

中国无人驾驶农机技术与机库自动泊机方法研究进展

马 钦，唐庚宇，付尊元，邓鸿刚，范佳宁，吴才聪*

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院，北京 100083; 2. 农业农村部农机作业监测与大数据应用重点实验室，北京 100083)

摘要：面对国内人口老龄化加剧、农业劳动力短缺、农村人口大规模转移及由此导致的农业人力成本上升等多重现实挑战，无人驾驶农机的研发成为核心应对策略，对于构建完整意义上的无人农场体系至关重要。该文围绕无人驾驶农机技术需求，全面综述了国内在环境感知、农业高精度地图构建、农机自主定位导航、农业全场景作业路径规划与农机跟踪控制等关键技术研究进展。机库与田间的全自动转移作业是无人农场的关键特征之一，目标是实现农田、机耕道和机库的全场景无人化操作。目前无人驾驶农机在农田和机耕道场景下的研究已取得一定突破，但农机进入机库后的感知与自动泊机技术相对匮乏。本文重点针对无人驾驶农机在结束田间作业返回机库后的自动泊机任务，梳理了无人驾驶农机在机库内所需的感知技术和实现自动泊机任务的多种室内定位导航技术路线，最后总结了无人驾驶农机技术面临的挑战，并对未来发展方向进行展望，指出多元技术高度集成与全天候复杂环境自适应作业的无人驾驶农机是发展的重要方向，可为提高国内无人驾驶农机的广泛应用、提高作业质量和作业效率提供参考。

关键词：无人驾驶农业机械；环境感知；高精度地图；定位导航；全场景；自动泊机

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202410129

中图分类号: S24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-10-0015-13

马钦, 唐庚宇, 付尊元, 等. 中国无人驾驶农机技术与机库自动泊机方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2025, 41(10): 15-27. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202410129 <http://www.tcsae.org>

MA Qin, TANG Gengyu, FU Zunyuan, et al. Research progress on autonomous agricultural machinery technology and automatic parking methods in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(10): 15-27. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202410129 <http://www.tcsae.org>

0 引言

随着时代发展和社会结构变迁，国内乡村人口数量骤减且老龄化问题逐渐凸显，农业劳动力面临前所未有的挑战。2023年末，中国人口总数达到14.09亿，其中乡村人口下降至4.77亿，占全国总人数的33.8%^[1]，近5年国内乡村常住人口不断下降。在第三次全国农业普查中，农业生产经营人员构成为35岁及以下占19%，36~54岁占47%，55岁及以上占34%^[2]，农业劳动力结构日益趋向老龄化^[3-4]，这给农村可持续发展带来了严峻挑战。面对老龄化和农业劳动力短缺的双重压力，发展农机自主作业和智能化势在必行^[5-8]。

在现代农业生产中，农业装备自主作业和智能化水平是国家农业发展水平的重要标志。欧美日等农业发达国家正在积极推进无人驾驶农机技术研发和应用，已实现部分场景的商业化应用。中国已将智能农机装备列为“中国制造2025”十大研究领域之一^[9]。其中，无人驾驶农机作为智能农机核心装备，不仅为农业生产注入了新的活力，同时也给传统农业模式带来了深刻的变革^[10-11]。无人驾驶农机可有效减轻田间作业的劳动负担，提高作业质量和经济效益，为农业生产提供安全、高效、合理且系统化的解决方案^[12-15]。目前，无人驾驶农机已在农

业生产中得到大规模应用并取得显著效益^[16-17]。

农机在机库与田间的自动转移是无人农场的关键特点之一^[17]，包括农机从机位自动出库，沿机耕道转移至农田作业，完成作业后返回机库停靠至机位。该过程展示了无人驾驶农机在农田、机耕道和机库不同环境下的作业能力。但目前机库内的操作仍主要依靠人工。为实现全场景无人化作业，无人驾驶农机需具备精准室内定位导航和环境感知能力。与开放的农田和机耕道环境不同，机库内部农机集中停放，对无人驾驶农机的环境感知能力提出了更高的要求。因此，机库场景下的无人驾驶技术对提升智能农机装备水平和推进无人农场的实际应用具有重要意义^[18-19]。

本文系统阐述了无人驾驶农机的关键技术及研究进展，包括环境感知、农业高精度地图构建、农机自主定位导航、农业全场景路径规划以及农机跟踪控制技术，梳理了无人驾驶农机在机库场景中所需的感知技术以及实现自动泊机任务的室内定位导航技术路线，总结了无人驾驶农机技术面临的挑战，并对其发展方向进行展望。

1 无人驾驶农机关键技术研究进展

无人驾驶农机通过搭载传感器系统感知周围环境，并结合农业高精度地图和定位系统确定自身位置，从而实现路径规划和自主导航。国内无人驾驶农机已取得一定研究进展，构建了智能化农业装备体系^[20]，无人驾驶农机的关键技术架构如图1所示。

1.1 环境感知技术

无人驾驶农机首先通过对周围环境进行实时感知与解析，完成障碍物定位与可通行区域划分，并设计一条避障路径，最后通过下达控制指令使无人驾驶农机沿规

收稿日期: 2024-10-18 修订日期: 2025-01-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3901302)

作者简介: 马钦, 博士, 副教授, 研究方向为计算机视觉、农机自动驾驶感知。Email: sockline@163.com

※通信作者: 吴才聪, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为农机自动驾驶与农机大数据。Email: wucc@cau.edu.cn

划路径行驶。因此,环境感知是无人驾驶农机的重要基础和先决条件。

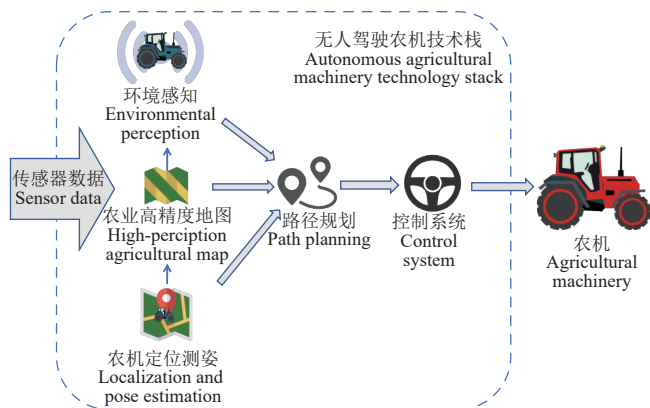


图1 无人驾驶农机的关键技术架构图

Fig.1 Key technology architecture diagram of autonomous agricultural machinery

无人驾驶农机安全作业的核心在于可靠的障碍物探测与规避机制。在农田、机耕道以及机库等环境中,存在动态和静态的环境因素,如行进中的人、各类静态障碍物、被植被覆盖而难以辨识的机耕道路缘线、其他农业机械等,这些因素均可能干扰无人驾驶农机的正常行驶与作业。在探索农业场景中的感知问题时,研究人员主要利用视觉、激光雷达以及多源数据融合等策略^[10,21-22]。

1.1.1 基于视觉的环境感知方法

基于视觉的环境感知通过视觉传感器获取周围环境图像并进行分析,具有成本较低、信息量丰富的特点^[23]。杨丽丽等^[24]利用双目相机采集半结构化与非结构化田间道路图像,提出一种改进的UNet网络结构,在多种环境下实现了高精度的田间道路识别。陈斌等^[25]提出一种改进YOLOv3-tiny目标检测模型,引入残差模块,实现了对田间行人和其他农机的检测与识别。但此方法仅在标注样本上具有较高精度的识别,在作业场景中出现训练阶段未标注过的新物体时会发生漏判或误判。XU等^[26]结合全景视觉、Lucas-Kanade光流算法和K-means聚类算法,实现了障碍物的快速探测,但该方法局限于农机直线行驶状态,对转弯或复杂运动状态不适用。薛金林等^[27]提出了一种两阶段农田障碍物检测方法,减少了模糊农田图像输入情况下出现的漏检和误检问题。WANG等^[28]针对特定数据集训练的检测模型在实际农田应用中适应性低的挑战,提出一种基于共性语义关联和编-解码级联的零样本障碍物检测模型,降低了对稀缺训练样本的依赖,能够对训练阶段未出现的障碍物进行识别与分类,并在识别精度和检测速度之间取得了较好的平衡。

1.1.2 基于激光雷达的环境感知方法

基于激光雷达的环境感知方法主要通过测量激光束在环境中的反射或散射,获得载体周围物体位置、形状和距离等数据。激光雷达具有测量精度高,可以生成具有丰富几何形状和比例信息的三维点云数据,并且对光线不敏感^[29]。深度学习的发展提升了点云数据的分析性能,催生了许多基于LiDAR的目标检测解决方案。尚业华等^[30]提出了使用三维激光雷达基于点云聚类的农田障碍物检测方法,通过下采样和感兴趣区域划定点云数据并进行预处理,随后区分地面点云与障碍物点云,使用欧氏聚类对障碍物点云进行处理,实现了多种农田障碍

