

# 最小二乘法与 SVM 组合的林果行间自主导航方法

刘星星<sup>1</sup>, 张超<sup>1</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 杨圣慧<sup>1</sup>, 江世界<sup>1</sup>, 郑永军<sup>1,2\*</sup>,  
苏道毕力格<sup>1</sup>, 万畅<sup>1,3</sup>

(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. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300)

**摘要:** 为了提高作业装备在果园与树林行间的自主导航性能, 该研究提出一种基于最小二乘法与支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 融合的树行识别与导航方法。研究采用履带式小型喷雾机为作业平台, 通过低成本的单线激光雷达获取果园或树林环境点云数据, 融合姿态传感器进行数据校正, 利用最小二乘法拟合识别树行, 结合 SVM 算法, 预测果园行间中心线, 作为作业平台的参考导航线。在桃园、柑橘园、松树林 3 种不同的行间环境对导航算法进行了测试验证, 并以松树林导航为例进行分析。试验结果表明: 该导航算法最大横向偏差为 107.7 mm, 横向偏差绝对平均值不超过 17.8 mm, 结合作业平台的行驶轨迹, 说明该导航算法能够保证作业平台沿树行行间中心线自主导航行驶, 能够满足作业装备在果园与树林行间自主导航作业的需求。

**关键词:** 激光雷达; 导航; 最小二乘法; 支持向量机; 地面装备

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.018

中图分类号: S147.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-09-0157-08

刘星星, 张超, 张浩, 等. 最小二乘法与 SVM 组合的林果行间自主导航方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 157-164.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.018 <http://www.tcsae.org>

Liu Xingxing, Zhang Chao, Zhang Hao, et al. Inter-row automatic navigation method by combining least square and SVM in forestry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 157-164. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.018 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

自动驾驶是实现农业装备智能化的重要部分, 根据传感器种类可将导航方式分为激光雷达导航、GPS/GNSS 导航、机器视觉导航以及多传感器融合导航等<sup>[1-2]</sup>。张雄楚等<sup>[3]</sup>提出一种枣树树行视觉导航路径检测算法, 对于灰枣枣园与骏枣枣园, 该算法的路径检测准确率平均值分别为 94%和 93%, 单帧图像处理时间分别为 0.042 和 0.046 s, 但该算法受到抖动、人像干扰、逆光以及地膜干扰等情况影响时容易产生检测错误。杨洋等<sup>[4]</sup>提出了一种基于车轮正前方可行行走动态感兴趣区域的玉米行导航线实时提取算法, 该算法提取的导航线与人工提取结果平均误差为 1.157°, 准确率为 96%, 单帧图像处理时间为 0.097 56 s。聂森等<sup>[5]</sup>提出一种基于机器视觉的果园环境行间导航算法, 该算法能够提取两侧树行的中心线作为导航路径, 但是图像平均处理时间为 1.166 s, 算法较为复杂, 处理时间过长, 且也会受到光照与落叶的影响。袁池等<sup>[6]</sup>针对果树复杂空间层次造成

直线检测算法失效的问题, 提出了一种果树行中心线检测算法, 单帧图像处理时间长达 0.6 s, 图像处理算法较复杂。所以在实际生产应用中, 机器视觉导航技术受光照强度、视角范围等条件限制较大<sup>[7-9]</sup>。魏爽等<sup>[10]</sup>提出一种基于 GNSS 的农机自动驾驶路径搜索方法与基于预瞄点搜索的纯追踪模型, 导航均方根误差最大为 25.23 cm。熊斌等<sup>[11]</sup>采用 DBS 技术设计了一套施药机自主导航系统, 在果园自动化施药作业试验中, 导航横向误差最大不超过 13 cm, 横向误差平均值不超过 3 cm。罗锡文等<sup>[12]</sup>基于载波相位差分 GPS 技术设计了一套导航控制系统, 并设计了地头跨行转向的控制算法, 在直线导航速度为 0.8 m/s 时, 平均误差不足 3 cm, 最大误差不足 15 cm。但是尽管现代化果园环境相对标准, 仍然存在果树枝叶茂冠层郁闭的情况, 环境等同于半封闭环境, 卫星信号受到树冠遮挡, 容易产生较大误差, 因此在果园作业环境中, 基于 GNSS 定位的导航方法还受到一定的限制。激光雷达受环境影响较小, 具有较强的环境适应性, 能够在户外实时获取作物或果树轮廓以及环境、位置信息, 近年来在导航、扫描、对靶等领域得到广泛应用<sup>[13-15]</sup>。

Oscar 等<sup>[16]</sup>设计了一种基于二维激光雷达的果园自动驾驶导航系统, 横向误差为 110 mm, 航向角误差为 1.5°。Thanpattranon 等<sup>[17]</sup>利用二维激光雷达, 设计了一种适用于果园自动曲线导航行驶系统, 与人工驾驶相比, 路径跟踪平均偏差为 275 mm, 标准差为 9 mm。Bayar 等<sup>[18]</sup>

收稿日期: 2020-12-01 修订日期: 2021-02-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0700603); 新疆重点产业创新发展支撑计划项目 (2020DB003)

作者简介: 刘星星, 博士生导师, 研究方向为机器视觉与智能控制。

Email: liuxingxing56285@163.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

