

温室超声波驱虫机器人导航系统设计与试验

赵文锋¹ 黄家俊¹ 桑文² 罗梓涛¹ 颜伟胜¹ 袁祥智²

(1. 华南农业大学人工智能与低空技术学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学植物保护学院, 广州 510642)

摘要: 为提高温室环境下超声波驱虫的机械化与自动化水平, 本文根据温室规范化栽培模式下的高效驱虫需求, 设计了超声波驱虫机器人, 并根据其自主作业模式设计了该机器人的自主导航系统。该导航系统使用基于点云滤波优化的三维激光雷达 Cartographer 3D 算法对作业环境建图, 并最终形成导航所需的栅格地图, 使用自适应蒙特卡罗定位算法进行多传感器融合定位, 融合遍历式路径平滑插值优化方法与基于 JPS 跳点搜索的路径直线优化方法改进 Dijkstra 全局路径规划算法, 并结合 TEB 局部路径规划算法进行路径规划。实验表明: 融合点云滤波后构建的温室环境地图长宽误差分别为 0.035、0.019 m; 改进 Dijkstra 算法相比 A* 与传统 Dijkstra 算法在直线行间规划路径长度分别减少 0.64% 与 3.12%, 在弯曲场景规划路径长度分别减少 0.41% 与 5.65%; 大于 60° 折点数量在直线行间分别减少 71.4% 与 75%, 在弯曲行间分别减少 20% 与 36.8%, 且离散情况更优; 对机器人进行导航运动实验, 其横纵平均偏差分别为 0.048 m 与 0.089 m, 航向平均偏差为 8.26°, 满足超声波驱虫机器人在温室行间自主作业导航需求。最后进行了超声波驱虫机器人的驱虫效果实验, 使用超声波驱虫机器人使斜纹夜蛾产卵数量减少 98.92%。

关键词: 温室超声波驱虫机器人; 自主导航; 激光雷达; SLAM; 路径规划

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)21-0300-10 OSID: 

Design and Experiments of Greenhouse Ultrasonic Pest-control Robot Navigation System

Zhao Wenfeng¹ Huang Jiajun¹ Sang Wen² Luo Zitao¹ Yan Weisheng¹ Yuan Xiangzhi²

(1. College of Artificial Intelligence and Low-altitude Technology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
2. College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Aiming to enhance the mechanization and automation levels of ultrasonic pest control in greenhouse environments, an ultrasonic pest control robot was designed based on the efficient pest control requirements under standardized greenhouse cultivation models and the autonomous navigation system for the robot was designed according to its autonomous operation mode. The navigation system used the 3D LiDAR Cartographer 3D algorithm optimized based on point cloud filtering to map the operating environment and finally form the raster map required for navigation, using the adaptive Monte Carlo localization algorithm for multi-sensor fusion localization, and fused the traversal path smoothing interpolation optimization method with the path straight line optimization method based on the JPS jump-point search to improve Dijkstra's global path planning algorithm, and combined with TEB local path planning algorithm for path planning. Experiment results showed that the length and width errors of the greenhouse environment map constructed after fusing point cloud filtering were 0.035 m and 0.019 m, respectively; the improved Dijkstra algorithm reduced the length of the planned paths between straight lines by 0.64% and 3.12% compared with A* and traditional Dijkstra algorithms, and the lengths of the planned paths in curved scenes were reduced by 0.41% and 5.65%. The number of folds greater than 60 degrees was reduced by 71.4% and 75% in straight rows and 20% and 36.8% in curved rows, and the discretization was better. The robot was subjected to navigation movement experiments, and its average transverse and longitudinal errors were 0.048 m and 0.089 m, respectively, and the average heading error was 8.26°, which satisfied the autonomous operation and navigation needs of the ultrasonic

pest-control robot in the greenhouse rows. Finally, the deworming effect experiment of ultrasonic deworming robot was carried out, and the number of eggs laid by Twilow moth was reduced by 98.92% by using ultrasonic deworming robot.

Key words: greenhouse ultrasonic pest-control robot; autonomous navigation; LiDAR; SLAM; path planning

0 引言

传统种植模式下的驱虫主要为使用化学农药,但是农药残留不仅对土壤、水系造成污染,采摘后的蔬菜等农作物中过量的农药残留更是直接影响到人类的身体健康^[1]。随着人口增长,农业中对化肥农药的过度使用加剧了土壤污染,加之全球气候变暖,导致柑橘病虫害的发生频率显著上升^[2]。相比于其他防治方式,超声波驱虫把昆虫行为学与物理声学技术相结合,利用超声波来控制害虫^[3]。绝大部分鳞翅目蛾类昆虫是农林牧业的重要害虫,而夜间活动蛾类的主要天敌是蝙蝠,蝙蝠能发出人类听不见的频率在 20 kHz 以上的超声波,并捕获反射回来的声波来识别飞行中的蛾类等猎物^[4],为了回避蝙蝠的捕食,蛾类也相应发展了能检测声波的器官鼓膜器,已知蛾类 85% 以上的种类都具有这样的结构^[5],例如斜纹夜蛾在 24.5 kHz 的超声波下会产生明显的神经冲动^[6]。可以通过超声波干涉的手段影响害虫对天敌超声波的反应,从而得到一种无公害绿色防治方法^[7]。因此结合现代规模化栽培模式的发展趋势,研发一款适用于大规模种植环境下的自主导航式超声波驱虫机器人,对驱虫走向高效智能化具有重要的意义。

自主导航技术已成为当前设施农业装备领域研究的核心方向之一,其在喷雾、搬运及采摘等作业场景中展现出不可替代的应用价值,且能够显著提升作业效率^[8]。传统农业自主移动机器人底盘导航的相关研究中,依赖识别巡线、二维码定位以及固定轨道式的移动方式在场景维护与泛用性方面存在明显的弊端^[9-11],目前主流的导航方法为通过激光雷达、RGB-D 相机等视觉传感器,导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)以及多传感器融合对外界环境进行感知定位以及导航^[12]。魏逸飞等^[13]结合 GNSS 与激光雷达实现了果园机器人的自主导航,但是在温室半结构化半开放环境中,GNSS 信号较弱,不利于机器人长时间稳定作业。丛佩超等^[14]使用 RGB-D 相机,基于 ORB-SLAM2 算法架构,在果园喷药机器人上进行了精准定位与稠密建图实验。韩振浩等^[15]基于 U-Net 网络设计果园视觉导航路径识别方法,但视觉系统容

