

面向精准喷雾的果树冠层体积在线计算方法

姜红花¹ 刘理民² 柳平增¹ 王金字¹ 张晓辉² 高东升³

(1. 山东农业大学信息科学与工程学院, 泰安 271018; 2. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018;
3. 山东农业大学园艺科学与工程学院, 泰安 271018)

摘要: 针对目前变量喷雾未综合考虑空隙预判及防漏喷的问题, 提出了基于空隙预判的果树冠层体积在线计算方法。该方法利用超声波传感器与激光传感器提前 46 cm 探测, 获取冠层信息点云图, 并剔除空隙及冗余数据进行滤波; 同时进行曲线分割、空隙预判, 沿喷雾机行进方向离散分割冠层, 并制定针对空隙的防漏喷决策。试验表明: 采用融合式传感器阵列及防漏喷策略, 防漏喷效果最佳, 但存在喷施过量的问题。相比普通融合式传感器阵列, 改进后的融合式传感器阵列, 在连续型密集果园上、中、下冠层的雾滴沉积个数分别降低 6.95%、3.85% 和升高 4.40%, 沉积量分别降低 11.11%、8.33%、3.57%; 在纺锤型稀疏果园上、中、下冠层的雾滴沉积个数分别降低 27.08%、30.37%、18.55%, 沉积量分别降低 64.71%、60.87%、40.38%; 在单株型稀疏果园上、中、下冠层的雾滴沉积个数分别降低 18.44%、26.26%、15.54%, 沉积量分别降低 40%、42.43%、41.46%。

关键词: 精确喷雾; 果树; 冠层体积; 点云图; 空隙预判; 在线计算

中图分类号: S499 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0120-10

Online Calculation Method of Fruit Trees Canopy Volume for Precision Spray

JIANG Honghua¹ LIU Limin² LIU Pingzeng¹ WANG Jinyu¹ ZHANG Xiaohui² GAO Dongsheng³

(1. College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
3. College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: In order to solve the problem of synthetic void pre-judgment and anti-leakage spray, a new canopy partied volume method of fruit tree was developed based on void pre-judgment. The measurement sensors required were NU40F15TR – 2M non-contact ultrasonic ranging sensor and SICK – DT35 non-contact laser ranging sensor, which were fixed on caterpillar self-propelled orchard sprayer. When information of fruits was collected, the vehicle’s traveling speed was 1.0 m/s, and the sensor was 1.4 m away from the tree trunk. Firstly, NU40F15TR – 2M non-contact ultrasonic ranging sensor and SICK – DT35 non-contact laser ranging sensor were used to obtain orchard information point cloud pictures, ahead of nozzle 46 cm distance, which were distances between ranging sensor and fruits canopy. Continuous canopy width was calculated based on point cloud picture, and canopy width calculation formula was designed. At the same time, fruits void was reasoned by the formulas, and the abnormal data point was chosen with a negative canopy width value and replaced with data points of zero. Secondly, length of discrete canopy volume model was determined by E6B2 – CWZ10C speed, because speed of caterpillar self-propelled orchard sprayer was nonuniform motion in actual travelling. Thus caterpillar self-propelled orchard sprayer travelling distance of a certain period time was calculated by uniform speed of caterpillar self-propelled orchard sprayer and variable rate spraying decision time. And variable spraying decision time was designed by a required time formula, which was satisfied with responding time, effective spray time of the actuator and the real-time requirement of variable spray. Pulse number of E6B2 – CWZ10C

收稿日期: 2018 – 12 – 29 修回日期: 2019 – 02 – 20

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2015GNC112004)、山东省农业重大应用技术提升项目、山东省自然科学基金项目(ZR2018MC017)、山东省林业科技创新团队项目(LYCX04 – 2018 – 22)和山东省重大科技创新工程项目(2018CXGC0209)

作者简介: 姜红花(1971—),女,副教授,主要从事物联网与自动控制研究,E-mail: j_honghua@163.com

通信作者: 张晓辉(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计与理论研究,E-mail: zhangxh@sdau.edu.cn

speed encoder was calculated based on the principle of itself and caterpillar self-propelled orchard sprayer driving distance of a certain period time. Thus discrete canopy length was obtained by E6B2 - CWZ10C speed encoder and variable rate spraying decision time. Finally, fruits void and fruits canopy were judged by a model, which was used to distinguish fruits void, fruits canopy and the mixture of fruits void and fruits canopy. There were fruits void, when the average width was less than one tenth of the maximum width in the distance of discrete canopy length. Therefore, the discrete canopy width value was got and fruit tree canopy volume model was partied. This anti-leakage spray decision was made by designing logic operation. The testing results showed that the fusing sensor array and the blowout prevention strategy were the best. But there was the problem of overspray. By improving the fusion sensor array and testing, compared with the conventional fusion sensor array, the number of droplets in the upper, middle and lower canopy of the continuous dense orchard was decreased by 6.95%, 3.85%, and increased by 4.40%, respectively; the deposition amount was decreased by 11.11%, 8.33% and 3.57%, respectively. The number of droplets in the upper, middle and lower canopy of the spindle-type sparse orchard was decreased by 27.08%, 30.37% and 18.55%, respectively; the sedimentation was decreased by 64.71%, 60.87% and 40.38%, respectively. The number of droplets in the upper, middle and lower canopy of the single plant type sparse orchard was decreased by 18.44%, 26.26% and 15.54% respectively; the sedimentation was decreased by 40%, 42.43% and 41.46%, respectively.