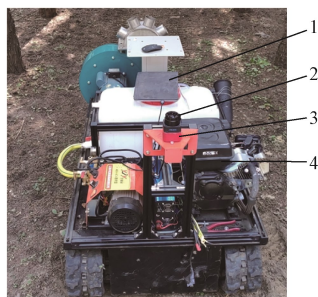
利用廉价激光测距仪实现拖拉机在苹果园中直线行走和地头转弯,在保证系统稳定性情况下,降低了成本。Freitas 等<sup>[19]</sup>利用激光雷达、编码器等多传感器感知果园垄行果树位置信息,并采用派生卡尔曼滤波器判别植保机器人相对垄行的位置以及植保机器人的导航路径。陈军等<sup>[20]</sup>采用 SICK LMS291 型激光雷达来模拟果园环境导航,平均横向偏差 120 mm,最大横向偏差 400 m。贾士伟等<sup>[21]</sup>提出一种基于激光雷达的温室导航定位方法,在走廊环境中平均横向偏差为 12.7 mm,均方误差为 26.8 mm,温室道路平坦地带可实现自主行走。艾长胜等<sup>[22]</sup>利用卡尔曼滤波器处理由激光雷达扫描获取的果园数据信息,并结合 SVM 技术实现植保机器人定位,平均横向偏差为 4.22 mm,平均航向偏差为 0.72°。毛鹏军等<sup>[23]</sup>设计了林下自主导航机器人,采用 ROS 操作系统,搭载激光雷达实现环境地图构建,在室内模拟环境中能够规划路线、躲避障碍物,实现一定程度的自主导航。周俊等<sup>[24]</sup>提出一种利用激光雷达前后多帧数据匹配的农业机器人定位方法,在密植果园的果树行间试验中定位误差约为 80 mm,精度基本满足果园作业机器人应用需求。

综上,近年来国内外基于激光雷达的林间导航技术研究很多,但多针对单一的林间环境,单一扫描树冠或者扫描树干。本研究设计一种基于激光雷达的作业平台导航系统,针对冠层相连的桃园行间、冠层不相连的柑橘园行间以及扫描树干的松树林行间 3 种环境,提出最小二乘法与支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 融合的导航路径生成算法,研究作业平台在林间环境中的导航性能。

## 1 导航系统与导航路径计算

### 1.1 系统组成及原理

本研究基于中国农业大学工学院设计的履带式喷雾机 (如图 1 所示),采用激光雷达扫描林间作业环境,获取导航基础数据。该履带式喷雾机主要技术参数如下:外形尺寸 1 575 mm×1 190 mm×1 355 mm (长×宽×高),驱动系统由 48 V、1.3 kW 直流无刷电机与 RV50 型蜗轮蜗杆减速机组成,动力系统采用电压为 48 V、容量为 45 ah 铅蓄电池,配置 6 kW 增程器提高续航能力。



1.上位机 2.激光雷达 3.姿态传感器 4.增程器  
1.Slave computer 2.Lidar 3.Attitude sensor 4.Range extender

图 1 自主导航履带式喷雾机

Fig.1 Track-type sprayer for autonomous navigation

系统总体方案如图 2 所示。激光雷达传感器获取两侧树行点云数据,通过串行接口将数据传输至上位机。姿态传感器获取作业平台的姿态信息并通过串行接口传输至上位机。上位机对点云数据及姿态位姿数据进行处理、分析并计算出导航路径后通过串口将控制信号发送至下位机;下位机根据控制信号输出脉冲宽度调制 (PWM) 信号至电机驱动器以驱动电动机,实现作业平台的移动。

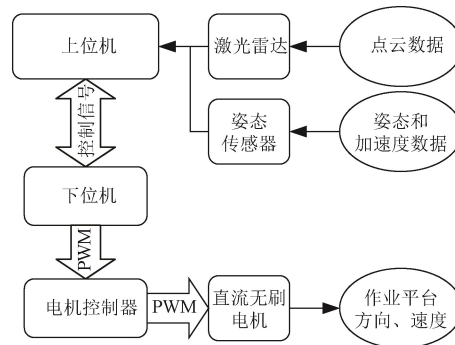


图 2 系统总体方案

Fig.2 Entire design of the system

所用激光雷达传感器为上海思岚科技有限公司的 RPLIDAR S1,该激光雷达具有 40 m 测距半径,可在室外环境下工作,扫描频率为 8~15 Hz 可调。姿态传感器选用 SC-AHRS-100D2 型号姿态模块,可提供动静态环境下实时的、高精度的横滚角、俯仰角和航向角。姿态传感器性能指标如表 1 所示。

表 1 100D2 型姿态传感器性能参数

Table 1 Performance parameters of the attitude sensor of 100D2

参数 Parameters	值 Values	备注 Remarks
俯仰角 Pitch angle/(°)	±90	
横滚角 Roll angle/(°)	±180	
航向角 Yaw angle/(°)	0~360	
静态精度 Static precision	0.3	
动态精度 Dynamic precision	0.8	2°航向角
分辨率 Resolution	0.01	

### 1.2 导航路径计算

当作业平台在树林行间行走时,利用姿态传感器获取的作业平台位姿信息,对由激光雷达获取的行间数据信息做方向上的校正,然后用最小二乘法拟合识别树行,结合支持向量机,获得树林行间中心线,以此中心线作为作业平台的参考导航线。

#### 1.2.1 激光雷达点云数据校正

作业平台在树林行间行走时,激光雷达初步扫描捕获的树行行间实况信息如图 3a 所示,由于作业平台行进时有航向偏差,激光雷达扫描的点云信息在行间行进中不能很好分辨出树林中的行与列,所以用姿态传感器的航向信息对激光雷达点云进行角度数据校正,排除作业平台行进时的航向偏差所带来的激光雷达点云数据起始位置的角度干扰,确保每一帧激光雷达数据起始位置的角度相同,以便于后续数据处理分辨出激光雷达点云数据中的树行信息。