易受到温室内日光灯光线等干扰。相比于视觉,激光同步定位与建图(Simultaneous localization and mapping, SLAM)技术成熟、定位误差更小^[16],但对于大场景非固定地图仍需进一步研究^[17-18]。三维激光雷达因其测距精度高,抗干扰能力强以及数据采集响应速度快等优点,被广泛应用于自动驾驶以及农业机器人导航领域^[19],适用于果园巡园机器人的温室作业。范永祥等^[20]引入二次去畸变、二次配准等模块,以 LOAM 算法为基础,提升 LiDAR-SLAM 森林样地调查系统的去畸变、配准的鲁棒性及精度。艾长胜等^[21]通过处理激光雷达扫描获取的果园数据,得到了垄线的安全预估位置,并完成了果园装备作业导航线的规划与拟合,结果显示,其拟合导航线与垄行中心线的平均角度偏差为 0.72°,但该研究尚未对地头位置处导航路径的提取开展测试。

因此本研究针对规范化栽培模式下的超声波驱虫机器人作业需求,设计一种基于激光雷达的机器人自主导航系统。该系统基于三维激光雷达的 Cartographer 3D 即时定位与地图构建技术进行建图与定位,结合点云滤波算法形成栅格地图,使用自适应蒙特卡罗定位算法进行多传感器融合定位,采用针对温室环境的改进 Dijkstra 算法进行路径规划,以期实现温室果园巡园机器人的导航任务。

1 超声波驱虫机器人设计方案

1.1 种植作业环境

超声波驱虫机器人的高效驱虫依赖于规范化种植,柑橘幼苗温室种植环境采用标准化的行间种植模式,植株高度为 0.3~0.7 m,行距为 1.05~1.5 m,行间土地需进行平整固化以满足机器人行进。机器人在规范标准化的栽培模式下,通过自主导航系统在行间进行连续定点作业,具体的栽培模式与作业模式如图 1 所示。

1.2 超声波驱虫机器人硬件结构设计

超声波驱虫机器人的总体结构主要由超声波驱虫装置与底盘装置组成。针对温室较为规范的半结构化环境,本文选用了阿克曼结构的轮式机器人作为底盘结构,并搭载基于机器人操作系统(Robot

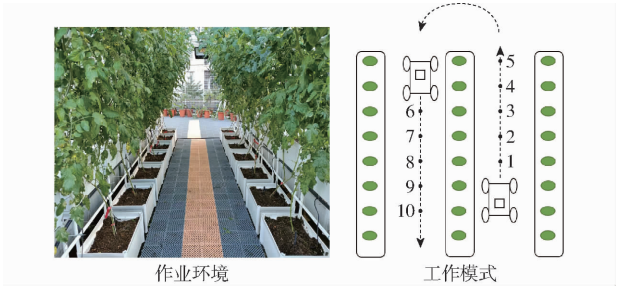
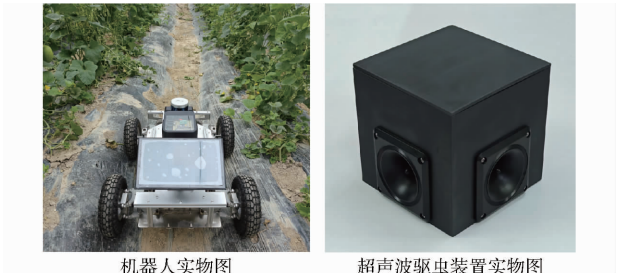


图 1 温室环境与作业模式

Fig. 1 Greenhouse environment and mode of operation

operating system,ROS)开发的自主导航系统。超声波驱虫装置根据温室规模化的栽培特点,设计了满足超声波频率调节的驱虫执行装置,机器人整体设计与超声波驱虫装置结构如图 2 所示,硬件框架结构如图 3 所示。



机器人实物图 超声波驱虫装置实物图

图 2 机器人整体设计与超声波驱虫装置图

Fig. 2 Robot overall design and ultrasonic pest repellent device diagram

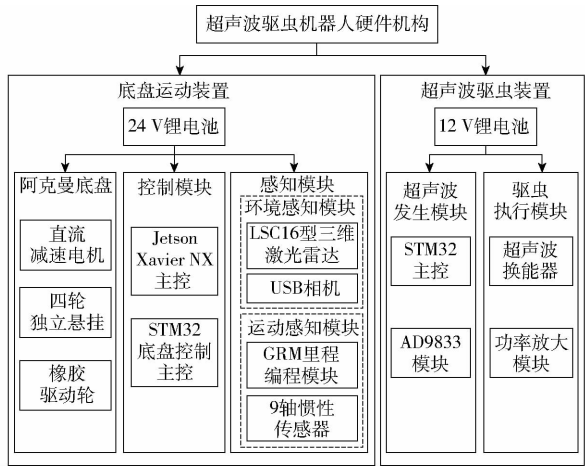


图 3 超声波驱虫机器人硬件结构图

Fig. 3 Hardware structure of ultrasonic pest repellent robot

1. 2. 1 超声波驱虫装置

超声波驱虫装置主要由超声波发生电路和超声波驱虫执行装置组成,通过 12 V 锂电池进行整体驱动,可持续驱虫 12 h 以上。核心的超声波发生电路以 STM32 单片机为控制核心,可通过程序灵活设定超声波发射频率、脉冲频率与脉冲持续时间,从而面向不同目标昆虫群体实现精准驱虫。驱虫执行装置选用超声波喇叭,其高灵敏度的压电陶瓷换能器能够有效地将控制电路生成的电信号转换为超声信号并发射

出去,对目标区域形成高强度超声声场,使用最大测量值为 90 dB 的专用采集器测量超声波驱虫装置在频率 24. 2 kHz 下的有效范围,如图 4 所示,超声波强度只需达到 40 dB 即可使斜纹夜蛾产生听觉刺激,故超声波驱虫装置的有效作用范围为 5 m 以上。