Key words: precision spraying; fruit trees; canopy volume; point cloud; void prejudgement; online calculation

0 引言

目前果园施药机械多采用连续式喷雾技术,该技术相比人工喷雾,具有劳动效率高,药液穿透能力强等优点^[1],但喷雾参数往往是固定的,易造成药液在果树冠层内沉积不均^[2-3],导致部分冠层喷施过量或部分冠层防治不达标,严重影响水果生产品质^[4-5]。根据在线采集到的冠层体积信息进行精准变量喷雾,是提升果品品质和果园绿色可持续发展的必然要求^[6-7]。面向精准喷雾的果树冠层体积在线计算方法,采用改进的融合式传感器阵列,精确计算果树冠层体积并依据体积信息进行变量喷雾,可解决果园喷施过量问题,提高农药利用率,减少环境污染,降低农药残留。

果树冠层体积精准信息是制定变量喷雾决策的数据基础^[8]。近年来,多种非接触式测距传感器被应用到果树冠层测量中^[9-10]。文献[11]较早进行了基于超声探测作物形貌的试验研究,并给出了由超声波测量信号计算树冠体积的原始公式,将果树分为上下4个冠层,为离散化体积计算方法提供了思路。文献[12]利用超声波测量果树的高度及宽度,其相对误差小于10%。文献[13]运用超声波传感器实时在线计算获取植株冠层体积,并基于冠层体积变化进行变量喷雾,相比传统机械喷雾,平均节省34.5%的药量,但部分冠层存在漏喷情况。文献[14]基于激光雷达设计了果园靶标外形探测系统,可实时感知不同高度果树冠层形状。文献[15]使用激光测距传感器测量估算果树冠层的结构和树冠表面,但需收集数据后,才能实现基于点云数据的

果树三维结构重建,不利于在线使用。文献[16]研究了一种使用超声波和激光传感器的变量喷雾器,并比较了两种测距传感器的准确度,发现激光测距传感器可提供较为准确和详细的冠层信息,但数据处理方法复杂,需进行改进。文献[17]研制的基于激光雷达(Light detection and ranging, LIDAR)和热感相机融合法构建的果树3D冠层结构系统,可用于密闭果园,获取冠层温度分布和结构特点,但该系统后处理时间长。文献[18]利用自制的超声波传感器进行靶标外形轮廓探测,并对仿真树与花期樱桃树进行对比试验,探测精度分别达92.8%、90.0%,制定了果树间空隙的防漏喷方法,但未考虑冠层间空隙。文献[19]利用三维激光扫描点云图,以体元模法进行树冠体积的计算,提出了一种树木冠层体积测量的方法,比较了不同模型下的离散化体积算法的准确性,其中长方体模型准确性最高。文献[20]利用三维激光扫描仪及惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU),可实时矫正靶标体积和果树体积模型。文献[21]利用激光LIDAR扫描仪,将整个树木冠层由上到下分成20层,得到了一定时间内的冠层体积,考虑了系统响应时间,制定了果树间空隙预判及防漏喷的方法。以上研究构建的体积计算方法,在涉及喷雾系统的响应时间内,只是将非接触式测距传感器提前,而没有综合考虑喷雾系统的响应时间及空隙预判时间,没有制定单株果树冠层内部空隙处的防漏喷策略。

针对上述问题,本文提出面向精准喷雾的果树冠层体积在线计算方法。利用非接触式NU40F15TR-2M型超声波测距传感器及非接触式

SICK - DT35 型激光测距传感器,采集果树冠层宽度的原始数据,进行噪声滤波等一系列算法处理后,将同一传感器测得的果树冠层横向宽度离散化,得到离散化果树冠层体积计算方法;设计防漏喷逻辑策略,以确定提前喷雾或延后喷雾;并针对部分冠层喷施过量的情况,设计喷雾系数。

1 计算流程

面向精准喷雾的果树冠层体积在线计算方法的具体流程是:非接触式测距传感器 3 个 1 组,以相同的间隔竖直安装在机体的两侧,机体行驶过程中,机体两侧的非接触式测距传感器,不断扫描检测其与果树之间的距离;同时,安装在机体上的速度编码器实时获取机体的速度,单片机 (Microcontrollers, MCU) 对收集到的距离及机体速度采用相关的算法处理,并储存处理后的数据。由存储的速度数据计算得到一定时间内的机体行驶距离及分区冠层宽度。由得到的分区冠层宽度、机体行驶距离及传感器安装间隔,计算果树连续分区冠层体积;依据制定的空隙预判算法,将冠层宽度及冠层体积进行离散化处理,得到离散冠层体积;同时设计逻辑电路,制定防漏喷策略。通过 MCU 及 Wi-Fi 无线模块^[22]将上述数据传递到上位机,在上位机界面上,实现喷雾参数的可视化实时显示,并将数据保存于数据库,为后期数据分析做准备。面向精准喷雾的果树冠层体积在线计算方法的构建流程如图 1 所示。

2 离散化体积计算方法

2.1 数据采集与图形绘制

于 2017 年 8 月 1—5 日在山东农业大学校园绿化观赏果园内,利用系统抽样的方法,随机选取稀疏度 (果树间空隙长度占果树行长度的比值) 分别为 20.56%、30.18%、40.32% 的 10 m 果树行,采用测量精度皆为 88% 的非接触式 NU40F15TR - 2M 型超声波测距传感器及非接触式 SICK - DT35 型激光测距传感器,分别采集果树冠层体积特征信息。数据

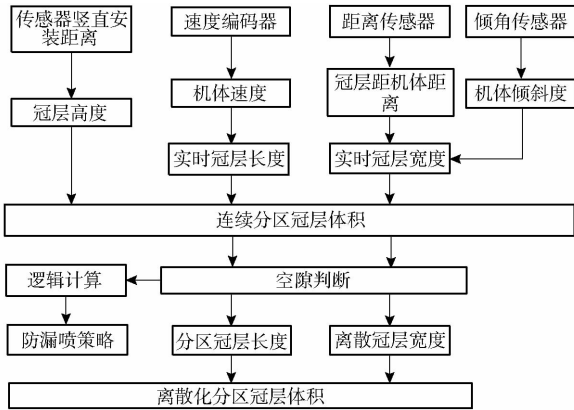


图 1 冠层分割体积在线计算方法的构建流程图
Fig. 1 Constructed principle flow chart of canopy partition volume way online

传输控制盒如图 2a 所示,采用 24 V、12 000 mA·h 大容量聚合物锂电池供电,通过相应的升压、降压电路分别给非接触式超声波传感器、激光传感器、数据传输控制盒、STM32F103ZET6 单片机和 USR - WIFI232 - 602 - V2 型 RS232 串口转 Wi-Fi 无线传输模块供电。具体试验过程为:将 SICK - DT35 型激光传感器及 NU40F15TR - 2M 型超声波传感器安装在履带自走式喷雾机的机体两侧,在标定好 10 m 区间内,机体以 1.0 m/s 的速度匀速前进,采集信息的非接触式测距传感器距地面 1.6 m,机体中轴距离果树树干 2.1 m;果树种植行间距为 4.0 m,株距 1.0 m,采集效果如图 2b、2c 所示。

