

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.021

基于三维激光点云的靶标叶面积密度计算方法

张美娜¹ 吕晓兰¹ 邱威² 雷晓晖¹ 杨青松³ 张东新¹

(1. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 南京 210014; 2. 南京农业大学工学院, 南京 210031;

3. 江苏省农业科学院园艺所, 南京 210014)

摘要: 为向变量喷雾系统施药量的计算提供数据基础, 提出了靶标喷施区域叶面积密度参数的计算方法。靶标三维点云数据由二维激光雷达传感器沿果树行直线运动间接获取。在假设各喷施子区域内叶片面积变化相对较小的条件下, 基于 Matlab 曲线拟合工具箱 cftool 分析并验证了点云数与叶片数之间存在函数关系。曲线拟合结果表明, 利用高斯函数、多项式函数与指数函数拟合点云数与叶片数, 决定系数分别为 0.925 7、0.931 0 与 0.936 4, 指数函数拟合效果最好。相对误差分析结果表明, 基于 3 种拟合函数, 枝叶茂密区域相对误差最小为 11.46%, 枝叶中等茂密区域相对误差最小为 11.05%, 枝叶稀疏区域相对误差最小为 35.50%。基于确定的点云数与叶片数间的函数方程, 经系数变换后可计算出叶面积密度参数。

关键词: 变量喷雾; 激光雷达扫描; 三维点云; 点云密度; 叶面积密度

中图分类号: S491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)11-0172-07

Calculation Method of Leaf Area Density Based on Three-dimensional Laser Point Cloud

ZHANG Meina¹ LÜ Xiaolan¹ QIU Wei² LEI Xiaohui¹ YANG Qingsong³ ZHANG Dongxin¹

(1. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China

2. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

3. Institute of Horticulture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Geometrical characteristic of the target is the basis to calculate pesticide dosage. In domestic and international research, volume was calculated usually as the control input of variable-rate spraying system. Compared with the volume parameter, leaf area density can avoid the errors caused by irregular canopy shape and lots of gaps in the canopy. Therefore, a method to extract the leaf area density based on the three-dimensional laser point cloud data was proposed. This method corresponded to the law that the branches and leaves were more, the leaf area was larger and the point clouds were more. A target detection system was set up, including a laptop, a light detection and ranging sensor, an incremental photoelectric encoder and an electronic slide. Three-dimensional laser point cloud of the target was obtained through the detection system moving along the line between the trees. According to the structure of the spraying system, the spraying area was partitioned into several spaces with the same scale, and the number of point clouds and leaves was counted respectively by computers and men in each sub-region. Based on the assumption which the leaf areas were almost the same in each spraying area, the function relationship between the number of point clouds and leaves was analyzed based on Matlab software cftool. The curve fitting results showed that the correlation coefficients between the leaf number and laser point number were 0.925 7, 0.931 and 0.936 4, respectively, with Gaussian function, polynomial function and exponential function, and the exponential function was the best. On the other hand, based on the above three functions, the minimum relative error of the thick area was 11.46%, the minimum relative error of the area between thick and sparse was 11.05%, and the minimum relative error of the sparse

收稿日期: 2017-03-01 修回日期: 2017-04-01

基金项目: 国家梨产业技术体系专项(CARS-29-18)、江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(15)1023)和江苏省农业科学院基本科研业务费专项(ZX(16)3006)

作者简介: 张美娜(1986—),女,助理研究员,博士,主要从事精准变量施药控制系统研究,E-mail: zmnll22@163.com

通信作者: 吕晓兰(1980—),女,研究员,博士,主要从事施药技术与植保机械装备研究,E-mail: lxlanny@126.com

量喷雾作业。

施药量 $P_j(i)$ 的计算包含多种参考因素,如靶标的几何特征信息 $G_j(i)$ 、病虫害信息 $D_j(i)$ 与农药信息 $C_j(i)$ 等,这些相关参数通过模型辨识能够获得计算施药量的数学模型,即 $P_j(i) = f(G_j(i), D_j(i), C_j(i))$ 。