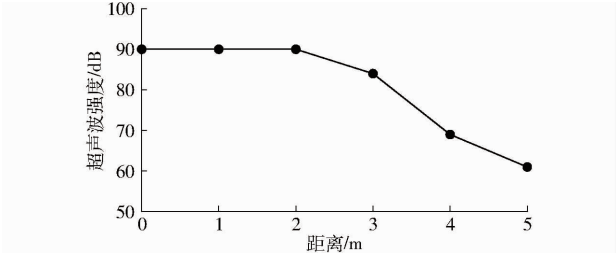


图 4 超声波驱虫装置有效范围

Fig. 4 Effective range of ultrasonic pest repellent device

1. 2. 2 底盘运动装置

底盘运动装置为阿克曼移动机器人,整体尺寸设计为长 75 cm,宽 65 cm,高 40 cm,采用充气橡胶轮与独立悬挂,离地间隙 13 cm,具有较强的地面适应能力。使用 24 V 锂电池提供电源,可持续驱虫作业 8 h 以上,搭载 100 W 直流减速电机驱动,通过脉冲宽度调制 (PWM) 控制电机转速。信息模块主要由控制模块、环境信息感知系统和运动信息感知模块组成。

控制模块分为搭载 ROS 的系统控制模块与底盘驱动控制模块。系统控制模块使用 Jetson Xavier NX 嵌入式处理器作为 Linux 主控进行 ROS 系统的部署,以实现建图导航的功能。底盘驱动控制模块采用 STM32F407VET6 单片机,用以驱动底盘电机和采集里程计与 IMU 信息,其通过串口与系统控制模块通信。

环境感知模块主要采用 LSC16 型 16 线激光雷达,运动信息感知模块主要由惯性传感器 IMU 与里程编码器组成,用于获取机器人的运动位姿信息。

1. 3 超声波驱虫机器人软件结构设计

针对超声波驱虫机器人在规模化温室内的作业情况,将整体的工作分为任务管理层、导航算法层、运动控制层与驱虫执行层,如图 5 所示。任务管理层为用户交互部分,使用者通过 Ubuntu 上位机系统进行远程的任务调度,根据作业需求对温室内的机器人所处植株行进行规模化连续作业。导航算法层的主要目标为机器人运动底盘通过激光雷达等传感器感知环境信息,使用基于 ROS 机器人设计的导航系统进行建图导航等任务规划,最终通过运动控制层驱动机器人底盘进行移动,结合超声波驱虫执行层进行超声波驱虫作业实现任务目标。

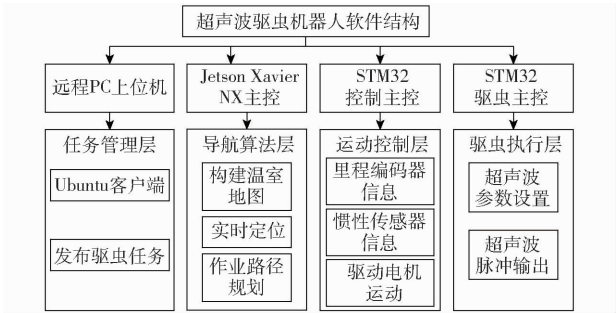


图 5 超声波驱虫机器人软件结构图

Fig. 5 Ultrasonic pest repellent robot software structure diagram

2 超声波驱虫机器人导航系统

导航系统是机器人自主作业的关键部分。机器人的导航系统主要由构建地图、自身定位与路径规划 3 个功能模块组成，系统通过多线激光雷达结合 Cartographer 3D SLAM 算法，引入点云优化滤波算法对点云地图进行后端优化，最终发布转换节点将点云地图转换为机器人导航用的栅格地图。自身定位采用自适应蒙特卡罗定位方法，该方法通过获取激光雷达与位置姿态信息进行位姿估计。路径规划采用 Dijkstra 算法进行全局路径规划，并针对温室作业环境进行路径优化改进，在此基础上，融合适合于阿克曼结构的时间弹性带 (Time elastic band, TEB) 局部路径规划方法，实现机器人全局路径与局部路径的协同规划，其 move_base 导航框架如图 6 所示。

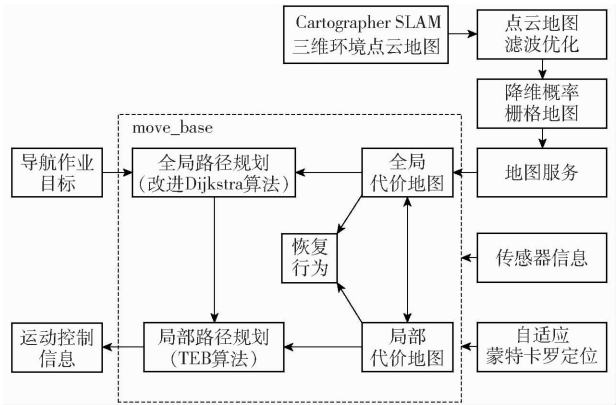


图 6 导航框架结构图

Fig. 6 Navigation framework structure diagram

2.1 构建地图

超声波驱虫机器人的温室作业环境较为复杂，传统温室移动机器人使用的单线激光雷达存在扫描平面外环境信息缺失问题，Cartographer 3D 算法为基于图优化框架的 SLAM 算法，适用于 3D 激光雷达，通过回环检测以优化大规模环境下的累积误差，具有更高的鲁棒性^[22]。因此本系统选用 LSC16 型三维激光雷达作为主要环境感知传感器，采用

Cartographer 3D SLAM 算法进行温室地图的构建。机器人通过 Cartographer 3D 算法得到温室环境的混合概率地图与三维点云地图，在点云地图的基础上，首先进行点云滤波优化处理，去除噪点；随后创建栅格地图，以满足实际导航需求，采用直通滤波与半径滤波 PCL 点云处理算法对三维点云结果进行优化，直通滤波器 PassThrough 通过对点云地图环境 z 轴范围外的背景噪声进行滤除，以实现地面点云与高处点云的滤除，其滤波原理式为

$$z_i \in [z_{\min} - \Delta_{\min}, z_{\max} + \Delta_{\max}] \tag{1}$$

式中 z_i ——点云 z 轴分量
 $z_{\min} \setminus z_{\max}$ ——点云 z 轴分量最值点
 $\Delta_{\min} \setminus \Delta_{\max}$ ——与阈值范围的距离

