RMSE 都控制在 3.5 mm 以内, rRMSE 在 0.17 以内, 说明茎短轴长度自动测量与长轴测量结果相比有较大的提高, 分析原因主要是由于叶片主要在长轴轴向, 对短轴测量结果影响较小。评价指标表明人工点云测量方法具有较高的准确性, 且算法测量值与真值一致性高; 自动点云测量方法精度较高。

3 讨论

本文使用地基激光雷达获取不同生长期不同品种玉米的三维点云数据, 并通过人工点云测量玉米表型参数验证了玉米点云数据与玉米真实形态的一致性, 证明了使用地基激光雷达测量表型参数的可行性和通用性, 并且实现了无损自动测量功能。无损测量的特点可以重复获取同一批植株的日动态检测和多个生长期的表型, 用于分析和量化植株的生长过程。但是采集时, 风的有无、大小对叶片形态影响十分严重, 所以要在无风或微风条件下采集点云数据; 或者使用茎秆高度代替株高。在自动测量茎粗方面, 由于叶片的干扰, 导致茎粗测量误差较大, 尤其是对茎长轴长度测量精度影响很大, 下一步将研究如何更好地分割茎秆和叶片, 减少叶片对茎粗测量的影响, 进一步提高茎粗的测量精度。另外, 使用三维点云数据不仅可以测量玉米株高和茎长轴、短轴长度, 还可以测量其他玉米表型参数, 例如: 叶长、叶宽、叶倾角、叶面积、茎秆高度^[26]等参数; 在以后的研究中将扩展到其他表型参数的测量上, 提高点云数据利用效率。

4 结论

- (1) 验证了使用地基激光雷达点云人工测量玉米株高和茎长轴、短轴长度是可行的, 并且操作简单, 结果稳定可靠, 可以代替人工田间测量值, 减轻田间劳动强度。并为育种学者和作物表型研究学者提供一种简单、可行、准确测量玉米株高、茎粗的方案。
- (2) 实现了基于地基激光雷达点云数据自动测量玉米株高和茎长轴、短轴长度, 实现玉米株高和茎长轴、短轴长度的快速测量, 提高了表型参数测量效率。并且京农科 728 和农大 84 株高的 RMSE 分别为 1.02、0.71 cm, 茎短轴长度的 RMSE 分别为 3.45、3.26 mm, 达到较高的测量精度。由于叶片干扰, 茎长轴长度的 RMSE 分别为 6.65、4.95 mm, 测量误差较大。

参 考 文 献

[1] 刘忠祥. 玉米株高主效 QTL 定位研究综述[J]. 甘肃农业科技, 2018(9): 62 - 69.

[2] 李峰, 闫秋艳, 鲁晋秀, 等. 种植密度对不同玉米品种茎秆性状及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(11): 8 - 15.

LI Feng, YAN Qiuyan, LU Jinxiu, et al. Effect of planting density on the stem characteristics and yield of summer maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(11): 8 - 15. (in Chinese)

[3] 仇瑞承, 苗艳龙, 季宇寒, 等. 基于 RGB - D 相机的单株玉米株高测量方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 211 - 219.

QIU Ruicheng, MIAO Yanlong, JI Yuhuan, et al. Measurement of individual maize height based on RGB - D camera [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 211 - 219. (in Chinese)

[4] 仇瑞承, 张漫, 魏爽, 等. 基于 RGB - D 相机的玉米茎粗测量方法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 170 - 176.

QIU Ruicheng, ZHANG Man, WEI Shuang, et al. Method for measurement of maize stem diameters based on RGB - D camera [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 170 - 176. (in Chinese)