姿态传感器读取的姿态数据使用四元数表示,分别

为  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $w$ ，为了方便计算，需要将其转换为欧拉角。四元数到欧拉角的转换方程为

$$\begin{bmatrix} R \\ P \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}(2(wz + xy), 1 - 2(z^2 + x^2)) \\ \arcsin(2(wy - zx)) \\ \text{atan2}(2(wy + zx), 1 - 2(x^2 + y^2)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $R$ 、 $P$ 、 $Y$  分别代表翻滚 (Roll) 角、俯仰 (Pitch) 角、航向 (Yaw) 角，( $^\circ$ )。作业平台在行间初始位置时姿态传感器获取的航向角数据记为  $\text{yaw1}$ ，此后每一帧激光雷达数据对应的航向角数据记为  $\text{yaw2}$ ，激光雷达点云数据需要校正的角度  $\beta$  为

$$\beta = \text{yaw2} - \text{yaw1} \quad (2)$$

激光雷达获取点云数据格式为  $P_i(r_i, \theta_i)$ ，其中  $r_i$  表示第  $i$  个点到激光雷达的距离， $m$ ； $\theta_i$  表示第  $i$  个点到初始位置的角度，( $^\circ$ )。分别对当前帧激光雷达每个点的角度减去需要校正的角度，如公式 (3)，校正后激光雷达点云数据为  $P_i(r_i, \phi_i)$

$$\phi_i = \theta_i - \beta \quad (3)$$

为了方便后续数据处理，将经过姿态传感器校正后的激光雷达点云数据由极坐标  $P_i(r_i, \phi_i)$  转为笛卡尔坐标  $P_i(x_i, y_i)$ ，其转换方程为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_i \times \cos \phi_i \\ r_i \times \sin \phi_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $r_i$  表示一帧激光雷达数据中第  $i$  个点到原点的距离， $\text{cm}$ ； $\phi_i$  表示第  $i$  个点的与原点连线和第 1 个点与原点连线的夹角，( $^\circ$ )； $x_i$ 、 $y_i$  分别表示笛卡尔坐标系中第  $i$  个点坐标， $\text{cm}$ 。

激光雷达点云原始数据由极坐标转为笛卡尔坐标系如图 3a，校正后如图 3b。当作业平台在初始位置时，树行与车身接近平行，在作业平台行进过程中，航向角发生变化，如图 3a 所示，树行线有一定的倾斜，通过位姿传感器对激光雷达数据角度校正，如图 3b 中，树行线接近水平，此时激光雷达数据起始位置角度与第一帧数据起始位置角度相同，以便于后续数据处理分辨出激光雷达点云数据中的树行信息。

### 1.2.2 最小二乘法拟合树行

由于树林行间距约为 2.5 m，初步滤掉  $y_i > 2.5 \text{ m}$  与  $y_i < -2.5 \text{ m}$  的数据，大致保留当前树林行间树行数据信息，并对  $P_i(x_i, y_i)$  中的数据分为  $y_i > 0$  与  $y_i < 0$  两类， $y_i > 0$  的数据集记为一侧树行激光雷达点云数据，记作  $L1(x_i, y_i)$ ， $y_i < 0$  的数据集记为另一侧树行激光雷达点云数据，记作  $L2(x_i, y_i)$ ，设  $L1$  与  $L2$  数据集线性回归方程为

$$\begin{aligned} L1: y &= m_1 x - b_1 \\ L2: y &= m_2 x - b_2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $m_1$ 、 $m_2$  分别为  $L1$ 、 $L2$  的斜率； $b_1$ 、 $b_2$  分别为  $L1$ 、 $L2$  的截距， $\text{cm}$ 。

最小二乘法拟合直线求解公式为

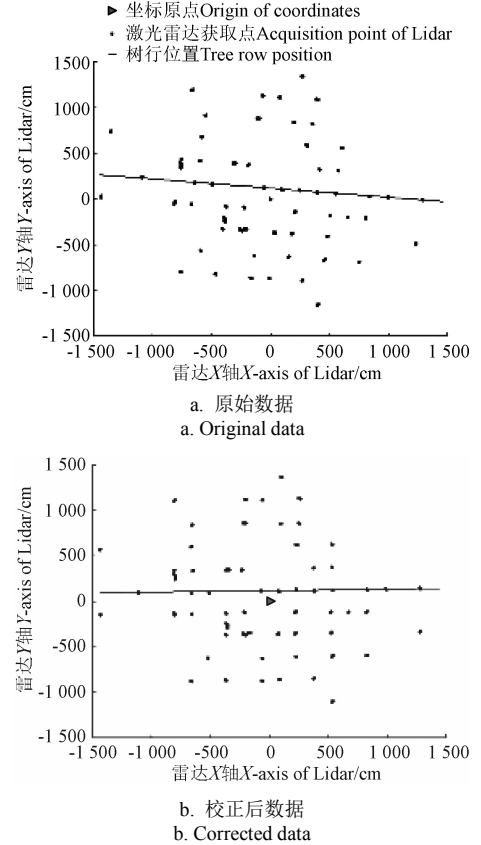


图3 姿态传感器校正激光雷达数据图  
Fig.3 Modification of orientation and pose by the data from Lidar

$$\begin{aligned} m &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \\ b &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i - m \sum_{i=1}^n x_i}{n} \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $n$  为一帧激光雷达数据中点的数量。

将数据集  $L1(x_i, y_i)$ 、 $L2(x_i, y_i)$  分别代入公式 (6)，求出对应的截距  $m_1$ 、 $m_2$  与截距  $b_1$ 、 $b_2$ ，将截距与斜率代入公式 (5) 分别求得最小二乘法拟合的左右两侧树行位置  $L1$ 、 $L2$ ，取  $L1$  与  $L2$  中心线  $L3$ ，将  $L3$  作为分类线，将  $P_i(x_i, y_i)$  中的数据分为两类。中心线  $L3$  的方程如公式 (7) 所示，最小二乘法拟合树行数据如图 4 所示。

$$L3: y = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)x + \frac{1}{2}(b_1 + b_2) = m_3 x - b_3 \quad (7)$$

### 1.2.3 支持向量机生成导航线

树行趋向平行是树林种植的突出特征，而其平行性展现了两侧树行可以进行二分类的特点。利用支持向量机可确定一条与两侧树行间隔最大化的最优分类线，以此最优分类线作为作业平台参考导航线。

由图 4 中的  $L3$  将激光雷达点云数据分为两类，对于点  $P_i(x_i, y_i)$  有其对应的标签  $z_i$ ，对应训练数据为  $(P_i, z_i)$ 。

$$z_i = \begin{cases} 1, & m_3 x_i + b_3 - y_i \geq 0 \\ -1, & m_3 x_i + b_3 - y_i < 0 \end{cases} \quad (8)$$

