DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2025.04.001

设施农业自主移动装备导航技术研究进展

黄银锋[1], 孙国祥[1, 2*], 汪小昂[1, 2], 施印炎[1, 2], 章永年[1, 2], 陈光宇[1]

(1. 南京农业大学工学院,江苏南京,210031; 2. 江苏省现代设施农业技术与装备实验室,江苏南京,210031)

摘要:设施农业自主移动装备导航技术的研发对于设施农业的智能化升级具有举足轻重的意义,其面临的核心挑战在于如何在设施场景内部实现安全、高效和精确的移动。通过深入剖析国内外最新的研究动态,本研究旨在全面阐述设施农业自主移动装备导航技术的发展脉络,并探讨其未来的发展趋势。首先梳理了设施农业自主移动装备导航技术的研究现状,重点分析了不同导航方式的优缺点,包括导轨式、循迹式以及基于实时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping,SLAM)技术的多源数据融合导航。在此基础上,进一步探讨了基于SLAM技术的多源数据融合导航在实时定位、地图构建以及路径规划等方面的最新研究进展。相关研究表明,传统的导轨式和循迹式导航方式虽然简单易行,但存在路线固定、安装成本高、作业范围受限等问题。相比之下,基于SLAM技术的多源数据融合导航则具有更高的灵活性和自主性,能够实现精准定位、智能避障以及自适应路径规划等功能,因此在设施农业自主移动装备领域具有广阔的应用前景。随着SLAM技术的不断发展和完善,基于多源数据融合导航的设施农业自主移动装备将迎来更加广阔的发展空间。同时,本研究也关注到这些技术在实际应用中可能存在的挑战和限制,如数据处理能力、算法优化等问题。最后,对我国设施农业自主移动装备导航技术的研发提出了几点展望:采用多源数据融合式导航技术,实现高精度定位与地图构建;引入人工智能、云计算与边缘计算等技术,提升自主移动装备对于复杂设施场景的识别和理解能力;通过全局路径规划和局部路径规划相结合,实现自主移动装备的自主决策和路径规划;通过智能避障技术,提高自主识别和避让障碍物能力,确保作业过程中的安全性与可靠性;深入研究多机协同、人机协同的自主移动装备,实现多任务协同作业,提升装备适用性和作业效率。该研究旨在为我国设施农业自主移动装备智能化发展提供有益的参考和借鉴。

关键词:设施农业;导航;自主移动装备;实时定位;地图构建;路径规划

中图分类号:S24 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2025)04-0001-16

黄银锋, 孙国祥, 汪小昂, 施印炎, 章永年, 陈光宇. 设施农业自主移动装备导航技术研究进展[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(4): 1—16

HUANG Yinfeng, SUN Guoxiang, WANG Xiaochan, SHI Yinyan, ZHANG Yongnian, CHEN Guangyu. Research progress in navigation technology for autonomous mobile equipment in facility agriculture [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(4): 1—16

0 引言

设施农业作为现代农业技术的璀璨明珠,通过运用先进的工程技术,在可控环境中为作物生长创造最佳条件,旨在提升农产品品质与产量,满足日益增长的粮食需求,并增强农业的核心竞争力[1-2]。2018年12月,国务院发布的《关于加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级的指导意见》(国发〔2018〕42号)[3]指出相关部门要加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级,大力推广先进适用农机装备与机械化技术,积极发展农机社会化服务,培养农机人才和加强组织建设,为实现农业农村现代化提供有力支撑。2023年5月,农业农村部、工业和信息化部、国家发展改革委、财政部联合发布的《关于在若干省份开展“一大一小”农机装备研发制造推广应用先导区建设的通知》[4]指出农机企业、农业研究院、农机推广机构和农机使用者需加快推进形成自主可控、低成本、高质量和高效能的农业机械产业生态,为全面推进乡村振兴、加快建设农业强国提供有力的装备支撑。

目前,我国设施农业在生产流程中仍面临自动化和机械化程度不足的问题,过多依赖传统的人力操作和经验积累。在此背景下,自主导航技术备受瞩目,尤

收稿日期:2024-05-16 修回日期:2024-06-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2000304,2023YFD2000305);江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(22)3097);江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2023-44)

第一作者:黄银锋,男,1998年生,江苏泰州人,硕士研究生;研究方向为农业机器人。E-mail: 2021112038@stu.njau.edu.cn

*通信作者:孙国祥,男,1985年生,江苏盐城人,博士,副教授;研究方向为设施园艺智能化装备。E-mail: sguoxiang@njau.edu.cn

其在喷雾、搬运和采摘等作业环节中发挥着不可或缺的作用[5-6]。尽管自主导航技术已取得显著进展,但在适应复杂设施场景、实时避障和提升导航精度等方面仍面临挑战。传统的固定轨道式和循迹式导航技术由于成本高、路线固定等限制[7],难以满足设施农业的实际需求。相比之下,基于即时定位与地图构建技术的多源数据融合式导航技术,以其高度的环境适应性、实时导航避障和无须铺设固定轨道等优势,被视为未来设施农业自主移动装备导航技术的新方向[8]。

本研究首先从固定轨道式、循迹式和基于SLAM技术的多源数据融合式3个方面介绍主流的设施农业自主移动装备的导航技术。然后,深入剖析多源数据融合式导航所应用到的各类SLAM建图、定位和路径规划算法的原理和优缺点,指出各个算法在设施农业领域的应用前景。最后,总结和展望未来设施农业自主移动装备导航技术的发展前景,为相关学者提供借鉴和参考。

1 设施农业自主移动装备导航技术

在温室大棚和植物工厂等复杂设施场景中,实现安全、高效和精确的路径规划和移动是当前设施农业自主移动装备应用时面临的最大挑战[9-10]。这些场景经常涉及狭窄的通道、多变的自然光条件、不平坦的地面、难以区分的行间特征以及随机放置的障碍物。因此,选择恰当的导航方式对保证装备的运行效率和安全性至关重要。目前,设施农业自主移动装备导航技术主要分为3类:固定轨道式、循迹式和基于SLAM技术的多源数据融合式[11-12]。这些导航技术的选择和应用,直接决定了自主移动装备在设施场景中的运行效果和性能。

1.1 固定轨道式导航

固定轨道式导航是一种基于预设轨道的自主导航技术,自主导航平台沿着固定的轨道进行移动和导航,通过传感器和控制系统实现平台的轨道跟踪和避障,按照轨道安装的位置可分为地面轨道式导航和悬挂轨道式导航。

地面轨道式导航指自主移动装备沿着地面铺设的固定轨道进行导航和移动[13],这种导航方式通常通过接触轮或其他接触设备与轨道相连,确保机器人或车辆能稳定地沿预定的轨道路径移动,它具有结构简单、安装便捷、操作容易的优点[14-15]。李良等[16]设计的温室轨道施药机器人,如图1所示,该机器人采用可编程逻辑控制器驱动电机启动,可实现在地面或者轨道上运行。地面轨道式导航可以直接使用设施农业中的管道设备,例如ARAD等[17]设计的甜椒采摘机器人在地面铺设的热水管道实现自主导航,携带的摄像头用于监控和校正机器人的位置,可实现地面和轨道双运行;BALASO等[18]设计了可在温室供热管道和地面上灵活运行的多功能机器人,该机器人配备了激光雷达、视觉传感器和惯性测量单元等多种传感器,能够实时探测管道、车道和障碍物,实现高效的自主导航和避障。



图1 地面轨道式多功能机器人

Figure 1 Ground-based multi-functional robot

由于长距离的地面轨道会显著增加成本,对设施内路面造成损害,因此固定轨道式导航在大规模应用方面存在局限性。相较之下,悬挂轨道式导航具有明显优势,它不会占用地面空间,也不会妨碍其他机具的正常作业。机器人或车辆通过吊装系统或磁力悬浮等方式悬挂在空中轨道上,从而实现自由移动和导航。例如李进海等[19]研制的自走式温室喷雾机器人,通过在温室行间道路中铺设的导轨实现自主导航和喷雾作业,如图2所示,这种机器人能够在温室的各个方向进行自动往复运动。另外,张晓文等[20]设计的智能移动喷灌机采用模糊控制算法实现自动导航和喷洒控制,并集成多种传感器实时监测温室环境和作物生长状况。同样,张二鹏等[21]在喷施机和换轨车上安装SIMENS S7-200控制器,结合多传感器定位技术,通过点对点接口通信和串行通信协议实现整体全自动协调工作。试验结果显示,当换轨车移动速度达到0.15 m/s时,单次换轨时间为18 s,且停车位置误差仅为4.5 mm。