物识别。QIN等^[31]将深度学习方法与点云相结合,基于改进Voxel R-CNN^[32]提出了Focal Voxel R-CNN网络,应用焦点稀疏卷积神经网络,增强对有价值特征的提取能力,优化了对小型、远距离障碍物检测的准确性。WANG等^[33]为了应对稀缺样本的挑战,提出一种基于SGI (semantic-geometry-intensity) 融合策略的单样本域自适应实时3D障碍物检测方法,该方法能够处理有限障碍物样本量下的类别差异,增强了模型对不同场景和类别的泛化能力。

1.1.3 基于多源数据融合的环境感知方法

对于复杂的农田环境,单一传感器无法进行全面的环境感知。为提供更加全面与可靠的感知能力,提高多场景适应性和识别准确率,无人驾驶农机通常需要结合多传感器来弥补单一传感器的局限性^[34-35]。多源数据融合技术已在汽车自动驾驶领域展现出巨大优势^[36-39]。表1总结了视觉传感器、激光雷达、毫米波雷达、超声波和热成像仪等主要环境感知传感器的优缺点。

表1 常用传感器的优点和缺点

传感器类型 Sensor	类型 Type	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
视觉传感器 Visual sensor	被动式	低成本、图像信息丰富、高分辨率	鲁棒性低、易受光照和阴影影响、易受天气影响
激光雷达 LiDAR	主动式	范围远、高稳定性、高精度、不易受光照影响	成本高、数据处理复杂、计算量大
毫米波雷达 Millimeter wave radar	主动式	穿透性强、抗干扰能力强、不易受天气和光照影响	分辨率低
超声波 Ultrasonic	主动式	低成本、数据易于处理、不易受天气和光照影响	分辨率低、方向性差、测量距离有限
热成像仪 Thermal imager	被动式	不易受光照影响、对温度敏感、适合检测人和动物	成本较高、在高背景温度下性能受影响

多源数据融合充分利用不同传感器获取的数据信息,通过互补和交叉验证提升对周围环境的感知。根据处理流程中的融合阶段可分为数据级融合、特征级融合和决策级融合,数据级融合和特征级融合为先验融合,决策级融合为后验融合^[40],三种融合级别对比分析如表2所示。

薛金林等^[41]为提高边缘检测效果,对图像进行显著性检测,同时处理激光雷达数据,获得障碍物的先验信息,最后基于受限区域生长完成障碍物分割。宋正根等^[42]提出一种基于毫米波雷达与摄像头融合的障碍物检测方法,有效克服了环境因素的干扰。冯吉^[43]将激光雷达和双目相机采集的数据进行融合,经过预处理、图像分割、立体匹配和聚类分析,使用透视变换整合障碍物的点云数据,通过计算障碍物点云占比验证了融合效果的有效性。LV等^[44]提出一种应用于农田障碍物检测的毫米波雷达与相机的决策级信息融合算法,采用全局最近邻法进行数据关联,关联成功后进行加权输出,对于不关联的序列,使用扩展卡尔曼滤波算法将其作为新目标进行跟踪。杨一鸣^[45]提出一种基于条件式生成对抗网络和泊松图像编辑的红外与可见光图像融合方法,能够在能见度较低的复杂环境下为无人驾驶农机提供环境感知能力。

1.2 农业高精度地图

高精度地图 (high-definition map, HD Map) 是面向自动驾驶系统的电子地图,为车辆提供行驶路段上所有

关键静态属性，紧密关联车辆的感知模块，支持自动驾驶车辆的行驶路径规划^[46-47]。农田是一种高度非结构化、动态、开放且受天气影响的复杂环境，这给无人驾驶农机的作业带来了巨大的挑战。相较于传统地图，农业高精度地图能够为无人驾驶农机提供包括机耕道边界、田块界限以及静态障碍物等先验信息，还能实现厘米级定位支持无人驾驶农机进行精确导航和高效路径规划，对构建和发展数字农业体系具有促进作用^[48]。

表 2 多传感器融合级别
Table 2 Multi-sensor fusion level

融合级别 Fusion level	描述 Description	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
数据级融合 Data-level fusion	在最低层次上直接对传感器原始数据进行融合	最大程度保持原始信息、噪声少	对传感器时间同步和几何校准要求高、数据量大，计算复杂度和处理时间长
特征级融合 Feature-level fusion	在提取的传感器特征层面进行融合，对特征进行匹配和关联	减少处理数据量，降低计算复杂度	特征选取可能丢失原始信息、融合算法设计复杂
决策级融合 Decision-level fusion	在各传感器初步决策或识别结果基础上进行融合，形成最终的决策结果。	扩展性好，兼容不同类型传感器、实时性好	可能放大早期错误，对预处理和特征提取阶段要求高、无法充分利用所有有用信息

赵欣等^[49]提出一种适用于无人驾驶农机的 4 层高精度农田地图架构和构建方法，将农田地图分为地块信息层、障碍物层、作业信息层和动态感知层。该方法所建地图绝对定位精度优于 0.1 m，平面误差的标准差小于 0.02 m，相对定位误差小于±2.5 cm，建图产生的地图拉伸与压缩误差在厘米级以内，可为无人驾驶农机提供精确的先验信息。FANG 等^[50]利用无人机遥感技术，提出一种基于无人机影像处理和模板匹配技术的算法，实现坐标自动配准和障碍物边界提取。张玉成等^[51]将无人机拍摄的农田遥感图像进行几何校正以确定地面坐标系下的图像边界，拼接生成全景图后进行正射纠正并分割，最后根据植被覆盖指数提取农田区域并整合，生成高精度农田导航地图。张天赋^[52]针对典型农机作业环境提出以多传感器融合与多模态信息处理为基础的高精度点云语义地图构建方法，从数据中有效抽取出不同物体或场景特征，以实现农田环境的建图和语义理解，并在田间大路、田间小路、田块地头和作物行间场景中进行点云地图构建。

在农业场景中，无人驾驶农机作业面临很多不确定性，其中自然环境的不稳定性是影响其作业效能的主要挑战^[53]。此外，由于当前传感器技术的感知范围和识别能力有限，无法有效探测远距离或被遮挡的障碍物。因此农业高精度地图中预置的静态障碍物信息不仅能够增强定位能力，还对作业前的全局路径规划以及作业过程中的实时环境感知具有补充作用。高精地图技术在推动自动驾驶系统进步的同时，也在数字化农业生产与智能化农业机械装备发展方面发挥关键作用，可进一步提高无人驾驶农机在复杂农田环境中的安全性和作业效率。

1.3 农机自主定位导航

无人驾驶农机自主定位导航技术是精细化农业的核心支撑，提高了作业精度与效率。目前，农机自主定位导航已在耕作、播种、施肥、喷药、收获等生产环节得到广泛应用^[54]。在实际应用中，自动导航系统通过引导农机遵循较优作业路径实施作业，避免重复作业和遗漏地块的现象，优化了田间作业的整体质量和工作效率。

经典的农机自动导航技术包括导航位姿信息获取、路径规划与跟踪控制等^[15]。

精准定位是实现农机自动导航的关键，通过传感器获取农机作业的位置、航向及速度等状态信息。目前，全球卫星导航系统（global navigation satellite system, GNSS）定位、机器视觉定位导航和惯性导航系统（inertial navigation system, INS）定位已广泛应用于农机自动导航定位技术中，表 3 对比了 3 种导航定位方法的特性。

表 3 导航定位方法比较
Table 3 Comparison of navigation and positioning methods

导航定位方法 Navigation and positioning methods	描述 Description	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
GNSS	单点定位 通过接收单一卫星信号进行定位，适合低精度需求场景	简单、硬件成本较低	定位精度低，易受信号遮挡或干扰影响
	差分定位 借助基站提供误差修正，提高定位精度，适用于精密作业	高精度定位，可达到厘米级，适合精细化农业作业	需要额外地面基站支持，成本较高
	机器视觉定位导航 基于摄像头采集图像数据，利用图像处理算法实现定位导航	成本较低，信息丰富，可识别目标物体和环境特征，适应复杂环境	对光线敏感，计算复杂度高，需要高性能硬件支持
惯性导航系统定位 通过测量加速度和角速度变化，计算位置和姿态信息		不依赖外部信号，可在短时间内提供连续定位信息	累积误差较大，需与其他技术结合使用

1.3.1 全球卫星导航系统定位

GNSS 利用环绕地球的多颗卫星精确定位地面上的待测点，从而获得该点在地理空间中的绝对位置。目前世界上有 4 个全球卫星导航系统，分别是美国-全球定位系统（global positioning system, GPS）、俄罗斯-格洛纳斯卫星导航系统（global navigation satellite system, GLONASS）、欧洲联盟-伽利略卫星导航系统（Galileo）以及中国自主研发的北斗卫星导航系统（beidou navigation satellite system, BDS）。美国的 GPS 起步较早，应用时间最长，覆盖范围最广。中国一直致力于建设自主导航系统，随着北斗系统的不断完善和发展，其在各领域的应用逐步深化，尤其在推动农业现代化进程方面起到了关键作用。