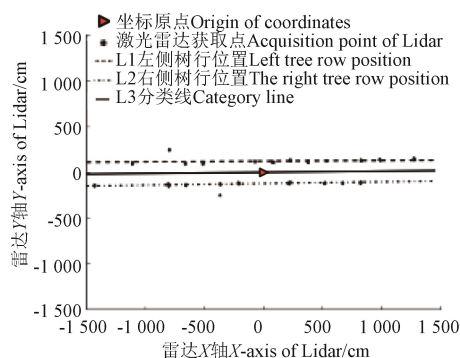


图4 最小二乘法拟合树行

Fig.4 Fitting of tree row using least square method

设分类面函数为  $w x + b = 0$ ，即对两侧点云数据进行二分类的最优分类面，为使分类面对所有样本正确分类并具备分类间隔，其数据需要符合关系：

$y_i[(w \cdot x_i) + b] \geq 1, i = 1, 2, \dots, l$  ( $l$  为一帧激光雷达数据中点的数量)。由此可得分类间隔为  $2/\|w\|$ ，将构造最优分类线的问题转化为具备约束条件的凸优化问题

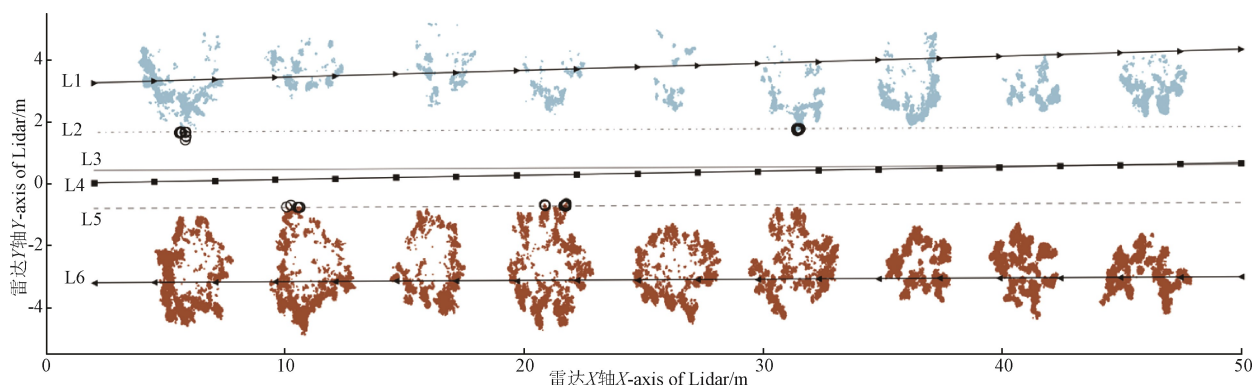
$\min \phi(w) = \frac{1}{2} \|w\|^2 = \frac{1}{2} (w' \cdot w)$ ，且转化为拉格朗日乘子的

目标函数<sup>[25]</sup>为  $L = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i (w x_i + b) + \sum_{i=1}^l \alpha_i$ 。其中

$\alpha_i$  为拉格朗日系数， $\alpha_i$  的值决定与其相对应各个激光雷达扫描点是否为支持向量点。同时在约束条件的限定下需要把目标函数的凸优化问题转变成拉格朗日的对偶求取最优解的问题。其中  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l)$ <sup>[22]</sup>

$$\begin{aligned} \max Q(\alpha) &= \sum_{j=1}^l \alpha_j \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i x_j) \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n \alpha_j y_j &= 0 \\ \alpha_j &\geq 0, j = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \quad (9)$$

通过对  $\alpha$  的求解间接获取  $w^*$  与  $b^*$  最优估计



注：图中浅色与深色部分分别为激光雷达扫描柑橘园行间左右两侧柑橘树冠层点云数据。L1、L6 分别为为最小二乘法拟合的左右两侧树行线，L4 为最小二乘法拟合的左右两侧树行线中心线。L2、L5 为支持向量机分类边际线，L3 为两条分类边际线中心线。黑色圆圈为支持向量。  
Note: The light and dark parts in the figure are respectively the point cloud data of the citrus canopy on the left and right sides of the orange orchard scanned by lidar. L1 and L6 are the tree rows on the left and right sides fitted by the least square method, and L4 is the center line of the tree rows on the left and right sides fitted by the least square method. L2 and L5 are the marginal lines of support vector machine classification, and L3 are the center lines of the two marginal lines of classification. The black circle are support vectors.

图6 最小二乘法与本研究算法导航线对比

Fig.6 Navigation line comparison between least squares and the proposed navigation method

$$w^* = \sum_{j=1}^l \alpha_j y_j x_j \quad (10)$$

$$b^* = y_i \sum_{j=1}^l \alpha_j y_j (x_j x_i) \quad (11)$$

最终求得最优分类线函数，即参考导航线 L

$$L: y = w^* x - b^* \quad (12)$$

通过支持向量机生成理想导航线如图 5 所示。

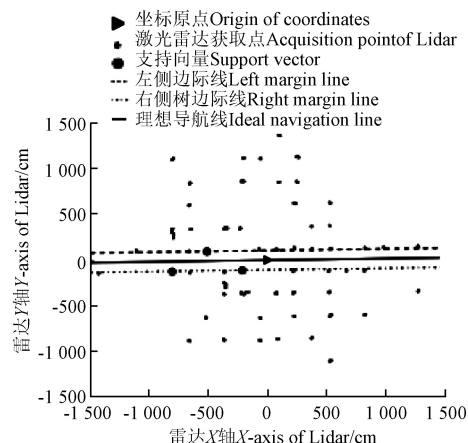


图5 支持向量机生成导航线

Fig.5 Navigation path using SVM

#### 1.2.4 最小二乘法与融合算法对比

为提升基于激光雷达作业平台的导航算法通用性，分别在北京市平谷区桃园、四川广安县柑橘园、北京市海淀区东升八家郊野公园北区松树林采集激光雷达点云数据。其中海淀区东升八家郊野公园北区松树林，树木较为高大，作业平台在林间行进时，激光雷达只能扫描到松树主干；北京市平谷区桃园与四川广安县柑橘园则由于矮化果树，作业平台在林间行进时，激光雷达只能扫描到果树冠层，其中柑橘园为柑橘树有间隔种植，桃园桃树为有行无列冠层相连种植。

