

果园喷雾机器人靶标探测与追踪系统

江世界¹, 马恒涛¹, 杨圣慧¹, 张超¹,
苏道毕力格¹, 郑永军^{1,2,3*}, 康峰⁴

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农业装备与设施教育部工程研究中心, 北京 100083;
3. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670; 4. 北京林业大学工学院, 北京 100083)

摘 要: 针对风送喷雾装备不间断无差别喷施造成的过量用药和雾滴脱靶严重的问题, 该研究设计一种果园喷雾机器人靶标探测与追踪系统, 随果树对象位置变化实时调整喷雾角度实现精准对靶。该系统采用激光雷达扫描获取作业范围内果树的点云数据, 确定靶标区域, 然后通过点云分割、滤波等处理获得目标靶点, 并根据目标靶点位置确定对应喷雾仰角; 构建喷雾机构目标仰角与编码器脉冲数的数学模型, 以及目标仰角与电动推杆行程的数学模型, 设计喷雾机构仰角的测控方法。实际果树冠层靶点探测试验表明, 随机选取的 3 棵果树目标靶点主要集中在距地 2.0~3.5 m 范围内, 系统可以依据冠层形状计算靶点并调节喷雾仰角, 最小喷雾仰角为 47.8°, 最大喷雾仰角为 51.4°, 连续目标靶点之间喷雾仰角最大调节时间为 0.06 s, 可满足对靶的时效需求。该系统能够适应不同形态果树中下部对靶施药需求, 为后续开展果园精准植保研究提供理论基础与技术参考。

关键词: 农业机械; 喷雾; 传感器; 果园; 植保; 激光雷达; 目标探测; 仰角追踪

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.004

中图分类号: S49

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-09-0031-09

江世界, 马恒涛, 杨圣慧, 等. 果园喷雾机器人靶标探测与追踪系统[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 31-39.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.004 <http://www.tcsae.org>

Jiang Shijie, Ma Hengtao, Yang Shenghui, et al. Target detection and tracking system for orchard spraying robots[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 31-39. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.004 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

病虫害防治工作是整个果树管理作业中重要的环节, 随着季节变更、气候变化, 每年喷药 8~15 次, 其工作量约占整个果树管理工作量的 30%, 果园植保技术主要包括地面植保技术和航空植保技术, 地面植保技术可分为人工施药技术、传统风送施药技术和精准施药技术等^[1-2]。

风送施药技术能够改善雾滴雾化性能, 有效提高工作效率, 得到了广泛研究和应用。但是传统风送施药机的喷头布置多采用固定安装方式, 常见有固定圆环式^[3-5]、喷杆式^[6-7]、门式^[8]、组合圆盘式^[9]等, 喷头位置不能随意调整, 容易造成无效喷施和雾滴脱靶飘移, 农药浪费严重。随着技术的发展, 对靶^[10-12]、仿形、变量^[13-14]等精准施药技术快速发展, 将传统连续喷雾模式变为间歇性、变量喷雾模式, 为提高农药利用率, 减少环境污染提供了一种途径^[15-17]。马驰等^[18]研制一种丘陵山地柑橘果园多方位自动喷药装置, 能够根据检测的果树冠层轮廓自

动切换喷药模式, 设计竖直喷药、45°倾斜喷药和对地喷药等不同模式, 提高了对不同果树适应性; Osterman 等^[19]提出一种基于激光雷达的多关节风送喷雾机, 并设计喷雾机构定位算法, 能够根据果树冠层特征自动调整喷头方向和位置, 实现定向仿形喷雾; 张晓辉等^[20]设计了履带自走式果园定向风送喷雾机, 可根据果树长势调整喷头喷雾角度, 实现定向仿形喷雾, 试验表明定向喷雾变异系数降低 55.3%; 李龙龙等^[21]开发一种基于变风量与变喷雾量的果园自动仿形喷雾机, 搭载多个风机和喷头, 根据激光传感器扫描的冠层特征调节风量和喷雾量实现仿形变量喷雾; Li 等^[22]设计基于激光传感器的果园变量喷雾机, 利用高精度激光传感器获取果树冠层体积, 并实时控制喷嘴的流量和喷嘴位置的风扇转速, 能够有效节省药量, 减少地面和空气中雾滴漂移量。此外, 研究者基于激光雷达^[23-24]、机器视觉^[25]、超声传感器^[26]等不同传感器类型开展了一系列对精准施药技术的探索, 但是受传感器性能、果园种植模式等因素限制, 鲜见有规模化应用。

综上, 本研究设计一种果园喷雾机器人靶标检测与追踪系统, 通过对激光雷达扫描获取的冠层点云信息的处理, 实时获取靶标位置以及喷雾仰角, 并设计基于增量式比例积分微分 (Proportional Integral Derivative, PID) 的喷雾仰角控制算法, 从而实现靶标跟随喷雾, 为果园施药技术与装备的发展提供参考。

收稿日期: 2020-11-30 修订日期: 2021-01-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0700603); 山东烟台校地融合发展项目 (2019XDRHXMT30)

作者简介: 江世界, 博士生, 研究方向为果园精准植保技术与装备。

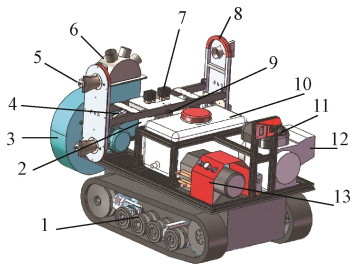
Email: jiangshijie1232@126.com

*通信作者: 郑永军, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业智能技术与装备。Email: zyj@cau.edu.cn

1 靶标探测与追踪系统设计

1.1 系统载体

本研究以中国农业大学工学院研制的靶标跟随式小型喷雾机器人作为系统载体(图1),主要包括电动履带底盘、靶标跟随式喷雾机构、离心式风机、喷雾组件和激光雷达等。其中,激光雷达安装在电动履带底盘的最前端,用于靶标的探测;靶标跟随式喷雾机构安装在电动履带底盘的后端,主要包括升降机构、喷雾支架、电动推杆、喷头,采用多喷头对称式设计,喷雾角度可根据靶标位置进行调节,双侧与单侧作业模式自由切换;离心式风机产生的气流被气流分配器分发输送到喷头位置,辅助提高雾滴的雾化程度。主要技术参数如表1所示。



1.电动履带底盘 2.升降机构 3.离心式风机 4.电动推杆 5.喷头 6.气流分配器 7.电磁阀 8.喷雾支架 9.测距传感器 10.药箱 11.激光雷达 12.增程器 13.药泵

1.Electric crawler chassis 2.Lifting implement 3.Centrifugal fan 4.Electric pushrod 5.Nozzle 6.Airflow distributor 7.Electromagnetic valve 8.Spraying bracket 9.Ranging sensor 10.Solution tank 11.Light detection and ranging (LiDAR) 12.Range extender 13.Chemical pump