STM32 单片机通过无线模块,将传感器信号传输给上位机存储并显示。将存储在上位机中的数据导出,绘制成如图 3 (稀疏度为 30.18% 果树中冠层) 所示的冠层宽度数据散点图。

2.2 连续分区冠层宽度表示

数据采集过程中机体行驶在果树行中间,两种非接触式测距传感器测得的实时分区冠层宽度为

$$L_0 = \frac{L_r - L_b - 2L_c}{2} \tag{1}$$

式中 L_0 ——果树冠层宽度,cm
 L_c ——传感器到探测点的距离,cm



图 2 果树冠层宽度信息采集
Fig. 2 Information collection of trees canopy width
1. 测距传感器 2. 履带自走式喷雾机

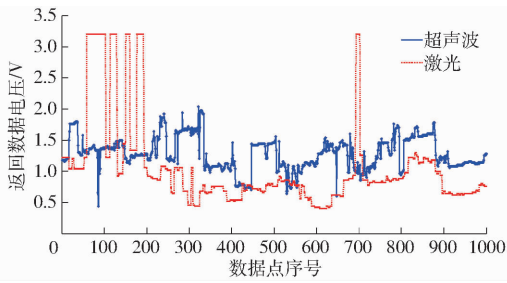


图3 稀疏果园数据点图

Fig.3 Data point map of spindle orchard

L_b ——机体宽度, cm

L_r ——果树行距, cm

不同果园行距不同, L_r 需要根据具体果园在上位机设定。

将图3中传感器与果树冠层之间的散点距离数据, 通过式(1)处理后, 使用 Matlab 软件进行冠层宽度可视化, 如图4所示。

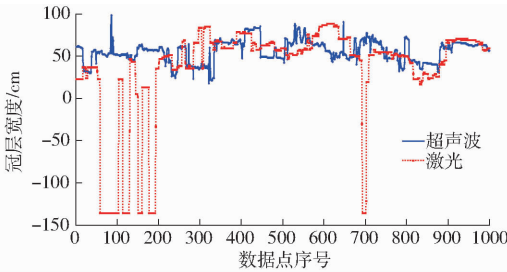


图4 冠层宽度可视化图

Fig.4 Visual picture of canopy width

2.3 异常数据点处理

图4中冠层宽度为负值的异常数据点, 表示该处有空隙或传感器返回异常数据值。设计滤波算法, 将异常数据点统一认为是空隙, 具体实现方法为去除冠层宽度为负值的点, 并补充同等数量的冠层宽度为0的点, 便于进一步的判断。滤波算法公式为

$$a_0 = \sum_{i=1}^n n_{pi} - \sum_{k=1}^{n_x} n_{Hk} + \sum_{k=1}^{n_x} n_{tk} \quad (2)$$

式中 a_0 ——滤波处理后的冠层宽度集合

n_{pi} —— t_0 时间内收到的传感器数据

n_{Hk} ——冠层宽度的异常点数据

n ——冠层宽度总数

n_x ——冠层宽度值异常点数

n_{tk} ——冠层宽度为0的数据补偿点数据

图5为去除异常点后的冠层宽度可视化图, 其冠层宽度皆为非负数。

2.4 离散分区冠层宽度

变量喷雾决策时, 需要将非接触式测距传感器前置喷头一定距离, 以解决控制系统响应时间造成的漏喷问题^[23]。

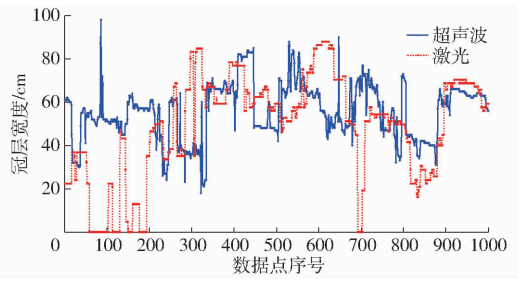


图5 去除异常点后的冠层宽度可视化图

Fig.5 Visualization of canopy width after removing anomaly points

2.4.1 变量喷雾决策响应时间

在果园精准变量喷雾过程中, 变量喷雾决策系统响应时间 t_0 为 203.009 ms, 计算公式为

$$t_0 = t_{01} + t_{02} + t_{03} + t_{04} + t_{05} \quad (3)$$

式中 t_{01} ——非接触式测距传感器发送接收信号的时间, 0.009 ms

t_{02} ——传感器的响应时间, 20 ms

t_{03} ——信息采集模块响应时间, 10.5 ms

t_{04} ——MCU 响应时间, 12.5 ms

t_{05} ——变量喷雾系统执行时间, 160 ms

为防止漏喷, 由系统响应时间 t_0 及机体最大行驶速度 1 m/s 知, 在机体行驶方向, 测距传感器至少提前喷头 20.3 cm, 变量喷雾机应在空隙处的提前喷雾距离及延后喷雾距离皆为 2 ~ 5 cm^[23]; 但在实际情况中, 考虑到冠层空隙及防漏喷预判逻辑判断的处理时间, 非接触式测距传感器位置需要提前喷头 46 cm。

2.4.2 空隙预判时间内机体行驶距离

为满足变量喷雾药液沉积均匀性, 要求机体行驶速度 v_{jy} 均匀, 则空隙判断及决策的时间为

$$t_1 = \frac{S}{v_{jy}} \quad (4)$$

实际工作过程中, 机体并不是完全匀速行驶, 在空隙判断及防漏喷决策的时间内, 可根据编码器 (欧姆龙 E6B2 - CWZ10C 型) 计算机体行驶精确距离 S (20 cm), t_1 内机体行驶距离计算公式为

$$S = \frac{\pi(n_1 + n_2 + n_3)r(1 + p)}{n_0} \quad (5)$$

式中 n_0 ——编码器旋转一周产生的脉冲数, 为 1 000 P/r

n_1 —— t_1 内单片机检测到的脉冲总数

n_2 —— t_1 内单片机没有检测到的脉冲总数

n_3 —— t_1 内编码器开始与结束微小时间段内没有达到产生脉冲的数量

r ——编码器外接轮直径, 50 mm

p ——编码器外接轮与喷雾机机体滑移率, 取 0.01

令 $n_A = n_1 + n_2 + n_3$, 则 n_A 为时间 t_1 内机体在行进距离 S 时产生总的脉冲数; 通过 MCU 收集到脉冲数量 n_A 来代替机体实际行驶过距离 S , 则

$$n_A = \frac{S n_0}{\pi r (1 + p)} \tag{6}$$

2.4.3 离散分区冠层宽度

机体行驶过程中, 每收集到 n_A 个脉冲时, 分割冠层宽度, 如图 6a 所示, 将每一果树行连续的冠层等分为长度为 S 的曲线梯形及空隙, 划分时, 存在一部分空隙与曲线梯形的混合区域。将曲线梯形及空隙及混合区域分离得到宽度不一的矩形或空隙, 如图 6b 所示。

