

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.05.023

周良富, 宋海潮, 周彬彬, 等. 基于二维激光雷达的果树冠层结构信息检测方法研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(5): 147-153

Zhou Liangfu, Song Haichao, Zhou Binbin, et al. Research on the detection method of fruit tree canopy structure information based on two-dimensional LiDAR [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2024, 45(5): 147-153

基于二维激光雷达的果树冠层结构信息检测方法研究*

周良富, 宋海潮, 周彬彬, 于鹏, 代祥

(南京工业职业技术大学, 南京市, 210023)

摘要: 果树冠层结构信息获取是变量喷雾作业重要前提, 为实现果树冠层结构信息在线采集, 采用二维地面激光雷达对不同叶面积指数的果树进行, 并运用 MATLAB 软件绘制果树的三维点云图。绘制出的果树三维点云图与实际果树形态的一致, 表明点云数据与果树结构信息具有高度相关性。研究结果表明采用 2D LiDAR 测量树高与树宽的相对误差分别为 2.22% 和 4.11%, 但树厚的精度与 LAI 相关, LAI 由 0 增加到 3.68 时其测量相对误差由 5.3% 增加到 41.1%。拟合出正面和背面扫描时的 LAI 预测模型分别为 $y=1.265x-0.3137$ 和 $y=1.2305x-0.338$, F 检验结果显示样本间存在显著性差异, 且其模型的拟合优度均大于 0.9。该研究可以为果园变量喷雾决策提供技术与模型支撑。

关键词: 果树; 变量喷雾; 叶面积指数; 激光雷达; 点云

中图分类号: S491 文献标识码: A 文章编号: 2095-5553 (2024) 05-0147-07

Research on the detection method of fruit tree canopy structure information based on two-dimensional LiDAR

Zhou Liangfu, Song Haichao, Zhou Binbin, Yu Peng, Dai Xiang

(Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing, 210023, China)

Abstract: The acquisition of information regarding fruit tree canopy structure is essential for optimizing variable spray operations. In order to enable real-time data collection on canopy structure, a two-dimensional (2D) ground laser radar was employed to scan fruit trees with varying Leaf Area Index (LAI) in this study. Three-dimensional (3D) point cloud images of the fruit trees was generated by using MATLAB software, and was consistent with the actual tree morphology, which indicated a strong correlation between the point cloud data and structural information of the fruit tree. The results revealed that the relative errors of tree height and tree width measured by utilizing 2D LiDAR were 2.22% and 4.11%, respectively. However, the accuracy of tree thickness was found to be influenced by LAI, the relative measurement errors for thickness increased from 5.3% to 41.1% when LAI increased from 0 to 3.68. The predictive models for LAI were developed for frontal and dorsal scans, with equations of $y=1.265x-0.3137$ and $y=1.2305x-0.338$, respectively. F-test results highlighted significant differences among the samples, with model goodness of fit exceeding 0.9. This study offers valuable technical insights and model support for decision-making in orchard variable spray operations.

Keywords: fruit tree; variable spray; leaf area index; LiDAR; point cloud

0 引言

果园变量喷雾是实现精准施药的一种重要技术手段。而果树冠层结构信息是实现变量喷雾的前提, 当前主要采用非接触式的冠层探测手段, 获取果树冠层

结构、形貌和密度等参数, 变量喷雾系统根据施药决策模型反馈的施药参数动态调节施药量, 实现按需施药的目的^[1], 其中冠层结构特征采集及分析已经引起广大学者的高度重视。

果树冠层结构信息是果园变量喷雾最重要的环节

收稿日期: 2023 年 10 月 31 日 修回日期: 2024 年 3 月 8 日

* 基金项目: 江苏省农业自主创新基金(X(22)3103); 南京工业职业技术大学科研启动基金项目(YK20-14-04)

第一作者: 周良富, 1983 年生, 江西玉山人, 博士, 副研究员; 研究方向为植保机械。E-mail: 2020101069@niit.edu.cn

之一,是变量喷雾参数控制与执行的基础数据基础^[2]。传统的果树体积测量主要采用采摘果树叶片样本法,不仅效率低成本高,而且对果树破坏造成不可逆的破坏。进入 21 世纪以来,各种非接触式的测量方法被应用到果树冠层测量中,包括微波雷达法^[3]、高清 X 射线扫描法^[4]、光学传感法^[5, 6]、超声波传感法^[7]、立体视觉法^[8, 9]和 LiDAR(light detection and ranging)传感法^[10],但受空间分辨率、果园相对密闭的关照等条件限制,只有超声波传感法和 LiDAR 传感法是目前最被广泛认可地应用于果树冠层结构信息采集的方法,而超声波传感法通过测出冠层外边界与每个传感器之间的距离计算冠层宽度,然后计算区域冠层面积和树冠总体积^[11],受超声波束扩散的影响,测量误差大,只能估算冠层体积,而且对冠层的孔隙度、叶面积指数等参数无能为力。