图2 悬挂轨道式温室喷雾机器人

Figure 2 Suspended rail greenhouse spray robot

不论是地面轨道式导航还是悬挂轨道式导航,铺设固定的轨道虽然可以降低自主移动装备的工作难度,但是会限制移动装备的工作范围,并且不易更改工作路径。

1.2 循迹式导航

循迹式导航,依据导航路径的确定方式,可细分为磁导航、激光循迹、视觉循迹以及无线循迹导航。这些

方式通过金属导线、磁带、二维码标签等手段精确设定导航路径，并引导设施农业装备沿着导航路径行进，完成导航任务。与固定轨道式导航相比，循迹式导航能够依据实时环境信息作出灵活调整，因此具有更高的适应性。这种导航方式特别适用于需要覆盖广阔区域及非结构化空间的场景。

1.2.1　磁导航

磁导航是一种利用磁场进行定位和导航的技术，主要通过测量设施场景的磁场强度和方向的变化确定自主移动装备的空间位置和姿态。实现磁导航最简单的方式是装备检测地面铺设的电磁引导线，例如许童羽等[22]设计出适用于日光温室的磁导寻迹喷药车，其在特定的电磁轨迹线上具有100%的转弯成功率。韩涛国等[23]设计的温室巡检移动平台则配备了无线模块，可远程监控温室环境信息。该平台根据事先铺设好的电磁引导线进行自主巡检，有效提升了巡检效率和准确性。

仅检测引导线的自主移动装备存在一个共同的局限性，即它们只能沿着预设的导线和磁带运动，避障能力相对较弱。为了克服这一局限，刘涛[24]设计的温室电磁导航机器人采用了组合式电磁传感器组，以增强机器人的可靠性和抗干扰能力，如图3所示；管泽峰等[25]提出了一种创新的协同跟随式温室作业机器人设计方案。该方案引入了模糊比例—积分—微分(proportional integral derivative，PID)控制算法，使机器人能够沿着预设轨迹实现自主导航，同时结合了超声波传感器和红外传感器组成的测距系统，显著增强了机器人的避障能力。这一设计不仅提升了机器人在复杂温室环境中的导航精度，还增强了其在多变环境下的适应性。综上，磁导航相较于固定轨道更加简单和灵活，自主移动装备可以根据实时环境信息作出调整。



图3　温室电磁导航机器人

Figure 3　Greenhouse electromagnetic navigation robot

1.2.2　激光循迹

激光循迹利用激光传感器探测地面标记或线路，引导自主导航平台沿特定路径移动。例如贾士伟等[26]提出了一种基于激光测距仪的温室机器人道路边缘检测和路径导航方法，该方法创新性地利用激光测距仪获取道路边缘信息，并结合改进的蚁群算法进行路径规划，机器人导航场景如图4所示；ZHAO等[27-28]提出激光雷达、深度相机和惯性测量单元融合的测距框架提升了激光循迹的定位鲁棒性，同时设计匹配半径可变和自适应初始化的迭代最近点算法，可以提升自主行走装备在温室内实时定位准确度；NAKAO等[29]设计的农药喷洒机器人通过激光雷达、摄像头和红外线检测器等检测出墙壁和作物的形状和距离信息，以此实现定位和路径规划，提高了杀虫可靠性和效率，有效地减少了农药的使用量。激光循迹的优势在于激光传感器精度高、实时性强，但易受到光照变化的干扰。



图4　温室激光循迹式导航机器人

Figure 4　Greenhouse laser tracking navigation robot vision navigation system

1.2.3　视觉循迹

视觉循迹主要包括两种策略：一种是基于相机识别导航标签的方法，另一种是基于Hough变换的方法。导航标签易于铺设，对光照干扰具有较强的抗性，但温室环境中，需要铺设大量标签，从而增加了维护成本。例如王鹏等[30]开发了一种相机识别二维码辅助定位的设施农业喷雾机器人，如图5所示。机器人采用基于机器视觉的垄沟识别算法和模糊PID控制算法，实现自主跨垄作业，并在不同的速度下测试，最大横向和纵向偏差小于2.0 cm和3.5 cm。

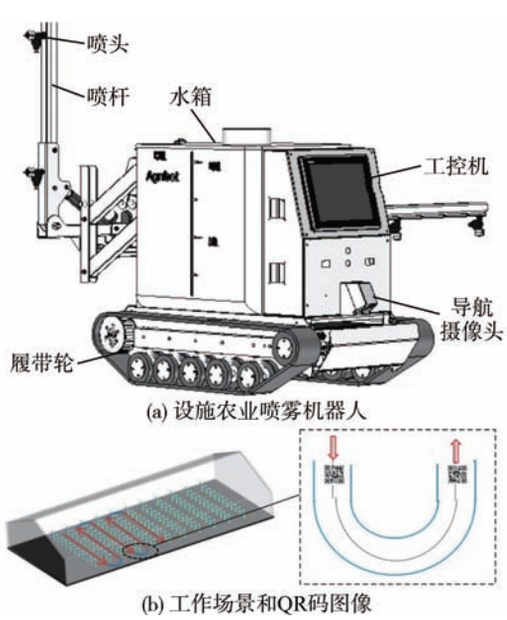


图5　基于导航标签的喷雾机器人

Figure 5　Spray robot based on navigation tag

基于Hough变换的视觉循迹方法以其简单方便和出色的抗干扰能力受到青睐。例如,NISSIMOV等[31]利用Kinect传感器获取深度图像和点云数据,深度图像用来分割前景和背景,点云数据用来估计障碍物的尺寸和位置,从而可以确定机器人的导航路径;JUANG等[32]为设施农业自主行走装备设计了一套基于深度学习的视觉跟踪算法,算法采用卷积神经网络和循环神经网络结合的架构,可实现对导航路径的识别和跟踪,装备可靠性得到了很大提升。李天华等[33]则通过摄像头云平台提取道路尽头的横向中心点像素坐标,从而获取导航信息。如图6所示,与传统的Hough变换相比,该方法在导航线的识别上具有更高的精度,平均识别偏差为2.4 cm,检测速率达到240 ms/f,展现出了高精度和实时性的优势。然而,此方法在检测过程中主要关注路线的直线方向,可能会丢失直线的长度信息,并且受到光照条件的影响较大,难以确保全天候的稳定运行。为了克服这些挑战,一些学者进行了深入研究。CHEN等[34]提出了一种基于中值点Hough变换的导航路径提取算法,该算法首先利用温室环境中的激光雷达点云数据提取并拟合出线段,然后使用中值点Hough变换来检测线段中的中值点,最后利用这些中值点来拟合导航路径。张群等[35]则提出了一种新的方法,将RGB图像转换为三通道图像的a通道,并对其进行灰度化,之后应用形态学方法、分水岭算法及Hough变换来进行图像的分割和路径提取。在0.5 m/s和1 m/s的速度测试中,机器人最大和最小的位移偏差均控制在20 cm以内,为视觉循迹技术的发展提供了新的思路。



图6 基于Hough变换视觉导航系统的温室运输车

Figure 6 Greenhouse transport vehicle based on Hough transform visual navigation system

视觉循迹式行走装备有两种导航方式,且各有其优缺点。基于相机识别导航标签的视觉循迹,具有易于铺设的优势,但同时也存在着大量标签的维护成本高的缺点。而基于Hough变换的视觉循迹,则具有简单方便和抗干扰能力强的优点,但也存在易丢失直线的长度信息和受光照影响大的缺点。

1.2.4 无线循迹

基于无线技术的定位导航主要包括超声波、超宽带(ultra wide band,UWB)以及射频识别等[33]。这些技术的原理、优势与局限性已在表1中详细列出。

表1 无线定位技术原理及优缺点

Table 1 Wireless positioning technology principle and advantages and disadvantages

无线定位技术	工作原理	优点	缺点
超声波	导航装备接收超声波传感器收发的距离信息确认自身位置	不受电磁干扰,易于实现避障	需要部署足够多的超声波传感器,否则精度不够
超宽带	通过基站的脉冲传输信号确认位置	功耗低,抗干扰能力强	需要配备各种额外的装备,成本高
射频识别	收发射频信号进行非接触式信号实现装备位置估计	可自动识别,操作方便	抗干扰能力差,定位误差大,大范围设施场景需要部署大量标签