GNSS 定位技术具备全球覆盖、全天候工作、高精度及实时性的优点。基于 GNSS 的定位方法包括单点定位和差分定位。单点定位利用 GNSS 接收器根据多颗卫星的信号计算目标位置，方法简单但易受到卫星轨道误差、大气层造成延迟等影响，定位精度低。差分定位至少使用 2 个 GNSS 接收器，其中一个作为静态参考站，已知其精确位置，另一个作为移动站进行测量，通过比较两者接收到的信号差异来校正定位误差，因而可以获得更高的定位精度。由于无人驾驶农机作业需精确到厘米级，通常采用差分定位。

张智刚等^[55]利用 RTK-GPS（real-time kinematic global positioning system）和电子罗盘进行定位，实现了插秧机在直线和圆曲线路径上的跟踪。罗锡文等^[56]开发了基于 RTK-DGPS（real-time kinematic differential global positioning system）的自动导航控制系统，并在东方红 X-804 拖拉机上测试，行进速度为 0.8 m/s 时，直线跟踪的最大误差小于 0.15 m，平均跟踪误差小于 0.03 m。熊斌等^[57]应用北斗卫星导航系统基于 RTK-BDS 定位方

法,实现了果园施药机的自动导航与喷洒作业,但在卫星遮挡情况下误差较大。GNSS 定位效果易受树木或建筑遮挡、多径效应、信号干扰等影响,在复杂环境中的性能下降,这对无人驾驶农机系统的稳定性造成重大影响。针对农机自动导航作业过程中存在的 GNSS 信号丢失问题,张闻宇等^[58]提出一种融合北斗定位数据和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)数据基于自校准变结构 Kalman 滤波器的农机导航 BDS (beidou navigation satellite system) 失锁续航方法,为操作人员预留了反应距离。

1.3.2 机器视觉定位导航

机器视觉定位导航技术利用安装在农机上的成像设备捕捉农田图像,并对图像进行实时分析,以实现农机精确定位和导航。在实际种植环境中,农作物通常按照平行直线的方式种植。机器视觉通过识别作物行的位置和方向,可为农机提供行驶基准^[59]。根据作物行信息生成农机行驶路径,并通过实时视觉反馈调整农机的行驶姿态,确保其保持在预设路径上,避免对作物造成损害。

霍夫变换(Hough transform)是一种用于作物行检测和导航线提取的经典视觉算法,陈子文等^[60]提出了一种基于 Hough 变换的多作物行提取算法,该算法能成功识别不同生长期的作物行线,并在田间和温室中获得较高识别精度。李霞等^[61]通过改进 2G-R-B 灰度化图像算法,结合最大类间方差法滤波去噪,正确分割玉米苗与土壤背景,采用中值点 Hough 变换拟合两侧玉米苗的行线,根据夹角正切公式提取导航线。最小二乘法通过将预测值与实际值之间误差的平方和最小化来确定函数模型,找出最佳拟合直线,该方法检测速度较快,且准确度较高。ZHANG 等^[62]结合粒子群优化算法和 Ostu 算法确定最终的聚类特征点集,最后采用基于最小二乘法的线性回归方法拟合导航线。王爱臣等^[63]通过边聚类边生长的方法获取作物行中心线,再利用最小二乘法拟合作物行,实现大蒜、玉米、油菜、水稻和小麦苗期作物行的有效提取,平均行识别率达到 98.18%,平均误差角度为 1.21°。许多其他方法也广泛用于作物行的检测中,翟志强等^[64]基于双目视觉利用自适应 Kalman 滤波技术提出一种作物行识别与跟踪方法。张硕等^[65]针对大田作物行识别提出一种基于特征工程作物行中心线检测方法,建立了基于 SVM (support vector machine) 的作物行冠层分割模型,降低了人工调节参数的工作量,利用随机抽样一致和主成分分析方法拟合出作物中心线。

基于机器视觉的农机定位导航技术因其信息丰富、灵活、高效且成本低,具有明显优势。但光照变化、天气因素和作物生长状态均会影响机器视觉定位导航效果。

1.3.3 惯性导航系统定位

惯性导航内置陀螺仪和加速度计连续测量载体,不依赖外部信息,能够全天候、全地域地提供位置、速度和姿态信息。惯性传感器的误差会随时间累积,但与其他导航技术的结合显著提升了精度和可靠性^[66]。LI 等^[67]通过融合 GNSS 和惯性导航信号提出了一种模糊自适应有限脉冲响应卡尔曼滤波器算法,该算法检测并处理异常噪声以减少后续延迟,提高了农机自动导航的精度和稳定性。在 BDS/INS 组合导航系统中,信号遮挡导致 BDS 信号丢失时,系统会依赖 INS 维持定位功能。同时在正常工作状态下,BDS 数据能够对 INS 固有的累积误

差进行有效修正和补偿,从而确保农机实现高精度的连续精确定位^[68]。张天等^[69]结合惯性导航系统和北斗卫星导航系统标准单点定位传感器数据,并利用卡尔曼滤波器进行优化融合定位,BDS-SPP (BDS-standard point positioning) 负责提供载体精确的位置和速度信息,INS 实时提供载体的运动状态和姿态信息,两者互补实现更高精度和稳定性的定位导航功能。

1.4 路径规划

路径规划是农机自动定位导航系统中的大脑,其作用是根据农田与周围环境要素,系统地生成全面覆盖作业区域且避免重复操作的较优路径。在这一过程中,全局路径规划与局部路径规划相互配合,共同应对农田-机耕道-机库全场景不同的路径规划难题。相较于城市道路或其他常规交通环境下的路径规划,农机路径规划面临独特的挑战,主要体现在农田、机耕道、机库场景不同,需要的路径规划方式有所不同,需要根据不同的场景设计不同的路径规划方案。

田内作业必须确保精细化且无遗漏,并杜绝已完成地块的重复作业。常见的策略是将大面积农田细分为若干小尺度的子区域或网格单元,这种划分策略不仅有利于将复杂的田块与作业要求结构化,而且增强了路径规划算法的处理效率与可行性^[70]。全局路径规划着重于长期视角下的整体作业效率优化,统筹规划农机在整个作业周期内的行进轨迹,确保农田各区域得到均衡且经济的访问。现有全覆盖路径规划可以分为梭形法、套圈法、螺旋法、离心法和向心法^[71]。曹如月等^[72]提出一种改进的 A* 算法,通过在启发函数前引入权重系数,使算法的搜索效率得到提升。林乙衡^[73]使用 VRP (vehicle routing problem) 数学模型将地块遍历问题模型化,实现了智能农机在标准果园的全局路径规划。翟卫欣等^[74]提出基于区块套行作业模式的路径规划方法,结合不同的作业参数完成路径规划。刘明杰^[71]分析了传统地头转弯方式处理不规则四边形地块的不足,提出了改进 U 型转弯路径,减小了地头转弯区域。景云鹏等^[75]提出一种基于改进蚁群算法的路径规划方法,以农机行驶路径最短为目标,利用土方负载函数对蚁群前进距离函数进行改进,诱导蚁群结合当前土方负载量选择下一个路径点,从而缩短路径长度。

农机在机耕道上的路径规划方法与传统自动驾驶车辆相似,其核心是在道路约束条件下找到一条从初始点到目标点的无碰撞路径^[76]。局部路径规划聚焦于短期内对实时环境信息的快速响应与灵活调整,生成从农机当前位置至临近目标点的路径,确保农机在机耕道行进过程中能迅速响应。杨一鸣^[45]将改进蚁群算法与动态窗口算法融合,解决了动态环境下无人驾驶农机的路径规划问题。杨丽丽等^[77]提出基于二次规划的局部路径规划方法,针对自动驾驶在动态环境中二次路径规划的实时性需求,解决了无人驾驶农机在机耕道内安全行驶环境复杂问题。苏海峰等^[78]利用实时语义分割网络识别机耕道图像,将路径像素坐标转换为实际坐标并进行直线拟合,从而获得实际路径,避免了操作人员手动定位路径,减少了农田作业前的准备工作。徐立章等^[79]针对机耕道场景,提出一种融合激光雷达与 GPS 的导航方法,该方法基于正态分布变换点云处理算法构建机耕道地图,并采用 A* 全局路径规划算法规划机耕道下的最优行驶路径。

机库内部路径规划效果对提升作业效率与智能化管理至关重要，特别是在缺乏北斗信号定位条件下如何实现高效、精准的路径规划已成为学术界的研究重点。张娇^[80]提出了一种融合改进 A*算法和改进 DWA（dynamic window approach）算法的设施大棚中的电动拖拉机路径规划方法，解决了拖拉机自主导航过程中路径不平滑和规划时间长等问题。方旭^[81]基于激光雷达坐标系进行局部路径规划，通过目标点坐标提取导航点，采用贝塞尔曲线进行避障路径规划，并对拐点路径进行平滑处理，解决了 GNSS 传感器信号在树木遮挡情况下易丢失的问题，实现了果园中不同障碍物的检测与避障路径规划。张亚莉等^[82]提出一种基于改进人工势场法的快速行进树算法，解决了农业机器人在复杂环境下全局路径规划耗时、最优路径求解困难的问题。高锐涛等^[83]提出一种无人驾驶农机转移路径规划方法，开发了基于图论的 Dijkstra 双向搜索转移路径规划算法，进行了农机在 0.7 m/s 的速度下从机库到田块、田块到田块和田块到机库实车试验，规划路径与实际路径的算术平均值差值小于 0.1 m，满足无人农场农机转移要求。