与超声波传感测量法相比,LiDAR 传感测量法具有测量精度高、速度快等优点,采用适当的算法可以将 3D 点云数据重构出高精度的果树结构^[12, 13]。目前的研究主要是激光点云与冠层结构之间的关系,如 Walklate 等^[14]根据 LiDAR 传感器测量激光的位置与角度,测量树高、树宽等结构信息。周梦维等^[15]采用机载 LiDAR,通过对激光回波波形的拟合,实现作物与土壤分离,结合冠层结构特征获取作物冠层高度,相对误差小于 5.2%。Ricardo 等^[16]设计了三维激光扫描系统,试验研究了激光在冠层上的撞击数与叶面积的关系。张美娜等^[17]采用 LiDAR 传感器研究了激光点云数与叶片数之间的关系,并利用不同的拟合函数建立了点云数与叶片数的函数关系,模型决定系数均大于 0.9。Sanza 等^[18]采用 LiDAR 在篱笆型果园中研究了冠层体积与实测叶面积密度间的相关性,相关性达到 $R^2 = 0.87$ 。由于激光束不能穿透过高叶面积指数 LAI(leaf area index)的树冠,不能准确获取冠层后部的结构,会引起“阴影效应”^[19],Escola 等^[20]发现由于冠层内部枝叶的影响,采用 LiDAR 传感测量出的树冠体积大于实际体积。这些研究在果园变量喷雾中都有一定的应用,如 Escola^[21]、李龙龙^[22]等利用 LiDAR 传感器采集果树冠层信息指导变量喷雾作业,并研制了相应的变量喷雾机。在借鉴以上研究成果基础上,周梦维等^[23]利用机载激光雷达的反射与回波,研究了叶面积体密度和叶面积指数模型,验证了激光雷达评估叶面积指数的有效性,但机载激光雷达采集尺度大精度低难以满足农业精细化作业要求。

本研究在 LiDAR 三维点云数据的基础上提取树高、胸径及最大覆盖面积,计算出点云密度,建立叶面积指数与点云密度的拟合模型。以期实现用点云密度来评估叶面积指数,为果园变量喷雾决策提供依据。

1 材料与方法

1.1 LiDAR 传感器

采用某公司的二维地面激光雷达 SICK LMS5100,该传感器广泛应用于防撞、监视和机器视觉导航等工业领域。与 3D 激光扫描传感器相比,该 2D 传感器价格便宜,但只能扫描一个平面,而且扫描距离短。激光扫描器连续不停地发射 905 nm 激光脉冲,由旋转光学机构将激光脉冲按一定角度间隔(角度分辨率)发射向扫描角度内的各个方向而形成以径向坐标为基准的二维扫描面。传感器采用 5 次回波技术测量障碍物距离,其扫描角度为 $-5^\circ \sim 185^\circ$ 可调,角度分辨率分别可以设置为 0.167° 、 0.25° 、 0.333° 、 0.5° 、 0.667° 、 1° 扫描频率可分别设置为 25 Hz、35 Hz、50 Hz、75 Hz、100 Hz,测量精度为 12 mm。

1.2 试验装置及仪器

本次试验主要采用的仪器设备包括激光扫描系统,叶面积扫描仪、仿真树、铅锤、米尺等。其中激光扫描系统包括 LiDAR 传感器、线性导轨、步进电机、控制柜、直流电源和控制电脑,系统主要用于采集果树三维点云数据,如图 1 所示。叶面积扫描仪主要用于测量叶片面积,铅锤和米尺主要用于测量果树最大边界位置。仿真树中的单个叶片面积一致,且每个枝条可任意拔插。

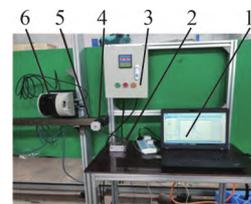


图 1 试验装置及仪器

Fig. 1 Test device and instrument

1.电脑 2.电源 3.控制柜 4.步进电机
5.线性导轨 6.LiDAR 传感器

1.3 研究方法

1.3.1 三维点云生成理论

LiDAR 传感器以一定的扫描频率,在一定的扫描角度下连续不断发射激光脉冲,当激光脉冲撞击冠层靶标时返回撞击点与激光发射点的距离值。其激光点云生成的原理如图 2 所示。