通过融合这些无线技术,可以有效弥补单一无线定位方式的不足。然而,这种融合方法需要在设施场景内部署多种传感设备,对传感器的数量需求较高,因此增加了总体成本。例如,SHIIGI等[36]提出一套基站补偿系统,该系统在装备和温室安装多个超声波传感器和基站,调整温室环境中的温度变化对基站时间差的影响,定位偏差为0.1~0.5 m;姚立健等[37]提出了一种基于UWB的室内机器人路径跟踪方法。该方法利用UWB技术的高精度测距能力,实时估计机器人的位置和姿态,并通过反馈控制算法引导机器人沿着预定的路径运动,其在直线追踪和矩形追踪试验中,平均偏差分别为6.3 cm和20.6 cm,为机器人自主导航和移动操作提供了高精度的解决方案。PRETER等[38]开发了一种用于草莓收获的机器人系统,如图7所示。该系统采用UWB技术进行定位,其在0.35 m/s的速度下导航平均偏差为0.15 m。此外,王勇等[39]提出了一种基于UWB/惯性测量单元组合导航的室内定位算法,该算法融合了UWB和惯性测量单元的数据,行走偏差不超6 cm,航向角偏差不超过5°,使得自主移动装备的导航精度得到了很大提升;TSAY等[40]提出了一类温度补偿式射频识别定位系统,在不借助温度传感器下可以高精准、低成本地实现自主导航装备在温室内的定位和导航,定位平均准确度为0.05 m。



(a) UWB导航锚　(b) 机器人采摘场景

图 7　温室内安置的 UWB 导航锚和机器人采摘场景

Figure 7　UWB navigation anchors and robot picking scene in greenhouse

1.3　基于 SLAM 技术的多源数据融合式导航

基于 SLAM 技术的多源数据融合式导航分为视觉 SLAM 和激光 SLAM 导航[41-42]。这种融合处理巧妙地集成了激光雷达、相机、编码器、陀螺仪等多种传感器信息，实现了高度环境适应性的自主导航，能够实时导航并避障，无须铺设固定轨道。

国外对于多源数据融合式导航技术的研究起步较早。MOHD 等[43]研制的温室植保机器人，如图 8 所示。该机器人使用二维激光雷达构建虚拟温室环境地图，并应用基于参考点的非支配排序遗传算法，实现机器人路径规划，从而完成植物的喷药作业。MASUZAWA 等[44]设计了一种同时具备跟踪导航和定位建图能力的移动收获平台。该平台使用实时增量图构建和定位映射（real-time appearance-based mapping，RTABMAP）算法构建导航地图，并采用了 YOLO 算法作为避障检测方法，并开发出一种规划方法，可以控制移动平台沿着检测到的目标物的轨迹移动，确保位置误差在 5 cm 以内。XIONG 等[45]研制的多隧道草莓连续采摘自主移动平台，结合激光雷达和轮式编码器获取得到的环境信息和运动信息，调用激光雷达里程计和建图优化算法构建环境地图，并在生成的点云地图上完成路径规划和导航的任务。ABANAY 等[46]设计了一套嵌入式感知系统的农业移动机器人“AgriEco 机器人”，主控系统采用基于二维激光雷达的机器人操作系统。对采集到的二维激光雷达处理后，生成环境地图并估计机器人运动偏移量。AGUIAR 等[47]采用半平面分割算法处理三维激光雷达点云，点云经匹配分类出点特征和面特征，并绘制出设施地图，使用粒子滤波器，实现定位，地图平均偏差为 0.15 m，最大偏差为 0.3 m。

随着自主移动装备技术的快速发展，国内众多学者纷纷投入该领域的研究。例如，季宇寒等[48]设计了一套基于激光雷达的巡检机器人导航系统，该系统通过融合激光雷达、惯性测量单元和里程计数据的方式实现姿态估计，通过 Gmapping 算法构建环境地图，在实际巡检场景中定位误差保持在 10 cm 左右。侯加林等[49-50]设计的双激光雷达温室运输机器人，如图 9 所示，基于 Cartographer 算法使用前后双激光雷达进行定位建图，A*算法作为全局路径规划算法，动态窗口算法作为局部路径规划算法。试验表明，构建地图时使用双激光雷达比单个激光雷达具有更高的建图效率和实时避障能力，机器人的导航精度满足温室运输机器人的导航定位需求。此外，胡焉为等[51]提出了一套基于信标识别定位的 SLAM 算法，该算法利用温室环境中的信标信息辅助 SLAM 算法定位，提高了系统定位精度和鲁棒性。在实际温室环境中，该算法定位误差始终小于 5 cm。这些研究不仅展示了 SLAM 技术在不同设施场景中的应用潜力，也为未来的研究和应用提供了宝贵的参考。



图 8　温室植保机器人

Figure 8　Greenhouse plant protection robot



图 9　双激光雷达温室运输机器人

Figure 9　Dual LiDAR greenhouse transport robot

2　多源数据融合式导航相关技术

2.1　实时定位与地图构建技术

实时定位与地图构建技术，作为基于 SLAM 技术的多源数据融合式导航体系的核心组成部分，为自主移动装备提供了精准的定位信息与参考地图。这一技术使得机器人能够在未知环境中自由移动，通过比对地图特征的相似信息，精确估计自身位置与姿态，进而逐步构建详尽的地图[52-53]。这一过程中，机器人的位姿数据被持续优化，以实现更精确地定位与地图构建。SLAM 技术的核心流程如图 10 所示，其关键在于如何在无误差的前提下实现精准地图的精确定位。通过迭代计算，这一问题得到了有效解决。SLAM 技术的工作流程涉及从环境中获取输入，以更新机器人的位置信息，同时提取环境特征并将其存储在内存中。当机器人在环境中移动时，它会重新观察这些特征，并根据传感器当前的观测结果，对收集到的位姿和地图数据进行优化[54]。

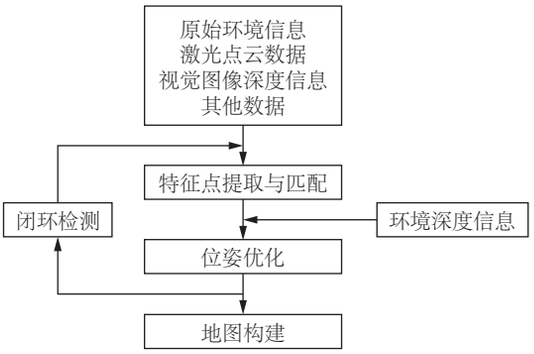


图 10 SLAM 算法的流程图

Figure 10 Flow chart of SLAM algorithm

按照使用的传感器类型将 SLAM 技术分为视觉 SLAM[55-56]、激光 SLAM[57]和融合 SLAM[58]。

2.1.1 视觉 SLAM

视觉 SLAM 技术通过输入的图像进行特征提取与匹配,或者直接利用图像灰度值进行数据关联,从而计算出视觉里程计。经过后端优化处理,最终生成点云地图。其中,典型的视觉 SLAM 算法包括基于特征点的带方向的 FAST 关键点和旋转 BRIEF 描述子 SLAM(oriented fast and rotated brief simultaneous localization and mapping second version, ORB-SLAM2)算法和大尺度直接式 SLAM(large-scale direct monocular SLAM, LSD-SLAM)算法。例如,MUR-ARTAL 等[59]对 ORB-SLAM2 进行了改进,延续了单目视觉 SLAM 系统的算法框架。在前端,该算法提取方向性快速特征检测和旋转的二进制鲁棒独特性描述符特征进行帧间匹配,并增加了一个词袋模型闭环检测的线程。如图 11 所示,这使得算法能够在特征缺失的情况下使用,但回环检测和丢失后的重定位较为困难。ENGEL 等[60]使用的 LSD-SLAM 算法在前端直接利用图像和关键帧的像素求解相机位姿和地图点云。如图 12 所示,这种方法省去了特征匹配的时间,但对变量的初始值要求较高,其建立点云地图的稳定性相对 ORB-SLAM2 算法而言有所不足。



图 11 ORB-SLAM2 构建稀疏点云地图

Figure 11 Constructing sparse point cloud map with ORB-SLAM2

视觉 SLAM 因使用的视觉传感器体积小巧、价格低,是目前 SLAM 技术研究的热点之一。但视觉 SLAM 多应用于室内场景,在温室场景内会受到噪声的影响,为此视觉 SLAM 未来在应用中需和惯性测量单元、激光雷达等传感器融合,增强平台定位和导航精度,实现优势互补。

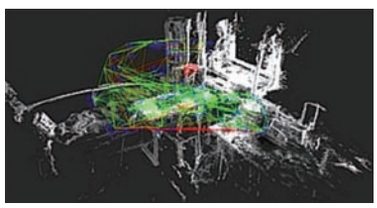


图 12 LSD-SLAM 构建出的点云地图

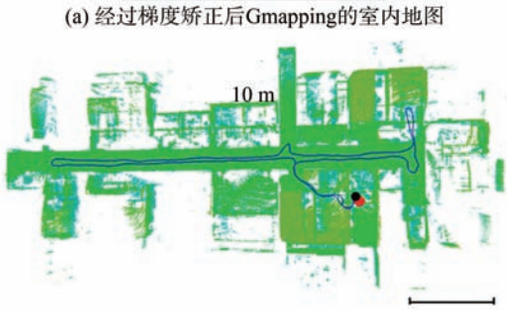
Figure 12 Sparse point cloud map with LSD-SLAM