本文以激光雷达扫描传感器作为靶标探测装置,主要计算靶标几何特征参数 $G_j(i)$ 。

1.2 靶标探测系统试验平台

靶标探测系统试验平台如图2所示。

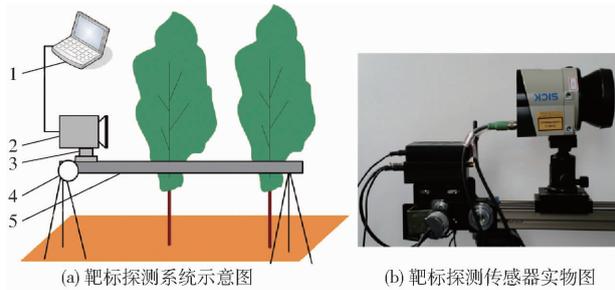


图2 靶标探测系统试验平台

Fig. 2 Test platform of target detection

1. 便携式计算机
2. 二维激光雷达扫描传感器
3. 云台支架
4. 增量式光电编码器
5. 电控滑轨

该平台由便携式计算机、二维激光雷达扫描传感器(Light detection and ranging, LIDAR)、云台支架、增量式光电编码器以及电控滑轨组成。靶标探测系统通过二维激光雷达扫描传感器垂直于扫描平面运动,间接获取靶标的三维点云数据。

系统选用西克公司的LMS111二维激光雷达扫描传感器探测靶标,获取各扫描面内靶标的距离与角度。传感器扫描范围最大20 m,扫描角度最大270°,角度分辨率为0.25°或0.5°可调,响应时间为40 ms或20 ms。系统选用西克公司的DBS36E增量式编码器,安装编码器与滑轨电动机同轴,输出脉冲用于计算各二维激光扫描面在水平方向的坐标值。编码器的分辨率为一圈输出2 048个脉冲,输出信号类型为高阈值逻辑(High threshold logic, HTL)推/挽式信号输出。便携式计算机为数据采集与处理终端。

1.3 叶面积密度计算方法

传统农药喷施的目标是将药剂均匀地喷洒到每一片叶片上,即施药量 q 是关于叶片面积 s 的函数,即 $q = f(s)$,但由于叶片数量繁多且存在部分遮挡,通过无损测量方法难以快速计算叶片面积。叶面积 s 可通过叶面积密度 ρ 乘以区域体积 V 进行间接计算,即 $s = \rho V$ 。其中,叶面积密度 ρ 用以描述树冠的枝叶稀疏情况,它指单位体积内的叶面积(m^2/m^3),即

$$\rho = \frac{s}{V} \quad (1)$$

假设区域体积 V 内叶片数为 n_l ,每片树叶的面积为 $s_i (i = 1, 2, \dots, n_l)$,将树叶编号排序,每片叶子与第一片叶子的叶面积之差记为 $\Delta s_i (i = 1, 2, \dots, n_l - 1)$,则区域体积 V 内叶面积可表示为

$$s = s_1 n_l + \sum_{i=1}^{n_l-1} \Delta s_i \quad (2)$$

假设 $s_1 n_l \gg \sum_{i=1}^{n_l-1} \Delta s_i$,即区域体积 V 内各叶片面积变化相对较小,则区域体积 V 内叶面积简化为 $s = s_1 n_l$,将其代入式(1)可得

$$\rho = \frac{s_1 n_l}{V} \quad (3)$$

即,当 s_1 与 V 值确定的情况下,叶面积密度 ρ 随 n_l 的变化而变化。

基于区域体积 V 内叶片数越多,叶面积越大,传感器输出的点云数越多,本文提出利用点云密度 ρ_p 表征叶面积密度 ρ ,计算方法为

$$\rho_p = \frac{n_p}{n_{\max}} \quad (4)$$

式中 n_p 为指定区域体积内探测返回的靶标的点云数据个数, n_{\max} 为布满该区域体积内点云数据个数理论最大值。即当 n_{\max} 值确定的情况下,点云密度 ρ_p 随 n_p 的变化而变化。