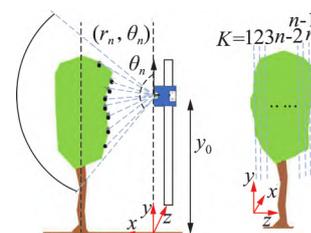


图 2 激光点云生成原理图

Fig. 2 Laser point cloud generation schematic

以传感器初始位置为 $Z=0$ ，在 Sopcast 软件中读取激光扫描的角度 θ 、距离 R ，第 i 次扫描的时间 t_i 等，并以 .xls 文件输出。将每个激光点的极坐标 (R_i, θ_i) 按式(1)~式(2)转化为直角坐标 (X_i, Y_i) ，而激光扫描的同时线性导轨上的滑块开始以速度 v 匀速运动，则 Z 方向的坐标按(2)式计算。

$$x_{ij} = r_{ij} \cos\theta_j \quad (1)$$

$$y_{ij} = y_0 + r_{ij} \sin\theta_j \quad (2)$$

$$z_i = v \cdot t_i \quad (3)$$

式中： x_{ij} ——第 i 次第 j 个角度扫描时所对应的 x 坐标；

y_{ij} ——第 i 次第 j 个角度扫描时所对应的 y 坐标；

r_{ij} ——第 i 次第 j 个角度扫描时所对应的距离值；

j ——从起始扫描角度开始的第 j 个扫描点；

y_0 ——雷达安装的初始高度，m。

将得到的 x 、 y 和 z 分别赋予矩阵 X 、 Y 、 Z ，运用 MATLAB 软件的 scatter3(X, Y, Z) 函数得到扫描区域的三维点云图。

$$X = [x_{ij}]; Y = [y_{ij}]; Z = [z_i]$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n; j = \theta_0, \theta_0 + \theta', \dots, \theta_0 + n\theta'$$

1.3.2 基于 MATLAB 的三维点云生成算法

在 MATLAB 中将 LiDAR 传感器采集的数据转化为可散点生成的点云数据，其数据处理具体步骤为：读取 TXT 数据文件→十六进制转十进制→按(1)~(3)式生成坐标点矩阵→矩阵变换→环境干扰点过滤→点云生成。

1.3.3 叶面积指数

叶面积指数是指单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的倍数，本文指单棵果树叶片总面积与其最大胸径截面面积之比。选取 10 片代表性的叶片，采用叶面积仪分别测量出其叶片面积，并以 10 个叶片面积的平均值作为单个叶面积。采用人工统计出每次测量的果树叶片数。采用米尺测量出树高、树宽尺寸，以树干为中心点采用铅垂线标识出每 45° 方向上边界点，从 270° 开始按逆时针分别标识为 P1~P8，采用米尺测量出中心点到各点的距离值。在 Pro/ENGINEER 软件中按实际尺寸绘制各边界点，采用样条曲线将各边界点连接成封闭的面，如图 3 所示，读取相应面的面积即为最大胸径截面面积。因此，果树叶面积指数 LAI 按式(4)计算。

$$LAI = \frac{N \cdot s}{S} \quad (4)$$

式中： LAI ——果树叶面积指数；

S ——果树最大胸径截面面积， m^2 ；

N ——单棵果树叶片总数；

s ——果树叶片的平均叶面积， m^2 。

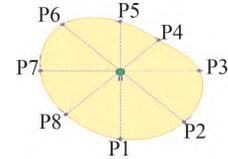


图 3 冠层边界及最大胸径测量

Fig. 4 Canopy boundary and maximum breast diameter measurement

1.3.4 模型构建及评价方法

在文中特定的果树结构参数下，人工插取 1 000、950、900... 300、250、200、150、100 和 0 片叶片，合计 40 组，从果树两侧分别进行 2 次扫描，得到共计 80 组点云数据。其中每组数据文件按扫描方向 (Front/Rear) - 叶片数来命名，如 F500 表示从正面扫描 500 片叶片果树的点云数据文件。根据式(3)计算出相应的叶面积指数 LAI，同时在 MATLAB 软件中统计出对应的点云数，得到以点云数和叶面积指数为随机变量的样本 $(N_i, LAI_i) (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 。具体建模过程为：(1)以 LAI_i 为因变量建立回归模型。(2)利用 80 组样本数据对模型的参数进行估计。(3)对参数估值及回归方程进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 果树三维点云构建结果

在实验室条件下，以开心型仿真树为对象。树高为 2.3 m，最大胸径为 1.68 m，总叶片数为 1 000 片，如图 4(a) 所示。设置激光雷达的扫描角度分辨率为 0.5° ，扫描频率为 50 Hz，扫描速度为 0.15 m/s。在 SOPAST 软件中采集每个激光碰撞点的角度、距离及时间。根据式(1)~式(3)分别计算出每个激光碰撞点的空间坐标，然后运用 MATLAB 软件的 scatter3(X, Y, Z) 函数生成扫描区域的三维点云图，消除相关环境非靶标点后得到仿真树单次正面扫描的三维点云图，如图 4(b) 所示。