之后采用半径滤波器 RadiusOutlierRemoval 对点云地图中离散点云进行噪点过滤，通过设定滤波半径与近邻数量，其以每点一定欧氏距离半径范围为基础，若该范围内雷达点云个数少于设定数则视为离群噪点，原理如图 7 所示，设定半径范围为 d ，当设定阈值点数为 1 时，点 A 为离群噪点并进行滤除，当设定阈值点数为 2 时，点 A 和点 B 为离群噪点进行滤除。对于点云中任意点 p ，计算其邻域点集为 $N(p)$ ，其满足公式

$$|N(p)| \geq n_{\min} \tag{2}$$

$$N(p) = \{q \in P | q - p \leq r\} \tag{3}$$

式中 $n_{\min}$ ——设定的最小阈值
 P ——点云数据集
 q ——点云数据点 r ——半径阈值

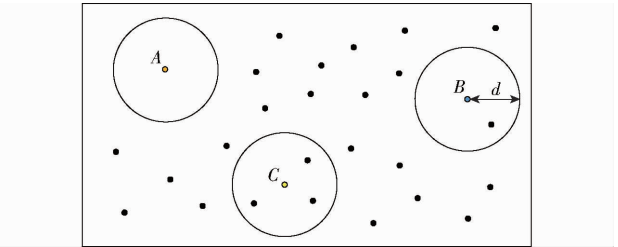


图 7 半径滤波原理图

Fig. 7 Radius filtering schematic

通过点云地图滤波处理后，机器人得到优化后的温室环境地图点云，最终将 pcd 点云地图文件以 map 话题进行发布，通过 map_server 功能包进行地图保存，转换为用于导航的 pgm 格式栅格全局地图，该地图用存在概率不同的灰度值代表障碍物用于之后的导航任务。

2.2 自身定位

机器人采用自适应蒙特卡罗定位算法进行概率定位^[23]，自适应蒙特卡罗定位算法将机器人位置以包含位姿和权重的随机粒子来表示，机器人根据运动模型预测下一个时刻位置，融合传感器进行权重

更新,最后进行重采样让符合观测粒子的置信度 bel 更容易在下一次被采样,其核心为

$$bel(x_t) = p(x_t | z_{1:t}, u_{1:t}) \tag{4}$$

式中 $bel(x_t)$ —— t 时刻下状态位姿 x_t 的条件概率分布

$z_{1:t}$ ——过去测量值

$u_{1:t}$ ——过去控制值

$p()$ ——条件概率分布函数

自适应蒙特卡罗定位算法框架如图 8 所示,通过接收环境地图信息与雷达扫描 Scan 内容,结合机器人姿态与里程信息,最终以 TF 坐标转换的方式输出。

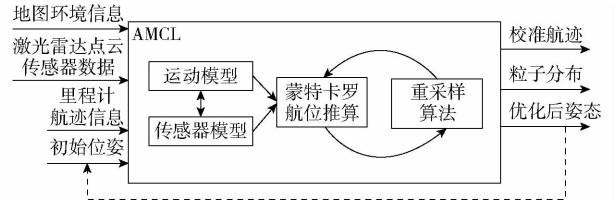


图 8 自适应蒙特卡罗定位算法框架图
Fig. 8 Adaptive Monte Carlo localization algorithm
framework diagram

2.3 路径规划

2.3.1 代价地图

代价地图主要分为用于全局路径规划的全局代价地图与用于局部路径规划的局部代价地图,其通常以栅格的形式表示占用状态,代价地图通过更新栅格图层插件的方式,向原有的栅格地图添加设定半径的地图膨胀层作为缓冲区,让规划的路径远离致命障碍物。

障碍物处于内切圆半径内时,代价值大于等于 256,机器人一定发生碰撞;当障碍物处于机器人外切圆半径内时,代价值为 128 ~ 256,机器人处于碰撞临界;当机器人靠近障碍物时,其代价值为 0 ~ 127,此时可能发生碰撞,综合考虑行驶性与安全性,本研究设定的膨胀半径为 0.2 m,其栅格代价地图如图 9 所示。

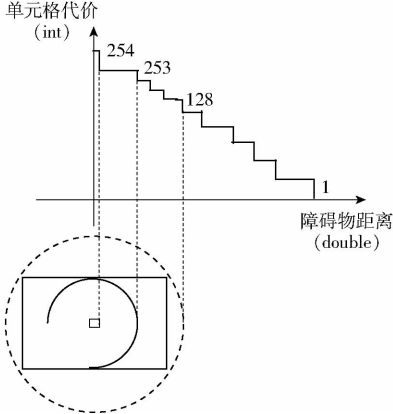


图 9 栅格代价图
Fig. 9 Raster cost graph

2.3.2 基于改进 Dijkstra 的全局路径规划算法

本文机器人采用基于温室环境优化改进的 Dijkstra 全局路径规划器进行设计。Dijkstra 算法是一种基于广度优先的路径规划算法,其具有规划路径较优的特点,更适合于自主作业机器人等需要规划精准路径的情况^[24]。

针对传统 Dijkstra 算法在果园行间路径规划中存在的折点冗余与过度弯曲问题,本文提出一种适应性改进方法。通过引入遍历式路径平滑约束以优化折点,并融合 JPS 跳点搜索思想进行直线优化,使算法更符合果园机器人的实际作业需求。

首先引入了遍历式路径平滑插值优化方法,通过引入潜在代价值的安全扩展概念进行节点的二次遍历,算法通过设定地图代价阈值 L ,对当前非障碍物节点邻近的 8 个方向进行二次代价值遍历,若存在超过代价阈值 L 的情况,则说明此时该邻近节点已经非常靠近膨胀层,将其移出当前列表不再进行后续的遍历,之后算法根据二次遍历后的节点列表进行重新规划,其在开放列表 P_{open} 中的具体实现表达式为

$$P_{open} = \begin{cases} P_{out} & (\text{Cost}(C_{near}(x)) \geq L) \\ P_{keep} & (\text{Cost}(C_{near}(x)) < L) \end{cases} \tag{5}$$

式中 P_{keep} ——保留当前节点
 P_{out} ——将当前节点移出开放列表
 $C_{near}(x)$ ——节点 x 附近障碍物相关的安全代价值
 $\text{Cost}(C_{near}(x))$ ——对这个“附近环境代价”进行量化后的结果

为了对路径进行后续角度平滑,进一步对生成的路径进行遍历拓展以增加路径点密度,通过遍历路径点计算相邻两点之间的绝对距离,若距离大于设定的长度阈值,则在原路径上进行双线性插值优化,其拓展的路径点 P 满足约束函数

$$Y_p = Y_0 + (X_p - X_0) \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} \tag{6}$$

式中 X_1, Y_1 ——点 P_1 的 X, Y 轴坐标
 X_0, Y_0 ——点 P_0 的 X, Y 轴坐标
 X_p, Y_p ——新插入路径点的 X, Y 轴坐标
之后对路径节点引入了角度平滑优化函数进行约束。首先设计归一化函数,对前后路径的角度值进行归一化处理得到处理后的角度值,使其角度范围为 $0 \sim 2\pi$,然后算法对路径的每个点进行重新遍历以计算列表当前节点与相邻节点间的归一化角度,对其设置角度阈值,若计算所得的角度存在超过角度阈值的情况,则对相邻节点进行满足代价约束

