doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.013

基于激光 SLAM 和 AprilTag 融合的温室移动机器人自主导航方法

张文翔[1,2]　卢鑫羽[1,2]　张兵园[1,2]　贡　宇[1,2]　任　妮[1,2]　张美娜[1,2]

(1. 江苏省农业科学院农业信息研究所, 南京 210014;
2. 农业农村部长三角智慧农业技术重点实验室, 南京 210014)

摘要: 为提高温室环境下移动机器人自主导航精度与效率,提出一种多传感器融合的自主导航方法。设计搭建了基于多维激光雷达、高清工业相机与边缘计算设备的温室移动机器人平台。为提高建图效率与精度,采用 Gmapping 算法构建二维格栅地图,其输入为三维激光雷达点云滤波后二维点云数据以及采用 RF2O 算法得到的里程计数据。针对设施栽培垄道狭长、对称、重复的环境特点,提出 AprilTag 定位校正方法,解决移动机器人定位丢失问题。使用 Dijkstra 算法和 DWA 算法分别规划机器人全局和局部导航路径。基于三维运动捕捉系统评估移动机器人定位精度,试验结果表明,在速度 0.4、0.3、0.2 m/s 下,移动机器人纵向定位误差平均值均不大于 0.066 m,标准差均不大于 0.049 m;横向定位误差平均值均不大于 0.117 m,标准差均不大于 0.092 m。在生产温室内开展了移动机器人自主导航性能评估试验,试验结果表明,在速度 0.4、0.3、0.2 m/s 下,移动机器人实际行驶轨迹与期望轨迹之间横向偏差平均值均不大于 0.050 m,标准差均不大于 0.032 m,航向偏差平均值均不大于 2.2°,标准差均不大于 1.4°。移动机器人的定位与导航精度能够满足温室内的连续稳定作业需求。

关键词: 温室; 移动机器人; 多传感器融合; 自主导航; 定位校正; 路径规划

中图分类号: S126　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0123-10　　**OSID**:

Autonomous Navigation Method of Greenhouse Mobile Robot Based on Laser SLAM and AprilTag

ZHANG Wenxiang[1,2]　LU Xinyu[1,2]　ZHANG Bingyuan[1,2]　GONG Yu[1,2]　REN Ni[1,2]　ZHANG Meina[1,2]

(1. *Institute of Agricultural Information*, *Jiangsu Academy of Agricultural Sciences*, *Nanjing* 210014, *China*
2. *Key Laboratory of Intelligent Agricultural Technology* (*Changjiang Delta*), *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: To enhance the precision and effectiveness of autonomous navigation for mobile robots in a greenhouse environment, a localization and autonomous navigation method was proposed by fusing laser simultaneous localization and mapping (SLAM) and AprilTag visual fiducial system. A mobile robot platform for greenhouse was developed based on multi-dimensional LiDAR, high-definition industrial cameras, and edge computing devices. Firstly, in order to improve the efficiency and accuracy of map building, Gmapping algorithm was used to construct a two-dimension grid map by taking two-dimension LiDAR point cloud processed by three-dimension LiDAR point cloud and the odometer data obtained by RF2O algorithm as inputs. Then AprilTag positioning correction method was proposed to solve the positioning loss problem of the mobile robot for the environmental characteristics of narrow, symmetrical, and repetitive facility cultivation ridges. Finally, a combination of Dijkstra algorithm and dynamic window approach (DWA) algorithm was used to plan the global and local navigation paths. The positioning accuracy of mobile robot was evaluated based on a three-dimensional motion capture system in laboratory. The experimental results showed that at speeds of 0.4 m/s, 0.3 m/s and 0.2 m/s, the average longitudinal positioning error of the mobile robot was no more than 0.066 m, and the standard deviation

收稿日期: 2024-01-22　修回日期: 2024-06-06

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(22)5009)

作者简介: 张文翔(1995—),男,助理研究员,主要从事智能农机装备导航控制系统研究,E-mail: zhang_sup@163.com

通信作者: 张美娜(1986—),女,副研究员,博士,主要从事智能农机装备传感监测与控制系统研究,E-mail: zmnll22@163.com

was no more than 0.049 m. The average lateral positioning error was no more than 0.117 m, and the standard deviation was no more than 0.092 m. Autonomous navigation performance evaluation tests of mobile robot were carried out in a greenhouse environment. The experimental results showed that at speeds of 0.4 m/s, 0.3 m/s and 0.2 m/s, the average lateral deviation between the actual driving trajectory of the mobile robot and the expected trajectory was no more than 0.050 m, the standard deviation was no more than 0.032 m, and the average heading deviation was no more than 2.2°, the standard deviation was no more than 1.4°. The positioning and navigation accuracy of mobile robots can meet the continuous and stable operation requirements in greenhouse.

Key words: greenhouse; mobile robot; multi-sensor fusion; autonomous navigation; positioning correction; path planning

0 引言

设施农业[1]是利用现代工程技术与设施装备,为动植物生长提供相对可控制的环境条件,属于资金、技术、劳动力密集型产业,具有高投入高产出的特点。随着全球人口老龄化的加剧以及农业青壮劳动力的流失,农业劳动力日益短缺、劳动力成本逐年攀升,给设施农业的可持续发展带来了前所未有的挑战[2]。推进设施农业“机器换人”,提升栽培管理过程中的机械化、自动化、智能化程度是设施农业发展的必然趋势[3-4]。设施农作机器人的基础功能是自主导航[5],即能够时刻感知所处位置并按期望的预设轨迹自主行走,从而完成相应的农事操作。由于设施内全球导航卫星系统(Global navigation satellite system,GNSS)定位信号弱,设施农作机器人主要依靠室内导航技术实现定位与导航[6-8]。

室内导航方式一般分为固定线路和非固定线路两类。固定线路导航方式主要包括导轨导航[9-12]和磁导航[13],这种方式简单易实现,具有较高的精度和稳定性,但因需额外铺设轨道或磁条增加建设成本以及占用有限地面空间的问题,限制了机器人运动路径和活动范围[14]。非固定线路导航方式主要包括无线电定位技术(如无线局域网、射频识别、超宽带、蓝牙和超声波)、视觉导航和同步定位与建图(Simultaneous localization and mapping, SLAM)导航技术。无线电定位技术[15-18]中,超带宽定位技术定位精度较高,传输速率高、抗干扰能力强,但存在无法检测到意外障碍物的问题。视觉导航[19-24]利用相机扫描环境中的标签信息,或通过 Hough 变换拟合路径线来实现机器人自主导航,该方式成本低,但容易受光照变化的影响,鲁棒性弱。SLAM 导航[25]是通过搭载特定的传感器,在对周围环境未知的情况下,在移动过程中根据位置估计和地图进行自身定位,同时在自身定位的基础上建造增量式地图,实现机器人的自主定位和导航,具有灵活性、扩展性和适应性强等特点。主流的 SLAM 技术应用为激光 SLAM[26-28](基于激光雷达传感器)和视觉 SLAM[29-30](基于单/双目摄像头)。视觉 SLAM 易受光线影响,数据处理成本较高,而激光 SLAM 在理论、技术和产品落地上相对成熟,是目前主流的定位导航方法。尽管如此,由于激光雷达在特征相似环境下存在匹配退化的问题,因而实际场景应用中往往综合了其他的辅助传感器,通过多传感器融合方法来提高定位精度与导航系统的容错性。