图 6 为四川省广安县柑橘园以最小二乘法与支持向量机算法得到的导航线对比。



由于柑橘树冠层枝叶茂密,激光雷达往往只能扫描到外侧点云,扫描数据并不能真实反映出冠层横截面,由此采用最小二乘法拟合树行的结果并不理想,如图6浅色树行部分最小二乘法拟合出的树行拟合线不能作为实际树行位置参考,由此最小二乘法生成的参考导航线算法不适用于扫描冠层的激光雷达林间导航。

本研究融合算法基于支持向量机生成的分类边界线,在于找到分类点云的边界,对于激光雷达只能扫描冠层外侧的情况则不受影响,并且能够在一定程度上排除果树生长情况和冠层大小不一带来的干扰。本研究融合算法生成导航线能尽可能的远离左右两侧障碍物,避免在行间自主导航过程中产生的枝叶的碰撞,同时也能适用于多种林间作业环境。

### 1.3 横向偏差计算

如图5所示,激光雷达坐标原点,式(12)中参考导航线为 $L$ ,所以横向偏差为激光雷达到 $L$ 理想导航线的距离。由于点云数据经过姿态传感器校正, $L$ 趋向于水平,斜率较小,采用 $L$ 距激光雷达的垂直距离作为横向偏差,横向偏差 $bias$ 计算公式为

$$bias = w^* \cdot 0 + b^* - 0 = b^* \quad (13)$$

### 1.4 导航控制

作业平台的移动是通过上位机通过串口通讯给下位机发送速度控制指令,下位机输出PWM信号,通过电机驱动器,控制直流无刷电机转速而实现。本研究中使用电机驱动器驱动左右两个电机,实现作业平台的差速转向。

本研究采用PD控制方式进行作业平台的导航控制。导航控制的输入量为作业平台的横向偏差 $bias_k$ 。输出 $U_k$ 为左右两侧直流电机速度差值,用于调整作业平台方向。

$$U_k = K_p \cdot bias_k + K_d (bias_k - bias_{k-1}) \quad (14)$$

式中 $K_p$ 为比例系数; $K_d$ 为积分系数; $U_k$ 为 $k$ 时刻输出量,

m/s; $bias_k$ 为 $k$ 时刻横向偏差,cm; $bias_{k-1}$ 为 $k-1$ 时刻横向偏差,cm。

## 2 试验与结果分析

### 2.1 试验设计

为检验基于激光雷达作业平台的导航算法性能,分别在北京市平谷区桃园、四川广安县柑橘园、海淀区东升八家郊野公园北区松树林开展试验。试验场景及场地参数如表2所示。

激光雷达传感器安装在作业平台的正前方,距离地面垂直高度950 mm(高度可调),水平扫描,扫描角度为 $360^\circ$ ,扫描半径为15 m,角度分辨率为 $0.333^\circ$ 。履带作业平台的初始速度为0.5 m/s。

在树林中随机挑选3处行间(行1、行2、行3)作为导航试验环境,每一行重复导航3次,记录激光雷达数据、姿态传感器数据与横向偏差数据。

表2 试验场景及场地参数  
Table 2 Test scene and site parameters

试验区 Test area	北京市平谷区桃园 s1	四川省广安县柑橘园 s2	北京市海淀区八家郊野公园松树林 s3
场景 Scene			
行距×株距×行长 Row spacing× plant spacing×row length (m×m×m)	3×1×50	5×5×200	2.5×1.5×27