阈值情况下的中值插值法优化,其优化点满足 $P\left(\frac{x_{\text{next}} - x_{\text{before}}}{2}, \frac{y_{\text{next}} - y_{\text{before}}}{2}\right)$, 式中, $x_{\text{before}}、y_{\text{before}}$ 为前一个点的 $X、Y$ 轴坐标, $x_{\text{next}}、y_{\text{next}}$ 为后一个点的 $X、Y$ 轴坐标。

基于 JPS 跳点搜索算法思想对 Dijkstra 路径规划算法进行路径优化^[25],以初始点 P_0 作为父节点,若跳过节点 P_1 与节点 P_2 相连,新生成的路径没有与障碍物碰撞,且该路径的插值子节点的潜在代价值均小于阈值,则将节点 P_1 进行路径剪切形成新路径继续遍历,最终实现规划路径的拉直优化,其新路径满足约束条件

$$\begin{cases} d_{\text{JPS}} = \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} \\ d_{\text{sum}} = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} + \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \\ d_{\text{JPS}} \leq d_{\text{sum}} \end{cases} \quad (7)$$

式中 d_{JPS} ——跳过 P_1 后,直接连接 P_0 与 P_2 所对应的路径长度增量
 d_{sum} ——路径长度和
 $x_i、y_i$ ——路径节点 P_i 的纵横坐标, i 为 0,1,2

2.3.3 基于 TEB 的局部路径规划算法

为了对动态障碍物进行避障,采用时间弹性带算法 (Time elastic band, TEB) 作为局部路径规划器进行局部路径规划^[26]。超声波驱虫机器人 为阿克曼结构机器人,其具有最小转向半径 R 的约束条件,如图 10 所示。

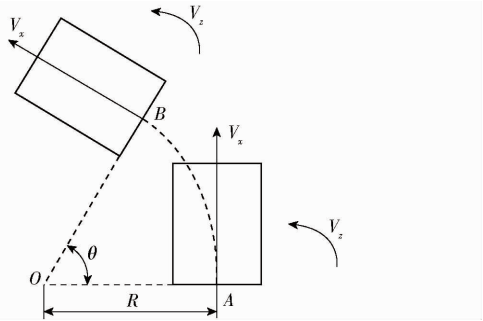


图 10 机器人运动学分析图

Fig. 10 Robot kinematics analysis diagram

将后轴中心作为旋转中心,机器人以速度 $V_x、V_z$ 运动时间为 t ,圆弧 $\widehat{OA}$ 与 $\widehat{OB}$ 的长度 $S_{OA}、S_{OB}$ 为 V_x 对 t 的积分,位姿旋转的角度 θ 为速度 V_z 对 t 的积分,因此约束条件最小转向半径 R 的表达式为

$$R = \frac{S_{OA} S_{OB}}{\theta} = \frac{V_x t}{V_z t} = \frac{V_x}{V_z} \quad (8)$$

TEB 算法提供了具有转向半径约束的动力学模型进行非完整运动学约束,因此相较于默认的动态窗口法更适合本机器人。

3 实验测试

导航系统的稳定与高精度是实现机器人在温室中高效自主作业的关键。评价导航性能的因素包括:SLAM 建图与路径规划效果、定位运动精度与移动运动精度^[27],为了验证本导航系统在超声波驱虫机器人上的部署效果,本文在实验室和实际温室进行导航实验。

3.1 实验室实验建图效果

为验证超声波驱虫机器人导航系统的效果,对机器人进行了实验室模拟行间导航实验,模拟植株行间平均宽度为 1.5 m,路面为模拟实际温室的固化路面,具体实验环境如图 11 所示。



图 11 模拟温室行间环境图

Fig. 11 Simulated greenhouse inter-row environment map

实验选取模拟行间进行地图构建,对场景进行建图测试,其具体效果如图 12 和图 13 所示,

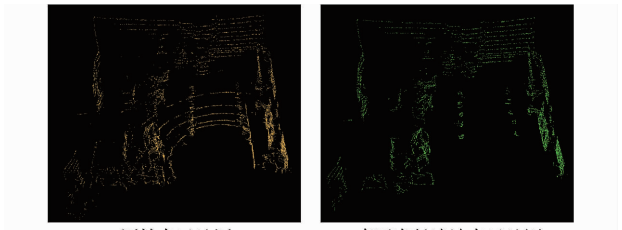


图 12 点云地图对比图

Fig. 12 Point cloud map comparison chart

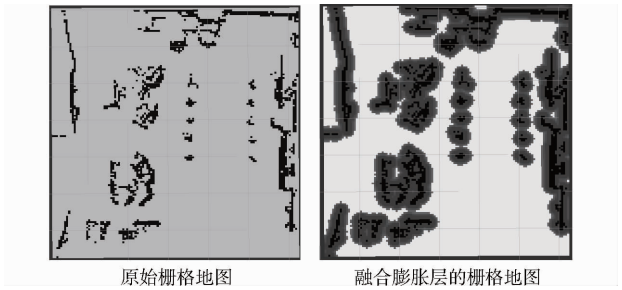


图 13 机器人导航栅格地图效果图

Fig. 13 Robot navigation raster map effect

实测原始点云数量为 22 214 个,经直通滤波后减少至 14 104 个,进一步采用直通滤波与半径滤波进行处理后,点云数量为 14 056 个,有效降低了点云数据量。

由图 12 知, Cartographer 3D 算法构建的行间三维点云地图具有丰富的环境信息。根据点云滤波后的效果图,结合滤波结果得知,其点云数量相较原始

点云下降 36.7% ,实现点云地图的轻量化以提高机器人建图的点云处理速度。

三维激光雷达建立的环境点云地图转换为用于导航的栅格地图,如图 13 所示,并在此基础上融合膨胀层以保证机器人规划路径的安全性。本文使用 Rviz 中的 Measure 对建图尺寸进行测量,其中模拟环境实际长度为 2.055 m,建图长度为 2.090 m,绝对误差为 0.035 m;实际宽度为 1.537 m,建图宽度为 1.556 m,绝对误差为 0.019 m。证明进行点云滤波优化后构建的地图具有较高的精度,适用于机器人的路径规划。