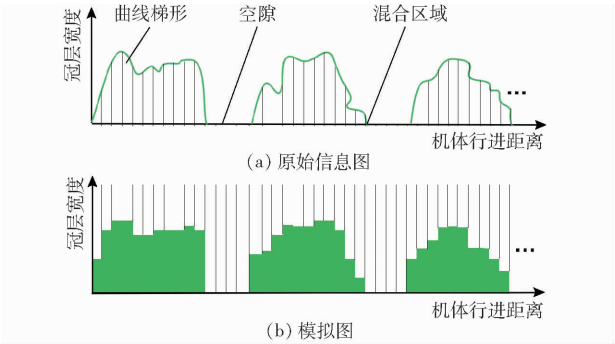


图 6 离散宽度表示图

Fig. 6 Discrete width representation picture

在数据滤波后, 计算机体在行进距离 S 内的平均冠层宽度

$$A_1 = \frac{\sum_{i=1}^n n_{pi} - \sum_{k=1}^{n_x} n_{Hk}}{n - n_x} \tag{7}$$

式中 A_1 ——机体行驶距离 S 时平均冠层宽度, cm
得到离散冠层宽度

$$b_1 = \text{MAX}(n_{pil} - A_1) + A_1 \tag{8}$$

式中 $\text{MAX}()$ ——最大值函数

n_{pil} ——机体行驶距离 S 时, 剔除异常数据后的每个冠层宽度信息集合数组

若冠层宽度满足

$$\frac{a_1}{n} < 0.1 b_1 \tag{9}$$

则认为该果树冠层横向长度 S 段内的混合区域为空隙, 否则为宽度 b_1 的果树冠层。

依据以上算法, 将采集到的数据, 经 Matlab 处理得到离散化冠层宽度可视化图, 如图 7 所示。

2.5 在线离散冠层体积

在时间 t_1 内, 机体行驶距离为 S , 冠层宽度为 b_1 , 冠层分区高度为 h_f , 离散化冠层体积 V_{ia} 计算式为

$$V_{ia} = S b_1 h_f \tag{10}$$

图 8 为离散分割冠层体积构建示意图。喷雾机

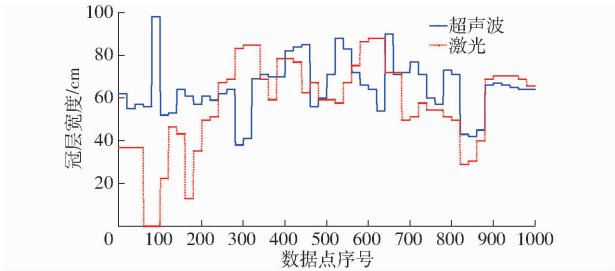


图 7 离散的冠层宽度的可视化图

Fig. 7 Visualization of discrete canopy width rectangle

一侧果树行离散分区冠层的宽度或体积表示为

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ b_1 & b_2 & \cdots & b_n \\ c_1 & c_2 & \cdots & c_n \end{bmatrix}$$

其中 a_1, b_1, c_1 为安装在机体上的上、中、下 3 个测距传感器在某一时刻测得的果树上、中、下 3 个分区冠层的离散宽度; $a_1, a_2, \cdots, a_n, b_1, b_2, \cdots, b_n, c_1, c_2, \cdots, c_n$ 为机体在不同位置时, 同一非接触式测距传感器获得离散冠层宽度。

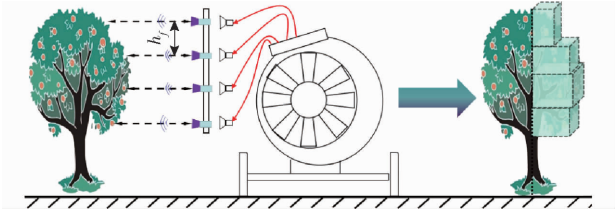


图 8 在线离散分割冠层体积构建示意图

Fig. 8 Schematic of discrete-partition online canopy volume model

2.6 变量喷雾防漏喷决策

在果树冠层的空隙处需设计提前或延后喷雾的防漏喷策略, MCU 通过逻辑计算式, 计算并判断逻辑计算结果

$$Y = A \oplus B \tag{11}$$

式中 Y ——防漏喷事件触发变量, 逻辑状态 1 时触发

A ——机体行驶在当前分区内的逻辑状态

B ——上一分区内的逻辑状态, 空隙状态为逻辑 0, 非空隙状态为逻辑 1, 见图 6b

当触发防漏喷事件后, 通过判断 B 的状态, 以确定当前防漏喷策略中的具体实现事件(提前或延后喷雾)。当 B 逻辑状态为 0 时, 应为防漏喷策略事件中的提前喷雾, 否则为防漏喷策略中的延后喷雾。MCU 在判断防漏喷策略的具体事件后, 将 B 处的逻辑状态清除, A 处逻辑状态移至 B 处; 同时, 清除 A 位置的逻辑状态, 机体继续行驶, 并判断新的分割冠层宽度是否为空隙, 并存储该逻辑状态至 A 处; 机体行驶完新的宽度分割区域后重复上述步骤。具体硬件实现电路如图 9 所示。