温室等设施种植环境具有光照不均匀且变化快、作物种植密度较大、行间距空间有限、同类作物行之间以及单一狭长行道内环境相似度高等特点。针对上述场景特点,当前的研究多以激光 SLAM 技术为核心,采用多传感器融合的方法实现设施移动机器人的自主定位与导航。文献[31-33]有效提高了设施内移动机器人的定位精度,然而,大量传感器数据融合存在系统复杂度高、机器人计算能耗增加、实时性较差等问题。

为解决设施场景内移动机器人易定位丢失的问题,本文提出一种多传感器融合的定位与自主导航系统解决方案。其中,多线 LiDAR、视觉识别 AprilTag 以及激光里程计的多源数据融合相应算法实现地图构建与定位校正;全局规划器结合局部规划器实现机器人路径规划与驱动控制,以期实现移动机器人在温室等设施环境内的高效自主移动作业,为移动机器人拓展巡检、施药、采收等功能奠定基础。

1 移动机器人系统组成

1.1 硬件系统

移动机器人是实现温室内环境与作物长势监测、施药、采摘、运输等作业的基础平台,其自主导航功能需要机器人平台完成空间信息感知、控制计算与自主行走等任务。为此,集成开发了一种移动机器人平台,如图 1 所示,其硬件系统包括运动底盘、多传感器系统以及主控制器 3 部分。运动底盘根据种植模式进行选型,这里采用 SCOUT MINI 底盘,四

轮差速驱动，采用 CAN(Controller area network)总线通信方式。多传感器系统负责空间环境信息感知，主要包括多线 LiDAR(VLP－16 型，美国)和配备 LED 补光灯的高清工业相机(中维奥柯)。主控制器采用边缘计算设备 Nvidia Jetson AGX Xavier 开发套件，性能和算力满足导航算法需求。硬件系统各模块的主要技术参数如表 1 所示。

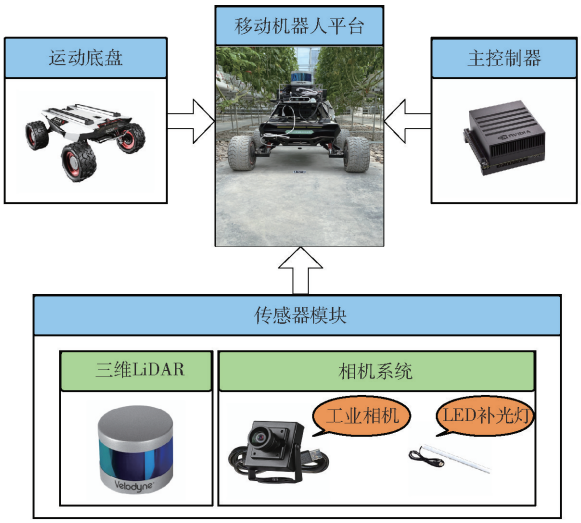


图 1　移动机器人平台硬件系统

Fig. 1　Hardware system of mobile robot platform

表 1　硬件系统主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of hardware system

模块	型号	技术参数
运动底盘	SCOUT MINI	尺寸:627 mm×550 mm×252 mm 驱动形式:四轮四驱 额定载重:10 kg 最高速度:20 km/h 最小转弯半径:0(可原地自旋) 通信接口:标准 CAN
传感器模块	VLP－16	最大测距:100 m 测距精度:±3 cm 水平方向测量角度范围:360° 水平方向角度分辨率:0.1°～0.4° 垂直视角:－15°～15° 垂直角分辨率:2° 扫描频率:5～20 Hz 安全等级:Class 1
	高清工业相机	像素:500 万 像素大小:2.0 μm×2.0 μm CMOS 尺寸:1/2.5 inch 分辨率:1 280 像素×720 像素 帧率:30 f/s
主控制器	Nvidia Jetson AGX Xavier	GPU:Tensor Core 512－Volta GPU CPU:8 核 ARM v8.2 64 位 CPU、8 MB L2＋4 MB L3 内存:32 GB 256 位 LPDDR4x|137 GB/s 存储:32 GB eMMC 5.1

1.2　软件系统

移动机器人软件系统架构如图 2 所示，分为上位机和下位机两部分。上位机软件运行在机器人操作系统(Robot operating system，ROS) Melodic 上，算法程序主要包括传感器数据处理功能包和导航功能包。传感器数据处理功能包用于实现传感器的数据采集和融合计算，并将计算后的校正位姿、二维 LiDAR 与里程计信息输出给导航功能包。传感器数据处理功能包由 Camera 数据处理与 LiDAR 数据处理两部分组成，Camera 数据处理包括 Camera 节点、AprilTag 节点与 Pose_calculation 节点，LiDAR 数据处理包括 3D LiDAR 节点、Pointcloud_to_LaserScan 节点与 RF2O 节点。导航功能包用于实现定位与导航，包括 Mapping 节点、Localization 节点与 Path_planning 节点。上述各 ROS 节点之间的数据实时传输通过基于“发布/订阅”模型的话题消息通信机制实现。下位机软件运行在嵌入式控制器上，负责接收上位机下发的线速度和角速度信息，通过解算程序输出控制信号驱动控制机器人行走和转向。上位机与下位机之间通过 CAN/2.0B 标准协议进行数据通信，报文格式采用 MOTOROLA 格式。