为了更全面构建出果树的三维特征，将分别从果树正、反两面扫描，并将 2 次的点云数据在一个坐标系融合。由于本实验台激光雷达传感器是固定的，因此将果树旋转 180° 进行反面扫描，以正面扫描时的坐标系为基准，反面扫描时的坐标转化到基准坐标系中，具体的转化算法为

$$x_{ij}' = 2L - r_{ij} \cos\theta_j \quad (5)$$

$$y_{ij}' = y_0 + r_{ij} \sin\theta_j \quad (6)$$

$$z_i' = L' - v \cdot t_i \quad (7)$$

式中： x_{ij}' 、 y_{ij}' 、 z_i' ——反面扫描时转化后的坐标值；

L ——雷达与果树杆中心的距离，m；

L' ——雷达直线运行距离，m。

最后将正、反两次扫描得到的数据矩阵 $[x, y, z]$ 和 $[x', y', z']$ 合并为同一矩阵 $[X, Y, Z]$ ，并生成三维点云图，如图 4(c)所示。虽然一侧扫描时后部会被前部的

冠层遮挡，导致激光束无法穿过生成激光点，但由图 4(b)可直观看出一侧扫描的点云图更能反映实际的冠层结构，因为两侧扫描时同一片树叶会被扫描两次造成点云堆积，而且对点云融合的精度要求很高，点云融合的微小误差都会造成冠层内部结构的失真。因此在后续研究点云与叶面积指数关系时采用单侧扫描法。

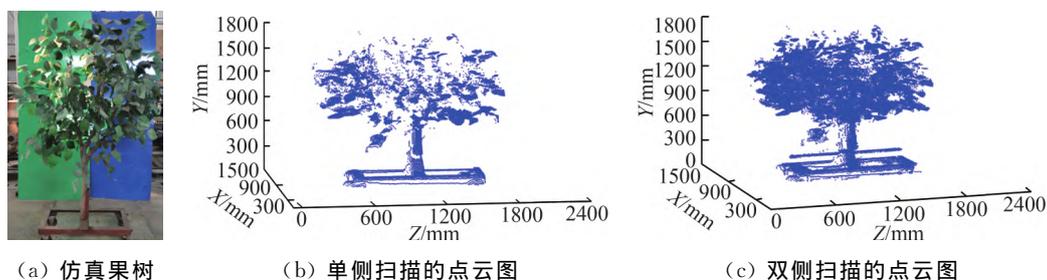


图 4 果树及三维点云图

Fig. 4 Fruit tree and 3D point cloud

2.2 不同叶面积指数的点云图

采用叶面积仪测量出 10 个叶片得平均叶面积为 0.007 m^2 。根据式(3)计算出叶片数为 1 000、950、900、850、800、...、300、250、200、150、100 和 0 所对应的叶面积指数为 3.68、3.5、3.48、3.36、3.18、3.24、3.02、2.8、2.64、2.5、2.27、2.04、1.87、1.81、1.55、

1.42、1.21、0.67、0.33 和 0。为观察扫描的三维点云图与实际果树形态的一致性，文中显示叶面积指数为 0、0.67、1.55、2.27、3.24 和 3.48 下的果树照片及其点云图，如图 5 所示。由图 5 可直观反映出点云数据与实际形态的一致性，因此也侧面验证了采用该系统及方法来获取果树形态特征的有效性。

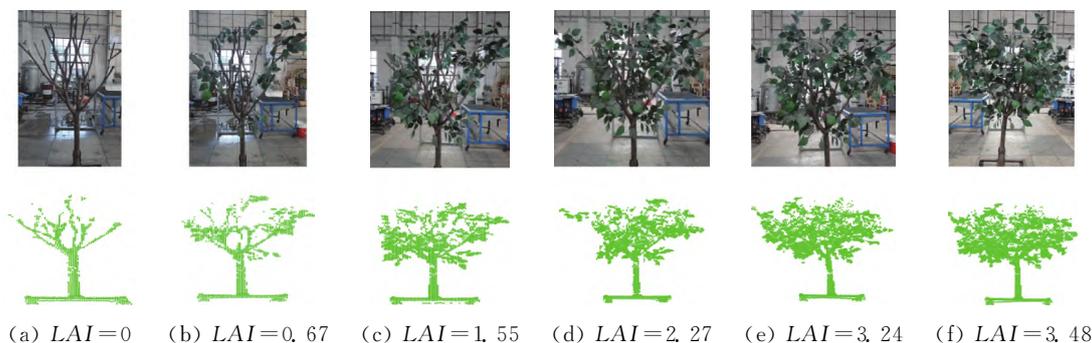


图 5 不同 LAI 下的果树及其点云图

Fig. 5 Fruit trees and their point cloud image under different LAIs

2.3 冠层几何结构信息

2.1 节只是说明了激光点云数据可以定性分析果树几何形态，而果园变量喷雾作业中更关注对冠层结构定量分析，其中冠层靶标边界是对靶喷雾和变量喷雾的最基本信息。为评估激光雷达扫描法测量果树树高、树宽(行走方向)和树厚(喷雾方向)的精度问题。对特定仿真树进行了 5 次扫描，提取树高与树宽数据并分别求平均值，与实际测量值比较求取相对误差如表 1 所示，可知激光雷达扫描获取树高与树宽的精度较高，其相对误差分别为 2.22% 和 4.11%，其中树高测量主要与传感器精度有关，而树宽还受扫描速度稳定性和认为操控影响，因此树宽的精度低于树高的测试精度。