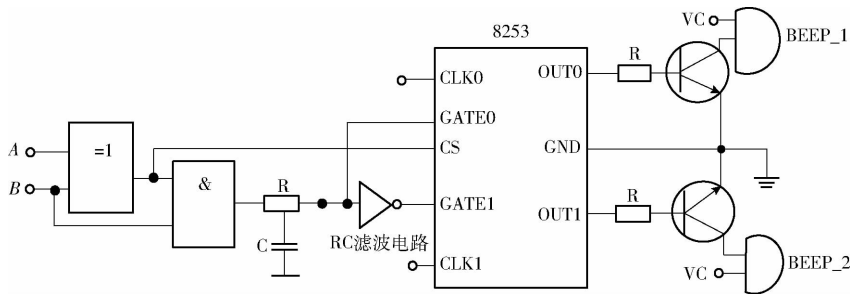


图 9 防漏喷硬件电路图
Fig. 9 Anti-leakage spray hardware circuit diagram

3 分区冠层可视化及数据储存

3.1 冠层宽度信息处理

系统运行过程中,下位机(MCU)实时采集数据,并通过 Wi-Fi 将处理后的连续冠层宽度实时传输给上位机。当 MCU 传输离散冠层宽度信息时,将机体左侧及右侧分别以二维数组的形式,存储在地址为 0XA1、0XA2 的数据采集板上。每隔时间 t_1 ,采集板的数据传输至输入寄存器中,上位机通过无线端口一次获取 2 个输入寄存器内的数据。

3.2 数据图像化显示

上位机经过开放图形库(Open graphics library, OpenGL)技术将接收到的数值处理,可实时显示冠层宽度曲线。连续冠层宽度曲线图像每 $t_1/2$ 时间刷新一次。手机 APP 界面内的宽度曲线可通过 X-Y 轴的分辨率进行调整,并可对 30 s 内的历史数据进行拖动显示。该手机 APP 系统还可以根据果树的种植行距以及树冠的尺寸设置靶标的最小阈值和最大阈值,构建不同类型果园的连续及离散冠层的体积算法。

将传感器探测得到的数据上传至上位机,上位机获得冠层的空间坐标信息,将坐标值空间连点成线,绘制构建机体左右两侧的果树冠层动态的二维、三维轮廓图,如图 10 所示。手机 APP 通过寄存器获取的离散冠层宽度,经 OpenGL 技术图像化处理后,将离散冠层体积网格图显示在上位机,如图 11 所示。

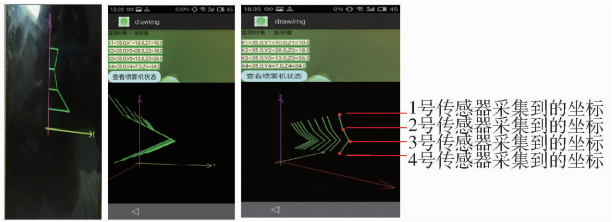


图 10 冠层轮廓图
Fig. 10 Canopy contour diagram

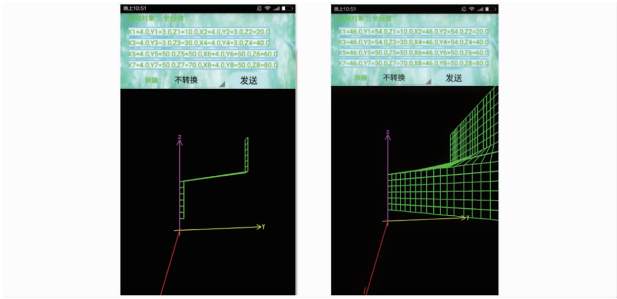


图 11 离散冠层体积网格图
Fig. 11 Discrete canopy volume information map

4 计算方法验证

融合式传感器阵列是针对不同类型果园上、中、下冠层特点而研制的,相比单一的传感器阵列,这种传感器阵列的整体测量精度较高^[24]。为验证不同传感器采用果树冠层在线体积计算方法,来判断冠层空隙及制定防漏喷策略的正确性,分别采用融合式传感器阵列、激光传感器阵列及超声波传感器阵列,对具有代表性的连续型密集果园、纺锤型稀疏果园和单株型稀疏果园 3 种果园进行喷雾试验验证。

4.1 果树冠层喷雾量确定

PWM 变量喷雾中,喷头流量主要受喷雾压力和 PWM 占空比影响,动态喷雾均匀性主要受 PWM 频率影响,经综合考虑,选择频率为 12 Hz 的 PWM 波控制电磁阀通断实现变量喷雾^[25];在 0.6 MPa 下,进行了占空比与喷头喷量关系的试验,试验结果如表 1 所示。

由表 1 可知,在 $30\% \leq y \leq 70\%$ 范围内,喷头流量 x (L/min) 与占空比 y (%) 之间的关系式为

$$y = 0.01345x + 0.2434 \quad (12)$$

机体行驶距离 S 时,MCU 将植株的冠层处理成离散化的冠层,冠层体积为 V_{ia} ,该离散冠层所需要的喷雾量可表示为

$$y \frac{S}{v_{jy}} = V_{ia} m_a \quad (13)$$

式中 m_a ——冠层所需的喷量,取 0.1 L/m^3

表 1 12 Hz 时占空比与喷头流量之间的关系

Tab.1 Relationship between duty cycle and nozzle flow rate at 12 Hz

占空比/%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
流量/(L·min ⁻¹)	0	0	0	0.55	0.61	0.96	1.09	1.21	1.25	1.24	1.24

整理式(13)得

$$x=\frac{6\,000\,000V_{ia}m_av_{jy}-2\,434S}{1\,345S}$$

(14)

依据式(14)和离散的冠层体积,计算 PWM 波占空比,进行变量喷雾。

4.2 试验及防漏喷效果

为验证冠层空隙策略及防漏喷策略的正确性,选择 3 种果园中具有代表性的果树,在其树冠边缘处及树木冠层空隙处布置水敏纸,水敏纸使用曲别针固定在树叶上,如图 12a 所示;水敏纸的具体规格为 76 mm × 26 mm。水敏纸在果树边缘的布置如图 12b 所示,在机体前进方向的前侧边缘、后侧边缘及冠层中的空隙处各布置 10 张水敏纸。