图1 靶标跟随式小型喷雾机器人

Fig.1 Target following small spraying robot

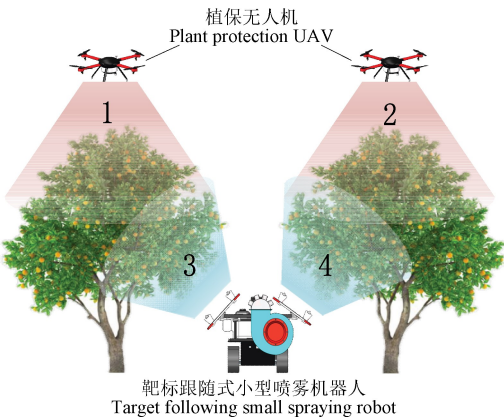
表1 靶标跟随式小型喷雾机器人的主要参数

Table 1 Main parameters of target following small spraying robot

类别	参数	备注
Categories	Parameters	Remarks
尺寸(长×宽×高)	1 575×1 190×1 355	收缩尺寸,高度、长度可调
Dimensions (Length×Width×Height)/mm×mm×mm		
整体质量	450	满载状态
Overall mass/kg		
作业速度	1~4	-
Operation speed/(km·h ⁻¹)		
最大喷雾幅宽	5	-
Maximum spraying swath/m		
配套动力	48	增程器+铅蓄电池
Auxiliary power/V		
电机功率	1.5	伺服减速电机
Electric motor/kW		减速比 15:1
最大风压	620	-
Maximum wind pressure/Pa		
最大风量	5 000	-
Maximum wind volume/(m ³ ·h ⁻¹)		
药泵流量	0~12	流量可调
Chemical pump flow/(L·min ⁻¹)		
药泵压力	1.5~4.5	压力可调
Chemical pump pressure/MPa		

1.2 靶标跟随式小型喷雾机器人作业原理

靶标跟随式小型喷雾机器人主要针对果树冠层中下部施药,可与植保无人机配合形成地空协同立体植保模式。地空协同立体植保模式示意图如图2所示,其中植保无人机对果树冠层上部施药,靶标跟随式小型喷雾机器人对冠层中下部施药,实现对果树冠层全覆盖施药。



注:区域1和2为植保无人机喷雾覆盖区域;区域3和4为本研究靶标跟随式小型喷雾机器人喷雾覆盖区域。

Note: Areas 1 and 2 are the coverage area by the spraying from plant-protection Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Areas 3 and area 4 are that from target following small spraying robot in this study.

图2 地空协同立体植保模式示意图

Fig.2 Schematic diagram of ground aviation collaborative cooperative stereo plant protection pattern

1.3 靶标探测与追踪系统方案设计

1.3.1 靶标探测与追踪系统硬件框图

靶标探测与追踪系统的硬件框图如图3所示,主控单元采用STM32F429单片机,接收和读取微型工控机、测距传感器的信号,通过脉冲宽度调制方式(Pulse width modulation, PWM)控制电动推杆的伸缩长度和升降机构的升降高度,并能根据推杆编码器的脉冲反馈信号实时调整。其中微型工控机对激光雷达扫描的点云信号进行处理,得到靶标位置、目标仰角等参数并发送给主控单元。

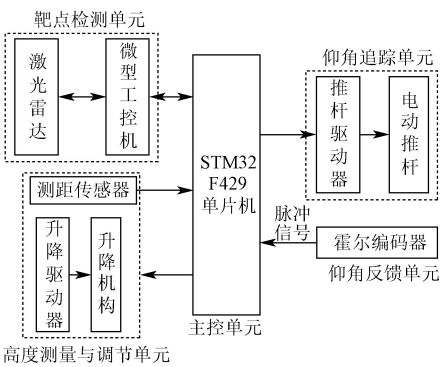


图3 靶标探测与追踪系统的硬件框图

Fig.3 Hardware diagram of target detection and tracking system

1.3.2 靶标跟随式小型喷雾机作业逻辑框图

靶标跟随式小型喷雾机作业流程如图4所示,作业开始前,作业人员首先根据果树冠层的整体高度对喷雾机构的高度进行预调节,使喷头组喷雾范围能够覆盖冠层中下部;作业时,喷雾机器人能够自主在果树行间行驶,激光雷达的扫描平面垂直行驶方向,点云数据可表征树冠间隙、树冠方位和密度。喷雾机构能够根据激光雷达的点云数据实时探测靶标位置,并根据靶标位置实时调节喷雾机构角度,减少雾滴脱靶。

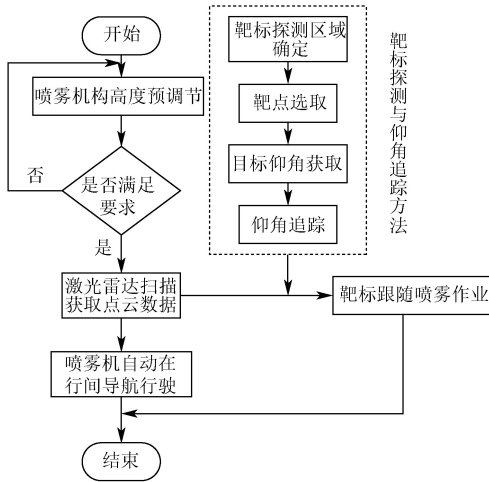


图4 靶标跟随式小型喷雾机器人作业流程图

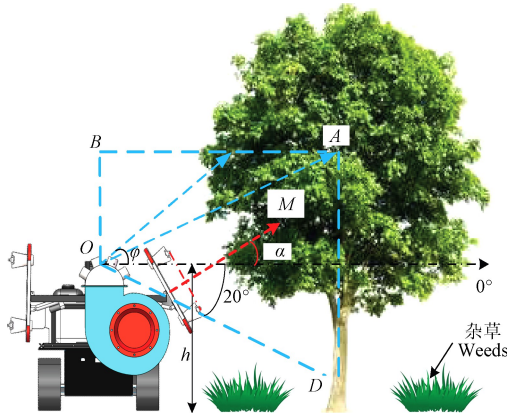
Fig.4 Operation flow chart of target following small spraying robot

2 靶标探测方法

2.1 靶标探测区域确定

靶点探测传感器采用激光雷达 (RPLIDAR S1, 上海思岚科技有限公司, 中国), 其扫描角度为 360° , 分辨率为 0.391° , 扫描频率为 $8\sim 20$ Hz, 扫描距离为 $0.1\sim 40.0$ m, 可满足果树冠层探测需求。

为避免杂草和树干的干扰, 减少数据运算量, 需先确定靶点探测区域, 取梯形 $ABOD$ 区域作为单侧靶点探测区域, O 点为激光雷达的探测中心点, 以过 O 点的水平线作为基准线, 令基准线以下扫描角度为负值, 基准线以上为正值 (图5)。



注: O 为激光雷达探测中心点; OB 为靶标探测区域垂直高度, mm; AB 为靶标探测区域水平长度, mm; D 点为靶标探测区域最低点; φ 为探测区域内任意一条扫描线与水平线的夹角, $(^\circ)$; h 为激光雷达中心点 O 距地面高度, mm; M 为靶点; α 为目标仰角, $(^\circ)$ 。下同。

Note: O is the central point of LiDAR detection; OB is the vertical height of target detection area, mm; AB is the horizontal length of target detection area, mm; D is the lowest point of target detection area; φ is the angle between the horizontal line and any scanning line in target detection area, $(^\circ)$; h is the height between the central point O of the LiDAR and the ground, mm; M is a target point; α is the target elevation angle, $(^\circ)$. The same below.