式(3)与式(4)中区域体积 V 内叶片数 n_l 与点云数 n_p 都是能够简单获取计算的数值,为此,通过数据分析确定 n_l 与 n_p 间的函数关系,再通过系数计算就能够确定参数 ρ 与 ρ_p 间的函数关系。

2 试验

2.1 激光雷达扫描传感器精度验证

将激光雷达扫描传感器面向墙面水平放置,设置传感器扫描频率为25 Hz,角分辨率为0.25°,扫描起始角为-45°,扫描终止角为45°,静止扫描并获取多组数据进行分析。试验取180组传感器输出数据,每组数据包含361个角度和距离,原始数据如图3a所示,每个角度对应180个距离的标准差如图3b所示。

图3b中,在每个角度坐标点上对应着由180个距离值计算的标准差,其中最大值为14.07 mm,最小值为6.59 mm,平均值为8.79 mm。试验结果表明,相同测量点测量的距离离散程度较小,具有毫米级的测量精度,且角度越接近零测量精度越高,即传感器的输出数据稳定可靠。

2.2 三维点云数据的构建

本文以纺锤形仿真塑料树为探测对象,通过人

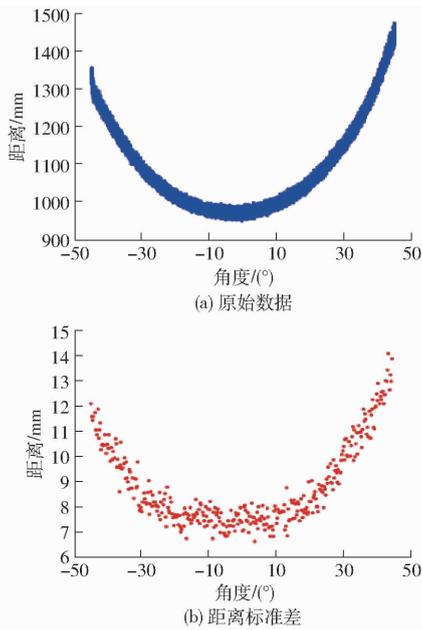


图 3 传感器数据

Fig. 3 Sensor data

工修剪得到仿真树枝叶稀疏与枝叶茂密 2 个靶标。试验用仿真树高为 1.8 m, 树冠宽为 1.2 m, 滑轨总长为 1.36 m, 滑块长为 0.1 m, 行驶总长为 1.26 m。设置滑轨高度在树中心点, 设置滑轨与仿真树底端距离为 1/2 树高, 设置滑轨速度为 1 m/s。根据靶标信息设置激光雷达传感器参数: 扫描频率为 25 Hz, 角分辨率为 0.25°, 扫描起始角为 -45°, 扫描终止角为 45°。靶标三维点云的构建步骤为:

(1) 通过 Visual Studio 2005 开发应用程序采集激光束角度 θ 、距离 γ 以及相应位置的编码器脉冲数。

(2) 将激光雷达扫描面二维极坐标 (γ, θ) 转化为直角坐标 (X, Y) , 计算方法为

$$\begin{cases} X = \gamma \cos \theta \\ Y = \gamma \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

(3) 通过编码器输出的脉冲数确定第三维坐标 z_i , 编码器输出脉冲最大值为 16 384, 超过最大值将

重新从零开始计数, 基于编码器输出数据特征计算 z_i , 计算方法为

$$\begin{cases} z_i = L_s \left| \frac{M_i}{M_n - M_0} \right| & (i = 0, 1, \dots, n) \\ M_i = M_0 \pm mb_i \end{cases} \quad (6)$$

式中 L_s ——滑轨行驶总长

M_0 ——初始位置编码器脉冲数

M_n ——终止位置编码器脉冲数

M_i ——滑块当前位置的编码器脉冲数

m ——编码器输出脉冲最大值

b_i ——数据拐点的个数

仿真树枝叶稀疏期和枝叶茂密期树冠实物图、二维图与三维点云图分别如图 4、5 所示。由图 4、5 可知, 靶标探测系统输出的三维点云数据能够真实、有效地反映实物靶标的形态特点。