### 2.2 结果与分析

北京市平谷区桃园、四川广安县柑橘园、海淀区东升八家郊野公园北区松树林3处场景中激光雷达实时生成参考导航线如图7所示。

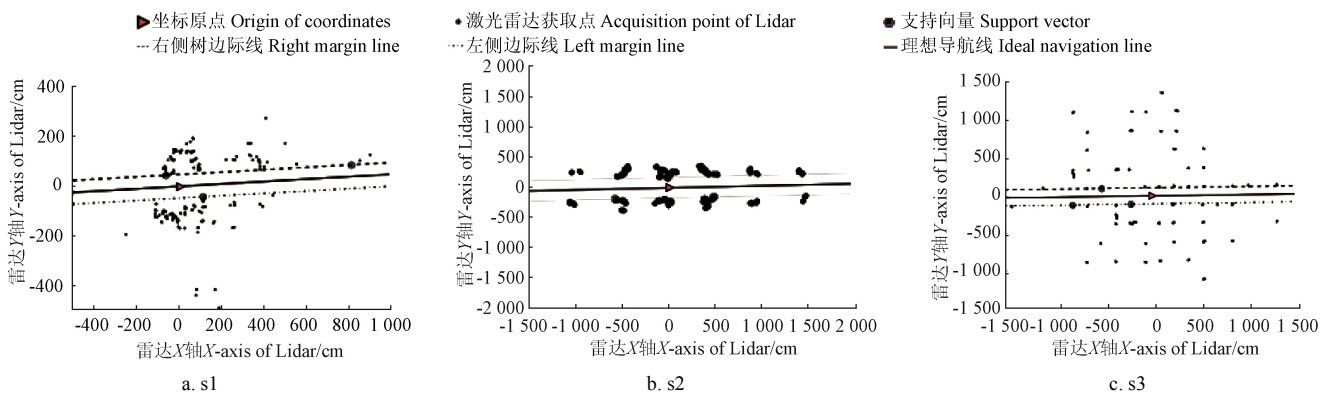


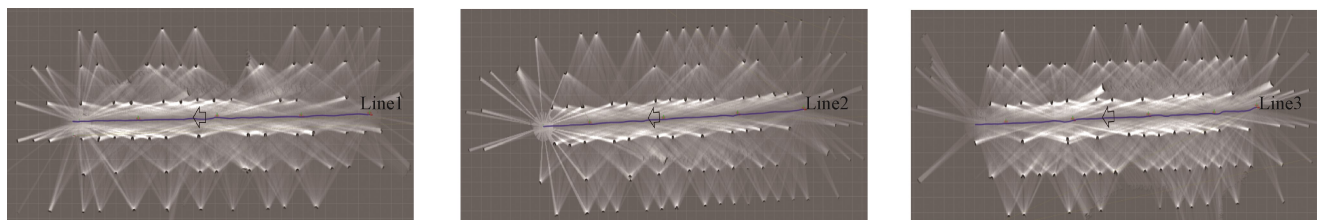
图7 各试验场景实时参考导航线

Fig.7 Real-time navigation paths for each test scene

以北京市海淀区八家郊野公园松树林试验的场景为例,将作业平台导航过程中的激光雷达点云数据与姿态传感器数据用Cartographer建图并生成行走轨迹,分别在行1、2、3中试验导航效果如图8所示。

表3为试验时的横向偏差统计结果。由表3可知,在9次导航试验中最大横向偏差为107.7 mm,横向偏差绝对值最大为17.8 mm,横向偏差的标准差最大为18.7 mm,9

次试验的导航行走轨迹作图如图9所示。其中行2第2次试验中最大横向偏差处,横向偏差为98.9 mm;行3第2次试验中最大横向偏差处,横向偏差为107.7 mm,这两次试验此处横向偏差跳变明显,此处横向偏差过大主要是路面不平,激光雷达随着车身而动,扫到地面或者松树树冠导致。9次试验轨迹沿中线均匀分布,并且能够快速响应并趋向平稳,基本满足行间自主作业要求。



a. 行 1

a. Row 1

b. 行 2

b. Row 2

c. 行 3

c. Row 3

注：图中黑点为激光雷达扫描到的松树树干，Line1、Line2、Line3 为在该区域中的某一行间导航轨迹线，箭头方向表示作业平台导航前进方向。

Note: The black dots in the figure are the pine trunks scanned by the lidar. Line1, Line2, and Line3 are the navigation trajectories of one line in the area, and the direction of the arrow represents the navigation direction of the operation platform.

图 8 导航建图与轨迹

Fig.8 Mapping and path of the navigation

表 3 试验横向偏差统计

Table 3 Test lateral deviation statistics

行号 Row No.	试验 序号 Test No.	最大值 Maximum values/mm	绝对平均值 Absolute values of means/mm	标准偏差 Standard deviation/mm	最大缺失间距 Maximum miss spacing/m
1	1	68.1	14.5	14.7	4.5
	2	-98.9	13.4	12.0	
	3	-74.4	15.4	14.2	
2	4	-85.4	14.5	13.9	3.0
	5	-60.3	11.9	10.9	
	6	57.8	11.1	9.0	
3	7	-94.7	16.9	18.1	3.0
	8	107.7	17.8	18.7	
	9	-82.9	14.4	14.7	

图 9 中试验轨迹小幅震荡是由于作业平台行进过程中，底盘震动较大，导致架设于底盘之上的激光雷达小幅震荡，从而导致的测量误差。后续改进试验中，或可架设云台进行改进。9 次试验轨迹图中大幅度震荡是由于 PID 控制导航时，微分系数较小，阻尼不够，导致在震荡中没有迅速趋于平稳，同时由于没有采用分段 PID 控制，导致导航控制不够精细。后续研究中采用分段 PID 控制，应该能够有所改进。9 组试验中横向偏差绝对值的平均值最大为 17.8 mm，标准偏差最大为 18.7 mm，结合图 9 的运行轨迹，表明本研究的基于激光雷达的作业平台导航控制系统能够让作业平台横向偏差趋于 0 以获得稳定的导航行为。