图5 靶标探测区域示意图

Fig.5 Schematic diagram of target detection area

对广西南宁、北京平谷、山西运城等地不同种类果园调研, 发现果树行间距一般为 $3\sim 5$ m, 株高为 $3.5\sim 4.0$ m, 主干高为 $0.7\sim 0.9$ m, 因此本研究取 O 点距地面

的距离 h 为 850 mm, OB 长为 $1\,000$ mm, AB 长为 $2\,000$ mm, OD 与水平线的夹角为 20° , 由几何运算得, OA 与水平线的夹角为 26.57° 。则探测区域 ($S(\varphi)$, mm) 如式 (1) 所示:

$$S(\varphi) = \begin{cases} 1\,000\sqrt{1+\cot^2\varphi}, & \varphi \in [26.57^\circ, 90.00^\circ] \\ 2\,000\sqrt{1+\tan^2\varphi}, & \varphi \in [-20.00^\circ, 26.57^\circ] \end{cases} \quad (1)$$

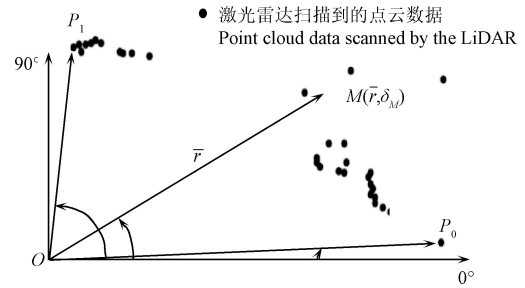
式中 φ 为探测区域内任意一条扫描线与水平线的夹角, $(^\circ)$; $S(\varphi)$ 为扫描角度为 φ 处的探测区域, mm。

2.2 靶点选取规则

以单侧喷头连线中垂线对准的目标点为靶点 M , 以喷头组的中垂线与激光雷达扫描的 0° 线夹角 (α , $(^\circ)$) 为喷头组的目标仰角 (图5)。靶点选取方法步骤如下:

1) 确定靶点极径大小

取一帧点云数据, 以激光雷达的探测中心为极坐标系的原点 O , 创建冠层中下部截面点云极坐标系如图6所示, 其中, $P_1(r_{P_1}, \theta_{P_1})$ 为极角最大点, $P_0(r_{P_0}, \theta_{P_0})$ 为极角最小点。



注: O 为激光雷达探测中心点 (极坐标系原点); P_1 为极角最大点; P_0 为极角最小点。 $M(\bar{r}, \delta_M)$ 为靶点, 其中 \bar{r} 为单帧点云的点平均极径, mm; δ_M 为单帧点云的点平均极角, $(^\circ)$ 。下同。

Note: O is the center of LiDAR detection (Origin of polar coordinate); P_1 is the point with the largest polar angle; P_0 is the point with the smallest polar angle. $M(\bar{r}, \delta_M)$ is the target point, where \bar{r} is the point average polar diameter of a single frame point cloud, mm; δ_M is the point average polar angle of a single frame point cloud, $(^\circ)$. The same below.

图6 冠层中下部截面点云极坐标系

Fig.6 Point cloud polar coordinate system in the middle and lower section of canopy

在靶点选取时, 若极径选择过小, 会导致喷雾仰角加大, 上喷头的喷幅可能会越过冠层喷雾区域上边界; 若极径选择过大, 下喷头的喷幅可能会越过冠层喷雾区域下边界, 过小和过大都会增加雾滴脱靶的可能性, 因此以单帧点云数据的点平均极径作为靶点的极径 (\bar{r} , mm), 其计算如式 (2) 所示:

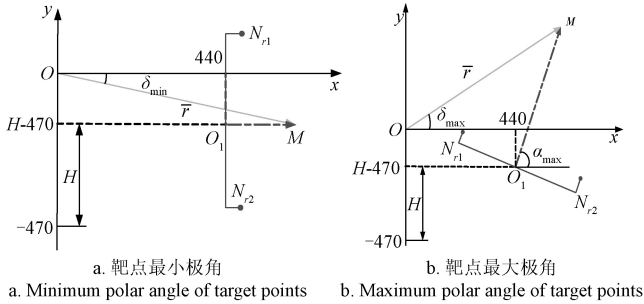
$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (2)$$

式中 r_i 为极坐标中第 i 个点的极径, mm; n 为靶标点云的总点数。

2) 确定靶点极角大小

为确定靶点的位置, 还需进一步确定靶点 M 的极角。由电动推杆尺寸和行程参数可知, 目标仰角存在最小仰角 0° 和最大仰角为 (α_{\max} , $(^\circ)$), 故靶点极角也应存在边界值。在确定靶点极角的边界值时, 需同时考虑喷头组的仰角极限值以及喷头组旋转中心与激光雷达的相对位置。

便于分析, 将喷头组的运动平面映射到激光雷达的扫描平面中, 并以激光雷达探测中心点为原点 O , 以激光雷达的 0° 扫描线为 x 轴, 以 90° 扫描线为 y 轴建立笛卡尔直角坐标系, 当喷雾仰角为 0° 时, 靶点极角存在下边界 (δ_{\min} , $^\circ$), 当喷雾仰角为 α_{\max} 时, 靶点极角存在上边界 (δ_{\max} , $^\circ$) 如图 7 所示。



注: O_1 是喷头组旋转中心点; N_{r1} 为右侧喷头组上喷头; N_{r2} 为右侧喷头组下喷头; 470 表示激光雷达探测中心点距电动履带底盘上表面的距离为 470 mm; 440 表示喷雾支架旋转中心距激光雷达探测中心的水平距离为 440 mm; H 为喷雾支架旋转中心距电动履带底盘上表面的高度, mm; δ_{\min} 为靶点 M 极角的最小值, $^\circ$; δ_{\max} 为靶点 M 的极角的最大值, $^\circ$; α_{\max} 为喷雾仰角的最大值, $^\circ$ 。下同。

Note: O_1 is the rotation center of a nozzle group; N_{r1} represents the upper nozzle of the right side of the group; N_{r2} represents the lower nozzle of the right side of the group; 470 means the distance between the LiDAR detection center and the upper surface of the electric crawler chassis; 440 is the horizontal distance between the rotation center of the spraying bracket and the LiDAR detection center; H is the height of the rotation center of the spraying bracket from the upper surface of the crawler chassis, mm; δ_{\min} is the minimum value of the polar angle of the target point M , $^\circ$; δ_{\max} is the maximum value of the polar angle of the target point M , $^\circ$; α_{\max} is the maximum elevation of the spraying, $^\circ$. The same below.