2　多传感器融合定位与导航方法

移动机器人导航运动控制框架如图 3 所示，主

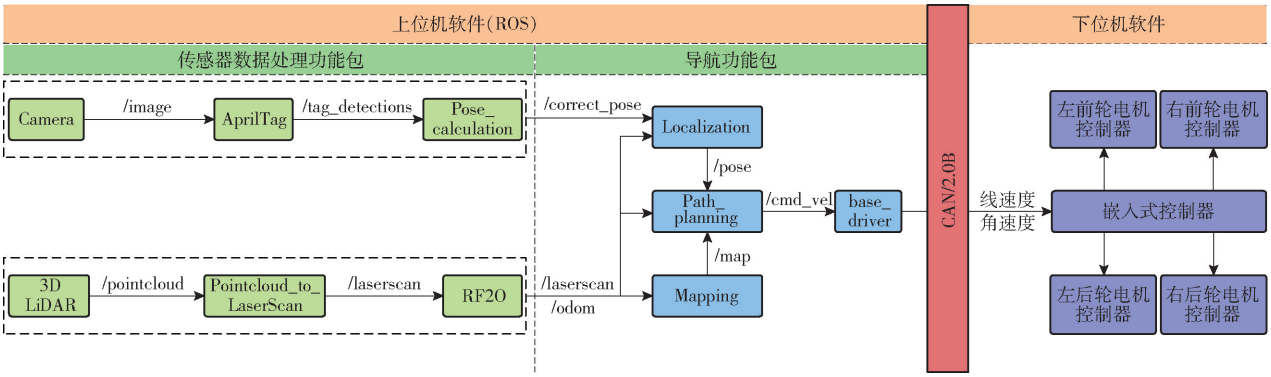


图 2　移动机器人软件系统架构

Fig. 2　Software system architecture for mobile robot

要包括建图、定位以及路径规划 3 个关键环节。首先,控制移动机器人在温室内行走,基于机载多传感器数据,使用 Gmapping 算法[34-35]建立温室环境地图,作为全局代价地图。然后,基于全局代价地图,根据主控制器下发的目标点,使用 Dijkstra 算法进行全局路径规划,计算出机器人到目标点的全局最优路线。最后,在机器人实际行走时,使用自适应蒙特卡洛定位(Adaptive Monte Carlo localization, AMCL)算法融合 AprilTag 算法进行全局定位,其中,AprilTag 信息用于周期性校正机器人位姿,以提高机器人在设施内的定位精度。同时,为了实现动态避障,根据 LiDAR 实时数据,引入局部代价地图,使用动态窗口法(Dynamic window approach, DWA)进行局部路径规划,随后结合评价函数计算出下一阶段的局部最优行走轨迹以及对应的移动机器人线速度与角速度,通过 CAN 协议发送给嵌入式控制器,从而实现机器人的精准运动控制。

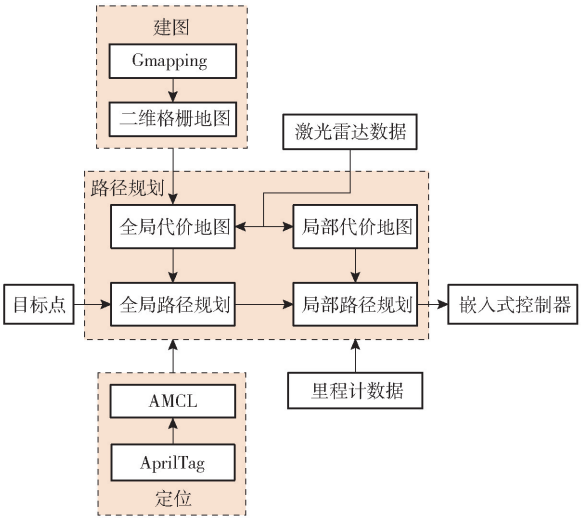
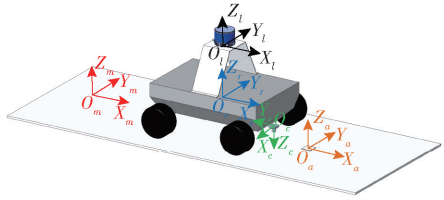


图 3 机器人导航运动控制框架

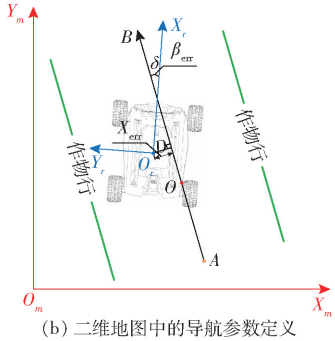
Fig. 3 Robot navigation motion control framework

2.1 坐标系与导航参数定义

三维空间中,移动机器人导航系统中主要包括以下 5 个坐标系:地图坐标系 $O_mX_mY_mZ_m$、机器人坐标系 $O_rX_rY_rZ_r$、相机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$、AprilTag 标签坐标系 $O_aX_aY_aZ_a$和 LiDAR 坐标系 $O_lX_lY_lZ_l$,各坐标系的空间位置关系如图 4a 所示,各坐标系均为右手坐标系。地图坐标系 $O_mX_mY_mZ_m$由 SLAM 建图时自动生成,Z_m轴垂直水平面指向正上方;机器人坐标系 $O_rX_rY_rZ_r$中,O_r为底盘中心点,X_r指向机器人正前方,Y_r轴指向机器人左边,Z_r轴垂直水平面指向正上方;相机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$中,O_c为相机镜头光心,X_c指向机器人右边,Y_c轴指向机器人后方,Z_c轴垂直水平面指向正下方;AprilTag 标签坐标系 $O_aX_aY_aZ_a$由张贴标签时确定,以底部标签名为参考,X_a轴指向标签名右方,Z_a轴垂直水平面指向正上方;激光雷达坐标系 $O_lX_lY_lZ_l$中,X_l指向机器人正前方,Y_l轴指向机器人左边,Z_l轴垂直水平面指向正上方。



(a) 三维空间导航系统的各坐标系示意图



(b) 二维地图中的导航参数定义

图 4 坐标系与导航参数描述示意图

Fig. 4 Schematics of coordinate system and navigation parameters description

在二维格栅地图中,移动机器人在作物行内实现自主导航,导航参数包括横向偏差 X_{err}和航向偏差β_{err},如图 4b 所示。X_{err}是机器人中心点 O_r与期望路径 AB 的垂直距离 D,计算公式为

$$D=\frac{kx_0-y_0+b}{\sqrt{1+k^2}} \tag{1}$$

式中 x_0、y_0——机器人中心点 O_r在地图坐标系 $O_mX_mY_m$中的 x、y 轴坐标

k——期望路径 AB 在地图坐标系 $O_mX_mY_m$中直线方程的斜率

b——期望路径 AB 在地图坐标系 $O_mX_mY_m$中直线方程的截距

β_{err}是车辆前进方向射线 O_rX_r与期望路径方向射线 AB 之间的夹角 δ,角度范围设定为$(-\pi,\pi]$。

2.2 环境地图构建

针对小规模温室场景,采用 Gmapping 算法能够实现计算量小且精度高的环境地图构建。Gmapping 算法是基于粒子滤波思想,以 LiDAR 的观测模型替代里程计运动模型作为提议分布从而给出对粒子真实分布的最佳近似,使用自适应重采样技术最大限度地减少了粒子损耗问题。Gmapping 算法依靠 LiDAR 和里程计获取环境位姿信息,传感器获取数据的精度决定了建图效果。为此,本研究主要在环境信息获取方面做了以下工作:①为保留机器人运动范围内的关键环境信息、降低计算能耗,将特定高度范围内(栽培架下沿到上沿之间)的多线 LiDAR