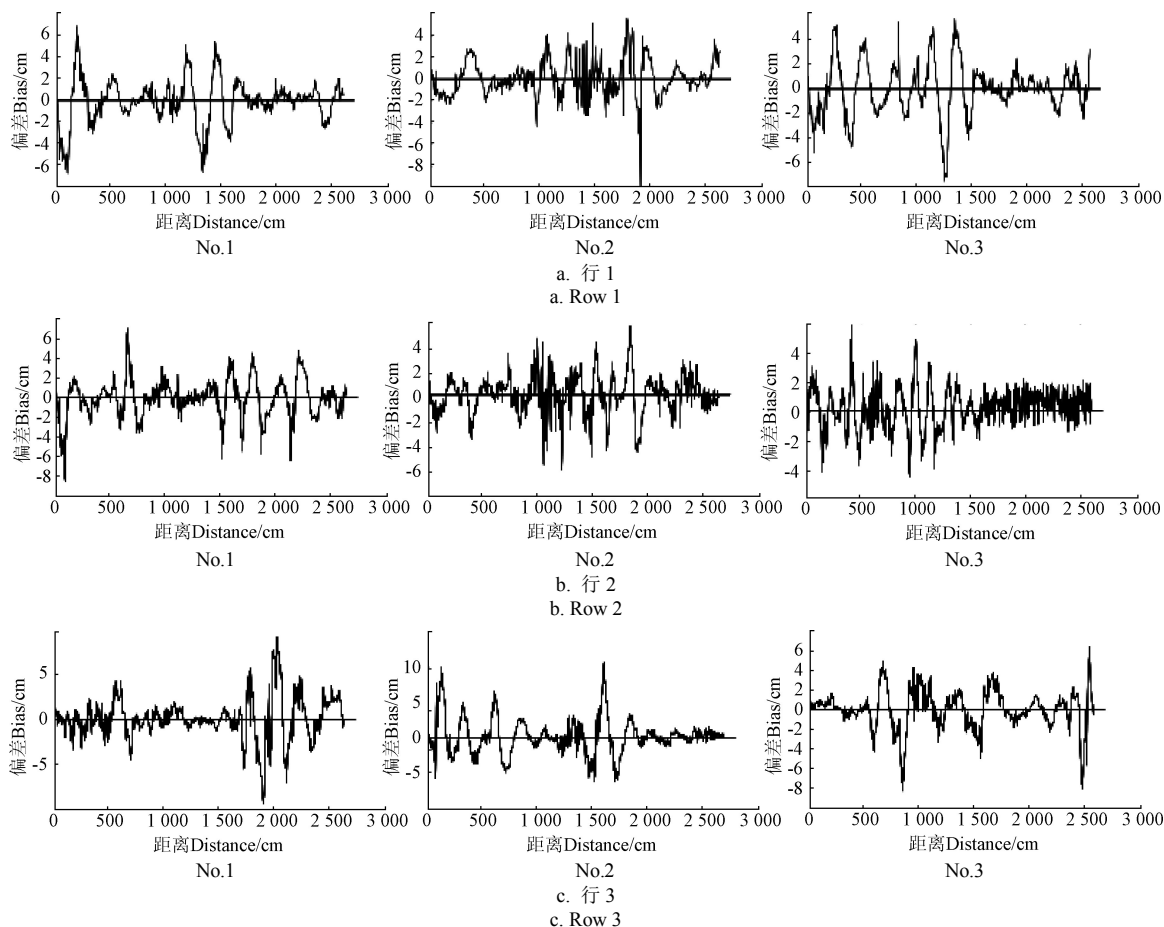


图 9 履带式作业平台行走轨迹

Fig.9 Trajectory of the track-type platform

### 3 结 论

本文针对传统导航方式在果园或林间的郁闭环境中GPS信号弱、光强影响大等问题,提出了基于激光雷达的林间作业平台导航方法,结论如下:

1) 设计了最小二乘法与支持向量机组成的树林行间导航算法,在桃园、柑橘园和松树林3种不同环境进行了测试,结果表明该算法均能有效提取得到参考导航路径,可适应多种复杂环境。

2) 在松树林开展了平台导航试验,将所设计算法的预测导航线与当前位置的横向偏差作为平台PID控制器的反馈输入,进行平台行进的方向调节,结果表明:在作业平台的速度为0.5 m/s条件下,最大横向偏差为107.7 mm,绝对偏差的平均值不超过17.8 mm,证明该导航方法能满足作业平台在林间自主导航的需求,可为林间地面装备的自主导航作业提供一种技术参考。

#### [参 考 文 献]

- [1] Han Shufeng, He Yong, Fang Hui. Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture: A Review[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2018, 44(4): 381-391, 515.  
韩树丰, 何勇, 方慧. 农机自动导航及无人驾驶车辆的发展综述[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2018, 44(4): 381-391, 515. (in English with Chinese abstract)
- [2] 李会宾, 韩伟, 史云. 果园作业机器人的自主行间导航系统研究[J]. 中国农业信息, 2019, 31(4): 51-64.  
Li Huibin, Han Wei, Shi Yun. Autonomous inter-line navigation system for orchard robots[J]. China Agricultural Informatics, 2019, 31(4): 51-64. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张雄楚, 陈兵旗, 李景彬, 等. 红枣收获机视觉导航路径检测[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 133-140.  
Zhang Xiongchu, Chen Bingqi, Li Jingbin, et al. Path detection of visual navigation for jujube harvesters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(13): 133-140. (in Chinese with English abstract)
- [4] 杨洋, 张博立, 查家翼, 等. 玉米行间导航线实时提取[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 162-171.  
Yang Yang, Zhang Boli, Zha Jiayi, et al. Real-time extraction of navigation line between corn rows[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(12): 162-171. (in Chinese with English abstract)
- [5] 聂森, 王丙龙, 郝欢欢, 等. 基于机器视觉的果园导航中线提取算法研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(12): 86-89.  
Nie Sen, Wang Binglong, Hao Huanhuan, et al. Navigation line extraction based on machine vision in orchard[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(12): 86-89. (in Chinese with English abstract)
- [6] 袁池, 陈军, 武涛, 等. 基于机器视觉的果树行中心线检测算法研究[J]. 农机化研究, 2013, 35(3): 37-39.  
Yuan Chi, Chen Jun, Wu Tao, et al. Algorithms of machine vision-based centerline detection of fruit tree rows[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(3): 37-39. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈艳, 张漫, 马文强, 等. 基于GPS和机器视觉的组合导航定位方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 126-130.  
Chen Yan, Zhang Man, Ma Wenqiang, et al. Positioning method of integrated navigation based on GPS and machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(3): 126-130. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张志斌, 潘华稳, 李琛, 等. 一种基于平均垄间距的视觉导航垄线识别算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(22): 191-194.  
Zhang Zhibin, Pan Huanwen, Li Chen, et al. Crop rows identification based-row interval for field vision guidance system[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(22): 191-194. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李云伍, 徐俊杰, 王铭枫, 等. 丘陵山区田间道路自主行驶转运车及其视觉导航系统研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 52-61.  
Li Yunwu, Xu Junjie, Wang Mingfeng, et al. Development of autonomous driving transfer trolley on field roads and its visual navigation system for hilly areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(1): 52-61. (in Chinese with English abstract)
- [10] 魏爽, 李世超, 张漫, 等. 基于GNSS的农机自动导航路径搜索及转向控制[J]. 农业工程学报, 2017, 33(S1): 70-77.  
Wei Shuang, Li Shichao, Zhang Man, et al. Automatic navigation path search and turning control of agricultural machinery based on GNSS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(S1): 70-77. (in Chinese with English abstract)
- [11] 熊斌, 张俊雄, 曲峰, 等. 基于BDS的果园施药机自动导航控制系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 45-50.  
Xiong Bin, Zhang Junxiong, Qu Feng, et al. Navigation control system for orchard spraying machine based on Beidou Navigation satellite system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 45-50. (in Chinese with English abstract)
- [12] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红X-804拖拉机的DGPS自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139-145.  
Luo Xiwen, Zhang Zhigang, Zhao Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese with English abstract)
- [13] 何勇, 蒋浩, 方慧, 等. 车辆智能障碍物检测方法及其农业应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 21-32.  
He Yong, Jiang Hao, Fang Hui, et al. Research progress of intelligent obstacle detection methods of vehicles and their application on agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(9): 21-32. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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 mechanization in hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1-20. (in Chinese with English abstract)
- [15] Zheng Y, Lan Y, Kang F, et al. Using laser sensor for measuring crop conditions in precision agriculture[C]// Kansas City, Missouri, 2013.
- [16] Oscar C, Mizushima A, Ishii K, et al. Development of an autonomous navigation system using a two-dimensional laser scanner in an orchard application[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(2): 139-149.
- [17] Thanpattranon P, Ahamed T, Takigawa T. Navigation of autonomous tractor for orchards and plantations using a laser range finder: Automatic control of trailer position with tractor[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 90-103.
- [18] Bayar G, Bergerman M, Koku A B, et al. Localization and control of an autonomous orchard vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 115: 118-128.