2.3 参数统计

基于靶标树冠高、宽、厚度参数, 喷施区域为 1.4 m × 1.2 m × 0.8 m 的长方体, 对其进行等比例网格划分, 每个子区域为 0.2 m × 0.2 m × 0.8 m 的长方体, 共计 42 个。统计各区域内叶片数 n_l 与点云数 n_p 。

2.3.1 叶片数统计

利用角钢材料搭建框架, 依照网格尺寸进行布线, 人工统计各区域内的叶片数, 将统计的叶片数按喷施区域网络由上至下、由左至右依次输入到向量中。

统计结果为, 枝叶稀疏靶标叶片数向量 $\mathbf{A} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 4 \ 18 \ 5 \ 9 \ 18 \ 14 \ 1 \ 9 \ 19 \ 9 \ 17 \ 15 \ 8 \ 0 \ 4 \ 25 \ 16 \ 18 \ 7 \ 4 \ 0 \ 0 \ 4 \ 5 \ 14 \ 22 \ 11 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 6 \ 11]$; 枝叶茂密靶标叶片数向量 $\mathbf{B} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 18 \ 20 \ 18 \ 42 \ 0 \ 0 \ 14 \ 53 \ 57 \ 55 \ 40 \ 4 \ 4 \ 25 \ 62 \ 63 \ 60 \ 43 \ 8 \ 0 \ 2 \ 23 \ 25 \ 16 \ 27 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 0]$ 。

2.3.2 点云数统计

靶标探测系统以相同起点、按同一方向扫描靶

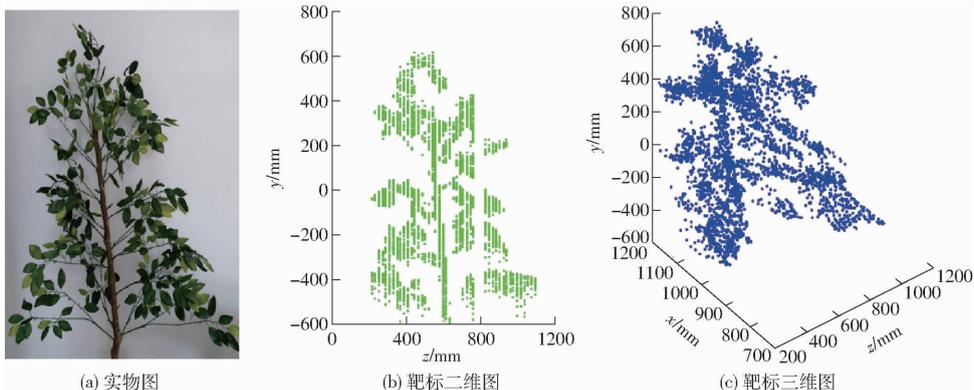


图 4 枝叶稀疏靶标

Fig. 4 Target with sparse branches

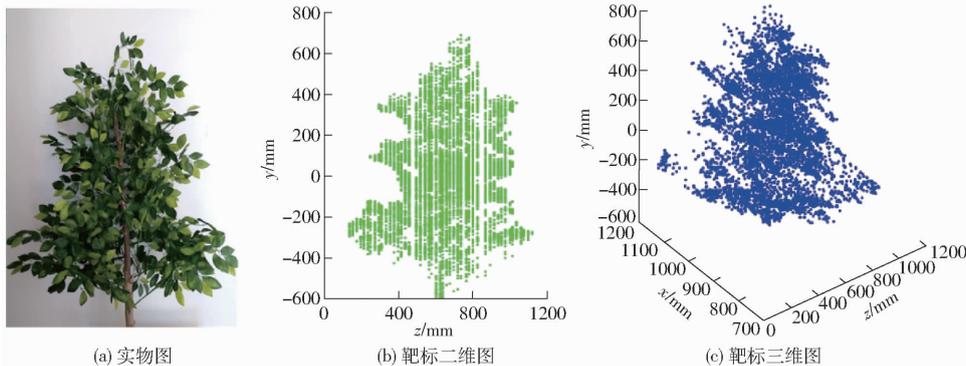


图5 枝叶茂密靶标

Fig.5 Target with thick branches

标3次,利用累加法统计指定各区域内的点云数。枝叶稀疏靶标3次统计结果分别输入矩阵 A_1 、 A_2 、 A_3 ,枝叶茂密靶标3次统计结果分别输入矩阵 B_1 、 B_2 、 B_3 。