点云过滤为二维 LiDAR 点云数据，作为 Gmapping 算法的输入信息。②为避免轮式编码器在车轮打滑产生累计误差的问题，采用 RF2O 方法[36]计算的激光里程计数据作为 Gmapping 算法的输入信息。建图过程的具体实现是以 ROS 中自带的 Gmapping 功能包为基础，进行本地化参数与话题订阅设置，最终输出二维格栅地图。

2.3　AprilTag 定位校正方法

在二维格栅地图中，移动机器人定位最常用的是 AMCL[37-38]算法，同样基于粒子滤波思想，通过随机采样概率计算得到机器人的位置和姿态。AMCL 算法流程如下：①以二维格栅地图为输入，在初始位置对粒子云进行初始化。②根据机器人运动模型和里程计信息来模拟粒子运动。③根据 LiDAR 点云信息来计算粒子权重。④粒子重采样维持循环定位，输出机器人的位置和姿态。

但由于温室环境具有栽培架行间环境重复且对称的特殊性，使得 AMCL 算法在行间会出现粒子快速衰退问题，导致机器人定位丢失。为此，提出了在 AMCL 算法框架下，采用 AprilTag[39-40]进行机器人位姿周期性校正的方法以提升定位精度，方法框架如图 5 所示。具体实现过程如下：①分别在栽培垄道行间两头及中间地面张贴 AprilTag 标签，每张标签记录着其在二维格栅地图中的精确位置。②机器人行驶过程中，机载工业相机扫描到 AprilTag 标签时，计算机器人的校正位姿与中心点坐标，反馈给 AMCL 算法。③AMCL 算法将接收到的机器人校正位姿与坐标作为新的初始位置，按照上述 AMCL 算法流程重新进行定位。④重复以上步骤，在机器人扫描完所有 AprilTag 标签后完成全局定位。

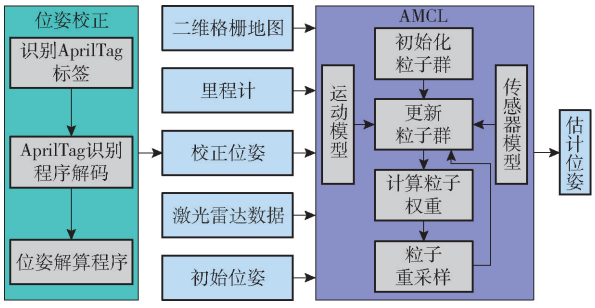


图 5　AprilTag 定位校正方法流程图

Fig. 5　Flowchart of AprilTag localization correction method

移动机器人扫描到 AprilTag 的位姿解算方法为：针对二维平面，移动机器人的俯仰角与翻滚角均为零，只需考虑机器人的航向角。当机器人机载工业相机扫描到 AprilTag 标签时，如图 6a 所示，机器人的航向角 α 为机器人坐标系 $O_rX_rY_r$ 与地图坐标系 $O_mX_mY_m$ 在 x 轴方向上的夹角，$\alpha=\gamma+\varphi$，其中 φ 为标签坐标系 $O_aX_aY_a$ 与地图坐标系 $O_mX_mY_m$ 在 x 轴方向上的夹角，γ 为机器人坐标系 $O_rX_rY_r$ 与标签坐标系 $O_aX_aY_a$ 在 x 轴方向上的夹角。AprilTag 标签张贴后，可根据标签中心线上 2 点在地图坐标系中的坐标值计算夹角 φ。夹角 γ 的计算方法则分为以下 2 个步骤：

（1）通过 AprilTag 检测程序解算出标签坐标系 $O_aX_aY_aZ_a$ 相对于相机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$ 的欧拉角为 $(\theta_z,\theta_y,\theta_x)$。由于标签水平张贴，因此 $\theta_z\in[0,2\pi]$，$\theta_y\approx\pi$，$\theta_x\approx0$，即欧拉角可以近似为 $(\theta_z,\pi,0)$。

（2）已知相机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$ 相对于机器人坐标系 $O_rX_rY_rZ_r$ 的 $Z-Y-X$ 欧拉角为 $(\pi/2,\pi,0)$，进而得到标签坐标系 $O_aX_aY_aZ_a$ 相对于机器人坐标系 $O_rX_rY_rZ_r$ 的 $Z-Y-X$ 欧拉角为 $(\theta_z-\pi/2,0,0)$，可得 $\gamma=\theta_z-\pi/2$。

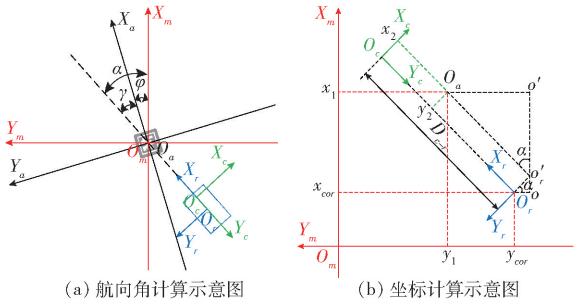


图 6　机器人位姿计算示意图

Fig. 6　Schematics of robot pose calculation

坐标解算方法为：机器人中心点在二维地图坐标系中的坐标 (x_{cor},y_{cor}) 如图 6b 所示，计算公式为

$$\begin{cases}x_{cor}=x_1-[(D_{c-r}-y_2)\cos\alpha+x_2\sin\alpha]\\ y_{cor}=y_1-[(D_{c-r}-y_2)\sin\alpha-x_2\cos\alpha]\end{cases}\tag{2}$$

式中　x_1、y_1——AprilTag 标签中心点在地图坐标系 $O_mX_mY_m$ 中的 x、y 轴坐标

x_2、y_2——AprilTag 标签中心点在相机坐标系 $O_cX_cY_c$ 中的 x、y 轴坐标

D_{c-r}——相机坐标系原点 O_c 与机器人坐标系原点 O_r 的直线距离

2.4　路径规划

由于 Gmapping 算法得到的二维格栅地图是全局静态的，无法实时更新地图上的障碍物信息，因此，采用全局与局部路径规划相结合的方法提高移动机器人的避障能力。全局与局部路径规划均依靠代价地图实现，包括静态地图层、障碍地图层和膨胀层，静态地图层是 SLAM 绘制的静态二维格栅地图，障碍物地图层包括障碍物信息，膨胀层的作用是对障碍物进行膨胀，以避免机器人碰撞。