- [19] Freitas G, Ji Z, Hamner B, et al. A low-cost, practical localization system for agricultural vehicles[C]// International Conference on Intelligent Robotics & Applications. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [20] 陈军, 蒋浩然, 刘沛, 等. 果园移动机器人曲线路径导航控制[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 179-182, 187.  
Chen Jun, Jiang Haoran, Liu Pei, et al. Navigation control for orchard mobile robot in curve path[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 179-182, 187. (in Chinese with English abstract)
- [21] 贾士伟, 李军民, 邱权, 等. 基于激光测距仪的温室机器人道路边缘检测与路径导航[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 39-45.  
Jia Shiwei, Li Junmin, Qiu Quan, et al. New corridor edge detection and navigation for greenhouse mobile robots based on laser scanner[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(13): 39-45. (in Chinese with English abstract)
- [22] 艾长胜, 林洪川, 武德林, 等. 葡萄园植保机器人路径规划算法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 77-85.  
Ai Changsheng, Lin Hongchuan, Wu Delin, et al. Path planning algorithm for plant protection robots in vineyard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(13): 77-85. (in Chinese with English abstract)
- [23] 毛鹏军, 张家瑞, 黄传鹏, 等. 林下作业机器人设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(2): 91-95.  
Mao Pengjun, Zhang Jiarui, Huang Chuanpeng, et al. Design and experiment of understory robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(2): 91-95. (in Chinese with English abstract)
- [24] 周俊, 胡晨. 密植果园作业机器人行间定位方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 22-28.  
Zhou Jun, Hu Chen. Inter-row localization method for agricultural robot working in close planting orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 22-28. (in Chinese with English abstract)
- [25] 郭明玮, 赵宇宙, 项俊平, 等. 基于支持向量机的目标检测算法综述[J]. 控制与决策, 2014, 29(2): 193-200.  
Guo Mingwei, Zhao Yuzhou, Xiang Junping, et al. Review of object detection methods based on SVM[J]. Control and Decision, 2014, 29(2): 193-200. (in Chinese with English abstract)

## Inter-row automatic navigation method by combining least square and SVM in forestry

Liu Xingxing<sup>1</sup>, Zhang Chao<sup>1</sup>, Zhang Hao<sup>1</sup>, Yang Shenghui<sup>1</sup>, Jiang Shijie<sup>1</sup>,  
Zheng Yongjun<sup>1,2\*</sup>, Su Daobilige<sup>1</sup>, Wan Chang<sup>1,3</sup>

(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. College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

**Abstract:** Autonomous navigation has widely been served as agricultural working platforms in smart farming. A few kinds of sensors, such as GPS and camera, are commonly used as conventional. However, the automatic navigation cannot be extended suitable for orchard environment, due mainly to canopy closing and the variation of light intensity. In this study, an inter-row automatic navigation was developed for a track chassis using an Inertial Measurement Unit (IMU) and Light Detection And Ranging (LIDAR), thereby improving the capability of in-orchard navigation under agricultural working platforms. The track chassis was specifically developed for orchard conditions, including a chassis, a driving implement, a power implement, and a range extender, where the specific size was 1 575 mm×1 190 mm×1 355 mm. The detection and control systems were performed on a host and a slave computer. The host computer was in charge of data processing to obtain navigation paths and orders, while the slave one was to control motors using Pulse-Width Modulation (PWM). An SC-AHRS-100D2 was selected as the IMU in sensors and units, while RPLIDAR S1 was utilized as the LIDAR scanner. The orientation and pose of the platform were acquired under the IMU. Meanwhile, the orchard condition was also scanned by the LIDAR. First, the orientation and pose from the IMU were exploited to modify the data from the LIDAR, so that the platform remained in correct moving directions. Quaternions were transformed into Euler angles during the data processing. The tree lines on both sides were then extracted using least square, where an average line between two lines was calculated. Next, mathematical models were established to combine with the Support Vector Machine (SVM). An optimized classification line of environment between tree lines was computed as the navigation path of the track chassis platform, in order to ensure a maximum interval between the tree lines on both sides. Moreover, a Proportional-Incremental-Differential (PID) controller was employed to control the platform motion using the path information, where the lateral bias was selected as the evaluation standard. A series of field tests were conducted in the Bajiajiaoye Park (Dongsheng Street, Haidian District, Beijing), an apple orchard in Pinggu District, Beijing, and a citrus orchard in Guangan County, Sichuan Province of China. The data captured in the Bajiajiaoye Park was taken as the research case with several real conditions, where the trees were selected as the test environment. LIDAR was installed in the front of the track chassis, while each condition was tested three times. The speed of the chassis was 0.5 m/s. The results showed that the maximum size of the absolute value of lateral errors was 17.8 mm, and the maximum number of lateral errors was 107.7 mm. High performance was achieved in the automatic navigation, while the track chassis followed the central line between the fruit trees, according to the statistical values of lateral errors and the trajectory of the track chassis. Furthermore, excellent adaptability was also obtained for various situations. This finding can offer a potential technical reference on the wayfinding for the autonomous navigation of ground sprayers in orchards and forestry.

**Keywords:** Lidar; navigation; least square; support vector machine; ground equipment