3.2 导航路径规划效果

将本文基于改进 Dijkstra 的路径规划算法部署于超声波驱虫机器人,在实验环境进行路径规划实验以验证机器人路径规划能力。本文设计了直线行间环境 1 与弯曲行间环境 2 模拟环境,通过实验对比 A* 算法、Dijkstra 算法与改进 Dijkstra 算法的植株行间路径规划结果,并进一步对比了改进 Dijkstra 算法分别结合 TEB 与 DWA 局部路径规划器的性能差异,因为本机器人在超过 60°转角时需大幅度减速,因此在重复条件进行 5 次实验,以路径长度与大

于 60°转角次数为评价指标进行设计,实验结果如图 14 和表 1 所示。

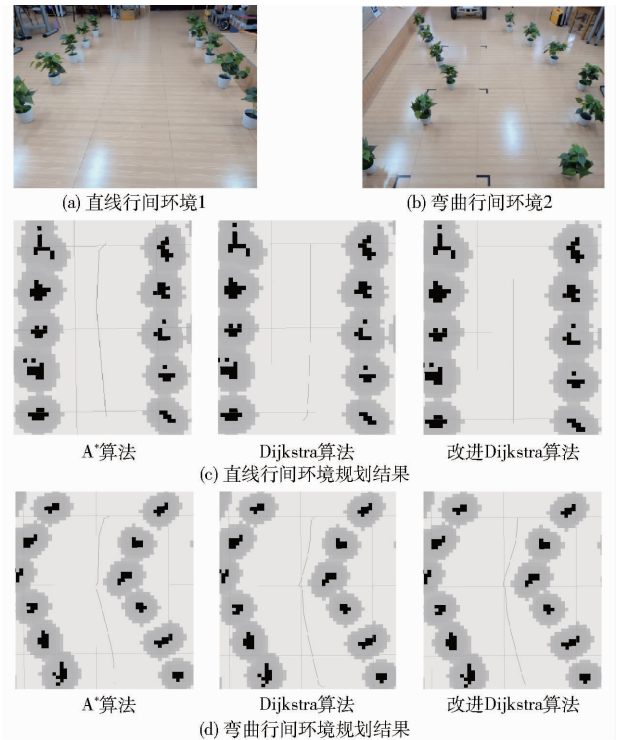


图 14 植株行间路径规划结果

Fig. 14 Results of path planning between plant rows

表 1 路径规划实验结果
Tab.1 Path planning performance comparison data

算法	环境	路径长度/m				60°转角数量/个			
		平均值	最小值	最大值	标准差	平均值	最小值	最大值	标准差
A* + TEB	1	2.032	1.936	2.127	0.062	1.400	1.000	2.000	0.490
	2	2.681	2.552	2.812	0.092	3.000	2.000	4.000	0.632
Dijkstra + TEB	1	2.084	1.939	2.158	0.041	1.600	1.000	2.000	0.490
	2	2.830	2.614	2.982	0.136	3.800	3.000	5.000	0.748
改进 Dijkstra + DWA	1	2.031	1.989	2.084	0.033	0.400	0.000	1.000	0.490
	2	2.828	2.663	2.907	0.087	3.200	2.000	4.000	0.748
改进 Dijkstra + TEB	1	2.019	1.982	2.056	0.027	0.400	0.000	1.000	0.490
	2	2.670	2.573	2.757	0.063	2.400	2.000	3.000	0.489

根据图 14 实验结果可知,改进 Dijkstra 算法在模拟植株行间环境中直线与曲线规划具有更好的效果。结合表 1 的实验数据可知,本文改进的 Dijkstra 算法在环境 1 中规划的平均路径长度相比 A* 与 Dijkstra 算法分别减少 0.64% 与 3.12%,在环境 2 中分别减少 0.41% 与 5.65%。在环境 1 中,改进 Dijkstra 算法结合 TEB 规划器所产生的平均路径长度比结合 DWA 规划器时减少了 0.59%,在环境 2 中减少 5.9%,改进后算法所规划出的路径长度更接近最优路线且其生成路径长度的离散情况较优;在环境 1 中大于 60°转角平均次数相比 A* 与 Dijkstra 算法分别减少 71.4% 与 75%,在环境 2 中分别减少 20% 与 36.8%,改进算法使用 TEB 局部

路径规划算法比使用 DWA 算法在环境 2 中减少 25%,改进算法转折较少,更为平滑,因此更适合于超声波驱虫机器人作业的路径规划。

3.3 温室环境机器人运动导航效果

为评估超声波驱虫机器人的行间自主导航性能,本文在华南农业大学温室种植基地设计了沿预定路径(点 A 至点 B)的行驶实验。实验在路径上每隔 0.5 m 设置 P1、P2、P3 共 3 个位姿采样点。机器人抵达每点后暂停,通过标记其四边中点并求交以确定实际中心位姿。导航精度通过计算该实际位姿与目标点之间的横向、纵向偏差及航向偏差予以量化。

实验选取机器人实际位姿与规划采样点处的横向偏差、纵向偏差与航向偏差作为评价指标,以采样

目标点 (x_0, y_0) 作为原点 $(0, 0)$,以超声波驱虫机器人的前进方向为 Y 轴,以 Y 轴方向顺时针 90° 垂直方向为 X 轴建立用于位姿测定的平面直角坐标系,如图 15 所示。设机器人尾部中心坐标 (x_1, y_1) ,因此机器人的纵向偏差为 y 值的差值,横向误差为 x 值的差值,以 Y 轴方向设置为目标航向,因此航向偏差为实际航向 y' 与目标航向 y 的夹角 α ,实验在相同条件下重复进行 5 次,实验场景如图 16 所示,实验数据如表 2 所示。