基于 ROS 中的 move_base 功能包[41]实现机器人路径规划与驱动控制。首先，设定目标点以及静

态地图;然后,由全局规划器(global_planner)规划出全局路径并产生一些路径点;最后,产生的路径点依次交给局部规划器(local_planner),在速度空间输出数据控制机器人移动,直到到达目标点。全局规划器采用 Dijkstra 算法[42],计算的是全局最短路径,算法流程如图 7a 所示。首先,算法初始化输入二维格栅地图、导航起始点和导航目标点;然后,寻找与导航起始点距离最近的下一中间路径点;进而,记录该路径点并以此路径点为开始,继续寻找与该路径点距离最近的下一路径点,以此往复,直到达到导航目标点;最后,输出导航起始点到导航目标点的最短路径。局部规划器采用 DWA 算法[43],实时规划出一条局部实际行走轨迹,算法流程如图 7b 所示。首先,设置算法基本参数,在速度空间中采样多组速度数据,并根据机器人运动模型模拟出这些速度在一定时间内的运动轨迹;然后,通过评价函数对这些轨迹进行评价;最后,选取最优轨迹对应的速度驱动机器人运动。

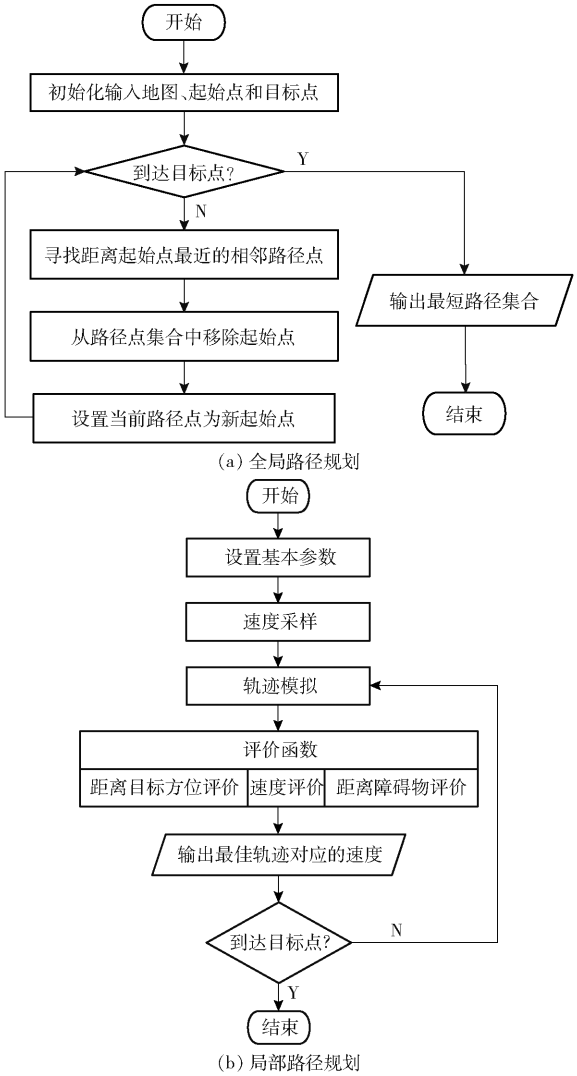


图 7 路径规划算法流程图

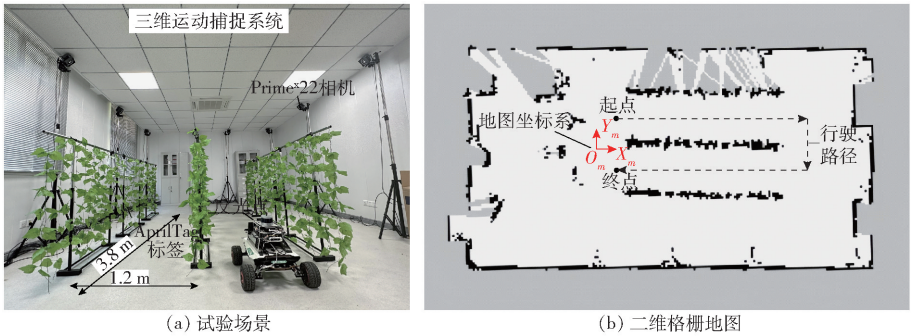
Fig. 7 Path planning algorithm flowcharts

3 试验

3.1 定位精度评估

实验室内搭建三维运动捕捉系统,验证 AprilTag 定位校正方法的有效性。实验室测试场景如图 8a 所示,仿真植物行间距 1.2 m,2 个行间地面贴有 4 个 AprilTag 标签。OptiTrack 三维运动捕捉系统由 12 台相同的 Prime^X 22 全局快门红外动作捕捉摄像机(VirtualPoint 公司)组成,相机分辨率为 2 048 像素 × 1 088 像素,帧速率为 360 f/s,视场角 79° × 49°,系统软件平台内置三维重建算法可获得贴有反光点刚体的 6 自由度位置和姿态数据,位置误差精度高达 $\pm 1.5 \times 10^{-4}$ m。本试验中,三维运动捕捉系统标定后误差精度为 9×10^{-4} m,设置数据采集频率为 20 Hz,机器人上贴有 5 个反光点以在系统中创建为刚体,其运动被系统实时捕捉记录,最终通过数据解算、数据导出步骤得到刚体运动过程的三维位置数据,其中二维平面位置数据作为定位真值评估移动机器人的定位精度。

定位精度评估试验步骤具体如下:首先,对齐三维运动捕捉系统坐标系与激光雷达构建的地图坐标系的 x 轴和 y 轴,通过安装在机器人中心点的十字激光器投影标记与三维运动捕捉系统 L 型标定杆重合具体实现。然后,机器人端使用 Gmapping 算法建立实验室环境地图,在地图中预设机器人行驶路径,自动控制机器人行走,如图 8b 所示,同时开启三

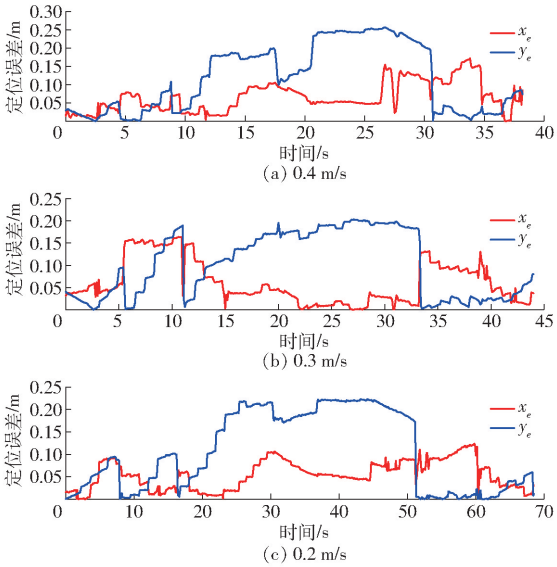


(a) 试验场景 (b) 二维格栅地图

图 8 实验室试验场景及二维格栅地图

Fig. 8 Laboratory experimental scenario and two-dimensional grid map

维运动捕捉系统记录机器人运动过程，2 个坐标系下机器人位置变化数据分别记录保存。最后，根据时间戳对齐相同时刻机器人在三维捕捉系统中位置坐标(x_t, y_t)和二维格栅地图中位置坐标(x_g, y_g)，分别计算 x 轴上纵向定位误差 x_e 和 y 轴上横向定位误差 y_e 来评估定位精度，其中，$x_e = |x_t(i) - x_g(i)|$，$y_e = |y_t(i) - y_g(i)|$，$i = 1, 2, \cdots, n$，n 为运动过程中数据采样个数。根据上述定位精度评估方法，分别计算机器人在速度为 0.4、0.3、0.2 m/s 时 x、y 方向上定位误差 x_e、y_e，变化曲线如图 9 所示。同时，分别统计 x_e、y_e 最大值、平均值和标准差来定量评估定位精度，统计结果如表 2 所示。