2.1.2 激光 SLAM

激光 SLAM 技术通过激光雷达获取环境中的距离和几何信息,进而推断传感器的位置并实时更新环境地图。根据激光雷达发射的线束数量,激光 SLAM 算法被划分为二维和三维两类。当前,应用最为普遍的二维 SLAM 算法是 Gmapping 算法和 Cartographer 算法。李亚伟[61]在 Gmapping 算法的基础上,提出了一种粒子过滤器定位和矫正梯度细化算法,显著减少了构建地图所需的粒子数量和运行时间,生成的地图如图 13(a)所示。而 DAI 等[62]则在 Cartographer 算法的基础上,提出了离线“粗—精”精度优化算法和新的位姿图验证方法,使得算法的点云平均点到点距离均方根误差降低了 47.3%,平均面到面距离减少了 50.9%。尽管如此,当前的点云匹配算法仍有待提高匹配效率,其生成的地图如图 13(b)所示。二维 SLAM 算法虽然在空间较小的室内环境能实现较好的建图效果,但在规模较大的温室内,其建图误差会明显增大。



(a) 经过梯度矫正后Gmapping的室内地图

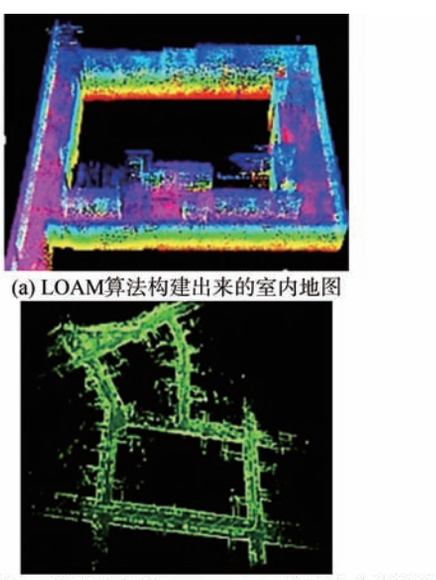


(b) 经过离线粗—精精度优化的Cartographer

图 13 二维 SLAM 算法构建的地图

Figure 13 Map constructed by two-dimensional SLAM algorithm

三维SLAM算法采用多线激光雷达进行地图构建，能够捕捉并处理更加详尽且真实的环境信息。这种算法鲁棒性更强，即便在复杂温室地形中也能展现出色的适应性和稳定性。同时，它在定位和建图方面的精确度极高，不过对自主行走系统上位机的性能要求也相对较高。目前主流的三维SLAM算法大多基于激光雷达里程计和建图（LiDAR odometry and mapping，LOAM）算法进行改进。例如，ZHANG等[63]在LOAM算法的基础上，采用低漂移、低计算负担、六个自由度移动的里程计和激光扫描雷达，以生成地图，如图14(a)所示。在高频情况下，该算法利用里程计信息校正点云畸变，而在低频情况下，则进行点云匹配并创建地图，使得温室内使用该算法建图精确度达1%。SHAN等[64]则使用LeGO-LOAM算法构建点云地图，该算法在LOAM算法的基础上，通过优化地面点云的分割和处理步骤，以及引入两部优化的列文伯格—马夸特算法（levenberg-marquadt，L-M）姿态估计，显著提高了算法的运行效率，其生成的地图如图14(b)所示。



(a) LOAM算法构建出来的室内地图

(b) 使用了L-M姿态室内地LeGO-LOAM算法构建的地图

图14　三维SLAM算法构建的地图

Figure 14　Map constructed by three-dimensional SLAM algorithm

2.1.3　融合SLAM

融合SLAM算法将不同类型的传感器数据进行融合，利用这些数据完成实时定位和地图构建。这种方法不仅提高了算法的鲁棒性，减少了数据丢失和漂移，还使得系统能够更好地适应复杂多变的设施场景。例如LABBÉ等[65]提出的RTABMAP算法，遵循着视觉SLAM的经典框架，包括前端里程计、后端优化和闭环检测，同时采用内管理机制来管理激光视觉传感器的节点。这种方法确保了闭环检测和全局优化的顺利进行，从而构建出精确的点云地图，如图15所示。然而，该算法在计算量方面相对较大，当应用于大型地图（如温室场景）时，可能会面临内存消耗过大和运行效率降低的问题。QIN等[66]设计的视觉惯性里程计和建图（visual-inertial navigation system for simultaneous localization and mapping，VINS-SLAM）算法旨在解决高速运动或特征严重缺失条件下传统SLAM无法应对的问题。该算法通过深度相机和惯性测量单元的紧耦合数据融合，提供了更为精确的定位信息。然而，VINS-SLAM算法也存在一定的局限性，比如它可能无法适应光照多变、纹理较少的复杂环境，并且无法提供适用于导航的地图信息。

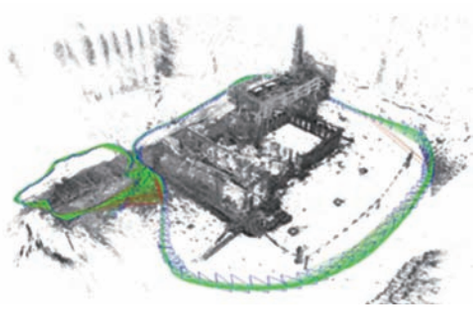


图15　RTABMAP构建的三维地图

Figure 15　A 3D map constructed using RTABMAP

综上，视觉SLAM和激光SLAM无法适应特征相似和空间庞大的设施场景，而融合SLAM可以合并激光雷达、相机等传感器的长处，做到优势互补，是未来自主移动装备SLAM建图技术的发展方向。

2.2　定位与路径规划算法

2.2.1　定位算法

在真实环境中的设施农业自主移动装备导航问题中，即便已经设定了起始点A和目标点B，系统依然面临不可预测性。为了确保导航的顺利进行，装备需要依赖实时的反馈信号来调整其行进路线。这一反馈信号主要来源于系统在地图上的精准定位数据。通过定位，装备能够明确自身与周围障碍物之间的关系，因为路径规划的核心正是基于这些障碍物的布局和分布进行决策。定位算法分为局部定位和全局定位两种。局部定位方法主要适用于在已知大致位置的情况下，通过感知传感器数据对位置进行微调。然而，这种方法可能会因为累积误差而影响定位的精确性。相比之下，全局定位则致力于在整个环境中实现导航装备的精确位置估计，以提供更为可靠和准确的导航信息。

局部定位通过借助外部设备，能够快速获取目标的绝对位置，进而为全局定位和路径规划提供初始位置数据。然而，这种定位方式在长时间运行下可能会

积累较大的误差。目前,射频识别定位、超宽带定位以及扩展卡尔曼融合定位等方法已被广泛应用[67-68]。为解决惯性测量单元出现漂移和噪声,UWB定位会受多路径效应干扰的问题,从而提升自动导航农机的定位精度和可靠性,HAN等[69]和FENG等[70]通过扩展卡尔曼滤波器实现惯性测量单元和UWB定位数据的融合,其在室内进行试验后定位偏差小于0.5 m。另外,岳康[71]设计的导航系统通过射频信号自动识别目标对象并获取当前系统的位置信息,同时还能和超声波测距等技术进行融合,提高系统鲁棒性和稳定性,不过该系统需要在温室内布置大量基站,导致成本过高。

在自主移动装备的长期运行中,局部定位会不可避免地累积误差,这就需要全局定位来精确校准装备在地图中的实际位置,从而消除这些误差。全局定位的可靠性直接关系到导航任务的成功与否。目前,自适应蒙特卡罗定位(adaptive Monte Carlo localization,AMCL)算法已成为业界领先的定位技术,然而,初始位置的选择以及适应复杂环境的能力仍是其面临的关键挑战。MONTEMERLO等[72]提出的蒙特卡罗定位算法创新性地将定位问题转化为概率问题,并运用蒙特卡罗采样与粒子滤波技术,通过机器人的移动使粒子逐渐收敛,从而精准确定全局位置。虽然该算法简单高效,能够实现出色的定位效果,但仍无法处理环境突然变化导致定位失真等这类特殊情况,导致在实际应用中仍可能出现定位失败的情况。为解决这个问题,KUANG等[73]将神经占据场模型代入到全局定位系统中,通过神经网络生成扫描环境地图来代替传统的栅格地图,搭配蒙特卡洛定位算法可实现自主导航平台更精确的定位,和栅格地图模型相比,定位准确度提升了4.56%。