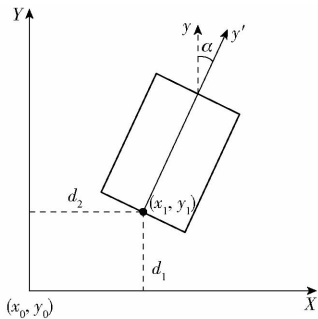


图 15 导航误差坐标系设置

Fig. 15 Navigation error coordinate system settings

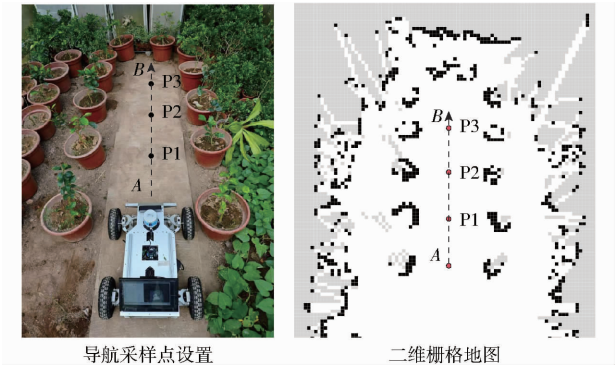


图 16 导航性能实验场景

Fig. 16 Navigational performance experimental scene

表 2 机器人导航精度实验结果

Tab. 2 Robot navigation accuracy test data

评价指标	0.2 m/s			0.4 m/s		
	横向偏	纵向偏	航向偏	横向偏	纵向偏	航向偏
	差/m	差/m	差/(°)	差/m	差/m	差/(°)
平均值	0.048	0.089	8.260	0.060	0.100	9.700
最小值	0.025	0.065	5.500	0.025	0.070	6.000
最大值	0.080	0.115	11.500	0.095	0.135	13.500
标准差	0.020	0.019	1.200	0.030	0.025	2.800

由表 2 可以看出,超声波驱虫机器人以 0.2 m/s 的作业速度进行导航移动时,其横向平均偏差 0.048 m,纵向平均偏差 0.089 m,航向平均偏差为 8.26°且偏离情况较为稳定,速度增加为 0.4 m/s 后,其横向平均偏差 0.06 m,纵向平均偏差 0.1 m,航向平均偏差为 9.7°,仍然可以满足超声波驱虫作业导航要求。结合超声波驱虫机器人作业范围与实际行间作业环境分析,该导航系统能在允许误差内

满足超声波驱虫机器人的行走要求。

3.4 超声波驱虫机器人驱虫效果

为了研究超声波驱虫机器人的驱虫效果,本研究构建了一个体积为 55 cm × 55 cm × 80 cm 的封闭网笼,内置一株柑橘幼苗,并向其中同时投放 6 只斜纹夜蛾成虫(3 雌 3 雄),研究斜纹夜蛾在单株柑橘幼苗上的产卵量。超声波驱虫机器人每次在植株旁停留 1 min 后继续巡园,统计 24 h 内斜纹夜蛾在柑橘幼苗上的产卵量。实验装置如图 17 所示。



图 17 超声波驱虫装置图

Fig. 17 Diagram of ultrasonic insect repellent device

在驱虫实验中,对照组斜纹夜蛾的平均产卵量为 (401.67 ± 39.81) 粒,而超声波脉冲组的平均产卵量仅为 (4.33 ± 3.51) 粒,对应的产卵抑制率达到 98.92%。与对照组相比,超声波脉冲处理后斜纹夜蛾的平均产卵量显著降低,表明超声波脉冲能够有效抑制斜纹夜蛾的产卵行为。实验结果表明,所设计的超声波驱虫机器人对斜纹夜蛾具有较好的驱避和抑制效果,为超声波驱虫技术在温室及室内设施农业中的应用提供了定量化实验依据。

4 结论

(1)结合大规模温室环境下高效驱虫的需求,设计了一种适用于规范化栽培的超声驱驱虫机器人,该机器人由超声波驱虫装置与底盘运动装置组成,通过底盘移动实现自主高效的超声波驱虫任务。
(2)为满足超声波驱虫机器人的作业需求,本文设计了其自主导航系统。该系统采用三维激光雷达与 Cartographer 算法构建并优化环境栅格地图,并利用自适应蒙特卡罗算法进行定位。路径规划则融合了经遍历式平滑与 JPS 直线化思想改进的 Dijkstra 全局算法,以及 TEB 局部规划器。

(3)通过实验进行导航系统性能分析,融合点云滤波的 Cartographer 3D 算法构建的地图感知环境效果更优且噪点更少,转换后的栅格地图长宽误差分别为 0.035、0.019 m,满足导航地图的需求。改进 Dijkstra 算法相比 A* 与传统 Dijkstra 算法在直线行间规划路径长度分别减少 0.64% 与 3.12%,在弯曲环境分别减少 0.41% 与 5.65%;大于 60°折点数

量在直线行间分别减少 71.4% 与 75%, 在弯曲行间分别减少 20% 与 36.8%, 且离散情况较好, 有效优化了规划路径的长度、平滑程度与稳定性; 以工作速度 0.2 m/s 对其进行导航精度测试, 其横纵平均偏差分别为 0.048 m 与 0.089 m, 航向平均偏差为 8.26°, 满足超声波驱虫机器人在温室行间自主作业的导航精度需求。最后通过超声波驱虫实验分析, 使用超声波脉冲的超声波驱虫机器人对斜纹夜蛾的驱虫率达到 98.92%, 可以明显抑制斜纹夜蛾的侵扰。

参 考 文 献

[1] 丁贝贝, 霍燕芳, 潘红蕊. 食用农产品中农药残留检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 53–61.
Ding Beibei, Huo Yanfang, Pan Hongrui. Research progress on detection technology of pesticide residues in edible agricultural products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 53–61. (in Chinese)

[2] 李栋, 周权. 我国柑橘害虫防治技术研究进展[J]. 湖北植保, 2021(4): 58–61.

[3] 李璐, 艾洪木, 上官明禹. 应用超声波装置控制害虫的研究概况[J]. 武夷科学, 2019, 35(2): 73–79.
Li Lu, Ai Hongmu, Shanguan Mingyu. Review of the applications of ultrasonic pest management[J]. Wuyi Science, 2019, 35(2): 73–79. (in Chinese)

[4] Miller L A, Surlykke A. How some insects detect and avoid being eaten by bats: tactics and countertactics of prey and predator[J]. Bioscience, 2001(51): 570–581.

[5] Kawahara A Y, Plotkin D, Espeland M, et al. Phylogenomics reveals the evolutionary timing and pattern of butterflies and moths[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., 2019, 116(45): 22657–22663.

[6] Nakano R, Ito R, Tokumaru S. Sustainable pest control inspired by prey-predator ultrasound interactions[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., 2022, 119(43): e2211007119.

[7] Nakano R, Takanashi T, Surlykke A. Moth hearing and sound communication[J]. Journal of Comparative Physiology A, 2015, 201(1): 111–121.