(a) 0.4 m/s　(b) 0.3 m/s　(c) 0.2 m/s

图 9　不同速度下机器人定位误差 x_e 和 y_e 变化曲线

Fig. 9　Variation curves of robot positioning errors x_e and y_e at different speeds

表 2　不同速度下机器人定位误差 x_e 和 y_e 统计数据

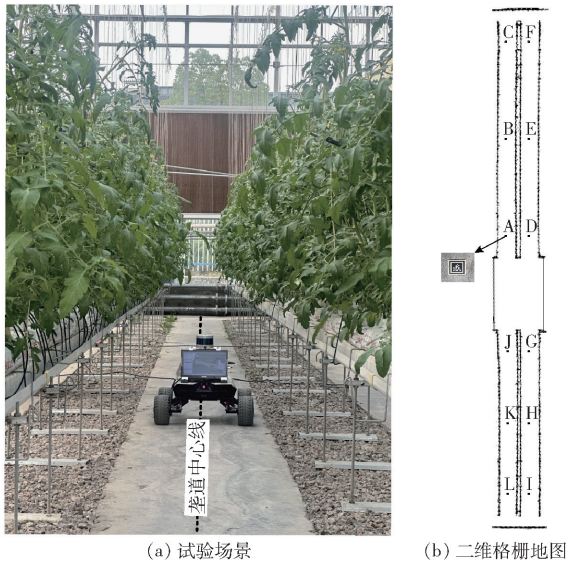
Tab. 2　Statistical data of robot positioning errors x_e and y_e at different speeds　m

速度/	x_e			y_e		
(m·s^{-1})	最大值	平均值	标准差	最大值	平均值	标准差
0.4	0.172	0.066	0.041	0.257	0.117	0.092
0.3	0.164	0.060	0.049	0.203	0.102	0.074
0.2	0.124	0.055	0.032	0.223	0.105	0.087

由图 9 和表 2 可得：3 种设定速度下，机器人纵向定位误差平均值均不大于 0.066 m，标准差均不大于 0.049 m，横向定位误差平均值均不大于 0.117 m，标准差均不大于 0.092 m。其中，机器人平均横向定位误差不小于 0.102 m，且最大达到 0.257 m，这是由于机器人在转弯时自身抖动引起定位系统振荡导致的，但在垄道内正常行驶时横向定位误差平均值小于 0.100 m。总体而言，采用 AprilTag 的定位校正方法使移动机器人达到厘米级定位精度。

3.2　自主导航性能评估

在生产温室场景下验证全局结合局部路径规划方法下的设施移动机器人自主导航性能。试验地点位于江苏省农业科学院连栋玻璃温室，温室内种植高架栽培的设施番茄，栽培架行间距 1.2 m，地面为硬质水泥路面，水泥路面宽为 0.8 m，试验场景如图 10a 所示。



(a) 试验场景　(b) 二维格栅地图

图 10　温室试验场景及二维格栅地图

Fig. 10　Greenhouse experimental scenario and two-dimensional grid map

在温室内选取 4 条作业垄道，使用 Gmapping 算法构建二维格栅地图，如图 10b 所示，垄道内共贴有 12 个 AprilTag 标签，分别记为 A ~ L。选择一条垄道作为测试环境，以垄道中心线为期望路径，自主导航行驶时利用机器人实时解算出的位置坐标与航向角计算横向偏差 X_{err} 与航向偏差 β_{err}，在速度 0.4、0.3、0.2 m/s 下分别进行 3 次试验，统计横向偏差 X_{err} 与航向偏差 β_{err} 的最大值、平均值与标准差评估移动机器人的自主导航性能。导航相关参数设置如下，障碍物膨胀半径设为 0.4 m，机器人中心点与目标点在 xy 平面上的距离误差均设为 0.15 m，航向误差设为 0.15 rad。不同速度下，机器人由垄道外初始位置进入垄道内稳定区域后横向偏差 X_{err} 与航向偏差 β_{err} 随时间变化曲线如图 11 所示，横向偏差 X_{err} 与航向偏差 β_{err} 统计数据如表 3 所示。

由图 11 和表 3 可知，不同速度下，机器人实际行驶轨迹与期望轨迹之间的横向偏差平均值均不大于 0.050 m，标准差均不大于 0.032 m，航向偏差平均值均不大于 2.2°，标准差均不大于 1.4°。同时，随着行驶速度降低，横向偏差与航向偏差标准差逐渐降低，即机器人导航轨迹与期望轨迹之间的离散程度越低。综上所述，3 种设定速度下，移动机器人