图 7 靶点极角边界值求解

Fig.7 Solution of boundary values of polar angles of target point

由几何关系求解得到靶点 M 的最小极角 (δ_{\min} , $^\circ$) 和最大极角 (δ_{\max} , $^\circ$) 的数学表达式如式 (3) 和式 (4) 所示:

$$\delta_{\min} = \arcsin \frac{H-470}{\bar{r}} \quad (3)$$

$$\delta_{\max} = \alpha_{\max} - \arcsin \left[\frac{(470-H) \cos \alpha_{\max} - 440 \sin \alpha_{\max}}{\bar{r}} \right] \quad (4)$$

式中 H 为喷头组旋转中心与电动履带底盘上表面的垂直距离, mm。

由式 (3) 和式 (4) 可知, 当 \bar{r} 和 α_{\max} 一定时, δ_{\min} 和 δ_{\max} 随 H 的增大而增大, 随 H 的减小而减小, 当冠层高度相对较低时, 可通过控制升降机构将喷头组高度适当降低, 以保证喷头组喷幅的下边界能覆盖冠层最下部, 同理, 当株高相对较高时, 可适当升高喷头组的高度以保证喷头组喷幅上边界能覆盖冠层中部; 当 H 和 α_{\max} 一定时, δ_{\min} 随着 \bar{r} 的增大而减小, 而 δ_{\max} 随着 \bar{r} 的增大而增大。由此可知, 不同帧的点云中, 靶点 M 的极角边界值与该帧点云中的点平均极径 \bar{r} 有关。

为确保 2 个喷头的喷施区域相对均衡, 取单帧靶点云中的极角最大点 P_1 的极角 θ_{P1} 与 δ_{\min} 的平均值作为靶点 M 的极角 (δ_M , $^\circ$), 其计算如式 (5) 所示:

$$\delta_M = \frac{\theta_{P1} + \delta_{\min}}{2} \quad \theta_{P1} \in [-20^\circ, 90^\circ] \quad (5)$$

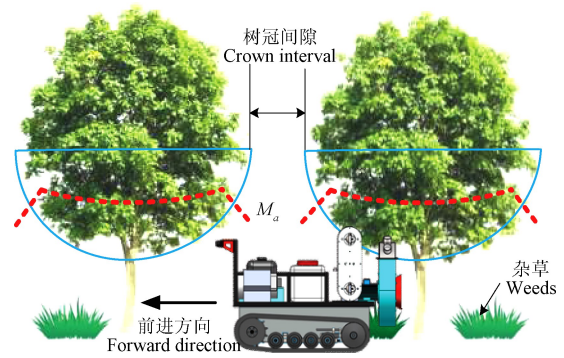
式中 θ_{P1} 为极角最大点 P_1 的极角, $^\circ$ 。

当通过式 (5) 计算得到的 δ_M 超出边界值时, 则用边界值代替, 得出 δ_M 关于 θ_{P1} 的分段函数表达式如式 (6) 所示:

$$\delta_M = \begin{cases} \delta_{\max}, & \theta_{P1} \in (2\delta_{\max} - \delta_{\min}, 90^\circ] \\ \frac{\theta_{P1} + \delta_{\min}}{2}, & \theta_{P1} \in (\delta_{\min}, 2\delta_{\max} - \delta_{\min}] \\ \delta_{\min}, & \theta_{P1} \in [-20^\circ, \delta_{\min}] \end{cases} \quad (6)$$

通过上述方式可获一帧数据的靶点为 $M(\bar{r}, \delta_M)$, 但在实际作业中单帧靶点跳动较大, 较难实现喷头对靶运动控制, 需要连续取多帧数据, 并求每帧点云数据的靶点, 再按时序取多组靶点进行均值滤波处理, 可得到该时段对应的三维点云空间内的平均靶点 $M_a(\bar{r}, \delta_{Ma})$ 作为对靶喷雾作业的实际靶点。

根据靶点选取规则, 可绘制作业过程中平均靶点 M_a 的变化轨迹示意图 (图 8)。在树冠间隙处, 探测区域内无靶点, 只有当激光雷达检测到靶标存在时, 探测区域才产生靶点。



注: M_a 为平均靶点; 虚线表示作业过程中平均靶点变化轨迹; 实线半圆区域代表喷雾范围。

Note: M_a is the average target point; dotted lines represent the changing trajectory of the average target point during operation; semicircle areas with solid lines represent the spraying range.

图 8 平均靶点变化轨迹示意图

Fig.8 Schematic diagram of the changing trajectory of average target point

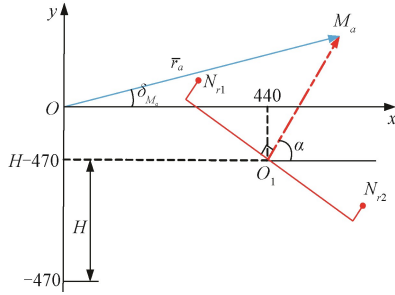
2.3 喷雾机构目标仰角获取

目标仰角 (α , $^\circ$) 是指在喷头组中垂线对准平均靶点 M_a 时的喷雾仰角。根据平均靶点 M_a 计算喷头组的目标仰角, 并通过串口通讯将计算结果传输至 STM32F429 单片机, 控制喷头组的仰角。为求取目标仰角, 将喷头组的运动平面映射到激光雷达的扫描平面中, 构成目标仰角求解直角坐标系如图 9 所示。

经几何求解, 可得到喷头组的目标仰角 α 与 \bar{r}_a 、 M_a 和 H 等参数的关系表达式如式 (7) 所示:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\bar{r}_a \sin \delta_{Ma} + 470 - H}{\bar{r}_a \cos \delta_{Ma} - 440} \right) \quad (7)$$

式中 \bar{r}_a 为平均靶点 M_a 的极径, mm; δ_{Ma} 为平均靶点 M_a 的极角, $^\circ$ 。



注: \bar{r}_a 为平均靶点 M_a 的极径, mm; δ_{Ma} 为平均靶点 M_a 的极角, ($^\circ$)。

Note: \bar{r}_a is the polar distance of the average target point M_a , mm; δ_{Ma} is the polar angle of the average target point M_a , ($^\circ$).

图9 喷雾机构目标仰角求解坐标系

Fig.9 Coordinate system for the solution of target elevation angle of the spraying mechanism

3 仰角追踪方法

3.1 仰角测量

喷雾仰角调节的执行机构采用电动推杆 (型号为 TGA-Y), 该电动推杆的最小安装距离为 205 mm, 最大行程为 100 mm, 最大伸缩速度为 60 mm/s, 推力为 100 N, 满足喷雾机构仰角调节的需求。电动推杆自带霍尔编码器, 推杆电机旋转 10 圈, 丝杠旋转 1 圈, 编码器可输出 6 个脉冲, 而丝杠旋转一圈推杆行程变化 9 mm。可利用鉴相原理通过单片机对编码器反馈的脉冲信号进行“加”计数或“减”计数, 可获得反馈脉冲总数 N_p , 且进而得到推杆行程 (l , mm) 的表达式如式 (8) 所示:

$$l = 0.15N_p \quad (8)$$

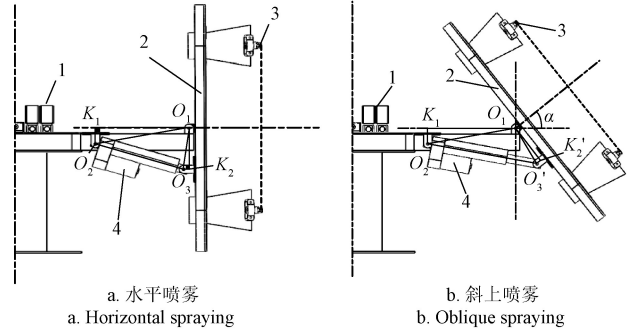
式中 l 为推杆行程, mm; N_p 为编码器反馈的脉冲总数。

推杆行程的变化可带动喷雾支架转动, 从而改变喷头组的仰角, 电动推杆行程 $l=0$ 时, 喷雾支架处于竖直状态, 喷头组处于水平喷雾姿态, 喷雾仰角为 0° (图 10a); 当电动推杆行程 $l>0$ 时, 喷雾支架处于向内倾斜状态, 喷头组处于斜上喷雾姿态, 目标仰角为 α (图 10b)。其中, O_1 为喷雾支架的旋转中心, O_2 为电动推杆固定端安装位置, O_3 和 O_3' 分别为喷雾仰角为 0° 和 α 时, 电动推杆活动端安装位置, K_1 为 O_2 在 O_1 所在水平面的投影, K_2 和 K_2' 分别为喷雾仰角为 0° 和 α 时, O_3 在 O_1 沿喷雾支架方向上的投影。

根据推杆行程与目标仰角变化示意图提取喷雾仰角调节原理图, 如图 11 所示, $\triangle O_1K_1O_2$ 、 $\triangle O_1K_2O_3$ 是刚体三角形, O_2O_3 是电动推杆最短安装尺寸, 即 $O_2O_3=205$ mm, γ 为喷雾支架与水平线的夹角 ($^\circ$), 且与 α 互为余角。当喷头水平喷雾时, 喷雾支架处于初始位置, 此时有 $K_2O_1 \perp K_1O_1$ 。当喷雾支架绕 O_1 点转动 α 角度时, 此时 $\triangle O_1K_2O_3$ 绕顶点 O_1 转动至 $\triangle O_1K_2'O_3'$ 处。此时推杆长度由 O_2O_3 变化为 O_2O_3' , 喷雾仰角由 0° 变为 α 。

利用余弦定理和刚体运动规律, 推导得到喷雾仰角与推杆行程关系如式 (9) 所示:

$$\alpha = \arccos \left[1.29 - \frac{(205+l)^2}{206.64^2} \right] - 72.26^\circ \quad (9)$$



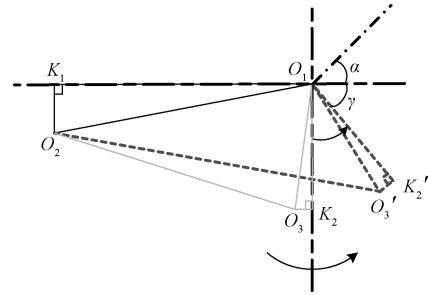
1.电磁阀 2.喷雾支架 3.喷头 4.电动推杆

1. Electromagnetic valve 2. Spraying bracket 3. Nozzle 4. Electric pushrod
注: O_2 为电动推杆固定端安装位置; O_3 和 O_3' 分别为喷雾仰角为 0° 和 α 时, 电动推杆活动端安装位置; K_1 为 O_2 在 O_1 所在水平面的投影; K_2 和 K_2' 分别为喷雾仰角为 0° 和 α 时, O_3 在 O_1 沿喷雾支架方向上的投影。下同。

Note: O_2 is the installation position of the fixed end of the electric pushrod; O_3 and O_3' are the installation positions of the movable end of the electric pushrod when the spraying elevation angles are 0° and α , respectively; K_1 is the projection of O_2 on the horizontal plane where O_1 is located; K_2 and K_2' are the projection of O_3 on O_1 along the direction of the spraying bracket when the spraying elevation angles are 0° and α , respectively. The same below.

图10 电动推杆行程与目标仰角变化示意图

Fig.10 Schematic diagram of the variation of electric pushrod stroke and target elevation angle



注: 箭头表示喷雾支架旋转方向; γ 为喷雾支架与水平线的夹角, ($^\circ$)。
Note: The arrows indicate the rotation direction of the spraying bracket; γ is the angle between the spraying bracket and the horizontal line, ($^\circ$).

图11 目标仰角调节原理图

Fig.11 Schematic diagram of target elevation adjustment

综合式 (8) 和式 (9) 可得到反馈脉冲数 N_p 与喷角 α 之间的关系如式 (10) 所示:

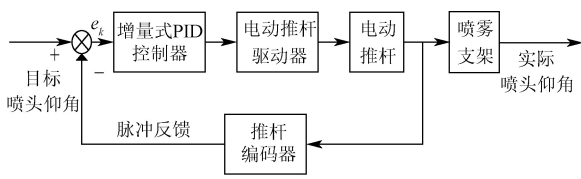
$$\alpha = \arccos \left[1.29 - \frac{(205 + 0.15N_p)^2}{206.64^2} \right] - 72.26^\circ \quad (10)$$

因此, 根据上述推导过程可知, 通过测量电动推杆的行程变化, 可求得喷头组的仰角变化, 进而实现喷雾仰角测量。

3.2 基于增量式比例积分微分 (PID) 的喷雾仰角控制算法

为提高喷雾仰角的控制精度, 设计了基于增量式 PID 的喷雾仰角控制算法, 控制模型如图 12 所示。在进行喷雾仰角控制时, 控制系统首先采集推杆编码器反馈的脉冲信号, 并同时获取靶标探测系统发送的目标仰角。然后控制器对编码器脉冲信号进行鉴相和计数, 并通过式 (10) 得到实时喷雾仰角。最后, PID 控制器将喷雾仰角实际值与喷雾仰角目标值作比较, 求出二者误差 e_k , 并

由 PID 控制器根据误差进行系统误差修正, 向推杆电机输入相应的控制量。



注: +表示正反馈; -表示负反馈; e_k 为第 k 次目标值与实际值之间误差。
Note: + represents positive feedback; - represents negative feedback; e_k is the error between the k_{th} target value and the actual value.

图 12 基于增量式比例积分微分的喷雾仰角控制模型
Fig.12 Control model of the spraying elevation based on incremental Proportional Integral Derivative (PID)

基于增量式 PID 的喷头仰角控制算法原理是使用离散的差分方程代替连续的微分方程, 其离散型 PID 控制方程如式 (11) 所示:

$$u(m) = K_p \cdot e_k + K_i \cdot \sum_1^m e_k + K_d \cdot (e_k - e_{k-1}) \quad (11)$$

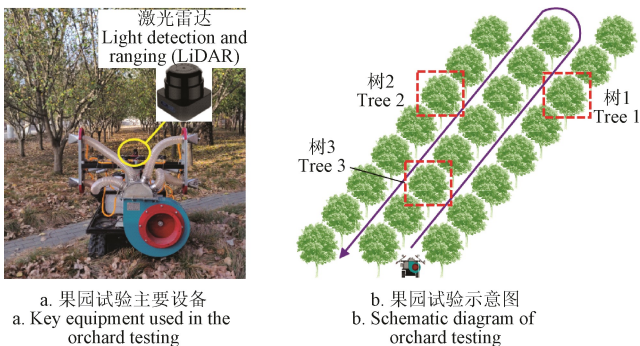
式中 $u(m)$ 为第 m 次控制输出量; e_k 为第 k 次目标值与实际值之间误差; e_{k-1} 为第 $k-1$ 次目标值与实际值之间误差; K_p 为比例控制环节系数; K_i 为积分控制环节系数; K_d 为微分控制环节系数。