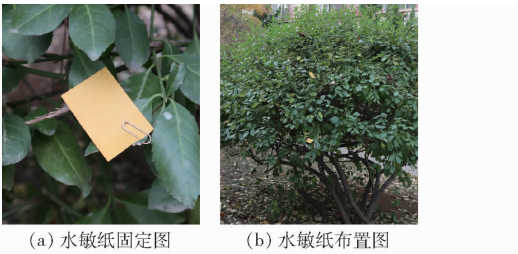


图 12 水敏纸固定及布置图

Fig. 12 Fixation and layout of water sensitive paper

具体试验过程:水敏纸布置后,启动履带自走式风送喷雾机,调整机体速度为 1 m/s,启动硬件控制盒电源,匀速行驶过试验植株后,关闭电源及发动机。待水敏纸干燥后,将水敏纸取下,及时用扫描仪扫描。更换不同传感器阵列或普通防漏喷策略后,重复上述步骤。

统计漏喷情况,发现相较于连续型密集果园及幼小稀疏果园的漏喷差异情况,纺锤型稀疏果园漏喷情况差异明显。统计纺锤型稀疏果园各状况下的防漏喷情况,如表 2 所示。其中布置的水敏纸只有一部分(小于整个水敏纸一半面积)或几乎没有液滴沉积,则防漏喷失败,如图 13a、13b 所示,否则认为防漏喷成功。

由表 2 知,采用融合式传感器及防漏喷策略时,防漏喷效果明显。其余两种传感器阵列的防漏喷效果,受传感器阵列及冠层影响程度大。

4.3 喷施过量及解决方法

实际喷施过程中,发现有喷施过量的现象,如图 13c 所示,正常的喷雾沉积如图 13d 所示,效果差异明显,违背变量喷雾的初衷。对 3 种果园冠层的

喷雾过量情况进行统计,如表 3 所示。

表 2 漏喷情况的水敏纸数量

Tab.2 Number of water sensitive paper under leakage

漏喷位置	超声波传感器		激光传感器		融合传感器	
	阵列		阵列		阵列	
	普通	防漏	普通	防漏	普通	防漏
	防漏喷	喷	防漏喷	喷	防漏喷	喷
前侧边缘	4 *	1 *	5 **	2 ***	3 *	0
后侧边缘	3 *	1 *	4 ***	1 ***	3 *	1
冠层空隙处	0 *	1 *	6	2 ***	5 **	0

注: * 表示上层防漏喷效果明显, ** 表示中层防漏喷效果明显, *** 表示下层防漏喷效果明显。



图 13 水敏纸检测雾滴沉积情况

Fig. 13 Situations of droplet deposition detected by water sensitive paper

表 3 喷施过量的水敏纸数量

Tab.3 Number of water sensitive paper severely sprayed

果园类型	超声波传感器	激光传感器	融合传感器
	阵列	阵列	阵列
连续型密集	3 **	1 ***	0
纺锤型稀疏	10 **	8 **	6 ***
单株型稀疏	6 **	4 **	3 **

注: ** 表示中层喷施过量明显, *** 表示下层喷施过量明显。

由表 3 知,连续型密集果园整体无明显喷施过量情况;相较于其他传感器阵列,融合式传感器阵列喷施过量的情况较少;相较于其他两种果园,纺锤型稀疏果园喷施过量的改善状况不佳。究其原因,纺锤型稀疏果园枝叶稀疏,统一使用与连续密集型果园相同的喷量,容易造成喷雾过量。

针对部分冠层存在喷施过量的情况,依据冠层间的稀疏情况制定合适的喷雾量,以达到正常的喷雾沉积。使用手持式叶面积测试仪随机检测 3 种果园 100 片叶片的面积,并取平均值;统计计算试验过程中,各类果园的叶面积指数,结果如表 4 所示。

如表 4 所示,连续型密集果园的叶面积指数与其余两种果园的叶面积指数差异明显,不能依据冠层体积采用统一的喷雾参数,需制定合适的喷雾系

表 4 不同类型果园冠层的叶面积指数与返回的激光点数

Tab.4 Leaf area index and return laser points of canopy in different orchards

参数	连续型密 集果园	单株型稀 疏果园	纺锤型稀 疏果园
叶面积指数	60. 21	30. 32	17. 68
返回的激光点数	92	59	43

数 h_j , 减少其他类型果园喷施过量情况, 若机体行驶速度 v_{jy} 一致 (1 m/s), 则 h_j 应满足

$$\frac{A_0}{B_0} = \frac{A_1}{B_1} h_j \tag{15}$$

式中 A_0 ——参考叶面积指数, 取 62

B_0 ——距离 S 内激光传感器产生的总点数, 取 100 个

A_1 ——当前类型果园的叶面积指数

B_1 ——距离 S 内激光传感器返回的点数

将式 (15) 得到的喷雾系数代入式 (13) 中, 并进行等式处理得

$$x = \frac{6\,000\,000V_{ia}m_a h_j v_{jy} - 2\,434S}{1\,345S} \tag{16}$$

以确定不同枝叶密度的冠层喷药量。

4.4 喷雾效果验证

虽然采用融合式传感器阵列, 有较好的防漏喷效果, 但存在喷施过量的现象。相比于其他类型的果园, 纺锤型稀疏果园的喷施过量情况严重, 为此制定了喷雾系数 h_j , 依据不同冠层的枝叶密度以确定喷药量。在 3 种不同类型的果园中, 采用的融合式传感器阵列内的非激光传感器处, 额外加装激光传感器, 以获取冠层枝叶密度信息, 即改进的融合式传感器阵列, 按照式 (15)、(16) 计算得到的喷雾量进行喷雾试验。具体试验布置及试验过程与防漏喷试验一致。选择 2.3 m 高的植株, 与喷头高度一致的冠层叶片上, 分上、中、下 3 层, 每层内部布置一片水敏纸, 共 3 张。

将收集干燥后的水敏纸 (图 14a), 按照软件要

求, 通过扫描仪扫描成 PNG 格式的黑白图像, 其分辨率为 600 像素 × 600 像素, 如图 14b 所示。使用重庆六六山下植保科技有限公司的雾滴分析软件, 将图像加载为 8 位位图, 修改图像类型为 RGB 格式, 如图 15a 所示; 调节背景, 设置 sigma 为 5, weight 为 5, 凸显雾滴, 如图 15b 所示; 剥离前景与背景, 调节颜色差 high 为 98, 如图 15c 所示; 填充, 进行像素间的转换, 如图 15d 所示; 进行筛选, 设置 area 为 4000 unit²; 最后进行统计分析, 并显示雾滴的 ID, 如图 15e 所示, 可方便查看每个雾滴的特征信息。