统计结果为 $A_1 = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 61\ 158\ 41\ 113\ 237\ 123\ 10\ 176\ 304\ 98\ 221\ 112\ 66\ 0\ 48\ 279\ 178\ 187\ 129\ 126\ 0\ 0\ 30\ 25\ 123\ 213\ 61\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 42\ 73]$, $A_2 = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 50\ 132\ 28\ 92\ 204\ 96\ 8\ 220\ 346\ 132\ 271\ 158\ 101\ 0\ 48\ 248\ 151\ 181\ 85\ 138\ 0\ 6\ 50\ 43\ 168\ 243\ 79\ 0\ 0\ 0\ 0\ 34\ 83]$, $A_3 = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 60\ 128\ 40\ 88\ 195\ 114\ 9\ 193\ 307\ 101\ 266\ 138\ 70\ 0\ 41\ 289\ 171\ 225\ 69\ 112\ 0\ 2\ 32\ 38\ 153\ 220\ 76\ 0\ 0\ 0\ 0\ 37\ 78]$ 。 $B_1 = [0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 72\ 0\ 0\ 1\ 96\ 183\ 244\ 315\ 1\ 0\ 127\ 353\ 368\ 376\ 379\ 59\ 49\ 296\ 413\ 442\ 406\ 344\ 112\ 0\ 6\ 239\ 249\ 181\ 276\ 3\ 0\ 0\ 0\ 0\ 57\ 0]$, $B_2 = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 64\ 0\ 0\ 1\ 112\ 214\ 251\ 318\ 1\ 0\ 104\ 349\ 363\ 419\ 378\ 64\ 46\ 313\ 443\ 482\ 429\ 367\ 122\ 0\ 12\ 246\ 234\ 193\ 304\ 9\ 0\ 0\ 0\ 0\ 27\ 0]$, $B_3 = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 80\ 0\ 0\ 1\ 102\ 196\ 240\ 316\ 1\ 0\ 115\ 350\ 364\ 396\ 378\ 63\ 47\ 327\ 422\ 460\ 415\ 352\ 116\ 0\ 8\ 248\ 242\ 190\ 280\ 7\ 0\ 0\ 0\ 0\ 40\ 0]$ 。

将枝叶稀疏靶标与枝叶茂密靶标的扫描数据用图形表述,如图6、7所示。

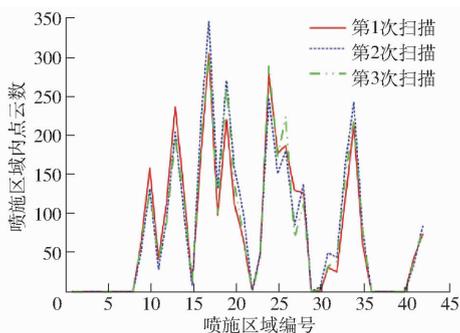


图6 枝叶稀疏靶标3次扫描数据

Fig.6 Three times scanning data for sparse target

分别计算42个区域3次扫描数据的标准差,再对所有喷雾区域计算的标准差求平均值,将该标准

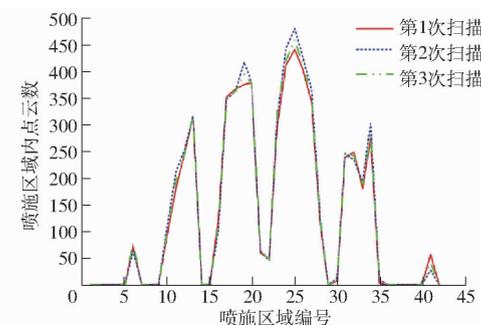


图7 枝叶茂密靶标3次扫描数据

Fig.7 Three times scanning data for thick target

差均值与靶标各区域点云数的最大值相除,得到一个比值,比值越小说明3次扫描数据差距越小,计算方法为

$$\begin{cases} \bar{\sigma} = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \sigma_j \\ \sigma_j = \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} (x_i - \mu_j)^2} \\ \mu_j = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} x_i \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\bar{\sigma}$ ——标准差均值