通过对各参数进行整定得到最优 PID 参数组合, 由式 (11) 计算得到的第 m 次与第 $m-1$ 次控制算法输出量, 并进行两次输出量差值, 得到控制增量输出。

4 试验与结果分析

4.1 试验条件与试验设计

为验证该系统的靶标探测和目标仰角定位的准确性, 2020 年 10 月—11 月在中国农业大学东校区工学院西侧海棠树林开展试验, 试验场地长×宽规格为 40 m×12 m, 主要种植参数为行距约 3.0 m, 株距约 3.0 m, 株高约 4.0 m, 树干高度约 0.8 m, 试验时环境温度约 5 °C, 自然风速小于 0.5 m/s, 主要设备为靶标跟随式小型喷雾机、激光雷达等 (图 13a)。



注: 图 13b 中, 实线为试验过程中喷雾机器人行驶路线, 虚线框为随机选取的冠层样本。
Note: In Fig. 13b, solid line is the driving route of the spraying robot during the test, while the dotted frames are randomly selected canopy samples.

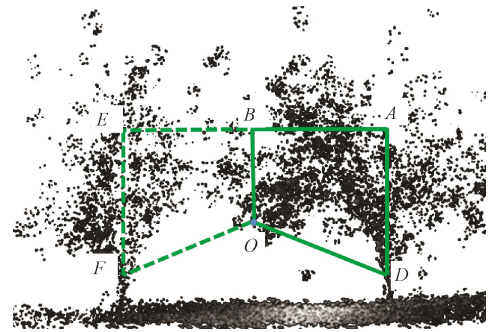
图 13 果园靶点探测与追踪试验方案

Fig.13 Diagram of target point detection and tracking testing in orchard

试验方案示意图如图 13b 所示, 试验时喷头组旋转中心距电动履带底盘上表面的高度 H 为 565 mm, 激光雷达安装在车体最前段, 安装位置距电动履带底盘上表面高度为 470 mm。试验过程中靶标跟随式小型喷雾机从起始位置以 0.5 m/s 速度匀速在行间行驶, 到达地头后调转方向从相邻行间返回, 激光雷达扫描海棠树冠层点云数据并存储到机器人操作系统 (Robot Operating System, ROS) 的 rosbag 文件中, 沿行进路线随机选取 3 棵树并标记为树 1、树 2、树 3。利用设计的靶标探测与追踪系统对选取的 3 棵树的冠层进行靶点定位与目标仰角处理。

4.2 结果与分析

进行靶标探测与仰角追踪处理前, 首先对冠层点云数据的靶标探测区域进行识别, 垂直于车体行驶方向对扫描的点云数据进行探测区域划分, 探测区域划分示意图如图 14 所示, 其中 O 点为激光雷达探测中心点, 实线梯形框 $ABOD$ 和虚线梯形框 $EBOF$ 分别表示前进方向右探测区域和左探测区域。



注: 实线梯形框 $ABOD$ 表示前进方向右探测区域; 虚线梯形框 $EBOF$ 表示前进方向左探测区域。
Note: Solid trapezoid $ABOD$ represents the right detection area of the forward direction; dotted trapezoid $EBOF$ represents the left detection area of the forward direction.

图 14 靶标探测区域划分示例

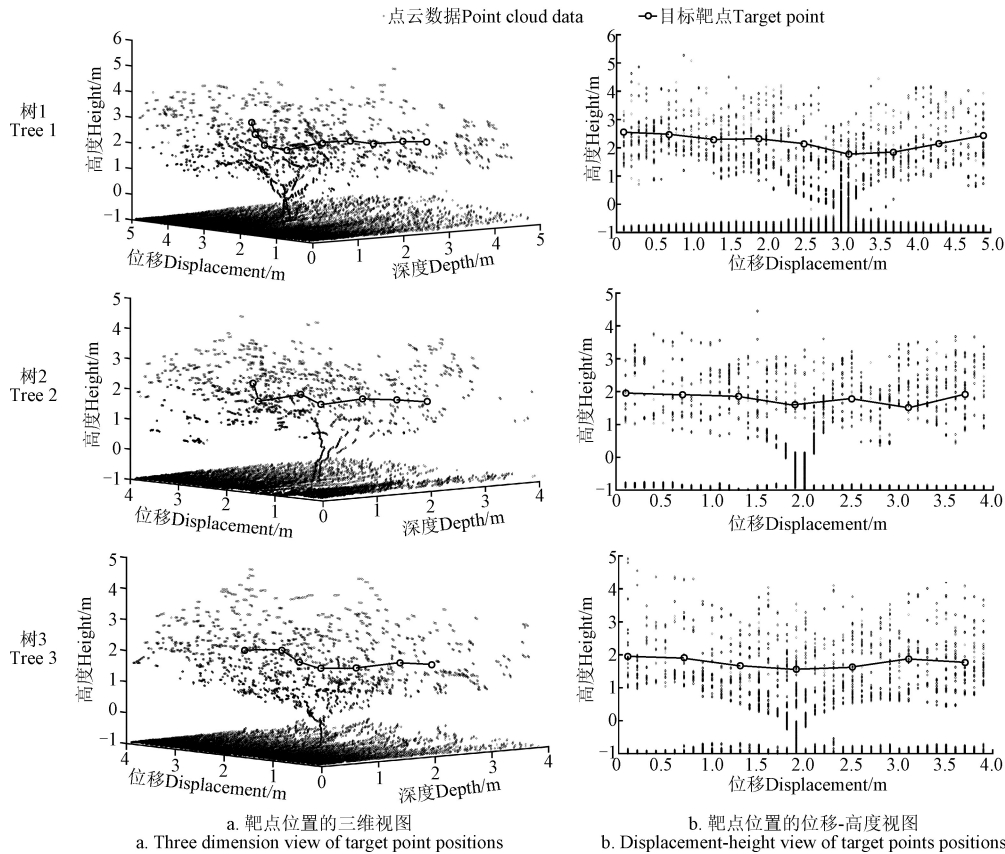
Fig.14 Example of partition of target detection areas

确定靶标探测区域后, 利用式 (2)~式 (10) 对点云数据进行分割和计算, 分别得到随机选取的 3 棵海棠树冠层探测区域内的靶点位置 and 对应喷雾仰角, 试验结果如图 15 和图 16 所示。所提出的靶标探测与追踪系统能够适应不同规格果树冠层, 可以依据冠层特征计算靶点位置; 并进一步得到靶点对应的喷雾仰角, 调节喷雾机构; 3 棵果树的目标靶点主要集中在距地 2.0~3.5 m 范围内, 相对于 5.0 m 左右的树高, 满足果树冠层中下部喷雾作业需求; 最小喷雾仰角为 47.8°, 最大喷雾仰角为 51.4°, 连续目标靶点之间喷雾仰角最大调节时间为 0.06 s, 可满足对靶的时效需求。分别将试验 3 棵树的机器测量靶点位置坐标表征到实际果树冠层上, 通过该方法获取的靶点离地高度与实际靶点离地高度误差小于 10%, 符合果树冠层覆盖喷雾需求。