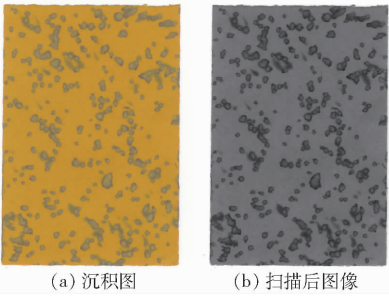
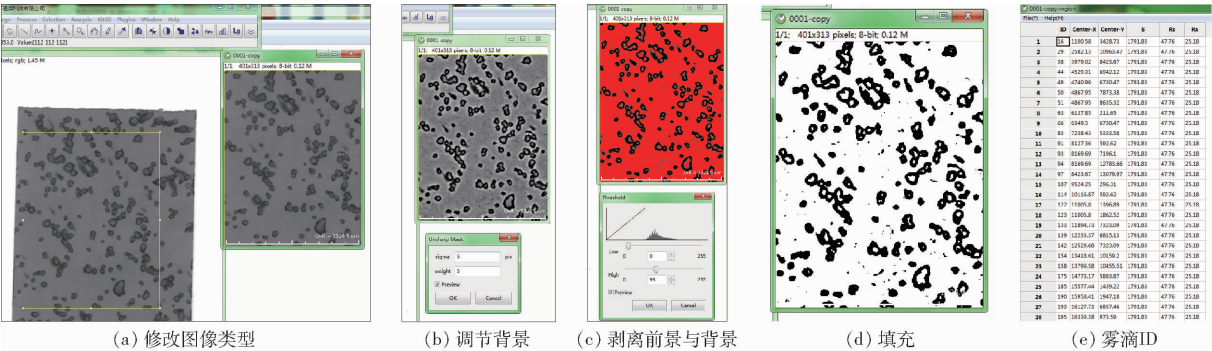


图 14 干燥后的水敏纸及扫描图

Fig. 14 Dried water sensitive paper and scanning chart

图 16 为不同类型果园冠层的雾滴沉积统计, 其中图 16a、16b 分别是改进的融合阵列喷雾方法与普通融合阵列喷雾方法每平方厘米的雾滴个数、沉积量。使用普通的融合式传感器阵列, 连续型密集果园上、中、下冠层雾滴沉积个数分别为 126.82、156、163.8 个/cm², 沉积量为 0.18、0.24、0.28 μg/cm²; 纺锤型稀疏果园上、中、下冠层的雾滴沉积个数分别为 167.3、202.5、221 个/cm², 沉积量为 0.34、0.46、0.52 μg/cm²; 单株型稀疏果园上、中、下冠层的雾滴沉积个数分别为 141、179、193 个/cm², 沉积量为 0.25、0.33、0.41 μg/cm²。使用改进的融合式传感器阵列, 连续型密集果园上、中、下冠层的雾滴沉积个数分别为 118、150、171 个/cm², 沉积量为 0.16、0.22、0.27 μg/cm²; 纺锤型稀疏果园上、中、下冠层的雾滴沉积个数分别为 122、141、180 个/cm², 沉积量为 0.12、0.18、0.31 μg/cm²; 单株型稀疏果园上、中、下冠层



(a) 修改图像类型

(b) 调节背景

(c) 剥离前景与背景

(d) 填充

(e) 雾滴ID

图 15 雾滴分析流程

Fig. 15 Droplet analysis processing

的雾滴沉积个数分别为 115、132、163 个/cm²,沉积量为 0.15、0.19、0.24 μg/cm²。相比普通融合式传感器阵列,连续型密集果园上、中、下冠层的雾滴沉积个数分别降低 6.95%、3.85% 和升高 4.40%,沉积量分别降低 11.11%、8.33%、3.57%;纺锤型稀疏

果园上、中、下冠层的雾滴沉积个数分别降低 27.08%、30.37%、18.55%,沉积量分别降低 64.71%、60.87%、40.38%;单株型稀疏果园上、中、下冠层的雾滴沉积个数分别降低 18.44%、26.26%、15.54%,沉积量分别降低 40%、42.43%、41.46%。

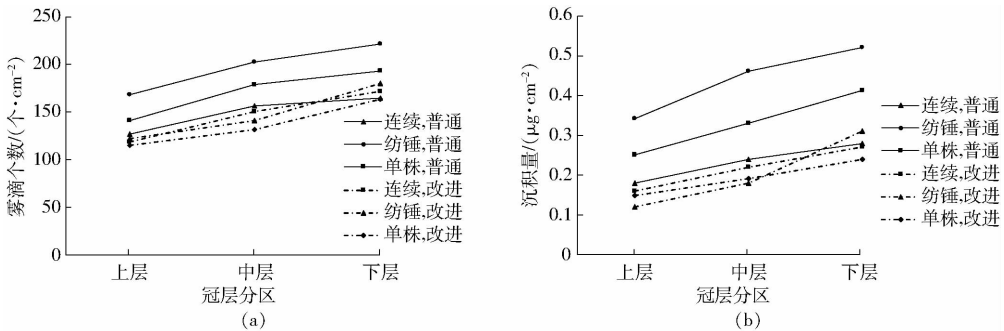


图 16 雾滴沉积统计
Fig. 16 Statistics of droplet deposition

5 结论

(1)面向精准喷雾的果树冠层体积在线计算方法是 将测距传感器提前至适当的位置,经滤波算法,依 据空隙预判预留的空间,进行果树冠层横向宽度离 散化分割,依据该方法设计了防漏喷的逻辑计算策 略。

(2)通过相关试验验证了果树冠层在线体积计 算方法,试验结果表明,相比普通传感器阵列及普 通防漏喷方法,采用融合式传感器阵列及防漏喷策 略,防漏喷效果明显,但有喷施过量的现象。