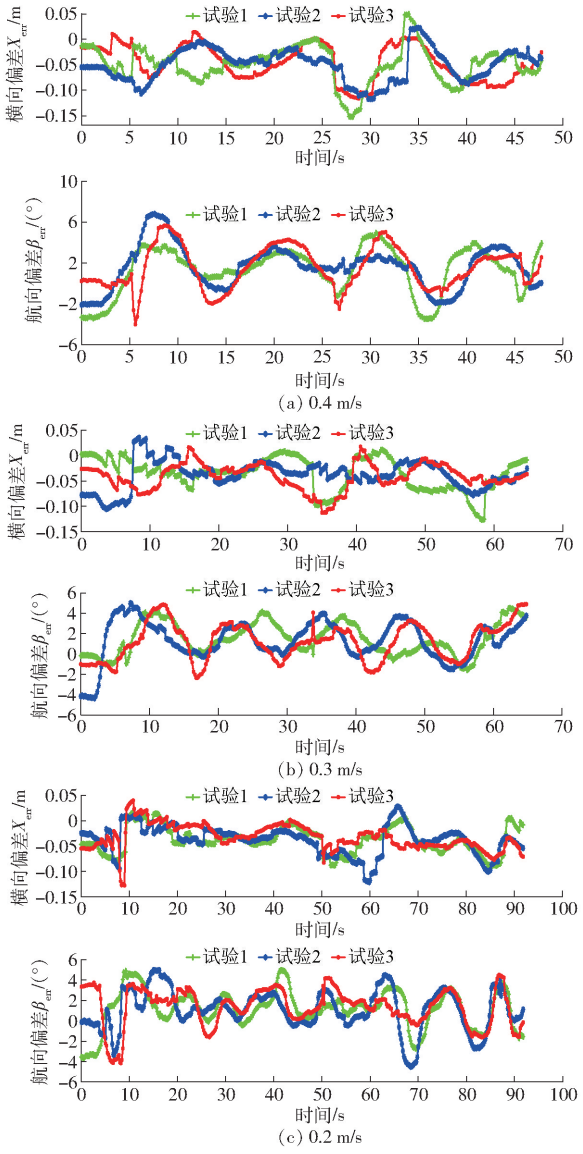


图 11 不同速度下移动机器人导航横向偏差 X_{err} 与航向偏差 β_{err} 变化曲线

Fig. 11 Lateral deviation X_{err} and course deviation β_{err} variation curves of mobile robot navigation at different speeds

自主导航横向偏差达到厘米级。

3.3 全局自主导航试验

开展移动机器人在温室内 4 条垄道的全局自主导航试验。机器人行驶速度设定为 0.3 m/s。规划机器人在垄道尽头原地转向调头的行驶策略,连续行驶轨迹如图 12 所示,图 12a 为单独使用激光 SLAM 方法进行自主导航,移动机器人在第 1 条垄道尽头调头时出现定位偏移大的问题,导致后续的自主导航任务失败;图 12b 为激光 SLAM 融合 ApriTag 定位校正的自主导航方法的机器人行驶轨迹,可以看出机器人能够完整地完成导航任务,行驶轨迹总体波动较小。试验结果表明,提出的定位与导航方法能够使移动机器人完成温室内连续、厘米级定位与自主导航作业要求。

表 3 不同速度下移动机器人导航横向偏差 X_{err} 与航向偏差 β_{err} 统计数据

Tab. 3 Statistical data on lateral deviation X_{err} and course deviation β_{err} of mobile robot navigation at different speeds

设定速度/(m·s^{-1})	试验序号	X_{err}/m			β_{err}/(°)		
		最大值	平均值	标准差	最大值	平均值	标准差
0.4	1	0.116	0.046	0.034	4.9	2.3	1.2
	2	0.152	0.051	0.032	6.8	2.2	1.5
	3	0.117	0.052	0.029	5.7	2.0	1.6
	平均值	0.128	0.050	0.032	5.8	2.2	1.4
0.3	1	0.126	0.036	0.030	4.5	1.7	1.3
	2	0.105	0.040	0.024	5.0	1.9	1.4
	3	0.112	0.042	0.024	4.9	1.8	1.2
	平均值	0.114	0.039	0.026	4.8	1.8	1.3
0.2	1	0.088	0.039	0.024	5.0	1.9	1.2
	2	0.121	0.040	0.026	5.0	1.8	1.4
	3	0.127	0.035	0.021	4.5	2.0	1.1
	平均值	0.112	0.038	0.024	4.8	1.9	1.2

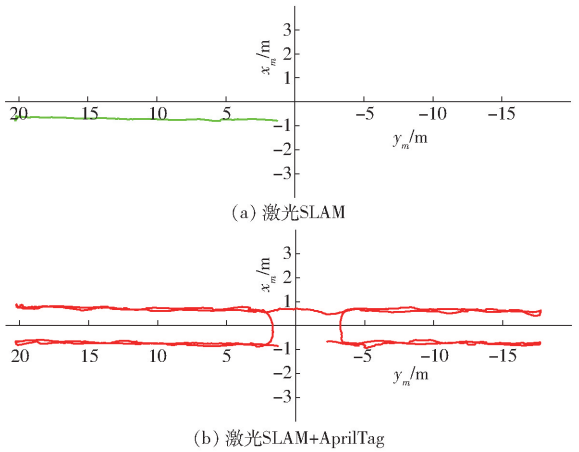


图 12 全局自主导航轨迹

Fig. 12 Global autonomous navigation trajectory

4 结论

(1)为了降低移动机器人主控单元的计算能耗,以及更好地保留机器人运动范围内的关键环境信息,将采集到的三维激光雷达点云数据过滤融合为二维激光雷达点云数据;基于融合而成的二维激光雷达点云数据,采用 RF2O 方法计算得到激光里程计代替传统的轮式编码器里程计数据,避免了车轮打滑造成的里程计累计误差。

(2)针对温室内部栽培架行间存在狭长对称及特征单一的特点,提出了激光 SLAM 与 AprilTag 融合的移动机器人定位与自主导航方法。基于激光 SLAM 技术,在 AMCL 定位算法框架下,基于 AprilTag 视觉基准系统进行机器人位姿校正,保证了机器人在温室内长时间稳定的自主导航运行。

(3)在实验室和连栋玻璃温室开展了不同速度下移动机器人定位与自主导航测试。试验结果表

明，移动机器人纵向、横向定位误差平均值以及自主导航横向偏差平均值均在厘米级，平均航向偏差不超过 2.2°。移动机器人在不同速度下的自主导航表现稳定，能够长时间在温室内自主行驶。

参 考 文 献

[1] AMPIM P, OBENG E, OLVERA-GONZALEZ E. Indoor vegetable production: an alternative approach to increasing cultivation [J]. Plants, 2022, 11(21): 2843.

[2] 刘继展. 温室采摘机器人技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 1 - 18.
LIU Jizhan. Research progress analysis of robotic harvesting technologies in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 1 - 18. (in Chinese)

[3] ZHANG B, XIE Y, ZHOU J, et al. State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 177: 105694.

[4] WANG Z, XUN Y, WANG Y, et al. Review of smart robots for fruit and vegetable picking in agriculture[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(1): 33 - 54.

[5] BAGAGIOLO G, MATRANGA G, CAVALLO E, et al. Greenhouse robots: ultimate solutions to improve automation in protected cropping systems—a review[J]. Sustainability, 2022: 14(11): 6436.

[6] XIONG Y, GE Y, LARS G, et al. An autonomous strawberry-harvesting robot: design, development, integration, and field evaluation[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(2): 202 - 224.

[7] CHEN Y, ZHANG B, ZHOU J, et al. Real-time 3D unstructured environment reconstruction utilizing VR and Kinect-based immersive teleoperation for agricultural field robots[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 105579.

[8] YAN Y, ZHANG B, ZHOU J, et al. Real-time localization and mapping utilizing multi-sensor fusion and Visual - IMU - Wheel odometry for agricultural robots in unstructured, dynamic and GPS - Denied greenhouse environments[J]. Agronomy, 2022, 12: 1740.