x_i ——扫描数据

μ_j ——各区域3次扫描数据的均值

σ_j ——各区域扫描数据的标准差

N_1 ——扫描次数,为3次

N_2 ——喷雾区域个数,为42个

计算结果如表1所示。

表1 3次传感器扫描数据一致性分析

Tab.1 Consistency analysis for three times scanning data

靶标	标准差	点云数最大值	比值
稀疏靶标	7.82	346	0.02
茂密靶标	4.20	482	0.01

由图6、7以及表1中的计算结果可知,针对稀疏靶标与茂密靶标,传感器3次扫描数据的标准差

均值与靶标各区域点云数的最大值的比值分别为 0.02 与 0.01, 因此, 传感器 3 次扫描的输出数据一致性较好。

2.4 曲线拟合分析

基于 Matlab 曲线拟合工具箱 cftool 讨论叶片数 n_l 与点云数 n_p 之间的函数关系, cftool 工具箱包含多项式函数(9 种类型)、高斯函数(8 种类型)、指数函数(2 种类型)、插值函数(4 种类型)以及幂函数

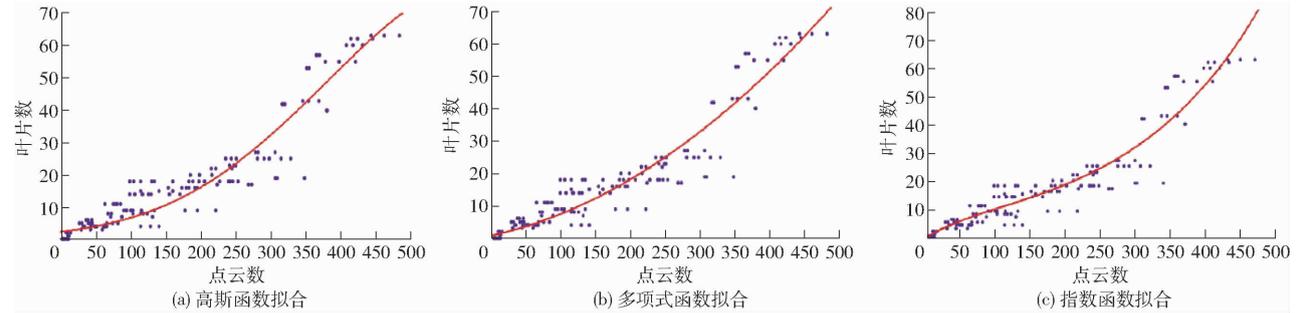


图 8 曲线拟合分析

Fig. 8 Curve fitting analysis

高斯函数拟合方程 $n_l = 80.08e^{-[(n_p - 605.5)/321.1]^2}$, 决定系数 $R^2 = 0.9257$ 。

多项式函数拟合方程 $n_l = 0.0001966n_p^2 + 0.04842n_p + 0.7666$, 决定系数 $R^2 = 0.9310$ 。

指数函数拟合方程 $n_l = 6.558e^{0.005149n_p} - 6.576e^{-0.0166n_p}$, 决定系数 $R^2 = 0.9364$ 。

拟合结果表明上述 3 种拟合函数的拟合效果均较好, 其中指数函数的拟合效果最好。

2.5 相对误差分析

人工统计的叶片数 n_l 与由点云数经拟合函数方程计算的叶片数 n'_l 之间的相对误差 e_l 为

$$e_l = \frac{|n'_l - n_l|}{n_l} \times 100\% \quad (8)$$

将枝叶稀疏靶标与枝叶茂密靶标共计 84 个区域按叶片茂密程度分为 3 种类型: 叶片数在区间 $[40, 70]$ 的区域为枝叶茂密区域, 叶片数在区间 $(20, 40)$ 的区域为枝叶中等茂密区域, 叶片数在区间 $[1, 20]$ 的区域为枝叶稀疏区域。3 种类型区域相对误差计算结果如表 2 所示。