(3)相比普通融合式传感器阵列,改进的融合 式传感器阵列在连续型密集果园上、中、下冠层的 雾滴沉积个数分别降低 6.95%、3.85% 和升高 4.40%,沉积量分别降低 11.11%、8.33%、3.57%; 在纺锤型稀疏果园上、中、下冠层的雾滴沉积个数 分别降低 27.08%、30.37%、18.55%,沉积量分别降 低 64.71%、60.87%、40.38%;在单株型稀疏果园 上、中、下冠层的雾滴沉积个数分别降低 18.44%、 26.26%、15.54%,沉积量分别降低 40%、42.43%、 41.46%。

参 考 文 献

[1] 白鹏. 基于 Android 的果园自动对靶风送式喷雾试验台的研制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
BAI Peng. Development of automatic target detecting and air-assisted spraying test platform based on Android[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[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 CSAE, 2017, 33(23): 80–92. (in Chinese)

[3] 张美娜, 吕晓兰, 常有宏, 等. 果树靶标精准探测系统研究进展分析[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(10): 227–233.
ZHANG Meina, LÜ Xiaolan, CHANG Youhong, et al. Research progress analysis of target precision system for orchards [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(10): 227–233. (in Chinese)

[4] 姜红花, 白鹏, 刘理民, 等. 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 189–195.
JIANG Honghua, BAI Peng, LIU Limin, et al. Caterpillar self-propelled and air-assisted orchard sprayer with automatic target spray system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Suppl.): 189–195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/abstract_view.aspx?file_no=2016s029&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.029. (in Chinese)

[5] 卢莹蓬, 易文裕, 庾洪章, 等. 果园喷雾机械现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(1): 36–41.
LU Yingpeng, YI Wenyu, TUO Hongzhang, et al. Present state and trends of orchard sprayer [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(1): 36–41. (in Chinese)

[6] 李素璇, 高明, 魏东辉, 等. 精准变量喷雾控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(6): 71–75.
LI Suxuan, GAO Ming, WEI Donghui, et al. Design of variable rate fertilizer spreader [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6): 71–75. (in Chinese)

[7] 丁天航, 曹曙明, 薛新宇, 等. 风送式果园喷雾机发展现状及趋势[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(10): 221–226.
DING Tianhang, CAO Shuming, XUE Xinyu, et al. Current situation and development trend of air-assisted orchard sprayer [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(10): 221–226. (in Chinese)

- [8] 张霖,赵祚喜,俞龙,等. 超声波果树冠层测量定位算法与试验[J]. 农业工程学报,2010,26(9):192–197.
ZHANG Lin,ZHAO Zuoxi,YU Long,et al. Positioning algorithm for ultrasonic scanning of fruit tree canopy and its tests[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(9):192–197. (in Chinese)
- [9] 翟长远,赵春江,WANG Ning,等. 果园风送喷雾精准控制方法研究进展[J]. 农业工程学报,2018,34(10):1–15.
ZHAI Changyuan,ZHAO Chunjiang,WANG Ning,et al. Research progress on precision control methods of air-assisted spraying in orchards[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(10):1–15. (in Chinese)
- [10] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/abstract_view.aspx?file_no=20150309&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.009. (in Chinese)
- [11] TUMBO S D,SALYANI M,WHITNEY J D,et al. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume[J]. Applied Engineering in Agriculture,2002,18(3):367–372.
- [12] GILES D, DELWICHE M, DODD R. Sprayer control by sensing orchard crop characteristics:orchard architecture and spray liquid savings[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1989,43(8):271–289.
- [13] MAGHSOUDI H, MINAEI S, GHOBADIAN B, et al. Ultrasonic sensing of pistachio canopy for low-volume precision spraying [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2015,112:149–160.
- [14] OSTERMAN A, GODEŠA T, HOČEVAR M, et al. Real-time positioning algorithm for variable-geometry air-assisted orchard sprayer[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2013,98:175–182.
- [15] MÉNDEZ V, ROSELL J R, SANZ R, et al. Deciduous tree reconstruction algorithm based on cylinder fitting from mobile terrestrial laser scanned point clouds[J]. Biosystems Engineering,2014,124(4):78–88.
- [16] MIRANDA-FUENTES A, LLORENS J, GAMARRA-DIEZMA J L, et al. Towards an optimized method of olive tree crown volume measurement[J]. Sensors,2015,15(2):3671–3687.
- [17] FRANCISCO J, JAIME S, PABLO A, et al. LiDAR and thermal images fusion for ground-based 3D characterisation of fruit trees[J]. Biosystem Engineering,2016,151(11):479–494.
- [18] 翟长远,赵春江,王秀,等. 幼树靶标探测器设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(2):18–22.
ZHAI Changyuan,ZHAO Chunjiang,WANG Xiu,et al. Design and experiment of young tree target detector[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(2):18–22. (in Chinese)
- [19] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130741&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.041. (in Chinese)
- [20] 刘慧,李宁,沈跃,等. 融合激光三维探测与 IMU 姿态角实时矫正的喷雾靶标检测[J]. 农业工程学报,2017,33(15):88–97.
LIU Hui,LI Ning,SHEN Yue,et al. Spray target detection based on laser scanning sensor and real-time correction of IMU attitude angle[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(15):88–97. (in Chinese)
- [21] 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 CSAE,2017,33(1):70–76. (in Chinese)
- [22] YAN M,LIU P,ZHAO R,et al. Field microclimate monitoring system based on wireless sensor network[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems,2018,35(2):1325–1337.
- [23] 许林云,张昊天,张海锋,等. 果园喷雾机自动对靶喷雾控制系统研制与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(22):1–9.
XU Linyun,ZHANG Haotian,ZHANG Haifeng,et al. Development and experiment of automatic target spray control system used in orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(22):1–9. (in Chinese)
- [24] 刘理民,王金宇,毛文华,等. 基于传感器融合阵列的果树冠层信息采集方法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):347–353,359.
LIU Limin,WANG Jinyu,MAO Wenhua,et al. Canopy information acquisition method of fruit trees based on fused sensor array [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):347–353,359. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s046&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.046. (in Chinese)
- [25] 翟长远. 果园靶标在线探测方法及风送变量喷雾技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012.
ZHAI Changyuan. Research on orchard target on-line probing method and air-blast variable spraying technology[D]. Yangling: Northwest A&F University,2012. (in Chinese)