1.5 跟踪控制系统

路径跟踪控制是无人驾驶农机系统的核心功能，它基于已规划路径与农机当前实时位姿数据，计算出农机的期望转向角，从而实现路径纠偏和辅助驾驶。通常情况下将拖拉机视为刚体模型，以简化动态分析。采用线性化自行车运动模型把拖拉机抽象为两轮车辆，在笛卡尔直角坐标系中，以后轮中心作为纵横坐标的参考点^[84]。根据拖拉机即时位置和姿态来控制前轮转角，这种策略有利于精准行驶和稳定引导拖拉机按规划轨迹行进^[85]。常见的路径跟踪控制技术可分为无模型控制器和基于模型的控制器两大类，包括比例-积分-微分控制（PID control）、模糊控制、纯追踪控制和模型预测控制（model predictive control, MPC）等，表 4 总结了不同跟踪控制方法对比。

周明宽等^[94]应用单神经元算法对 PID 控制器进行改进，设计变增益单神经元自适应 PID 控制器实时整定 PID 的控制参数。在田间试验中，作业速度为 1.15 m/s 时，直线跟踪最大横向偏差在 0.071 m 以内，平均绝对偏差不超过 0.031 m；曲线跟踪的最大横向偏差在 1.121 m 以内，平均绝对偏差不超过 1.030 m。杨杭旭等^[95]针对温室旋耕作业中拖拉机的俯仰扰动问题，把基于时间序列分析的角度预测方法引入到前馈 PID 控制中，有效减少了旋耕作业的能耗并提高耕深稳定性。刘兆祥等^[88]设计了基于遗传算法的自适应模糊控制器，利用遗传算法对模糊控制规则及输出比例因子进行在线优化，不仅保留了传统模糊控制的优势，还提升了系统的控制性能。吴才聪等^[89]利用农机与目标路径偏差设计变曲度路径跟踪模糊控制器，实时调整拖拉机前轮转角补偿量以减小稳态误差。王辉等^[96]提出一种基于预瞄追踪模型的农机路径跟踪控制算法，利用预瞄追踪辅助直线引导农机快速稳定地跟踪规划路径。徐立鸿等^[97]将侧滑与斜坡干扰考虑到农机行驶过程的数学模型中，提出基于线性自适应的模型预测控制算法，降低了无人驾驶农机行驶过程中的横向偏差和航向偏差。

针对农机作业环境的不同特性，张朝宇等^[98]针对丘陵山区小田块中大型农业机械运移不便、作业效率不高

和田头调头操作受限等问题，设计了一种适于轻简履带式车辆的基于运动学模型和几何模型的模糊自适应纯追踪控制器。熊斌等^[57]利用北斗导航系统获取系统位姿信息，将运动学模型与纯追踪模型相结合，设计了一种果园施药机的自动导航控制系统，速度为 2 km/h 时，最大误差为 11 cm，平均误差为 2 cm。石佳晨^[99]针对稻麦联合收获机田间作业时易发生侧滑且收获机转向控制系统滞后性严重的问题，提出基于模型预测控制的智能联合收获机路径追踪方法，系统运行稳定可靠，路径追踪的横向误差平均值为 2.56 cm。唐小涛等^[100]提出了一种利用模糊控制调整纯追踪模型前视距离的路径跟踪方法，分别在插秧机 1.0 m/s 和 0.3 m/s 运动情况下进行试验，在速度较快时能避免插秧机跟踪目标轨迹时发生振荡，有效改善了路径跟踪控制系统的稳定性。

表 4 跟踪控制方法对比

Table 4 Comparison of tracking control methods

跟踪控制方法 Tracking control method	优点 Advantage	缺点 Disadvantage	文献 Reference
无模型 控制器	PID 简单易实现、实时性强、适用范围广	参数整定困难、性能有限	[86-87]
	模糊 处理非线性系统、鲁棒性强、易于理解	规则设计复杂、计算量大、性能依赖模糊规则	[88-89]
基于模型的 控制器	纯追踪 路径跟踪能力强、适应性好、响应迅速	受车速影响、对曲率变化敏感、控制稳定性有限	[90-91]
	模型预测 优化控制性能、处理多变量系统、约束处理能力	计算复杂、依赖模型准确性、实现复杂	[92-93]

2 机库场景下无人驾驶农机技术初探

随着人工智能与机器人技术的发展，国内农业正逐步从传统模式向智慧化、无人化方向转型升级。无人农场依托物联网、大数据、人工智能、5G 通讯以及机器人等先进技术，无需进入农田现场，即可通过人工远程操控和智能装备的自主决策能力，实现农业生产的全天候、全过程作业^[18]。无人农场对智能农机无人化的需求尤为突出，为实现农田-机耕道-机库全场景无人化作业，无人驾驶农机不仅需要完成田间作业，还需自主导航返回机库自动泊机、移库、挂载不同机具和自动出库。这就要求农机在进入机库后具备自行寻找并准确停放在预设机位上的能力。同时，为了确保机库内的安全移动与泊机，无人农机必须具备机库场景下的实时环境感知能力。

2.1 面向机库的无人驾驶农机感知技术

农业机库是为农业机械提供安全的存放和维护条件的特殊建筑，也是储备各类农资的重要场所。在全场景无人化作业的过程中，无人驾驶农机在机库内部的移动是必要的。因此，农机必须具备对周围环境精准且全面的感知能力，在出入机库和机库内移动时，能够精确识别障碍物与停机位，避免发生碰撞。

2.1.1 停机位识别

停机位分为平行式、垂直式和倾斜式^[101]。鉴于农机尺寸多样，尤其是大型农机，垂直式停机位不仅能满足停放需求，还简化了农机进出库流程，降低了移动过程中的碰撞风险，具有更高的安全性与便捷性。

在机库管理中，为每台农机预设固定停机位减少了农机寻找和判断停车位置所需时间，为实现精准自动泊机提供了基础。无人驾驶农机入库后的泊机过程，关键

任务不是寻找空闲车位,而是精确识别和定位预设机位的边界,以确保农机能够无碰撞、准确地完成泊机操作。目前,主流的机位线识别方法是利用计算机视觉技术处理环绕视图,通过识别图像中的机位标线来确定机位边界。

ZHANG 等^[102]等提出基于视觉技术的车位检测系统架构,包含环绕视图合成和车位检测两个核心模块,通过整合车辆四周摄像头采集的图像数据,生成全方位环绕视图,利用计算机视觉技术识别车位线及其相对于车辆中心的位置信息,检测到停车位后,这些关键信息将传递给规划模块,实现自动泊车操作^[103-104]。WANG 等^[105]使用基于 Levenberg-Marquardt 算法的图像拼接技术生成鸟瞰图,利用 Radon 变换方法提取车位形状特征,完成车位线检测,与 Hough 变换^[106-107]相比,具有更高的准确性和鲁棒性。LEE 等^[108]利用“锥帽”滤波器提取车位线特征,并通过基于熵的聚类和随机采样一致性算法^[109]拟合车位线,能在模糊或变形车位线场景中生成准确线条。LI 等^[110]提出了基于几何特征的车位检测方法,利用基于 LSD (line segment detector) 算法^[111]优化的线聚类方法检测分隔线,并依据停车位的几何特征将分隔线匹配成候选车位区域,即使在复杂光照和地面条件下,也能有效检测车位。

随着深度学习技术的发展,停车位检测逐渐采用基于数据驱动的深度学习方法。LI 等^[112]使用训练好的检测器检测环绕图像标记点,根据标记点推断出有效停车位。ZHANG 等^[113]提出了一种基于深度卷积神经网络的 DeepPS 停车位检测方法,结合 YOLOv2 检测器检测标记点并绘制车位。HUANG 等^[114]提出一种定向标记点回归停车位检测法,使用卷积神经网络模型检测环绕视图每个车位标记点的位置、形态和方向信息,根据人工设计的几何规则过滤和匹配标记点,进而推导出车位线。文献^[113]和^[114]均通过深度学习技术检测停车位标记点,并引入人工设计的几何规则评估这些检测到的标记点是否能有效构成车位入口线。这种方法特别适用于具有固定机位线布局的农业机库场景。

2.1.2 机库内障碍物检测

在农业机库场景中,障碍物种类繁多且分布无序,包括工作人员、停放的其他农机、各类机具、维修配件以及可能临时堆放的农业物料等。为了实现对非确定性室内环境的感知,通常采用视觉^[115-119]、超声波^[120]、红外^[121]或激光技术^[122-123]来识别周围障碍物及位置等信息。