[9] LEE I N, LEE K, LEE J, et al. Autonomous greenhouse sprayer navigation using automatic tracking algorithm[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2015(31): 17 - 21.

[10] HAYASHI S, YAMAMOTO S, SAITO S, et al. Field operation of a movable strawberry-harvesting robot using a travel platform [J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2014, 48(3): 307 - 316.

[11] ARAD B, BALENDONCK J, BARTH R, et al. Development of a sweet pepper harvesting robot[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(6): 1027 - 1039.

[12] BALASO S D, ARIMA S, UEKA Y, et al. Development of a multi-operation system for intelligent greenhouses[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(4): 287 - 292.

[13] GENG G, JIANG F, CHAI C, et al. Design and experiment of magnetic navigation control system based on fuzzy PID strategy [J]. Mechanical Sciences, 2022, 13: 921 - 931.

[14] XIE B, JIN Y, FAHEEM M, et al. Research progress of autonomous navigation technology for multi-agricultural scenes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107963.

[15] YAO L, HU D, ZHAO C, et al. Wireless positioning and path tracking for a mobile platform in greenhouse[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(1): 216 - 223.

[16] PRETER A D, ANTHONIS J, BAERDEMAEKER J D. Development of a robot for harvesting strawberries[J]. IFAC - PapersOnLine, 2018, 51(17): 14 - 19.

[17] MOSALANEJAD H, MINAEI S, BORGHEI A, et al. Evaluation of navigation system of a robot designed for greenhouse spraying[J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2020, 13(1): 1 - 9.

[18] 毕松, 张国轩, 李志军, 等. 基于测距值修正的温室植保机器人定位方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 347 - 358.
BI Song, ZHANG Guoxuan, LI Zhijun, et al. Positioning method of greenhouse plant protection robot based on distance measurement value correction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 347 - 358. (in Chinese)

[19] 王新忠, 韩旭, 毛罕平, 等. 基于最小二乘法的温室番茄垄间视觉导航路径检测[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 161 - 166.
WANG Xinzhong, HAN Xu, MAO Hanping, et al. Navigation line detection of tomato ridges in greenhouse based on least square method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 161 - 166. (in Chinese)

[20] 高国琴, 李明. 基于 K - means 算法的温室移动机器人导航路径识别[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 25 - 33.
GAO Guoqin, LI Ming. Navigating path recognition for greenhouse mobile robot based on K - means algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 25 - 33. (in Chinese)

[21] CHEN J, QIANG H, WU J, et al. Extracting the navigation path of a tomato-cucumber greenhouse robot based on a median point Hough transform[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174: 105472.

[22] CHEN J, HU Q, WU J, et al. Navigation path extraction for greenhouse cucumber-picking robots using the prediction-point Hough transform[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 180: 105911.

[23] LI X, SU J, YUE Z, et al. Adaptive multi-ROI agricultural robot navigation line extraction based on image semantic segmentation[J]. Sensors, 2022, 22: 7707.

[24] 王杰, 陈正伟, 徐照胜, 等. 基于相机与激光雷达融合的温室机器人行间导航方法[J]. 农业机械学报,2023,54(3):32 -40.
WANG Jie, CHEN Zhengwei, XU Zhaosheng, et al. Inter-rows navigation method of greenhouse robot based on fusion of camera and LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3):32 -40. (in Chinese)
[25] DING H, ZHANG B, ZHOU J, et al. Recent developments and applications of simultaneous localization and mapping in agriculture[J]. Journal of Field Robotics, 2022,39(6):956 -983.
[26] 侯加林, 蒲文洋, 李天华, 等. 双激光雷达温室运输机器人导航系统研制[J]. 农业工程学报,2020,36(14):80 -88.
HOU Jialin, PU Wenyang, LI Tianhua, et al. Development of dual-LiDAR navigation system for greenhouse transportation robot[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(14):80 -88. (in Chinese)
[27] JIANG S, WANG S, YI Z, et al. Autonomous navigation system of greenhouse mobile robot based on 3D LiDAR and 2D LiDAR SLAM[J]. Frontiers in Plant Science,2022,13:815218.
[28] 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)
[29] 吴雄伟, 周云成, 刘峻渟, 等. 面向温室移动机器人的无监督视觉里程估计方法[J].农业工程学报,2023,39(10):163 -174.
WU Xiongwei, ZHOU Yuncheng, LIU Junting, et al. Unsupervised visual odometry method for greenhouse mobile robots[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(10):163 -174. (in Chinese)
[30] KRUL S, PANTOS C, FRANGULEA M. Visual SLAM for indoor livestock and farming using a small drone with a monocular camera: a feasibility study[J]. Drones, 2021,5:41.
[31] REN G, WU H, BAO A, et al. Mobile robotics platform for strawberry temporal-spatial yield monitoring within precision indoor farming systems[J]. Frontiers in Plant Science,2023,14:1162435.
[32] LONG Z, XIANG Y, LEI X, et al. Integrated indoor positioning system of greenhouse robot based on UWB/IMU/ODOM/LiDAR[J]. Sensors,2022,22:4819.
[33] OBREGÓN D, ARNAU R, CAMPO-COSSIO M, et al. Precise positioning and heading for autonomous scouting robots in a harsh environment[C]//International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation,2019.
[34] SANTOS J M, PORTUGAL D, RUI P R. An evaluation of 2D SLAM techniques available in robot operating system[C]//11th IEEE Int. Symp. on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR 2013). IEEE,2013.
[35] GRISETTI G, STACHNISS C, BURGARD W. Improving grid-based SLAM with rao-blackwellized particle filters by adaptive proposals and selective resampling[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation,2005:2432 -2437.
[36] JAIMEZ M, MONROY J G, GONZALEZ-JIMENEZ J. Planar odometry from a radial laser scanner. A range flow-based approach[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation,2016:4479 -4485.
[37] DELLAERT F, FOX D, BURGARD W, et al. Monte Carlo localization for mobile robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation,1999:1322 -1328.
[38] FOX D. Adapting the sample size in particle filters through KLD-sampling[J]. The International Journal of Robotics Research,2003,22(12):985 -1003.
[39] OLSON E. AprilTag: a robust and flexible visual fiducial system[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation,2011:3400 -3407.
[40] WANG J, OLSON E. AprilTag 2: efficient and robust fiducial detection[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016:4193 -4198.
[41] 胡春旭. ROS 机器人开发实践[M]. 北京:机械工业出版社,2019.
[42] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. Numerische Mathematik,1959(1):269 -271.
[43] FOX D, BURGARD W, THRUN S. The dynamic window approach to collision avoidance[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine,1997,4(1):23 -33.