此外, 单一果树冠层靶点位置和喷雾仰角变化幅度很小, 因此可根据喷雾机的行驶速度对冠层进行等分处理。以果树 1 的三等分为例, 对于 0.5 m/s 的行进速度, 需要约 50 帧点云数据表征果树三维模型, 可将其中约 15

帧点云数据的靶点坐标取平均值得到平均靶标位置的坐标, 以及平均靶点对应的喷雾仰角, 优化后目标靶点如

图 17 所示。等分处理可有效减少计算量以及仰角调节机构的响应时间要求, 提高系统的适用性。



注: 高度轴上“0”表示激光雷达的扫描中心点 O , 与地面距离为 1 m, 下同。图 15a 中, 位移轴与喷雾机器人行驶方向一致, 下同。
Note: “0” on the height axis represents the scanning center point O of the LiDAR, which distance from the ground is 1 m, the same below. In Fig. 15a, the displacement axis is consistent with the motion direction of the spraying robot, the same below.

图 15 靶点定位试验结果

Fig.15 Positioning test results of target points

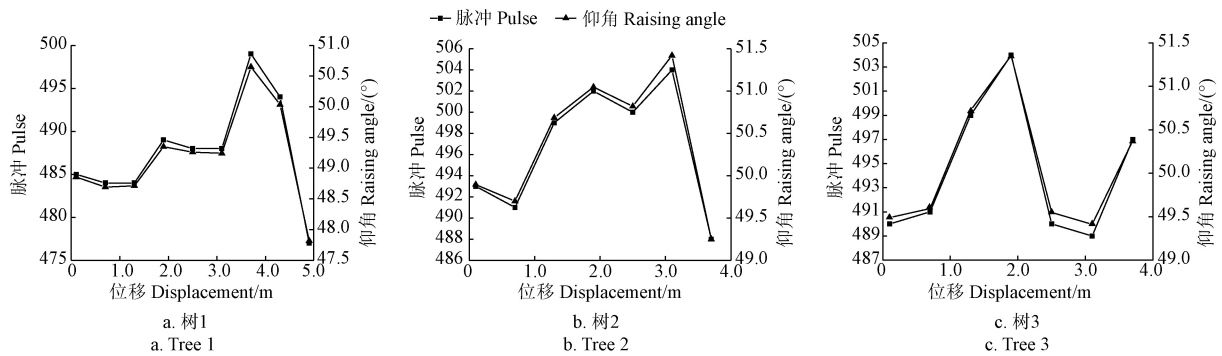


图 16 喷雾仰角和脉冲计算结果

Fig.16 Computation results of spraying raising angle and pulse

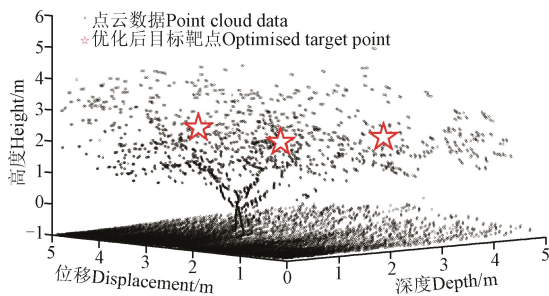


图 17 基于等分计算的冠层靶点位置

Fig.17 Canopy target point positions based on equal division computation

5 结论

本研究针对传统风送式喷雾机作业过程中雾滴脱靶率高的问题, 设计了一种基于果园喷雾机器人的靶标探测与追踪系统, 主要结论如下:

1) 采用激光雷达获取果树冠层点云数据, 通过点云分割计算等处理, 获取目标靶点的极径、极角等信息, 进而得到对应喷雾仰角, 为后续靶标跟随喷雾的效果研究提供理论基础;

2) 开展了实际果树冠层靶标探测和仰角测量试验, 试验结果表明, 随机选取的 3 棵果树利用该系统计算得

到的目标靶点主要集中在 2.0~3.5 m 范围内, 相对于 5.0 m 左右的树高, 满足中下部喷雾作业需求, 最小喷雾仰角为 47.8°, 最大喷雾仰角为 51.4°, 连续目标靶点之间喷雾仰角最大调节时间为 0.06 s, 可满足对靶的时效需求, 能够适应不同规格果树冠层, 为地面机械与无人机立体协同植保提供了技术手段。

3) 针对单一果树冠层靶点位置变化幅度较小的实际情况, 对果树冠层进行等分处理, 在保证靶标跟随效果的同时, 有效减少计算量以及仰角调节机构的响应时间要求。该系统为喷雾作业时减少雾滴脱靶, 提高农药利用率提供技术参考。

[参 考 文 献]

- [1] 郑永军, 江世界, 陈炳太, 等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 1-20. Zheng Yongjun, Jiang Shijie, Chen Bingtai, et al. Review on technology and equipment of the mechanization in hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1-20. (in Chinese with English abstract)
- [2] 郑永军, 陈炳太, 吕昊瞰, 等. 中国果园植保机械化技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 110-124. Zheng Yongjun, Chen Bingtai, Lyu Haotun, et al. Research progress of orchard plant protection mechanization technology and equipment in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(20): 110-124. (in Chinese with English abstract)
- [3] 吕晓兰, 张美娜, 常有宏, 等. 果园风送喷雾机导流板角度对气流场三维分布的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 81-87. Lü Xiaolan, Zhang Meina, Chang Youhong, et al. Influence of deflector angles for orchard air-assisted sprayer on 3D airflow distribution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(15): 81-87. (in Chinese with English abstract)
- [4] 丁素明, 薛新宇, 张玲, 等. 自走式果园风送喷雾机的研制[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(4): 54-58, 62. Ding Suming, Xue Xinyu, Zhang Ling, et al. Design on self-propelled air-blowing orchard sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(4): 54-58, 62. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张亮, 刘俊峰, 李建平, 等. 3WFQ-1600 型牵引式风送喷雾机研制与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(4): 62-67. Zhang Liang, Liu Junfeng, Li Jianping, et al. Design and experiment of 3WFQ-1600 traction type air-assisted in orchard[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(4): 62-67. (in Chinese with English abstract)
- [6] 乔白羽, 何雄奎, 王志翀, 等. 基于 LiDAR 扫描的高地隙宽幅喷雾机变量施药系统研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 89-95. Qiao Baiyu, He Xiongkui, Wang Zhichong, et al. Development of variable-rate spraying system for high clearance wide boom sprayer based on LiDAR scanning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 89-95. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李亚丽, 湛小梅, 王圆明, 等. 3WP-500 型喷杆式果园喷雾机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(8): 147-152. Li Yali, Zhan Xiaomei, Wang Yuanming, et al. Design and experiment on 3WP-500 spray rod orchard sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 147-152. (in Chinese with English abstract)
- [8] 邱威, 孙浩, 孙玉慧, 等. 低矮果园环流式循环风送喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 18-25. Qiu Wei, Sun Hao, Sun Yuhui, et al. Design and test of circulating air-assisted sprayer for dwarfed orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(6): 18-25. (in Chinese with English abstract)
- [9] 周良富, 傅锡敏, 丁为民, 等. 组合圆盘式果园风送喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 64-71. Zhou Liangfu, Fu Ximin, Ding Weimin, et al. Design and experiment of combined disc air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 64-71. (in Chinese with English abstract)
- [10] 翟长远, 赵春江, Ning Wang, 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, Ning Wang, et al. Research progress on precision control methods of air-assisted spraying in orchards[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(10): 1-15. (in Chinese with English abstract)
- [11] 宋淑然, 陈建泽, 洪添胜, 等. 果园柔性对靶喷雾装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 57-63. Song Shuran, Chen Jianze, Hong Tiansheng, et al. Design and experiment of orchard flexible targeted spray device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 57-63. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊 1): 189-195. Jiang Honghua, Bai Peng, Liu Limin, et al. Caterpillar self-propelled and air-assisted orchard sprayer with automatic target spray system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Suppl.1): 189-195. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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 (Transactions of the CSAE), 2017, 33(23): 80-92. (in Chinese with English abstract)
- [14] 程滨滨, 祁力钧, 吴亚垒, 等. 矮化密植果园摇摆变量喷雾机参数响应面法优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊 1): 22-29. Cheng Zhenzhen, Qi Lijun, Wu Yalei, et al. Parameter optimization on swing variable sprayer of orchard based on RSM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Suppl.1): 22-29. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘理民, 张晓辉, 石光智, 等. 多态自动对靶风送式喷雾试验台的设计与试验[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(13): 260-263. Liu Limin, Zhang Xiaohui, Shi Guangzhi, et al. Design and test of polymorphic automatic target air-blast spray test-bed[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(13): 260-263. (in Chinese with English abstract)
- [16] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J]. 智慧农业 (中英文), 2020, 2(1): 133-146. He Xiongkui. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 133-146. (in Chinese with English abstract)
- [17] Song L P, Huang J P, Liang X W, et al. An intelligent multi-sensor variable spray system with chaotic optimization