激光雷达成本高且安装适应性有限;超声波传感器受制于其长距离探测性能局限;红外传感器易受温度波动和材质影响导致信号稳定性欠佳。相比之下,视觉传感器能够更好地满足农业环境中的障碍物探测需求。RGB 深度传感器广泛用于室内场景识别^[115],如 WANG 等^[116]使用 Kinect 传感器^[117]设计了两步快速平面分割算法,对墙、地面和障碍物进行分类。然而,受限于 Kinect 传感器的技术局限,距离超 3 m 的三维数据往往不准确且含有大量噪声。CHOI 等^[118]提出了一种融合彩色与深度信息的泊车障碍物检测方法,消除基于单视图算法检测的异常点,通过深度信息计算出与障碍物的实际距离,根据距离提示警报信息。ZHANG 等^[119]提出一种结合深度学习与光场相机的算法来识别室内障碍物及其位置和尺寸信息。

尽管环境感知技术理论上适用于农机库环境,但为

克服机库内的复杂性和不确定性,需对现有算法进行优化,以适应农田、机耕道和机库全场景,既能在农田和机耕道上表现稳健,又能在机库内实现高鲁棒性识别。

2.2 基于室内定位导航的无人驾驶农机自动泊机技术

无人驾驶农机结束田间作业并返程至机库,从机库入口到预设机位的实际停靠操作被定义为自动泊机过程。由于物理特性的限制,机库内部无法接收到有效 GNSS 信号,导致基于 GNSS 的室外自动导航方案在此环境中失效。实现农机在机库内的自动泊机任务,核心挑战在于如何在无 GNSS 信号的情况下,精准完成从机库入口到预设泊位的路径规划与自主定位导航。因此,自动泊机的本质是依赖室内定位与导航技术,通过感知环境、定位并规划安全高效的行驶路径完成最终停靠。室内定位导航方式可分为固定线路定位导航和非固定线路定位导航两类。固定线路定位导航方式包括视觉导航(车道线追踪和视觉符号定位)、导轨导航和磁导航,其特点是实现简单,具备较高的精度和稳定性。此外,固定线路导航在泊机场景中有助于规范机库管理,划分安全行驶区域,从而提升无人驾驶农机在机库内的运行安全性。非固定线路定位导航方式主要包括外置信源定位技术(如射频识别、WiFi、蓝牙和超宽带)和同步定位与建图技术(simultaneous localization and mapping, SLAM)。与固定线路导航相比,非固定线路导航在灵活性、扩展性和适应性方面具有显著优势,能够更好地应对复杂和动态的室内环境。

2.2.1 基于固定线路的室内定位导航策略

基于固定线路的室内定位导航在机库内预先设置固定的导航基准线或标识,确保无人驾驶农机按照预定线路完成泊机操作。农机自动泊机的移动模式不同于一般道路车辆,更接近于具有预设轨迹和目的地的工业级搬运车辆和温室大棚作业机器人。其核心包括 3 个相互关联的子阶段:目标位置设定、路径规划及路径跟踪。目标位置是指农机需准确停靠的具体机位;路径规划是在充分考虑机库物理空间布局和障碍物分布的基础上,规划出最优或指定的行驶线路;路径跟踪要求农机在泊机过程中严格遵循规划路径行驶,确保最终精确移动到预设机位上。这类策略主要依赖于外部固定设备或明确的环境特征,例如视觉导航中的车道线、视觉符号标记,或物理设备如磁导航条和导轨系统。由于导航路径明确且约束条件强,这种方式在实现精确泊机和规范机库管理方面具有显著优势。此外,固定线路定位导航的实现相对简单,对算法与硬件的复杂度要求较低,能够在大部分结构化机库环境中提供高精度和高稳定性的导航能力。

导轨导航^[124-125]和磁导航^[126]需要额外铺设轨道或磁条,部署复杂、维护难度大、建设成本高,占地较大。相比之下,车道线追踪和基准标记定位无需依赖 GNSS 信号,具有建设成本低、线路维护与调整方便的优势。杨鹏强等^[127]通过修改引入注意力机制的 RepVGG 网络,采用基于行方向位置分类的车道线检测方式,显著提高了车道线的检测率和检测速度。贾远鹏等^[128]设计了一种轻量化的基于语义分割的编解码卷积神经网络结构,在存在干扰及曝光等场景下仍可以准确且快速地识别出车道线。

基准标记是一种基于高可视性和独特编码设计的视觉符号,用于环境标记的识别、检测和定位,具备较强的抗干扰能力和低误识别风险。目前已有多款成熟解决

方案，如 ARTag、AprilTag 和 ArUco 等，如表 5 所示。刘青松^[130]设计了一种基于 ARTag 的室内巡检机器人与充电站对接系统，移动误差在±15 cm 内。代进洪等^[131]构建了基于 AprilTag 的图像识别定位系统，其在干扰环境下具备全天候高精度与快速响应能力，适用于农机库内半开放场景。许佳斌^[132]设计的基于 ArUco 码导航系统在曲线和直线路径跟踪中均表现出良好的定位精度。

表 5 基准标记及其主要特点^[129]

Table 5 Fiducial markers and their main characteristics^[129]

名称 Name	形状 Shape	颜色 Color	编码 Encoding	标志 Marker	说明 Remarks
ARTag	方形	单色	拓扑		使用最广泛的标记
AprilTag	方形	单色	拓扑		提高了图像分割性，增加了鲁棒性
ArUco	方形	单色	拓扑		允许使用自定义库

2.2.2 基于非固定线路的室内定位导航策略

基于非固定线路的室内定位导航策略通过实时感知周围环境、自主定位与路径规划来完成泊机任务。这种策略通常采用外置信源定位或同步定位与建图技术，相比固定线路定位，非固定线路定位导航具有更强的灵活性与适应性，能够在非结构化或动态场景中实现高效的路径规划与导航。同时，这种策略在扩展性和适应性方面表现出色，可适应不同类型机库的泊机需求。

(1) 基于外置信源的室内定位技术

外置信源定位技术利用外部定位信号为载体提供精确的室内定位信息，能够有效克服传统定位方法在信号遮挡或变化环境中的局限性。

射频识别 (radio frequency identification, RFID) 利用无线电波实现非接触式自动识别与数据传输，可通过标签和阅读器进行目标物体的快速定位和信息读取。李鑫等^[133]设计了基于 RFID 和无线传感器网络的自主导航与避障采摘农机，通过阅读 RFID 标签和无线传感器网络节点通信实现路径规划，定位的最大均方差仅为 0.082 m，且信号通信稳定，满足高精度采摘作业需求。张九通等^[134]开发了基于 RFID 的拖拉机机库信息管理系统，通过设计 RFID 标签布局和 Landmarc 定位算法实现拖拉机室内定位。WiFi 室内定位技术通过测量无线信号的接收强度 (received signal strength indicator, RSSI)、到达时间 (time of arrival, TOA) 或信号差分时间 (time difference of arrival, TDOA) 等，实现目标设备在室内环境中的定位。于兵等^[135]提出了一种基于 WiFi 的混合滤波 RSSI 室内定位算法，通过自适应阈值滤波器和混合滤波显著降低 RSSI 波动，在室内与走廊环境中分别实现了 1.17 和 1.53 m 的平均定位误差。蓝牙室内定位利用蓝牙信号强度和分布信息，通过测量设备与多个已知位置的蓝牙基站之间的距离，实现载体精确位置估计。赵一智^[136]实现了基于低功耗蓝牙和指纹定位方法的室内定位，通过改进加权混合滤波算法优化信号预处理，并补偿缺失值和降维优化指纹库，在保持较好定位精度的同时有效提高了定位效率。超宽带室内定位技术利用纳秒级宽带脉冲信号进行高精度测距和定位，林相泽等^[137]基于超宽带定位技术开发了温室农机定位试验平台，采用 TDOA

结合 K-means 聚类与截段处理优化定位信息，静态平均定位精度为 0.063 4 m，动态定位精度显著提升。

(2) 基于 SLAM 室内定位技术

SLAM 是一种使载体在移动过程中利用自身搭载的多元传感器完成实时自我定位并同步构建周围环境地图的技术^[138]。由于融合多种传感器信息，SLAM 在复杂的动态场景中表现出色，在缺乏外部卫星导航信号的情况下是载体自主定位和导航的有效方案。目前，针对不同的应用场景和传感器特性，已经发展出多种基于特定传感器的 SLAM 实施方案，如利用摄像头和激光雷达等。

LiDAR 通过精确测量激光脉冲从发射到接收回波的时间间隔来确定距离。系统持续发射并接收大量激光束在周围环境物体上产生的回波，这些回波数据被转化为点云，这些点云数据详细表示了周围空间结构。在实现基于激光雷达 SLAM 过程中，除核心的 LiDAR 设备外，通常还须集成用于计算角度信息的惯性测量单元和用于记录位置信息的里程计 (odometry)。徐淑萍等^[139]使用轮式里程计和 IMU 的数据为激光的帧间匹配算法 (point-to-line interactive closest point, PL-ICP) 提供初始迭代参数。在建图过程中融合视觉投影为伪二维激光数据建立局部二维栅格地图，该方法显著提高了机器人在定位任务中的位姿精度。孙国祥等^[140]结合三维激光雷达和惯性测量单元，利用紧耦合的雷达惯导定位建图算法构建导航地图，并采用扩展卡尔曼滤波器算法和激光点云配准算法，实现局部和全局定位。通过 A* 算法规划全局路径，利用动态窗口算法规划局部路径，最终实现温室室内农机自主导航。