由于激光不能穿透实体叶片，因此难以获取高叶面

积指数果树的准确厚度，为评价叶片对激光的遮挡效应。采用激光扫描叶面指数分别为 0、0.67、1.42、1.71、2.27、2.8、3.18 和 3.68 仿真果树，提取相应的厚度数据并与实际测量值比较，计算相对误差如表 1 所示。由表 1 可得出，叶面积指数越大，其叶片对激光的遮挡效应越明显，导致树厚度测量精度越低，LAI 由 0 增加到 3.68 时，其测量相对误差由 5.3% 增加到 41.1%，因此对高 LAI 郁闭果树而且其厚度测试误差可能会超过 70%。为更直观反映 LAI 对激光雷达识别果树靶标边界的精度，图 6 直观给出 LAI 为 3.5、2.27 和 0.67 的 3 种的点云俯视图(XZ 面)，同时标注出树干(红点)及 8 个边界点(绿点)位置。由图 6(c)可看出在高叶面积指数下，其背部基本没有激光点，对于低叶面积指数的冠层靶标，其边界识别精度较高。

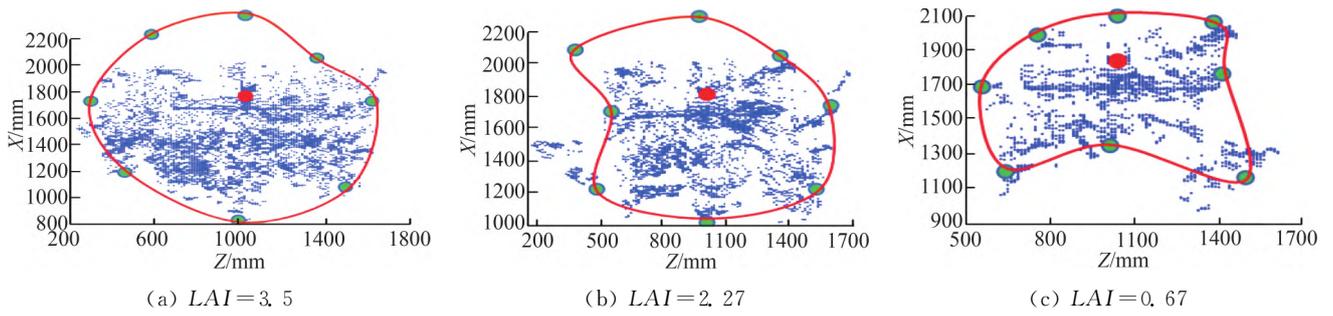


图 6 边界识别

Fig. 6 Boundary identification

表 1 边界识别精度

Tab. 1 Boundary identification accuracy

参数	LAI	实测值 /m	扫描值 /m	绝对误差 /m	相对误差 /%
树高	—	2.25	2.20	0.05	2.22
树宽	—	1.46	1.40	0.06	4.11
树厚	0	0.75	0.71	0.04	5.30
	0.67	1.05	0.95	0.1	9.50
	1.42	1.35	1.21	0.14	10.30
	1.81	1.35	1.19	0.16	11.80
	2.27	1.55	1.34	0.21	13.50
	2.8	1.55	1.31	0.24	15.40
	3.18	1.75	1.19	0.56	32.00
	3.68	1.75	1.03	0.72	41.10

2.4 叶面积指数评估模型

叶面积指数是衡量果树疏密的重要指标之一，也是指导变量喷雾较为有效的参数，针对目前难以在线获取叶面积指数的难题，采用激光传感器可以在线获取激光点云密度(单位土地面积上的点云数)，因此建立激光点云密度与叶面积指数之间的关系模型具有实际应用意义。文中的点云密度是指单棵仿真果树所占土地面积与所有叶面的点云数之比。

为降低树干对扫描点云数据的影响，将所有 80 组数据按正面扫描和背面扫描分成 2 大组分别统计出点云数后，将所有点云数减去叶面积指数为 0 的点云数得到不同叶面积指数下的总叶片点云数，并分别计算点云密度，得到正面和背面扫描的 2 个点云密度矩阵，其中正面扫描的点云密度矩阵为[2.888、2.867、2.872、2.869、2.751、2.671、2.711、2.489、2.340、2.225、1.984、1.824、1.677、1.632、1.569、0.813、0.240、0、2.836、2.817、2.924、2.968、2.895、2.794、2.649、2.427、2.277、2.160、1.919、1.734、1.766、1.824、1.677、1.632、1.569、0.813、0.240、0]，2 个点云密度所对应的叶面积指数矩阵均为[3.684、3.5、3.481、3.361、3.182、3.241、3.025、2.809、2.642、2.5、2.273、2.045、1.879、1.815、1.556、1.423、1.217、