2.2.2 路径规划算法

路径规划是导航系统不可或缺的基础组成部分,它通常在预设的栅格地图上进行。如图16所示,自主移动装备需遍历整个栅格地图,以寻找从起点A到终点B的多种可能路径,如L_1或L_2所示,这些路径并非唯一。在实际导航过程中,不仅要确保找到可通行的路径,还需综合考虑路径长度、平滑度、潜在的碰撞风险以及各类附加约束等性能因素,以确保导航过程既高效又安全。

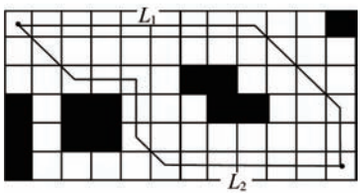


图16 栅格地图全局路径规划

Figure 16 Global path planning of raster map

针对自主移动装备的路径规划问题,主要可以分为全局和局部路径规划两方面[74]。在进行全局路径规划时,需要全面考虑整个环境,目标是规划出一条尽可能短且易于执行的路径。而在实际行走过程中,自主行走系统不仅需要遵循全局路径的指导,还需要实时感知周围的障碍物,并据此制定合适的避让策略。这正是局部路径规划所要承担的任务。

目前,全局路径规划领域主要涵盖了智能搜索算法与基于几何模型的路径算法两大类。智能搜索算法中,蚁群算法、遗传算法和粒子群优化(particle swarm optimization,PSO)等算法备受瞩目;而基于几何模型的路径算法则以A*算法和快速扩展随机树(rapidly-exploring random tree,RRT)等为代表。这些算法的原理、优势与不足详见于表2。

表2 全局路径规划算法原理和优缺点

Table 2 Principles,advantages and disadvantages of various global path planning algorithms

全局路径规划算法		原理	优势	不足
智能搜索算法	蚁群算法	模仿蚂蚁寻找食物的行为	适用于动态环境,抗干扰能力强	易陷入局部最优解,收敛速度慢
	遗传算法	模拟生物朝着更加“适应”方向发展的搜索最优解方法	路径搜索的灵活性强	计算速度较慢,路径拐点过多,计算效率低
	粒子群算法	模仿鸟类寻找食物的行为	能适应复杂高维的环境	导航转弯时存在问题
几何模型路径规划算法	A*算法	$f(n)=g(n)+h(n)$	效率高,搜索路径直观简洁	运算时间长,计算效率随计算节点增加而下降
	RRT算法	随机树生成	算法搜索路径速度较快	复杂环境下易陷入死区和局部最小值

智能搜索算法通常使用图搜索或采样技术来探索环境并找到从起点到终点的路径。智能搜索算法可以融合其他算法实现性能提升,例如,NAZARAHARI等[75]针对遗传算法初始位置迭代不够精确的问题,提

出多目标遗传算法和模拟退火相结合的方法，使用该算法的导航平台可以更快速地找出无碰撞路径。AJEIL 等[76]提出将衰老机制和栅格地图引入到蚁群算法中，可使移动平台能在动态和静态环境进行高效的路径规划，和原始蚁群算法相比，路径长度降低了17%。罗阳阳等[77]采用了一种基于混沌的粒子初始化策略改进 PSO 算法，可防止算法陷入局部最优解，使收敛速度提高了约 13.3%，路径长度降低了 6.5%。

智能搜索算法因搜索空间的复杂性和参数设置的随机性导致收敛速度很慢，为此众多研究者已经对不同的智能搜索算法的改进进行了深入探讨。例如，张强等[78]针对蚁群算法易陷入局部优化和收敛速度较慢的问题，优化了信息素更新策略，使其覆盖率提升至 73.63%，超越了原始算法的表现。另外，刘建华等[79]将势场法的全局寻优能力与蚁群算法的局部寻优能力相结合提升蚁群算法性能，加快了算法的收敛速度，使机器人能更快速地适应环境变化。同时，改进后的算法收敛速度显著提升，迭代次数减少了近一半。SONG 等[80]提出了一种基于连续高阶贝塞尔曲线平滑处理路径的粒子群算法，改进后的算法具有路径平滑度高、跟踪精度好、计算效率高等优点，但在实际应用中仍需考虑初始粒子群和复杂环境的影响。此外，陈嘉林等[81]提出了一种基于种群进化状态的自适应粒子群算法，该算法采用了一种基于速度的粒子更新策略来提高 PSO 算法收敛速度，同时引入自适应学习因子来动态调节算法的迭代次数，提高算法的鲁棒性。同时，徐力等[82]采用自适应交叉概率和变异概率策略改进遗传算法，可以根据算法的迭代次数动态调整遗传操作的概率，从而提高算法的收敛速度和解的质量，改进后的算法迭代次数减少至 100 次，收敛时间缩短至 7.25 s。QU 等[83]为解决遗传算法收敛性差的问题，提出将每个机器人的路径规划问题被作为一个子问题，并同时进行求解，有效避免了局部最优问题，并显著提升了算法的收敛速度。

几何模型路径规划，在获取的环境地图上构建几何模型，基于最优策略实时调节获取最优路径。然而，这些路径往往呈现出非光滑特性，因而需要进行进一步的优化，以确保移动机器人能够实现平滑拐弯。针对这一问题，已有许多学者进行了深入的研究。例如，HU 等[84]基于深度强化学习提出泰森多边形分区的多机器人探索算法，可在未知环境下实现高效的探索，提升 A*算法的探索能力和效率。实验结果表明，和传统路径算法相比，自主导航装备探索速度提升了 30% 以上。刘子豪等[85]对 A*算法进行改进，通过结合分层搜索策略和改进启发式函数的方式，有效减少了搜索空间并提高了路径规划的质量。张新艳等[86]则基于网格的障碍物表示和修改启发式函数的方式改进 A*算法，在仿真实验中该算法表现出路径长度短、计算效率高、鲁棒性好的优点，无人自走小车电能利用率达到了 89.1%。张文等[87]在 A*算法的启发式函数中引入方向信息和障碍物信息，并采用分层搜索策略，在仿真实验中，改进后 A*算法的平均路径长度比起原算法减少了 10% 以上，平均计算时间减少约 20%。此外，DENG 等[88]针对传统路径规划算法在全局地图依赖和采样随机性方面的不足，提出了一种动态路径规划算法。该算法仅需要局部信息即可规划短距离路径，同时能够保留先前的任务信息以规划长距离路径。这不仅使小车路线更加平滑，还显著缩短了行走时间。WANG 等[89]则提出了一种双向快速探索随机树方法，该方法不仅保留了双向搜索和高效分支修剪策略的优势，还能够在生成更短路径的同时节省计算资源。这些研究都为几何模型路径规划的优化提供了有益的参考和启示。

全局路径规划算法往往未能充分考虑到温室自主行走系统在真实运行环境中可能遭遇的动态障碍物、突发状况或地形细微变化[90-91]。为确保在实际导航过程中有效规避这些障碍，局部路径规划算法的应用变得至关重要。它能够实时调整原先的全局规划路径，以适应不断变化的环境条件。目前具有代表性的局部规划算法的原理、优势与不足详见表 3。为了解决机器人在不同速度和面对多样障碍物时路径规划的难题，DAS 等[92]提出临界点 BUG 算法，使用超声波传感器获取与障碍物间的距离，并且允许自主行走装备在有障碍物进入路径或障碍物在新路线中移动时纠正路径。LIU 等[93]提出了一种基于双势场融合的自适应路径规划系统，该系统同时考虑了目标点的吸引力和障碍物的排斥力，通过融合这两个势场来生成一条既能避开障碍物又能快速到达目标点的路径，使用该系统生成的平均路径长度可减少 10%，平均计算时间可减少 15% 。HOU 等[94]提出了一种改进型动态窗口法用于移动机器人的实时路径规划，算法经权重调整、采样方法改进、启发函数添加等方法改进后，移动机器人可以更有效地规避障碍物，并且不会陷入局部最小值的问题。此外，劳彩莲等[95]运用超声波传感器精准捕捉移动机器人的作业环境信息，通过动态窗口法对局部运动轨迹进行精准预测。利用评价函数从预测的轨迹线簇中筛选出最优轨迹，确保导航误差控制在 0.22 m 以内，定位误差不超过 0.28 m，显著提升了导航和定位的精准度。

表3 局部路径规划算法原理和优缺点

Table 3 Principles, advantages and disadvantages of various local path planning algorithms