表 2 相对误差统计结果

Tab. 2 Statistical results for relative error %

叶片数区间	高斯函数	多项式函数	指数函数
$[40, 70]$	11.46	12.14	14.07
$(20, 40)$	15.54	13.86	11.05
$[1, 20]$	36.21	35.50	36.23

由表 2 可知, 叶片数在区间 $[40, 70]$ 的区域, 采用高斯函数拟合计算的叶片数与人工统计的叶片数之间的相对误差最小, 为 11.46%。叶片数在区间

(2 种类型) 等, 考虑算法复杂度影响系统实时性, 选择各函数中阶次较低的算法进行拟合。工具箱得到的误差参数中, 决定系数 R^2 用于判定拟合优度, R^2 越接近 1 拟合效果越好。

为保证样本个数, 将枝叶稀疏靶标与枝叶茂密靶标 84 个区域 3 次扫描数据共计 252 组叶片数 n_l 与点云数 n_p 进行曲线拟合分析。经函数筛选, 得到分析结果如图 8 所示。

(20, 40) 的区域, 采用指数函数拟合计算的叶片数与人工统计的叶片数之间的相对误差最小, 为 11.05%。叶片数在区间 $[1, 20]$ 的区域, 采用多项式函数拟合计算的叶片数与人工统计的叶片数之间的相对误差最小, 为 35.50%, 枝叶稀疏区域相对误差较大的原因为相应区域内存在靶标枝干部分, 导致该区域叶片数少但返回的扫描点个数较多。

实际果园中, 果树枝叶存在遮挡, 冠层不同区域叶片面积大小与倾角存在差异, 另一方面, 果园路面不平, 靶标探测系统的运载平台难以保持匀速直线运动, 导致点云分布不均匀, 上述问题均导致激光扫描传感器输出的实际扫描点个数与区域内所有叶片均被完全扫描的数据点个数之间有一定差距。为此, 利用冠层分析仪对果树靶标进行生态学统计分析, 引入靶标形态校正系数; 通过速度闭环控制减小系统运载平台的前进速度误差, 使激光点云分布更均匀, 引入点云分布校正系数; 进而用点云数、形态校正系数与点云分布校正系数的组合模型表征叶面积密度参数补偿测量值与真实值之间的误差是今后的研究工作。

3 结论

(1) 基于二维激光雷达扫描传感器构建了一种靶标精准探测系统, 通过数据采集、坐标变换与数据处理获取了靶标的三维点云数据, 且靶标精准探测系统 3 次扫描靶标输出数据的一致性表明探测系统稳定可靠。

(2)在假设各喷施子区域内叶片面积变化相对较小的条件下,分别基于高斯函数、多项式函数与指数函数对各喷施区域内叶片数与点云数参数进行了曲线拟合,决定系数均大于0.9,该结果表明叶片数与点云数之间存在一定的函数关系,点云数与叶片数经系数变换可得,点云密度参数与叶面积密度参

数存在相同的函数关系,即通过点云密度可以计算叶面积密度作为靶标的几何特征参数。

(3)人工统计的叶片数与由点云数经拟合函数方程计算的叶片数之间的相对误差分析结果表明,在没有枝干干扰的靶标区域,由传感器数据计算的叶片数其相对误差最小为11.05%。