0.667、0.333、0、3.684、3.5、3.481、3.361、3.182、3.241、3.025、2.809、2.642、2.5、2.273、2.045、1.879、1.815、1.556、1.423、1.217、0.667、0.333、0]。运用 EXCEL 2010 软件，以点云密度为横坐标以叶面积指数为纵坐标分别建立正面和背面激光扫描时的散点图，采用线性回归的方法分别拟合出基于点云密度的叶面积指数预测模型(图 7)。其正面和背面扫描时的预测模型分别为 $y = 1.265x - 0.3137$ 和 $y = 1.2305x - 0.338$ ，模型的方差分析结果如表 2 所示，F 检验结果显示样本间存在显著性差异，且其模型的拟合优度均大于 0.9。

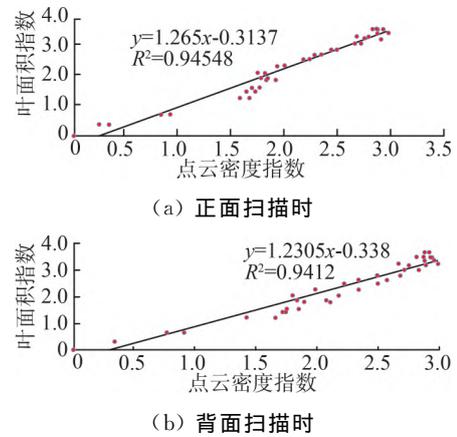


图 7 叶面积指数预测模型

Fig. 7 Leaf area index prediction model

表 2 模型的方差分析

Tab. 2 Variance analysis of the model

差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit	R ²
正面	0.96	1	0.96	18.6	0.0001	4.091	0.95
背面	0.41	1	0.41	7.52	0.0091	4.091	0.94

3 结论与建议

3.1 结论

通过搭建激光雷达扫描系统，以仿真树为对象，测试不同叶面积指数下的点云数据，经数据分析得出以下结论。

1) 采用 2D LiDAR 扫描系统及方法获取不同叶面积指数的仿真树的点云数据, 果树三维点云图与实际果树形态的一致性表明该系统及方法的可行性。

2) 采用不同方向对果树进行激光扫描, 可以更准确获取形态数据, 但点云融合的微小误差都会造成冠层内部结构的失真, 结合实际变量喷雾作业场景, 建议以单侧扫描法进行更进一步研究。

3) 采用 2D LiDAR 测量树高与树宽的精度较高, 其相对误差分别为 2.22% 和 4.11%, 但树厚的精度与 LAI 相关, LAI 由 0 增加到 3.68 时其测量相对误差由 5.3% 增加到 41.1%, 说明 LAI 越大对激光的遮挡越严重。

4) 通过 80 组点云与叶面积指数数据, 拟合出正面和背面扫描时的 LAI 预测模型分别为 $y = 1.265x - 0.3137$ 和 $y = 1.2305x - 0.338$, F 检验结果显示样本间存在显著性差异, 且其模型的拟合优度均大于 0.9。

3.2 建议

本文是基于类纺锤形仿真树开展的研究, 其意义在于验证建立点云密度与叶面积指数关系模型的方法有效性及可行性, 但模型适用性受树形影响较大, 因此本研究结果只适用于与本研究对象相一致的果树。该研究可以为果树变量喷雾提供模型支撑, 在果树变量喷雾应用中存在如下技术难点, 值得后续关注。

1) 针对激光难以穿透高叶面积指数的果树冠层的问题, 而图 6 显示激光可以穿透到高叶面积指数 ($LAI = 3.5$) 的树干部分, 因此对于高叶面积指数的冠层, 可以采用半棵果树来计算相应的叶面积指数及点云密度。而实际施药作业时雾滴也难以穿透高叶面积指数的整个冠层, 符合实际应用需求。

2) 一般来说, 果树植保喷雾都是在行间两侧同时喷雾, 因此变量喷雾时需要同时探测两行的冠层信息。为提高传感器使用效率, 降低成本, 对于低矮型的果树, 可以将 LiDAR 吊装于与冠层高度齐平的位置, 从 $-5^\circ \sim 185^\circ$ 全域扫描, 提取冠层信息。但对于高大型果树, 建议每侧单独安装一个 LiDAR 传感器, 根据树高设置扫描角度。