局部路径规划算法	原理	优势	不足
BUG算法	相机帧间图像匹配确定路径	仅使用触觉传感器获取有关周围环境的局部信息,而无需了解全局情况	未充分考虑机器人的转弯半径,路径不平坦
人工势场算法	机器人自身受到的排斥力和吸引力的合力来改变路径	无须全局搜索,鲁棒性强	合力为0时,陷入局部最优解
动态窗口算法	在当前时刻对周围进行采样,获取得下一时刻的机器人动作状态	实时性高,可以和其他算法搭配	高度依赖于全局参数

3 发展趋势与展望

近年来,随着农村劳动力短缺、农村人口老龄化、气候变化等问题日益严重,传统低效率的农业耕作方式受到巨大冲击,也给设施农业的发展带来了机遇。设施农业作为推动自主可控、低成本高质量发展的农业机械产业生态的重要一环,开发出适用于该场景的自主移动装备至关重要。

设施农业自主移动装备的导航方式正从传统的导轨式、循迹式转向基于SLAM技术的多源数据融合式的转变。这种新型导航方式不仅摒弃了铺设导轨、磁条等烦琐步骤,更通过数据融合和先进的导航避障算法,实现了更为灵活和智能的路径规划与自主运动。这一变革预示着基于SLAM技术的多源数据融合式导航将成为未来设施农业自主移动装备导航的主流趋势。实时定位与地图构建、精确定位以及高效路径规划等关键领域的研究将持续深化,为这一导航方式注入更多活力。针对当前自主移动装备导航技术的发展态势,可以提出以下几点展望:

1)高精度定位与地图构建:当使用单一的传感器进行SLAM建图的前端匹配定位时,可能会因为设施特征的缺失而导致结果不稳定。因此,为了提升定位的精确性和鲁棒性,未来多源数据融合式导航技术需致力于开发精确且高效的融合SLAM算法。这种算法应能够结合各类传感器的独特优势,以弥补视觉SLAM和激光SLAM各自的局限性。

2)复杂场景智能识别和理解:人工智能技术将在设施农业自主移动装备导航中发挥越来越重要的作用。通过深度学习、机器学习等技术,装备能够实现对复杂场景的识别与理解,如识别农作物、障碍物、地形等。同时,通过云计算与边缘计算技术,为自主移动装备提供更高效的数据处理和分析能力。

3)自主决策和路径规划:自主移动装备可将全局路径规划和局部路径规划相结合,以解决全局路径规划适用范围有限、局部路径规划反应速度慢的问题。同时,新技术也可应用到路径规划算法中,来提高路径规划的准确性、实时性和自主性,例如遗传算法和行为控制结合、人工势场法和神经网络结合等。

4)智能避障:在设施农业自主移动装备的研发过程中,智能避障技术的安全性与可靠性占据着举足轻重的地位。集成多传感器并结合先进的避障算法,同时采取提升硬件性能、加强系统维护的措施,可以实现装备安全、可靠的目标。

5)多任务协同:多机协同、人机协作是未来设施农业自主导航装备发展的一个重要方向。通过构建多机协同系统,引入人机交互技术,可以实现多个自主移动装备在同一作业区域内的协同作业,并实现人与自主移动装备之间的沟通协作,从而提升装备作业效率和适用性。

参 考 文 献

[1] 李飞, 曾福生. 农业基础设施促进农业经济增长的文献综述[J]. 农业经济与管理, 2016, 7(2): 87－94.
LI Fei, ZENG Fusheng. A literature review about agricultural infrastructures to promote the agricultural economic growth [J]. Agricultural Economics and Management, 2016, 7(2): 87－94.

[2] 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.

[3] 中华人民共和国国务院. 国务院关于加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级的指导意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/2019－1/42/content_5355467.htm, 2019－01－10.

[4] 农业农村部 工业和信息化部 国家发展改革委 财政部. 关于在若干省份开展“一大一小”农机装备研发制造推广应用先导区建设的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2023-5/31/content_6884838.htm, 2023－05－31.

[5] 王飞涛, 樊春春, 李兆东, 等. 机器人在设施农业领域应用现状及发展趋势分析[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(3):

93－98, 120.
WANG Feitao, FAN Chunchun, LI Zhaodong, et al. Application status and development trend of robots in the field of facility agriculture [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3): 93－98, 120.

[6] 齐飞, 李恺, 李邵, 等. 世界设施园艺智能化装备发展对中国的启示研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 183－195.
QI Fei, LI Kai, LI Shao, et al. Development of intelligent equipment for protected horticulture in world and enlightenment to China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 183－195.

[7] GAO X Y, LI J H, FAN L F, et al. Review of wheeled mobile robots′ navigation problems and application prospects in agriculture [C]// IEEE Access, New York, USA, 2018: 49248－49268.

[8] 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 Mechanization, 2022, 43(3): 159－169.

[9] 王洪兵. 农业机械导航技术的发展与应用[J]. 南方农机, 2022, 53(23): 72－74.

[10] 兰玉彬, 闫瑜, 王宝聚, 等. 智能施药机器人关键技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2022, 38(20): 30－40.
LAN Yubin, YAN Yu, WANG Baoju, et al. Current status and future development of the key technologies for intelligent pesticide spraying robots [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(20): 30－40.

[11] 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.

[12] LUCIANO C, FILIPPO B, DOMENICO L, et al. A small versatile electrical robot for autonomous spraying in agriculture [J]. AgriEngineering, 2019, 1(3): 391－402.

[13] 冯青春, 王秀. 温室智能装备系列之五十 温室多功能轨道运载平台设计[J]. 农业工程技术(温室园艺), 2013, 2(8): 62.

[14] BAC C W, ROORDA T, RESHEF R, et al. Analysis of a motion planning problem for sweet-pepper harvesting in a dense obstacle environment [J]. Biosystems Engineering, 2016, 146: 85－97.

[15] 赵亚聪, 张国栋, 蔡峰. 温室悬挂喷灌机特点和选用分析[J]. 农业工程技术, 2019, 39(7): 15－18.

[16] 李良, 张文爱, 冯青春, 等. 温室轨道施药机器人系统设计[J]. 农机化研究, 2016, 38(1): 109－112, 118.
LI Liang, ZHANG Wen′ai, FENG Qingchun, et al. The research and design on decision support system for agricultural machinery depreciation [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(1): 109－112, 118.

[17] 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.

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

[19] 李进海, 王昱潭, 杨术明, 等. 温室自走式自动喷雾机的研制[J]. 河南农业科学, 2016, 45(7): 137－142.
LI Jinhai, WANG Yutan, YANG Shuming, et al. Design of self-contained automatic spray machine for greenhouse [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(7): 137－142.

[20] 张晓文, 卜云龙. 温室用智能移动喷灌机的设计与推广[J]. 农业技术与装备, 2007, 4(2): 4－6.

[21] 张二鹏, 马锃宏, 耿长兴, 等. 温室悬挂喷施机跨垄作业控制系统设计[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(6): 170－174.
ZHANG Erpeng, MA Zenghong, GENG Changxing, et al. Control system for automatic track transferring of greenhouse hanging sprayer [J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(6): 170－174.

[22] 许童羽, 冯帅, 陈春玲, 等. 日光温室自主寻迹喷药车设计方法研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(4): 440－446.
XU Tongyu, FENG Shuai, CHEN Chunling, et al. Research on design method of self tracking spray vehicle in solar greenhouse [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, 49(4): 440－446.

[23] 韩涛国, 谷志新, 涂文宇, 等. 基于云计算的温室巡检机器人[J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49(4): 40－43.
HAN Taoguo, GU Zhixin, TU Wenyu, et al. Greenhouse inspection robots based on cloud computing [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2021, 49(4): 40－43.

[24] 刘涛. 视觉信息辅助的室内建图与行人导航方法研究[J]. 测绘学报, 2019, 48(6): 804.
LIU Tao. Visual-aided indoor mapping and pedestrian navigation research [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(6): 804.

[25] 管泽峰, 王新忠. 磁导式温室协同作业移动平台控制系统设计与实现[J]. 农机化研究, 2018, 40(9): 120－124.
GUAN Zefeng, WANG Xingzhong. Design and

implementation of motion control system for magnetic greenhouse information monitoring platform [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40 (9): 120－124.

[26] 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, 2015, 31(13): 39－45.

[27] ZHAO Z X, ZHANG Y C, LONG L, et al. Efficient and adaptive LiDAR-visual-inertial odometry for agricultural unmanned ground vehicle [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2022, 19(2): 1－15.

[28] ZHAO Z X, ZHANG Y C, SHI J L, et al. Robust LiDAR-inertial odometry with ground condition perception and optimization algorithm for UGV [J]. Sensors, 2022, 22(19): 7424.

[29] NAKAO N, SUZUKI H, KITAJIMA T, et al. Path planning and traveling control for pesticide-spraying robot in greenhouse [J]. Journal of Signal Processing, 2017, 21(4): 175－178.