视觉 SLAM 使用摄像头捕捉特征点来感知环境，相比于其他传感器，摄像头具有体积小、功耗低、获取的信息丰富等特点^[141]。随着计算机视觉技术的不断发展，视觉 SLAM 的可用性得到了大幅提高。付悦欣^[142]提出了一种动态场景下基于注意力机制的语义 SLAM 算法，能够有效降低视觉 SLAM 系统在动态场景下的误差，提升视觉 SLAM 系统的鲁棒性。殷嘉徽^[143]针对特征点比较少的室内场景，引入了深度信息，提出一种基于点、线和面元特征 RGB-DSLAM (RGB-depth SLAM) 方法，适用于杂乱、低纹理或者结构重复的室内场景中能够稳定跟踪，并且获得较高的定位精度。张倩^[144]提出了一种基于视觉 SLAM 和多源信息融合的温室农机实时定位与建图方法，将轮式里程计、陀螺仪和视觉-惯性里程计数据集成到基于扩展卡尔曼滤波器的松耦合框架中提升定位精度，并利用改进的 ORB-SLAM2 (oriented fast and rotated brief-SLAM2) 算法构建温室环境的三维稠密点云地图，为室内农机自主导航提供了技术支持。

3 无人驾驶农机技术的挑战与展望

无人驾驶农机已经在实际农业生产中展现出巨大优势^[18-19]，该技术应用场景广泛，对于提升农业生产效率具有显著的实际意义。然而，无人驾驶农机技术仍面临许多挑战：

1) 全场景高精度地图构建：为了实现无人驾驶农机在农田-机耕道-机库的全场景无人化操作，需要探索和构建适用于包括机库在内的各类农业场景的高精度地图生成策略，并融合感知算法更新地图，以指导多机协同、动态避障，提高无人驾驶农机安全性与作业效率。

2) 建立高保真的非线性农机动态模型: 基于运动学模型的方法在应对农机具负载变化时缺乏鲁棒性, 难以达到预期跟踪控制精度。未来的发展趋势是利用机器学习方法创建拖拉机高保真运动模型, 以避免建模不准确以及模型参数变化对跟踪控制性能的负面影响。

3) 智能化无人驾驶农机管理系统: 随着农业经营规模的不断扩大和农机数量的增加, 如何实时监控农机的位置和状态, 合理制定调度策略, 并确保农机在非作业时间的合理停放和维护等成为待解决的问题。

4) 无人驾驶农机在农机库场景下的探索: 尽管无人驾驶农机田间作业问题已取得显著研究进展, 但在机库内的自动操作仍然缺乏关注。特别是自动出库、泊机、移库和挂载机具等, 需要深入研究。这些操作的复杂性主要体现在机库环境中障碍物繁杂、作业需求变化多样以及农机具种类繁多。为提高作业效率和空间利用率, 需要探索适应不同机具的自动挂载与合理的移库策略。

当前, 无人驾驶农机技术面临功能模块分散、缺乏有效整合以及过度依赖模拟测试等一系列挑战。各个功能模块独立运行, 系统集成度较低, 在面对复杂环境时, 系统的稳定性和适应性不足。因此, 未来无人驾驶农机技术的发展应围绕以下关键点展开:

1) 多元技术的高度集成: 无人驾驶农机的核心挑战在于深度整合环境感知、路径规划、导航与控制等模块。模块间的高效协同可显著提升系统的实用性和可靠性, 增强其适应复杂环境的能力。

2) 全天候不规则地块作业能力: 为实现全季节、全天候稳定作业, 需发展适应复杂天气、不规则地块和光照变化的系统, 并通过深度学习、仿生算法与多传感器融合提升鲁棒性与灵活性。

3) 多机协同作业: 除单机智能化发展外, 农机之间的协作也将成为主流趋势。通过车联网技术, 多农机实现协同感知与控制, 共享环境信息, 优化作业路径, 提升整体作业效率。

4) 技术标准化与生态体系构建: 通过制定无人驾驶农机的行业标准, 推动核心技术模块的互联互通与统一规范, 构建开放、合作的生态体系, 促进产业健康发展。

未来无人驾驶农机将朝着智能化、生态化、系统化的方向发展。技术的高度集成和复杂环境的自适应能力提升是实现无人驾驶农机广泛应用的核心动力。通过技术创新和场景应用验证, 无人驾驶农机将为农业生产提供强有力的支撑, 进一步推动现代农业的智能化转型。

[参 考 文 献]

- [1] 王萍萍. 人口总量有所下降 人口高质量发展取得成效[N]. 中国信息报, 2024-01-19.
- [2] 国家统计局. 第三次全国农业普查主要数据公报 (第五号) [EB/OL]. (2017-12-16) [2024-07-16]. https://www.stats.gov.cn/sj/tjgb/nypcgb/qgnypcgb/202302/t20230206_1902105.html.
- [3] 杜建国, 李波, 杨慧. 人口老龄化下农业人力资本对农业绿色全要素生产率的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(9): 215-228.
DU Jianguo, LI Bo, YANG Hui. Impact of agricultural human capital on agricultural green total factor productivity under population aging[J]. China Population, Resources and Environment, 2023, 33(9): 215-228. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王亚华, 苏毅清, 舒全峰. 劳动力外流、农村集体行动与乡村振兴[J]. 清华大学学报 (哲学社会科学版), 2022, 37(3): 173-187.
- WANG Yahua, SU Yiqing, SHU Quanfeng. Labor out-migration, rural collective action and rural revitalization[J]. Journal of Tsinghua University(Philosophy and Social Sciences), 2022, 37(3): 173-187. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘小伟, 吴才聪, 车宇. 无人化农机技术与装备发展趋势[J]. 农机科技推广, 2019(10): 26-27.
- [6] ROSHANIANFARD A, NOGUCHI N, OKAMOTO H, et al. A review of autonomous agricultural vehicles (The experience of Hokkaido University)[J]. Journal of Terramechanics, 2020, 91: 155-183.
- [7] WU C, CHEN Z, WANG D, et al. A cloud-based in-field fleet coordination system for multiple operations[J]. Energies, 2020, 13(4): 775.
- [8] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业. 2019, 1(1): 1-7.
- ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture[J]. Smart Agriculture. 2019, 1(1): 1-7 (in Chinese with English abstract)
- [9] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
- ZHOU Ji. Intelligent manufacturing——Main direction of "Made in China 2025"[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张智刚, 王进, 朱金光, 等. 我国农业机械自动驾驶系统研究进展[J]. 农业工程技术, 2018, 38(18): 23-27.
- [11] 罗锡文, 廖娟, 臧英, 等. 我国农业生产的发展方向: 从机械化到智慧化[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 46-54.
- LUO Xinwen, LIAO Juan, ZANG Ying, et al. Developing from mechanized to smart agricultural production in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 46-54. (in Chinese with English abstract)
- [12] 吴才聪, 方向明. 基于北斗系统的大田智慧农业精准服务体系构建[J]. 智慧农业, 2019, 1(4): 83-90.
- WU Caicong, FANG Xiangming. Development of precision service system for intelligent agriculture field crop production based on BeiDou system[J]. Smart Agriculture. 2019, 1(4): 83-90. (in Chinese with English abstract)
- [13] 韩树丰, 何勇, 方慧. 农机自动驾驶及无人驾驶车辆的发展综述[J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2018, 44(4): 381-391.
- HAN Shufeng, HE Yong, FANG Hui. Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture: A review[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2018, 44(4): 381-391. (in Chinese with English abstract)
- [14] XIONG L, SUN S, XIAO M. Agricultural machinery automation and intelligent research and application[C]//IMMAEE. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, UK: IOP Publishing, 2018, 452(4):042077.
- [15] 张漫, 季宇寒, 李世超, 等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1-18.
- ZHANG Man, JI Yuhao, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1-18. (in Chinese with English abstract)
- [16] 罗锡文, 胡炼, 何杰, 等. 中国大田无人农场关键技术研究建设与建设实践[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 1-16.
- LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, et al. Key technologies and practice of unmanned farm in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 1-16. (in Chinese with English abstract)
- [17] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 8-17.
- LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8-17. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李道亮, 李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 1-12.
- LI Daoliang, LI Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [19] 尹彦鑫, 孟志军, 赵春江, 等. 大田无人农场关键技术研究