3) 为避免喷雾农药雾滴对 LiDAR 的污染造成测量精度降低的问题, 要求 LiDAR 与出风口保持一定的距离。对于可以快速响应的喷雾系统, 要求 LiDAR 冠层信息采集与喷雾执行在线响应, 可以将 LiDAR 以一定的侧向角度安装于远离出风口, 确保 LiDAR 扫描面在喷雾区内、强扰动区域以外, 实现在线变量喷雾, 同时避免农药雾滴对 LiDAR 的污染。

4) 本文只研究一种树形在特定扫描参数下(扫描

角度分辨率为 0.5° , 扫描频率为 50 Hz, 扫描速度为 0.15 m/s) 的点云数据, 以验证方法的可行性, 后续还将以扫描参数为变量进行正交试验, 得出适应性更强的拟合模型。

参 考 文 献

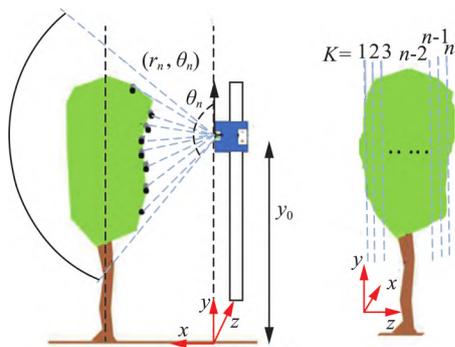
- [1] 邱白晶, 闫润, 马靖, 等. 变量喷雾技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 59-72.
Qiu Baijing, Yan Run, Ma Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 59-72.
- [2] 周良富, 薛新宇, 周立新, 等. 果园变量喷雾技术研究现状与前景分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 80-92.
Zhou Liangfu, Xue Xinyu, Zhou Lixin, et al. Research situation and progress analysis on orchard variable rate spraying technology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(23): 80-92.
- [3] Bongers F. Methods to assess tropical rain forest canopy structure: An overview [J]. Plant Ecology, 2001, 153(5): 263-277.
- [4] Stuppy W, Maisano J, Colbert M, et al. Three-dimensional analysis of plant structure using high-resolution X-ray computed tomography [J]. Trends in Plant Science, 2003, 8(1): 2-6.
- [5] Giuliani R, Magnanini E, Fragassa C, et al. Ground monitoring the light shadow windows of a tree canopy to yield canopy light interception and morphological traits [J]. Plant Cell Environment, 2000, 23(3): 783-796.
- [6] 夏春华, 施滢, 尹文庆. 基于 TOF 深度传感的植物三维点云数据获取与去噪方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 168-174.
Xia Chunhua, Shi Ying, Yin Wenqing. Obtaining and denoising method of three-dimensional point cloud data of plants based on TOF depth sensor [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(6): 168-174.
- [7] Hong Y, Heping Z, Richard D, et al. Evaluation of ultrasonic sensor for variable-rate spray applications [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 75(5): 36, 173-191.
- [8] Kise M, Zhang Q. Development of a stereovision sensing system for 3D crop row structure mapping and tractor guidance [J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(2): 191-198.
- [9] Francisco R, Qin Zhang, John F, et al. Stereo vision three-dimensional terrain maps for precision agriculture [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(5): 133-143.