[30] 王鹏, 耿长兴, 王蓬勃. 设施农业喷雾机器人的组合视觉导航方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 307－312.
WANG Peng, GENG Changxing, WANG Pengbo. Visual navigation method of agro-spraying robot based on navigation line and QR code combination [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2019, 40(3): 307－312.

[31] NISSIMOV S, GOLDBERGER J, ALCHANATIS V. Obstacle detection in a greenhouse environment using the Kinect sensor [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 113: 104－115.

[32] JUANG L H, ZHANG J S. Robust visual line-following navigation system for humanoid robots [J]. Artificial Intelligence Review, 2020, 53(1): 653－670.

[33] 李天华, 吴增昊, 廉宪坤, 等. 基于定向摄像头的大拱棚运输车视觉导航研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 8－13.
LI Tianhua, WU Zenghao, LIAN Xiankun, et al. Navigation line detection for greenhouse carrier vehicle based on fixed direction camera [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 8－13.

[34] CHEN J Q, 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.

[35] 张群, 宋健, 曹高华, 等. 视觉导航温室机器人路径识别算法与实验[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(5): 14－16, 41.
ZHANG Qun, SONG Jian, CAO Gaohua, et al. Path recognition algorithm and experiment of greenhouse robot by visual navigation [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2018, 37(5): 14－16, 41.

[36] SHIIGI T, KONDO N, OGAWA Y, et al. Temperature compensation method using base-station for spread spectrum sound-based positioning system in green house [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2017, 10(3): 233－242.

[37] 姚立健, SANTOSH K Pitla, 杨自栋, 等. 基于超宽带无线定位的农业设施内移动平台路径跟踪研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 17－24.
YAO Lijian, SANTOSH K Pitla, YANG Zidong, et al. Path tracking of mobile platform in greenhouse based on ultra wideband wireless positioning [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 17－24.

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

[39] 王勇, 张新景, 史颖刚. UWB/陀螺仪组合的温室喷药机器人导航系统设计[J]. 信息技术与信息化, 2019, 22(6): 60－62.
WANG Yong, ZHANG Xinjing, SHI Yinggang. Design of navigation system of UWB/gyroscope combined greenhouse pesticide spraying robot [J]. Information Technology and Informatization, 2019, 22(6): 60－62.

[40] TSAY L W J, SHIIGI T, HUANG Z, et al. Temperature-compensated spread spectrum sound-based local positioning system for greenhouse operations [J]. IoT, 2020, 1(2): 147－160.

[41] CADENA C, CARLONE L, CARRILLO H, et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Towards the robust-perception age [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(6): 1309－1332.

[42] XU L C, FENG C, KAMAT V R, et al. An occupancy grid mapping enhanced visual SLAM for real-time locating applications in indoor GPS-denied environments [J]. Automation in Construction, 2019, 104: 230－245.

[43] MAHMUD M S A, ABIDIN M S Z, MOHAMED Z, et al. Multi-objective path planner for an agricultural mobile robot in a virtual greenhouse environment [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 488－499.

[44] MASUZAWA H, MIURA J, OISHI S. Development of a mobile robot for harvest support in greenhouse

horticulture－Person following and mapping [C]// 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). IEEE, 2017: 541－546. .

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

[46] ABANAY A, MASMOUDI L, ANSARI M E, et al. LiDAR-based autonomous navigation method for an agricultural mobile robot in strawberry greenhouse: AgriEco Robot [J]. AIMS Electronics and Electrical Engineering, 2022, 6(3): 317－328.

[47] AGUIAR A S, NEVES DOS SANTOS F, SOBREIRA H, et al. Localization and mapping on agriculture based on point-feature extraction and semiplanes segmentation from 3D LiDAR data [J]. Frontiers in Robotics and AI, 2022, 9: 832165.

[48] 季宇寒，李寒，张漫，等. 基于激光雷达的巡检机器人导航系统研究[J]. 农业机械学报，2018，49(2)：14－21.
JI Yuhan, LI Han, ZHANG Man, et al. Navigation system for inspection robot based on LiDAR [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 14－21.

[49] 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 navigation system for greenhouse transportation robot with dual LiDAR [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(14): 80－88.

[50] 蒲文洋. 基于前后激光雷达的温室机器人导航系统设计与试验[D]. 泰安：山东农业大学，2021.
PU Wenyang. Design and experiment of greenhouse robot navigation system based on front and rear LiDAR [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2021.

[51] 胡焉为，苗玉彬. 基于信标识别的温室AGV视觉SLAM定位算法[J]. 机电一体化，2018，24(10)：9－15.
HU Yanwei, MIAO Yubin. The improved visual SLAM algorithm for greenhouse AGV based on beacon detection [J]. Mechatronics, 2018, 24(10): 9－15.

[52] 吴建清，宋修广. 同步定位与建图技术发展综述[J]. 山东大学学报(工学版)，2021，51(5)：16－31.
WU Jianqing, SONG Xiuguang. Review on development of simultaneous localization and mapping technology [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(5): 16－31.

[53] DISSANAYAKE M W M G, NEWMAN P, CLARK S, et al. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(3): 229－241.

[54] DEMIM F, BOUCHELOUKH A, NEMRA A, et al. An adaptive SVSF-SLAM algorithm in dynamic environment for cooperative unmanned vehicles [J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(15): 394－399.

[55] 张国强，韩军，成坚炼，等. 融合激光雷达与视觉信息的小型障碍物测量方法[J]. 电光与控制，2021，28(2)：69－74.
ZHANG Guoqiang, HAN Jun, CHENG Jianlian, et al. A small obstacle measurement method based on fusion of LiDAR and visual information [J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(2): 69－74.

[56] HESS W, KOHLER D, RAPP H, et al. Real-time loop closure in 2D LiDAR SLAM [C]// 2016 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, 2016: 1271－1278.

[57] 周治国，曹江微，邸顺帆. 3D激光雷达SLAM算法综述[J]. 仪器仪表学报，2021，42(9)：13－27.
ZHOU Zhiguo, CAO Jiangwei, DI Shunfan. Overview of 3D LiDAR SLAM algorithms [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 13－27.

[58] 宗文鹏，李广云，李明磊，等. 激光扫描匹配方法研究综述[J]. 中国光学，2018，11(6)：914－930.
ZONG Wenpeng, LI Guangyun, LI Minglei, et al. A survey of laser scan matching methods [J]. Chinese Optics, 2018, 11(6): 914－930.

[59] MUR-ARTAL R, TARDÓS J D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(5): 1255－1262.

[60] ENGEL J, SCHÖPS T, CREMERS D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM [C]// European conference on computer vision. Cham: Springer International Publishing, 2014: 834－849.

[61] 李亚伟. 基于SLAM技术的高秆环境下小型植保车自主行驶系统研究[D]. 合肥：安徽农业大学，2020.
LI Yawei. Research on autonomous driving system of small plant protection vehicle in high pole environment based on SLAM [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.

[62] DAI J C, YAN L, LIU H, et al. An offline coarse-to-fine precision optimization algorithm for 3D laser SLAM point cloud [J]. Remote Sensing, 2019, 11(20): 2352.

[63] ZHANG J, SINGH S. Low-drift and real-time LiDAR odometry and mapping [J]. Autonomous Robots, 2017, 41(2): 401－416.

[64] SHAN T X, ENGLOT B. LeGO-LOAM: Lightweight and ground-optimized LiDAR odometry and mapping on variable terrain [C]// 2018 IEEE/RSJ International

Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018: 4758－4765.

[65] LABBÉ M, MICHAUD F. RTAB-Map as an open-source LiDAR and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation [J]. Journal of Field Robotics, 2019, 36(2): 416－446.

[66] QIN T, LI P L, SHEN S J. VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(4): 1004－1020.

[67] 严小意, 郭杭. 激光SLAM移动机器人室内定位研究[J]. 测绘通报, 2019(12): 8－11.
YAN Xiaoyi, GUO Hang. Research on indoor positioning of LiDAR SLAM mobile robot [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(12): 8－11.

[68] 周彦, 李雅芳, 王冬丽, 等. 视觉同时定位与地图创建综述[J]. 智能系统学报, 2018, 13(1): 97－106.
ZHOU Yan, LI Yafang, WANG Dongli, et al. Overview of visual simultaneous positioning with map creation [J]. Journal of Intelligent Systems, 2018, 13(1): 97－106.

[69] HAN Y Q, WEI C C, LI R, et al. A novel cooperative localization method based on IMU and UWB [J]. Sensors, 2020, 20(2): 467.

[70] FENG D Q, WANG C Q, HE C L, et al. Kalman-filter-based integration of IMU and UWB for high-accuracy indoor positioning and navigation [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(4): 3133－3146.