[8] 孙锦, 高洪波, 田婧, 等. 我国设施园艺发展现状与趋势[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(4): 594–604.
Sun Jin, Gao Hongbo, Tian Jing, et al. Development status and trends of protected horticulture in China[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2019, 42(4): 594–604. (in Chinese)

[9] 陈璇, 张立勇, 陈超, 等. 温室智能循迹小车系统稳定性研究[J]. 电子设计工程, 2023, 31(18): 90–94, 99.
Chen Xuan, Zhang Liyong, Chen Chao, et al. Study on the stability of greenhouse intelligent tracking car system[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(18): 90–94, 99. (in Chinese)

[10] 牛小骥, 王庭蔚, 葛雯斐, 等. 一种基于视觉二维码/惯性融合的室内高精度定位定姿方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(11): 1067–1075.
Niu Xiaoji, Wang Tingwei, Ge Wenfei, et al. A high precision indoor positioning and attitude determination method based on visual two-dimensional code/inertial information[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(11): 1067–1075. (in Chinese)

[11] 黎思奇, 田素博, 李刚, 等. 温室大棚轨道式巡检机器人设计[J]. 中国农机装备, 2023(8): 9–13.
Li Siqi, Tian Subo, Li Gang, et al. Design of greenhouse track inspection robot[J]. China Agricultural Machinery and Equipment, 2023(8): 9–13. (in Chinese)

[12] 姜赛珂, 张美娜, 李雪, 等. 设施内自主移动装备导航控制技术研究进展[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(3): 159–169.
Jiang Saike, Zhang Meina, Li Xue, et al. Development of navigation and control technology for autonomous mobile equipment in greenhouse[J]. Journal of Chinese Agricultural Machinery and Chemistry, 2022, 43(3): 159–169. (in Chinese)

[13] 魏逸飞, 李青龙, 孙宜田, 等. 基于 GNSS 和激光雷达的果园机器人导航系统研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(10): 55–61, 69.
Wei Yifei, Li Qinglong, Sun Yitian, et al. Research on orchard robot navigation system based on GNSS and LiDAR[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(10): 55–61, 69. (in Chinese)

[14] 丛佩超, 崔利营, 万现全, 等. 基于改进 ORB-SLAM2 的果园喷药机器人定位与稠密建图算法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 45–55.
Cong Peichao, Cui Liying, Wan Xianquan, et al. Localization and dense mapping algorithm for orchard spraying robot based on improved ORB-SLAM2[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 45–55. (in Chinese)

[15] 韩振浩, 李佳, 苑严伟, 等. 基于 U-Net 网络的果园视觉导航路径识别方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 30–39.
Han Zhenhao, Li Jia, Yuan Yanwei, et al. Path recognition of orchard visual navigation based on U-Net[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 30–39. (in Chinese)

[16] 李晨阳, 彭程, 张振乾, 等. 融合里程计信息的农业机器人定位与地图构建方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 16–23.
Li Chenyang, Peng Cheng, Zhang Zhenqian, et al. Positioning and map construction for agricultural robots integrating

odometer information[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(21): 16 – 23. (in Chinese)

[17] 刘凌云,蔡成林,吴芊. 室外光照易变场景下的回环检测方法[J]. 传感器与微系统,2022,41(4):121 – 124.
Liu Lingyun, Cai Chenglin, Wu Qian. Loop closure detection method in outdoor scene with variable illumination[J]. Transducer and Microsystems Technologies,2022,41(4):121 – 124. (in Chinese)

[18] 孙曼晖,杨绍武,易晓东,等. 基于 GIS 和 SLAM 的机器人大范围环境自主导航[J]. 仪器仪表学报,2017,38(3):586 – 592.
Sun Manhui, Yang Shaowu, Yi Xiaodong, et al. Autonomous navigation of robot in large-scale environments based on GIS and SLAM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2017,38(3):586 – 592. (in Chinese)

[19] 姜晓勇,吴起威,魏璇,等. 基于激光雷达 SLAM 的三维点云自适应算法[J]. 激光与红外,2024,54(1):48 – 56.
Jiang Xiaoyong, Wu Qiwei, Wei Xuan, et al. 3D point cloud adaptive algorithm based on LiDAR SLAM[J]. Laser and Infrared,2024,54(1):48 – 56. (in Chinese)

[20] 范永祥,冯仲科,申朝永,等. 基于改进 LOAM 的森林样地调查系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(7):291 – 300.
Fan Yongxiang, Feng Zhongke, Shen Chaoyong, et al. Design and experiment of forest plot survey system based on improved LOAM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(7):291 – 300. (in Chinese)

[21] 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 CSAE,2018,34(13):77 – 85. (in Chinese)

[22] Dwijotomo A, Abdul Rahman M A, Mohammed Ariff M H, et al. Cartographer SLAM method for optimization with an adaptive multi-distance scan scheduler[J]. Appl. Sci. , 2020, 10: 347.

[23] 袁千贺,田昕,沈斯杰. 基于多传感器融合的移动机器人定位[J]. 计算机系统应用,2022,31(3):136 – 142.
Yuan Qianhe, Tian Xin, Shen Sijie. Mobile robot localization based on multi-sensor fusion[J]. Computer System & Application, 2022, 31(3): 136 – 142. (in Chinese)

[24] 周俊,何永强. 农业机械导航路径规划研究进展[J]. 农业机械学报,2021,52(9):1 – 14.
Zhou Jun, He Yongqiang. Research progress on navigation path planning of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):1 – 14. (in Chinese)

[25] 蔡佳成,白克强,李旭春,等. 基于 JPS 改进的移动机器人路径规划算法[J]. 计算机应用研究,2022,39(7):1985 – 1991.
Cai Jiacheng, Bai Keqiang, Li Xuchun, et al. Improved path planning algorithm for mobile robot based on JPS[J]. Application Research of Computers,2022,39(7):1985 – 1991. (in Chinese)

[26] 郑凯林,韩宝玲,王新达. 基于改进 TEB 算法的阿克曼机器人运动规划系统[J]. 科学技术与工程,2020,20(10):3997 – 4003.
Zheng Kailin, Han Baoling, Wang Xinda. Ackermann robot motion planning system based on improved TEB algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(10): 3997 – 4003. (in Chinese)

[27] 宋怀波,段援朝,李嵘,等. 基于激光 SLAM 的牛场智能推翻草机器人自主导航系统[J]. 农业机械学报,2023,54(2): 293 – 301.
Song Huaibo, Duan Yuanchao, Li Rong, et al. Autonomous navigation system for pasture intelligent overthrowing grass robot based on laser SLAM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 293 – 301. (in Chinese)