- [10] Escolà A, Camp F, Solanelles F, et al. Variable dose rate sprayer prototype for dose adjustment in tree crops according to canopy characteristics measured with ultrasonic and laser LiDAR sensors [C]. In: Proceedings ECPA-Sixth European Conference on Precision Agriculture, 2007: 563–571.
- [11] Llorens J, Gil E, Llop J, et al. Ultrasonic and LiDAR sensors for electronic canopy characterization in vineyards: Advances to improve pesticide application methods [J]. Sensors, 2011, 65(11): 2177–2194.
- [12] Rosell J, Llorens J, Sanz R, et al. Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LiDAR scanning [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(12): 1505–1515.
- [13] Rosell J R, Sanz R, Llorens J, et al. A tractor-mounted scanning LiDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations; A comparison with conventional destructive measurements [J]. Biosystems Engineering, 2009, 102(2): 128–134.
- [14] Walklate P, Cross J, Richardson G, et al. Comparison of different spray volume deposition models using LiDAR measurements of apple orchards [J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(3): 253–267.
- [15] 周梦维, 柳钦火, 刘强, 等. 基于机载小光斑全波形 LiDAR 的作物高度反演[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 183–188.
Zhou Mengwei, Liu Qinhuo, Liu Qiang, et al. Inversion for crop height by small-footprint-waveform airborne LiDAR [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 183–188.
- [16] Ricardo S, Jordi L, Alexandre E, et al. Innovative LiDAR 3D dynamic measurement system to estimate fruit-tree leaf area [J]. Sensors, 2011, 11(3): 5769–5791.
- [17] 张美娜, 吕晓兰, 邱威, 等. 基于三维激光点云的靶标叶面积密度计算方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 172–179.
Zhang Meina, Lü Xiaolan, Qiu Wei, et al. Calculation method of leaf area density based on three-dimensional laser point cloud [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 172–179.
- [18] Sanza R, Rosella J, Llorens J, et al. Relationship between tree row LiDAR-volume and leaf area density for fruit orchards and vineyards obtained with a LiDAR 3D dynamic measurement system [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 172(3): 153–162.
- [19] Van D, Hoet D, Jonckheere W, et al. Influence of measurement set-up of ground-based LiDAR for derivation of tree structure [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2006, 141(10): 147–160.
- [20] Escolà A, Camp F, Solanelles F, et al. Variable dose rate sprayer prototype for dose adjustment in tree crops according to canopy characteristics measured with ultrasonic and laser LiDAR sensors [C]. In: Proceedings ECPA-Sixth European Conference on Precision Agriculture, 2007: 563–571.
- [21] Escolà A, Rosell P, Planas J, et al. Variable rate sprayer Part 1-orchard prototype: Design, implementation and validation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 95(3): 122–135.
- [22] 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 70–76.
Li Longlong, He Xiongkui, Song Jianli, et al. Design and experiment of automatic profiling orchard sprayer based on variable air volume and flow rate [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 70–76.
- [23] 周梦维, 柳钦火, 刘强, 等. 机载激光雷达的作物叶面积指数定量反演[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 207–213.
Zhou Mengwei, Liu Qinhuo, Liu Qiang, et al. Inversion of leaf area index based on small-footprint waveform airborne LiDAR [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 207–213.

论文精选：基于二维激光雷达的果树冠层结构信息检测方法研究

成果简介

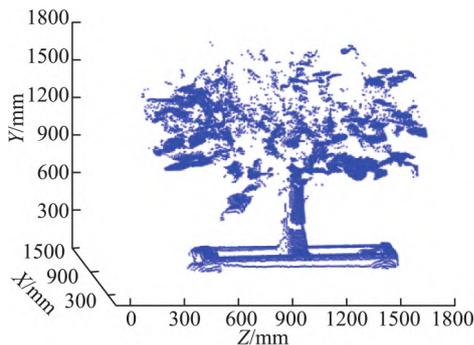
为实现果树冠层结构信息在线采集,采用二维地面激光雷达对不同叶面积指数的果树进行扫描;运用MATLAB软件绘制果树的三维点云图;通过点云信息研究果树几何结构、冠层结构等信息。绘制出的果树三维点云图与实际果树形态一致,表明点云数据与果树结构信息具有高度相关性。研究表明采用2D LiDAR测量树高与树宽的相对误差分别为2.22%和4.11%,但树厚的精度与LAI相关,LAI由0增加到3.68时其测量相对误差由5.3%增加到41.1%。拟合出正面和背面扫描时的LAI预测模型分别为 $y=1.265x-0.3137$ 和 $y=1.2305x-0.338$,F检验结果显示样本间存在显著性差异,且其模型的拟合优度均大于0.9。该研究可以为果园变量喷雾决策提供技术与模型支撑。该研究由江苏省农业自主创新基金(CX(22)3103),南京工业职业技术大学科研启动基金项目(YK20-14-04)资助。



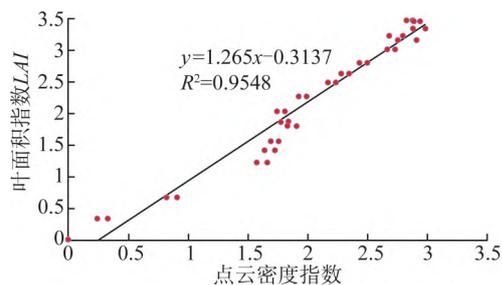
激光点云生成原理图

边界识别精度

参数	LAI	实测值 /m	扫描值 /m	绝对误差 /m	相对误差 /%
树高/m	—	2.25	2.20	0.05	2.22
树宽/m	—	1.46	1.40	0.06	4.11
树厚/m	0	0.75	0.71	0.04	5.30
	0.67	1.05	0.95	0.1	9.50
	1.42	1.35	1.21	0.14	10.30
	1.81	1.35	1.19	0.16	11.80
	2.27	1.55	1.34	0.21	13.50
	2.8	1.55	1.31	0.24	15.40
3.18	1.75	1.19	0.56	32.00	
3.68	1.75	1.03	0.72	41.10	



果树点云图



叶面积指数预测模型

团队介绍

该成果由南京工业职业技术大学智能装备机精密制造技术团队研发。团队主要致力于智能农机系统与特色蔬菜机械化装备研发,取得了多项重要成果。

联系方式

联系人:周良富,电话:15366093013,邮箱:2020101069@niit.edu.cn