参 考 文 献

- 张海峰,许林云. 果园喷雾机发展现状及展望[J]. 中国农机化学报,2014,35(3):112-118.
ZHANG Haifeng, XU Linyun. Summary of research status on orchard sprayer [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(3):112-118. (in Chinese)
- 邱白晶,闫润,马靖,等. 变量喷雾技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):59-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150309&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.009.
QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3):59-72. (in Chinese)
- 翟长远,赵春江,王秀,等. 树型喷洒靶标外形轮廓探测方法[J]. 农业工程学报,2010,26(12):173-177.
ZHAI Changyuan, ZHAO Chunjiang, WANG Xiu, et al. Probing method of tree spray target profile [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12):173-177. (in Chinese)
- 张富贵,洪添胜,李建雄,等. 果树外形的检测方法[J]. 农机化研究,2008,30(12):107-109.
ZHANG Fugui, HONG Tiansheng, LI Jianxiong, et al. Experimental study on microwave drying mathematical model of Chinese Prickly Ash [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(12):107-109. (in Chinese)
- SCHUMANN A W, ZAMAN Q U. Software development for real-time ultrasonic mapping of tree canopy size [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 47: 25-40.
- GIL E, ESCOLA' A, ROSELL J R, et al. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors [J]. Crop Protection, 2007, 26: 1287-1297.
- LLORENS J, GIL E, LLOP J, et al. Variable rate dosing in precision viticulture: use of electronic devices to improve application efficiency [J]. Crop Protection, 2010, 29: 239-248.
- 张富贵,沈明明,刘国志,等. 基于图像处理技术的果树树叶稀密程度的检测[J]. 山地农业生物学报,2013,32(6):517-521.
ZHANG Fugui, SHEN Mingming, LIU Guozhi, et al. Detection for the fruiter leaf density based on image processing technology [J]. Journal of Mountain Agricultural and Biology, 2013, 32(6):517-521. (in Chinese)
- 李松,张建瓚,可欣荣,等. 果树三维外形轮廓的仿真与重建[J]. 华南农业大学学报,2009,30(1):115-120.
LI Song, ZHANG Jianling, KE Xinrong, et al. Simulation and reestablishment of the fruit tree's three-dimensional profile surface [J]. Journal of South China Agricultural University, 2009, 30(1):115-120. (in Chinese)
- 肖健. 果树对靶喷雾控制系统中图像识别技术[D]. 北京:中国农业大学,2005.
XIAO Jian. Image recognition used in crown detection for orchard spraying system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- ROSELL J R, 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.
- 熊妮娜,王佳,罗旭,等. 一种基于三维激光扫描系统测量树冠体积方法的研究——以油松为例[J]. 北京林业大学学报,2007,29(增刊2):61-65.
XIONG Nina, WANG Jia, LUO Xu, et al. Measuring tree crown volume based on three dimension laser scanning and mapping system—taking *Pinus tabulaeformis* as a case [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(Supp.2):61-65. (in Chinese)
- GIL E, LLORENS J, LLOP J, et al. Variable rate sprayer. part 2—vineyard prototype: design, implementation, and validation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 95: 136-150.
- CHEN Y, ZHU H, OZKAN H E. Development of a variable-rate sprayer with laser scanning sensor to synchronize spray outputs to tree structures [J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(3): 773-781.
- 俞龙,黄健,赵祚喜,等. 丘陵山地果树冠层体积激光测量方法与试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(8):224-228. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130838&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.038.
YU Long, HUANG Jian, ZHAO Zuoxi, et al. Laser measurement and experiment of hilly fruit tree canopy volume [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):224-228. (in Chinese)
- 徐伟恒,冯仲科,苏志芳,等. 一种基于三维激光点云数据的单木树冠投影面积和树冠体积自动提取算法[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(2):465-471.
XU Weiheng, FENG Zhongke, SU Zhifang, et al. An automatic extraction algorithm for individual tree crown projection area and volume based on 3D point cloud data [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(2):465-471. (in Chinese)
- XU Weiheng, SU Zhifang, FENG Zhongke, et al. Comparison of conventional measurement and LiDAR-based measurement for crown structures [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98: 242-251.
- 韦雪花,王永国,郑君,等. 基于三维激光扫描点云的树冠体积计算方法[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(7):235-240. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130741&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.041.
WEI Xuehua, WANG Yongguo, ZHENG Jun, et al. Tree crown volume calculation based on 3-D laser scanning point clouds data [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7):235-240. (in Chinese)
- MARTIN B, JEAN-LUC W, RICHARD A F. A model for deriving voxel-level tree leaf area density estimates from ground-based LiDAR [J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 51: 184-189.