- [5] ROSELL J, SANZ R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 81: 124–141.
- [6] 张漫, 苗艳龙, 仇瑞承, 等. 基于车载三维激光雷达的玉米叶面积指数测量[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(6): 12–21. ZHANG Man, MIAO Yanlong, QIU Ruicheng, et al. Maize leaf area index measurement based on vehicle 3D LiDAR[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(6): 12–21. (in Chinese)
- [7] 仇瑞承, 苗艳龙, 张漫, 等. 基于线性回归的玉米生物量预测模型及验证[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 131–137. QIU Ruicheng, MIAO Yanlong, ZHANG Man, et al. Modeling and verification of maize biomass based on linear regression analysis[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(10): 131–137. (in Chinese)
- [8] 何晶. 基于图像处理的株高无损测量方法研究[J]. *测控技术*, 2015, 34(4): 39–42. HE Jing. Measurement method of plant height based on image processing[J]. *Measurement & Control Technology*, 2015, 34(4): 39–42. (in Chinese)
- [9] 张宏鸣, 谭紫薇, 韩文霆, 等. 基于无人机遥感的玉米株高提取方法[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(5): 241–250. ZHANG Hongming, TAN Ziwei, HAN Wenting, et al. Extraction method of maize height based on UAV remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 241–250. (in Chinese)
- [10] ZHAO H, XU L, JIANG H, et al. High throughput system for plant height and hyperspectral measurement[J]. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, XLII-3: 2365–2369.
- [11] 杨斯, 高万林, 米家奇, 等. 基于RGB-D相机的蔬菜苗群体株高测量方法[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(增刊): 128–135. YANG Si, GAO Wanlin, MI Jiaqi, et al. Method for measurement of vegetable seedlings height based on RGB-D camera[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(Supp.): 128–135. (in Chinese)
- [12] 胡杨. 基于深度相机的叶菜类作物三维重建与生长测量方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. HU Yang. Study on 3D reconstruction and growth measurement methods for leafy crops based on depth camera[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [13] CHE J, ZHAO C, ZHANG Y, et al. Plant stem diameter measuring device based on computer vision and embedded system[C]//*Computer & Computing Technologies in Agriculture-III-Third Ifip International Conference on Computer & Computing Technologies in Agriculture*, 2009.
- [14] 宗泽, 郭彩玲, 张雪, 等. 基于深度相机的玉米株型参数提取方法研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(增刊): 50–56. ZONG Ze, GUO Cailing, ZHANG Xue, et al. Maize plant type parameters extraction based on depth camera[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(Supp.): 50–56. (in Chinese)
- [15] 冷小梅. 基于影像的玉米株高和茎粗测量方法的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2018. LENG Xiaomei. Measurement of plant height and stem thickness of maize by image processing[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [16] LIN Y. LiDAR: an important tool for next-generation phenotyping technology of high potential for plant phenomics? [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 119: 61–73.
- [17] 张漫, 苗艳龙, 仇瑞承, 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. ZHANG Man, MIAO Yanlong, QIU Ruicheng, et al. Maize point cloud data filtering algorithm based on vehicle 3D LiDAR[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(4): 170–178. (in Chinese)
- [18] 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]. *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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 22–27. (in Chinese)
- [19] 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. SU Wei, JIANG Kunping, GUO Hao, et al. Extraction of phenotypic information of maize plants infield by terrestrial laser scanning[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(10): 125–130. (in Chinese)
- [20] TILLY N, HOFFMEISTER D, SCHIEDUNG H, et al. Terrestrial laser scanning for plant height measurement and biomass estimation of maize[J]. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, XL-7: 181–187.
- [21] CHATZINIKOS A, GEMTOS T, FOUNTAS S. The use of a laser scanner for measuring crop properties in three different crops in Central Greece[C]//*Proceedings of the 9th European Conference on Precision Agriculture*, 2013: 129–136.
- [22] EHLERT D, HEISIG M, ADAMEK R. Suitability of a laser rangefinder to characterize winter wheat[J]. *Precis. Agric.*, 2010, 11(6): 650–663.
- [23] 李抒昊. 玉米冠层三维点云处理技术及株型参数计算方法研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2018. LI Shuhao. Study on corn canopy three-dimensional point cloud processing technology and calculation method of plant type parameters[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [24] 郭彩玲, 宗泽, 张雪, 等. 基于三维点云数据的苹果树冠层几何参数获取[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(3): 175–181. GUO Cailing, ZONG Ze, ZHANG Xue, et al. Apple tree canopy geometric parameters acquirement based on 3D point clouds[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(3): 175–181. (in Chinese)
- [25] 徐华东, 陈文静, 刘华. 基于三维激光扫描的单木胸径和树高提取[J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(5): 524–529. XU Huadong, CHEN Wenjing, LIU Hua. Single-wood DBH and tree height extraction using terrestrial laser scanning[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, 39(5): 524–529. (in Chinese)
- [26] 梁秀英, 周风燃, 陈欢, 等. 基于运动恢复结构的玉米植株三维重建与性状提取[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(6): 209–219. LIANG Xiuying, ZHOU Fengran, CHEN Huan, et al. Three-dimensional maize plants reconstruction and traits extraction based on structure from motion[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 209–219. (in Chinese)