[71] 岳康. 基于有源RFID定位系统的设计与实现[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.
YUE Kang. Design and realization of location system based on active RFID [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2015.

[72] MONTEMERLO M, THRUN S, KOLLER D, et al. FastSLAM 2.0: An improved particle filtering algorithm for simultaneous localization and mapping that provably converges [C]// IJCAI. 2003, 3(2003): 1151－1156.

[73] KUANG H F, CHEN X Y L, GUADAGNINO T, et al. IR-MCL: Implicit representation-based online global localization [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(3): 1627－1634.

[74] 林韩熙, 向丹, 欧阳剑, 等. 移动机器人路径规划算法的研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(18): 38－48.
LIN Hanxi, XIANG Dan, OUYANG Jian, et al. Review of path planning algorithms for mobile robots [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(18): 38－48.

[75] NAZARAHARI M, KHANMIRZA E, DOOSTIE S. Multi-objective multi-robot path planning in continuous environment using an enhanced genetic algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2019, 115: 106－120.

[76] AJEIL F H, IBRAHEEM I K, AZAR A T, et al. Grid-based mobile robot path planning using aging-based ant colony optimization algorithm in static and dynamic environments [J]. Sensors, 2020, 20(7): 25－32.

[77] 罗阳阳, 彭晓燕. 基于改进PSO的四轮移动机器人全局路径规划[J]. 计算机仿真, 2020, 37(7): 373－379.
LUO Yangyang, PENG Xiaoyan. Global path planning of four-wheel mobile robot based on improved PSO [J]. Computer Simulation, 2020, 37(7): 373－379.

[78] 张强, 陈兵奎, 刘小雍, 等. 基于改进势场蚁群算法的移动机器人最优路径规划[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 23－32, 42.
ZHANG Qiang, CHEN Bingkui, LIU Xiaoyong, et al. Ant colony optimization with improved potential field heuristic for robot path planning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 23－32, 42.

[79] 刘建华, 杨建国, 刘华平, 等. 基于势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 18－27.
LIU Jianhua, YANG Jianguo, LIU Huaping, et al. Robot global path planning based on ant colony optimization with artificial potential field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 18－27.

[80] SONG B Y, WANG Z D, ZOU L. An improved PSO algorithm for smooth path planning of mobile robots using continuous high-degree bezier curve [J]. Applied Soft Computing, 2021, 100: 106960.

[81] 陈嘉林, 魏国亮, 田昕. 改进粒子群算法的移动机器人平滑路径规划[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(12): 2550－2555.
CHEN Jialin, WEI Guoliang, TIAN Xin. Smooth path planning for mobile robots based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(12): 2550－2555.

[82] 徐力, 刘云华, 王启富. 自适应遗传算法在机器人路径规划的应用[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(18): 36－41.
XU Li, LIU Yunhua, WANG Qifu. Application of adaptive genetic algorithm in robot path planning [J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(18): 36－41.

[83] QU H, XING K, ALEXANDER T. An improved genetic algorithm with co-evolutionary strategy for global path planning of multiple mobile robots [J]. Neurocomputing, 2013, 120: 509－517.

[84] HU J, NIU H, CARRASCO J, et al. Voronoi-based

multi-robot autonomous exploration in unknown environments via deep reinforcement learning [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 14413－14423.

[85] 刘子豪, 赵津, 刘畅, 等. 基于改进A*算法室内移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(2): 186－190.
LIU Zihao, ZHAO Jin, LIU Chang, et al. Path planning of indoor mobile robot based on improved A* algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(2): 186－190.

[86] 张新艳, 邹亚圣. 基于改进A*算法的自动导引车无碰撞路径规划[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(1): 240－246.
ZHANG Xinyan, ZOU Yasheng. Collision-free path planning for automated guided vehicles based on improved A* algorithm [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2021, 41(1): 240－246.

[87] 张文, 刘勇, 张超凡, 等. 基于方向A*算法的温室机器人实时路径规划[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 22－28.
ZHANG Wen, LIU Yong, ZHANG Chaofan, et al. Real-time path planning of greenhouse robot based on directional A* algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 22－28.

[88] DENG X, LI R F, ZHAO L J, et al. Multi-obstacle path planning and optimization for mobile robot [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 183: 115445.

[89] WANG J K, LI B P, MENG M Q H. Kinematic constrained Bi-directional RRT with efficient branch pruning for robot path planning [J]. Expert Systems with Applications, 2020, 170: 114541.

[90] 张隆梅, 刘岗微, 齐彦栋, 等. 农业机械无人驾驶系统关键技术研究进展[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2022, 3(1): 27－36.
ZHANG Longmei, LIU Gangwei, QI Yandong, et al. Research progress on key technologies of agricultural machinery unmanned driving system [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2022, 3(1): 27－36.

[91] 何勇, 黄震宇, 杨宁远, 等. 设施农业机器人导航关键技术研究进展与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(5): 1－19.
HE Yong, HUANG Zhenyu, YANG Ningyuan, et al. Research progress and prospectsof key navigation technologies for facility agricultural robots [J]. Smart Agriculture, 2024, 6(5): 1－19.

[92] DAS S K, ROY K, PANDEY T, et al. Modified critical point—A bug algorithm for path planning and obstacle avoiding of mobile robot [C]// Proceedings of the 2020 International Conference on Communication and Signal Processing, IEEE, 2020: 467－471.

[93] LIU Z X, YUAN X F, HUANG G M, et al. Two potential fields fused adaptive path planning system for autonomous vehicle under different velocities [J]. ISA Transactions, 2021, 112: 176－185.

[94] HOU P Q, PAN H, GUO C. Simulation research for mobile robot path planning based on improved artificial potential field method recommended by the AsiaSim [J]. International Journal of Modeling, Simulation and Scientific Computing, 2017, 8(2): 241－254.

[95] 劳彩莲, 李鹏, 冯宇. 基于改进A*与DWA算法融合的温室机器人路径规划[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 14－22.
LAO Cailian, LI Peng, FENG Yu. Path planning of greenhouse robot based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window approach [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 14－22.

Research progress in navigation technology for autonomous mobile equipment in facility agriculture

HUANG Yinfeng[1], SUN Guoxiang[1, 2*], WANG Xiaochan[1, 2], SHI Yinyan[1, 2], ZHANG Yongnian[1, 2], CHEN Guangyu[1]

(1. *College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210031, *China*; 2. *Jiangsu Province Engineering Lab for Modern Facility Agriculture Technology & Equipment, Nanjing* 210031, *China*)

Abstract: The development of navigation technologies for autonomous mobile equipment is pivotal to the intelligent upgrading of facility agriculture, with its core challenge being how to achieve safe, efficient, and precise movement within greenhouse

environments. Through an in-depth analysis of the latest research trends, this study aims to comprehensively elucidate the evolution of these navigation technologies and discuss their future directions. We begin by reviewing the state of the art, with a focus on comparing the advantages and disadvantages of different navigation methods, including guide-rail, path-tracking, and multi-source data fusion navigation based on simultaneous localization and mapping (SLAM) technology. Furthermore, we explore recent advances in SLAM-based multi-source data fusion navigation for real-time localization, mapping, and path planning. Relevant research indicates that while traditional guide-rail and path-tracking methods are simple to implement, they suffer from fixed routes, high installation costs, and limited operational range. In contrast, SLAM-based multi-source data fusion navigation offers greater flexibility and autonomy, enabling precise localization, intelligent obstacle avoidance, and adaptive path planning, thus holding broad application prospects in facility agriculture. As SLAM technology continues to mature, equipment employing this navigation approach will see even wider adoption. This study also addresses practical challenges and limitations, such as computational demands and algorithm optimization. Finally, we propose several development prospects for China's facility agriculture: adopting multi-source data fusion navigation to achieve high-precision localization and mapping; integrating artificial intelligence, cloud computing, and edge computing to enhance the equipment's perception and understanding of complex environments; combining global and local path planning to enable autonomous decision-making; implementing intelligent obstacle avoidance to ensure operational safety and reliability; and investigating multi-vehicle and human-vehicle collaboration for efficient multi-task coordination. This research aims to provide valuable insights and references for the intelligent development of autonomous mobile equipment in Chinese facility agriculture.

Keywords: facility agriculture; navigation; autonomous walking equipment; real-time positioning; map construction; path planning

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2023YFD2000304, 2023YFD2000305); Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund (CX(22)3097); Jiangsu Modern Agricultural Machinery Equipment and Technology Demonstration and Promotion Project (NJ2023-44)

First Author: HUANG Yinfeng, E-mail: 2021112038@stu.njau.edu.cn

*** Correspondence Author:** SUN Guoxiang, E-mail: sguoxiang@njau.edu.cn