- 究现状与展望[J]. 智慧农业, 2022, 4(4): 1-25.
YIN Yanxin, MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, et al. State-of-the-art and prospect of research on key technical for unmanned farms of field crop[J]. Smart Agriculture. 2022, 4(4): 1-25. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘婵韬, 李小龙, 徐岚俊, 等. 农机无人驾驶技术现状及发展前景[J]. 农机科技推广, 2020(12): 22-24.
- [21] KRAGH M F, CHRISTIANSEN P, LAURSEN M S, et al. Fieldsafe: Dataset for obstacle detection in agriculture[J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2579.
- [22] 何勇, 蒋浩, 方慧, 等. 车辆智能障碍物检测方法及其农业应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 21-32.
HE Yong, JIANG Hao, FANG Hui, et al. Research progress of intelligent obstacle detection methods of vehicles and their application on agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(9): 21-32. (in Chinese with English abstract)
- [23] CHEN Q, XIE Y, GUO S, et al. Sensing system of environmental perception technologies for driverless vehicle: A review of state of the art and challenges[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 319: 112566.
- [24] 杨丽丽, 陈炎, 田伟泽, 等. 田间道路改进 UNet 分割方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 185-191.
YANG Lili, CHEN Yan, TIAN Weize, et al. Field road segmentation method based on improved UNet[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 185-191. (in Chinese with English abstract)
- [25] 陈斌, 张漫, 徐弘祯, 等. 基于改进 YOLOv3-tiny 的全景图像农田障碍物检测[J]. 农业机械学报, 2021, 52(S1): 58-65.
CHEN Bin, ZHANG Man, XU Hongzhen, et al. Farmland obstacle detection in panoramic image based on improved YOLOv3-tiny[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(S1): 58-65. (in Chinese with English abstract)
- [26] XU H, LI S, JI Y, et al. Dynamic obstacle detection based on panoramic vision in the moving state of agricultural machineries[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 184(1): 106104.
- [27] 薛金林, 李雨晴, 曹梓建. 基于深度学习的模糊农田图像中障碍物检测技术[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 234-242.
XUE Jinlin, LI Yuying, CAO Zijian. Obstacle detection based on deep learning for blurred farmland images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 234-242. (in Chinese with English abstract)
- [28] WANG T, CHEN B, WANG N, et al. Zero-shot obstacle detection using panoramic vision in farmland[J]. *Journal of Field Robotics*, 2024, 41(7): 2169-2183.
- [29] 季宇寒, 徐弘祯, 张漫, 等. 基于激光雷达的农田环境点云采集系统设计[J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 1-7.
JI Yuhuan, XU Hongzhen, ZHANG Man, et al. LI Han. Design of point cloud acquisition system for farmland environment based on LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(S1): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [30] 尚业华, 张光强, 孟志军, 等. 基于欧氏聚类的三维激光点云田间障碍物检测方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 23-32.
SHANG Yehua, ZHANG Guangqiang, MENG Zhijun, et al. Field obstacle detection method of 3D LiDAR point cloud based on euclidean clustering[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 23-32. (in Chinese with English abstract)
- [31] QIN J, SUN R, ZHOU K, et al. Lidar-based 3D obstacle detection using Focal Voxel R-CNN for farmland environment[J]. *Agronomy*, 2023, 13(3): 650.
- [32] DENG J, SHI S, LI P, et al. Voxel R-CNN: Towards high performance voxel-based 3D object detection[C]//Proceedings of the Thirty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-21). Palo Alto, USA: AAAI Press, 2021: 1201-1209.
- [33] WANG T, WANG N, XIAO J, et al. One-shot domain adaptive real-time 3D obstacle detection in farmland based on semantic-geometry-intensity fusion strategy[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 214: 108264.
- [34] 丁幼春, 王书茂, 陈红. 农用车辆作业环境障碍物检测方[J]. 农业机械学报, 2009, 40(S1): 23-27.
DING Youchun, WANG Shumao, CHEN Hong. Obstacle detection in the working area of agricultural vehicle based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(S1): 23-27. (in Chinese with English abstract)
- [35] 兰玉彬, 王林琳, 张亚莉. 农用无人机避障技术的应用现状及展望[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 104-113.
LAN Yubin, WANG Linlin, ZHANG Yali. Application and prospect on obstacle avoidance technology for agricultural UAV[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(9): 104-113. (in Chinese with English abstract)
- [36] CHEN X, MA H, WAN J, et al. Multi-view 3D object detection network for autonomous driving[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society, 2017: 1907-1915.
- [37] LIANG M, YANG B, WANG S, et al. Deep continuous fusion for multi-sensor 3D object detection[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). Munich, Germany: Springer, 2018: 641-656.
- [38] CHEN X, ZHANG T, WANG Y, et al. FUTR3D: A unified sensor fusion framework for 3D detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Vancouver, Canada: IEEE, 2023: 172-181.
- [39] WANG X, LI K, CHEHRI A. Multi-sensor fusion technology for 3D object detection in autonomous driving: A review[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 25(2): 1148-1165.
- [40] CASTANEDO F. A review of data fusion techniques[J]. *The Scientific World Journal*, 2013, 2013(1): 704504.
- [41] 薛金林, 董淑娟, 范博文. 基于信息融合的农业自主车辆障碍物检测方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 29-34.
XUE Jinlin, DONG Shuxian, FAN Bowen. Detection of obstacles based on information fusion for autonomous agricultural vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 29-34. (in Chinese with English abstract)
- [42] 宋正根, 彭竟德, 肖璨. 基于毫米波雷达和摄像头的农用车障碍物检测[J]. 现代信息科技, 2019, 3(14): 46-48.
- [43] 冯吉. 基于机器视觉和激光雷达的割草机前方障碍物检测[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.
FENG Ji. Obstacle Detection in Front of Mower Based on Machine Vision and LiDAR [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [44] LV P, WANG B, CHENG F, et al. Multi-objective association detection of farmland obstacles based on information fusion of millimeter wave radar and camera[J]. *Sensors*, 2022, 23(1): 230.
- [45] 杨一鸣. 复杂环境下无人农机的环境感知与路径规划关键技术研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2023.
YANG Yiming. Environment Perception and Path Planning of Unmanned Agricultural Machinery in Complex Environment [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [46] 应申, 蒋跃文, 顾江岩, 等. 面向自动驾驶的高精地图模型及关键技术[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2024, 49(4): 506-515.
YING Shen, JIANG Yuewen, GU Jiangyan, et al. High definition map model for autonomous driving and key technologies[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(4): 506-515. (in Chinese with English abstract)
- [47] BAO Z, HOSSAIN S, LANG H, et al. A review of high-definition map creation methods for autonomous driving[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 122: 106125.
- [48] 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 with English abstract)
- [49] 赵欣, 王万里, 董靓, 等. 面向无人驾驶农机的高精度农田地图构建[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊): 1-7.
ZHAO Xin, WANG Wanli, DONG Liang, et al. High precision farmland map construction for unmanned agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(Sup): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [50] FANG H, CHEN H, JIANG H, et al. Research on method of