- and adaptive fuzzy control[J/OL]. *Sensors*, 2020, 20(10). [2020-05-20]. <https://doi.org/10.3390/s20102954>.
- [18] 马驰, 李光林, 李晓东, 等. 丘陵山地柑橘果园多方位自动喷药装置研制[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 31-41. Ma Chi, Li Guanglin, Li Xiaodong, et al. Development of multi-orientation automatic spraying device for citrus orchards in hilly and mountainous areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(3): 31-41. (in Chinese with English abstract)
- [19] Osterman A, Godeša T, Hočevan M, et al. Real-time positioning algorithm for variable-geometry air-assisted orchard sprayer[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 98: 175-182.
- [20] 张晓辉, 姜宗月, 范国强, 等. 履带自走式果园定向风送喷雾机[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(8): 117-122. Zhang Xiaohui, Jiang Zongyue, Fan Guoqiang, et al. Self-propelled crawler directional air-blowing orchard sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(8): 117-122. (in Chinese with English abstract)
- [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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(1): 70-76. (in Chinese with English abstract)
- [22] Li L L, He X K, Song J L, et al. Design and experiment of variable rate orchard sprayer based on laser scanning sensor[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(1): 101-108.
- [23] Shen Y, Zhu H, Liu H, et al. Development of a laser-guided, embedded-computer-controlled, air-assisted precision sprayer[J]. *Transactions of the ASABE*, 2017, 60(6): 1827-1838.
- [24] Cai J C, Wang X, Song J, et al. Development of real-time laser-scanning system to detect tree canopy characteristics for variable-rate pesticide application[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(6): 155-163.
- [25] Xiao K, Ma Y J, Gao G D. An intelligent precision orchard pesticide spray technique based on the depth-of-field extraction algorithm[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 133: 30-36.
- [26] Li H Z, Zhai C Y, Weckler P, et al. A canopy density model for planar orchard target detection based on ultrasonic sensors[J/OL]. *Sensors*, 2017, 17(1). [2016-12-21]. <https://doi.org/10.3390/s17010031>.

Target detection and tracking system for orchard spraying robots

Jiang Shijie¹, Ma Hengtao¹, Yang Shenghui¹, Zhang Chao¹, Su Daobilige¹, Zheng Yongjun^{1,2,3*}, Kang Feng⁴

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Engineering Research Center of Agricultural Equipment and Facilities, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. China Agricultural University YanTai Institute, Yantai 264670, China; 4. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Pesticide spray is a key session of management of fruit trees and air-assisted ground sprayers are commonly used in orchards. However, conventional equipment may lead to concerning issues, such as excessive chemical use and serious drifts. This study designed a target detecting and tracking system for an orchard spray robot, which was specifically developed for spraying onto middle and lower parts of fruit trees in terms of the background of stereo plant protection. The robot had an electric crawler chassis. A lifting implement and a spray bracket with nozzles were specifically designed. In terms of the control system, the system consisted of four main units: including a LiDAR detection unit, a height adjustment unit, an angle adjustment unit, and a control unit. For the LiDAR detection unit, RPLIDAR S1 was used to detect trees and measure the distance between the robot and the trees. For the height adjustment unit, a lifting implement combined with ranging finders was utilized to raise the height from the ground to the spray bracket, so that nozzles could reach the calculated height of target points in real-time. For the angle adjustment unit, electric pushrods with encoders were exploited to change the angle of the spray bracket, so that the nozzles could follow the calculated angle of target points. In terms of the control unit, STM32F429, a microcontroller, was applied. Based on the structure, three steps were developed for operation. First, general characteristics of fruit trees were analyzed based on the investigation in the orchards in Beijing, Shanxi, and Guangxi, and detection areas were determined based on these characteristics. Then, LiDAR was used to acquire the point clouds of canopies of the trees, and the polar distance and polar angle of target points were computed based on the maximum and minimum polar coordinate values of points of the trees. At last, the target points were obtained by the division and filtering of the point clouds in the areas, and the final distance and elevation angle of spraying were calculated based on these targets. Furthermore, the mathematical relations, one, between the elevation angle of the targets and the pulse number of the encoder, the other, between that and the stroke of pushrods, were established. Meanwhile, the measurement and control method of elevation angles of the spray bracket was designed. Incremental Proportion Integral Differential (PID) was applied for the angle variation so that elevation tracking could be achieved. To demonstrate the performance of the system, trials were conducted on the campus of China Agricultural University to acquire the data of Begonia canopies. The route of the robot was 'U' shaped and three trees were randomly selected for analysis. Results indicated that the system could adapt to different sizes and characteristics of canopies. Meanwhile, the targets of the three trees were concentrated on the height from 2.0 m to 3.5 m, which illustrates that the range could meet the requirement of spray onto middle and lower canopies of trees. Furthermore, the trials identified that the minimum spray elevation angle was 47.8°, while the maximum spray elevation angle was 51.4°. The maximum adjustment time of spray elevation angle between continuous targets was 0.06 s, which meant that the positioning of targets was fast. The system could offer a solid theoretical basis of the target following spray and the study could give a technical reference on chemical reduction, energy-saving, and drift decrease of plant protection in orchards.

Keywords: agricultural machinery; spraying; sensors; orchard; plant protection; LiDAR; target detection; elevation angle tracking