- farmland obstacle boundary extraction in UAV remote sensing images[J]. *Sensors*, 2019, 19(20): 4431.
- [51] 张玉成, 万忠政, 李莹玉. 一种基于无人机遥感的农田高精度导航地图生成方法: CN201811104500.4 [P]. 2018-09-21.
- [52] 张天赋. 农田高精度 3D 点云语义地图构建方法研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2023.
- ZHANG Tianfu. On High-Precision 3D Point Cloud Semantic Map Construction Method in Agricultural Fields[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [53] WU C, CAI Y, HU B, et al. Classification and evaluation of uncertain influence factors for farm machinery service[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(6): 164-174.
- [54] 胡静涛, 高雷, 白晓平, 等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1-10.
- HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [55] 张智刚, 罗锡文, 周志艳, 等. 久保田插秧机的 GPS 导航控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 95-97.
- ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan, et al. Design of GPS navigation control system for rice transplanter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(7): 95-97. (in Chinese with English abstract)
- [56] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139-145.
- LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese with English abstract)
- [57] 熊斌, 张俊雄, 曲峰, 等. 基于 BDS 的果园施药机自动导航控制系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 45-50.
- XIONG Bin, ZHANG Junxiong, QU Feng, et al. Navigation control system for orchard spraying machine based on Beidou navigation satellite system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 45-50. (in Chinese with English abstract)
- [58] 张闻宇, 王进, 张智刚, 等. 基于自校准变结构 Kalman 的农机导航 BDS 失锁续航方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 18-27.
- ZHANG Wenyu, WANG Jin, ZHANG Zhigang, et al. Self-calibrating variable structure kalman filter for tractor navigation during BDS outages[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(3): 18-27. (in Chinese with English abstract)
- [59] 姬长英, 周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 44-54.
- JI Changying, ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 44-54. (in Chinese with English abstract)
- [60] 陈子文, 李伟, 张文强, 等. 基于自动 Hough 变换累加阈值的蔬菜作物行提取方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 314-322.
- CHEN Ziwen, LI Wei, ZHANG Wenqiang, et al. Vegetable crop row extraction method based on accumulation threshold of Hough transformation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(22): 314-322. (in Chinese with English abstract)
- [61] 李霞, 苏筠皓, 岳振超, 等. 基于中值点 Hough 变换玉米行检测的导航线提取方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 167-174.
- LI Xia, SU Junhao, YUE Zhenchao, et al. Extracting navigation line to detect the maize seedling line using median-point Hough transform[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(5): 167-174. (in Chinese with English abstract)
- [62] ZHANG X, LI X, ZHANG B, et al. Automated robust crop-row detection in maize fields based on position clustering algorithm and shortest path method[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 154: 165-175.
- [63] 王爱臣, 张敏, 刘青山, 等. 基于区域生长均值漂移聚类苗期作物行提取方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 202-210.
- WANG Aichen, ZHANG Min, LIU Qingshan, et al. Seedling crop row extraction method based on regional growth and mean shift clustering[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(19): 202-210. (in Chinese with English abstract)
- [64] 翟志强, 熊坤, 王亮, 等. 采用双目视觉和自适应 Kalman 滤波的作物行识别与跟踪[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 143-151.
- ZHAI Zhiqiang, XIONG Kun, WANG Liang, et al. Crop row detection and tracking based on binocular vision and adaptive Kalman filter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(8): 143-151. (in Chinese with English abstract)
- [65] 张硕, 刘禹, 熊坤, 等. 基于特征工程的大田作物行中心线识别方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(S1): 18-26.
- ZHANG Shuo, LIU Yu, XIONG Kun, et al. Center line detection of field crop rows based on feature engineering[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(S1): 18-26. (in Chinese with English abstract)
- [66] 张京, 陈度, 王书茂, 等. 农机 INS/GNSS 组合导航系统航向信息融合方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(S1): 1-7.
- ZHANG Jing, CHEN Du, WANG Shumao, et al. Research of INS/GNSS heading information fusion method for agricultural machinery automatic navigation system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(S1): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [67] LI S, ZHANG M, JI Y, et al. Agricultural machinery GNSS/IMU-integrated navigation based on fuzzy adaptive finite impulse response Kalman filtering algorithm[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 191: 106524.
- [68] 张晓寒, 赵景波, 董振振. 农机 BDS/INS 组合导航算法研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(2): 171-177.
- ZHANG Xiaohan, ZHAO Jingbo, DONG Zhenzhen. Research on BDS/INS integrated navigation algorithm for agricultural machinery[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(2): 171-177. (in Chinese with English abstract)
- [69] 张天, 张智刚, 罗锡文, 等. 低功耗 BDS-SPP/INS 融合定位系统的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(3): 437-445.
- ZHANG Tian, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of low-power BDS-SPP/INS fusion positioning system[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2024, 45(3): 437-445. (in Chinese with English abstract)
- [70] 孟志军, 王昊, 付卫强, 等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 1-24.
- MENG Zhijun, WANG Hao, FU Weiqiang, et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(10): 1-24. (in Chinese with English abstract)
- [71] 刘明杰. 智能收获机路径规划与跟踪方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- LIU Mingjie. Research on Path Planning and Path Tracking Methods of Intelligent Harvester [D]. Nanjing: Southeast University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [72] 曹如月, 张振乾, 李世超, 等. 基于改进 A*算法和 Bezier 曲线的多机协同全局路径规划[J]. 农业机械学报, 2021, 52(S): 548-554.
- CAO Ruyue, ZHANG Zhenqian, LI Shichao, et al. Multi-machine cooperation global path planning based on A-star algorithm and bezier curve[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(S): 548-554. (in Chinese with English abstract)
- [73] 林乙衡. 基于多源信息融合的智能农机路径规划和路径跟踪研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- LIN Yiheng. Path Planning and Path Tracking of Intelligent Agricultural Vehicle Based on Multi-Source Information Fusion [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [74] 翟卫欣, 王东旭, 陈智博, 等. 无人驾驶农机自主作业路径规划方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 1-7.
- ZHAI Weixin, WANG Dongxu, CHEN Zhibo, et al.

- Autonomous operation path planning method for unmanned agricultural machinery[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(16): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [75] 景云鹏, 金志坤, 刘刚. 基于改进蚁群算法的农田平地导航三维路径规划方法[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S1): 333-339.
- JING Yunpeng, JIN Zhikun, LIU Gang. Three dimensional path planning method for navigation of farmland leveling based on improved ant colony algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S1): 333-339. (in Chinese with English abstract)
- [76] 胡浩. 无人农机多阶段轨迹规划方法研究[D]. 济南: 山东交通学院, 2024.
- HU Hao. Research on Multi-stage Trajectory Planning Method for Unmanned Agricultural Vehicles[D]. Jinan: Shandong Jiaotong University, 2024. (in Chinese with English abstract)
- [77] 杨丽丽, 唐晓宇, 吴思贤, 等. 机耕道自动驾驶农机局部路径规划[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(1): 27-36.
- YANG Lili, TANG Xiaoyu, WU Sixian, et al. Local path planning for autonomous agricultural machinery on farm road[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(1): 27-36. (in Chinese with English abstract)
- [78] 苏海峰, 宋佳音, 蔡扬. 路径确定方法、装置、设备及计算机可读存储介质: CN202310410675.2[P]. 2023-08-18.
- [79] 徐立章, 戴步旺, 刘朋. 一种基于 SLAM 技术的收割机机耕道自动导航方法及系统: CN202310750642.2[P]. 2023-07-28.
- [80] 张娇. 设施大棚中电动拖拉机导航系统研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- ZHANG Jiao. Research on Electric Tractor Navigation System in Facility Greenhouses[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [81] 方旭. 基于多传感器融合的果园植保机械导航系统研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
- FANG Xu. Research on Navigation System for Orchard Crop Protection Machinery Based on Multi-sensor Fusion [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [82] 张亚莉, 莫振杰, 田昊鑫, 等. 基于改进 APF-FMT* 的农业机器人路径规划算法[J]. *华南农业大学学报*, 2024, 45(3): 408-415.
- ZHANG Yali, MO Zhenjie, TIAN Haoxin, et al. Path planning algorithm of agricultural robot based on improved APF-FMT*[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2024, 45(3): 408-415. (in Chinese with English abstract)
- [83] 高锐涛, 资乐, 胡炼, 等. 农场道路图层构建和农机转移路径规划方法与试验[J]. *华南农业大学学报*, 2025, 46(2): 256-264.
- GAO Ruitao, ZI Le, HU Lian, et al. Farm road layer construction and agricultural machinery transfer path planning methods and experiments [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2025, 46(2): 256-264. (in Chinese with English abstract)
- [84] FAN X, WANG J, WANG H, et al. LQR trajectory tracking control of unmanned wheeled tractor based on improved quantum genetic algorithm[J]. *Machines*, 2023, 11(1): 62.
- [85] GE Z, MAN Z, WANG Z, et al. Robust adaptive sliding mode control for path tracking of unmanned agricultural vehicles[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2023, 108: 108693.
- [86] JOSEPH S B, DADA E G, ABIDEMI A, et al. Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: Review, approaches and open problems[J]. *Heliyon*, 2022, 8(5): e09399.
- [87] GAMEIRO T, PEREIRA T, VIEGAS C. Autonomous tractor control navigation in forest environments[J]. *Sensors & Transducers*, 2024, 265(2): 64-71.
- [88] 刘兆祥, 刘刚, 籍颖, 等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(11): 148-152.
- LIU Zhaoxiang, LIU Gang, JI Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(11): 148-152. (in Chinese with English abstract)
- [89] 吴才聪, 吴思贤, 文龙, 等. 拖拉机自动导航变曲度路径跟踪控制[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(21): 1-7.
- WU Caicong, WU Sixian, WEN Long, et al. Variable curvature path tracking control for the automatic navigation of tractors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(21): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [90] 张智刚, 罗潘文, 赵祚喜, 等. 基于 Kalman 滤波和纯追踪模型的农业机械导航控制[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(S1): 6-12.
- ZHANG Zhigang, LUO Xiaowen, ZHAO Zuoxi, et al. Trajectory tracking control method based on kalman filter and pure pursuit model for agricultural vehicle[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(Sup): 6-12. (in Chinese with English abstract)
- [91] JOGLEKAR A, SATHE S, MISURATI N, et al. Deep reinforcement learning based adaptation of pure-pursuit path-tracking control for skid-steered vehicles[J]. *IFAC-Papers On Line*, 2022, 55(37): 400-407.
- [92] BACKMAN J, OKSANEN T, VISALA A. Navigation system for agricultural machines: Nonlinear model predictive path tracking[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 82: 32-43.
- [93] ZHOU L, WANG G, SUN K, et al. Trajectory tracking study of track vehicles based on model predictive control[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 65(6): 329-342.
- [94] 周明宽, 夏俊芳, 郑侃, 等. 基于变增益单神经元 PID 的秸秆旋埋还田导航系统研制[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 31-40.
- ZHOU Mingkuan, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Development of rotary straw burying and returning navigation system based on variable-gain single-neuron PID[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(5): 31-40. (in Chinese with English abstract)
- [95] 杨杭旭, 周俊, 齐泽中, 等. 温室电动拖拉机旋耕稳定性时序分析与前馈 PID 控制方法研究[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(3): 412-420.
- YANG Hangxu, ZHOU Jun, QI Zezhong, et al. Rotary tillage stability of greenhouse electric tractor based on time series analysis and feedforward PID[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(3): 412-420. (in Chinese with English abstract)
- [96] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(4): 11-19.
- WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(4): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [97] 徐立鸿, 陈戎泉, 袁洪良. 含斜坡扰动的轮式拖拉机路径跟踪控制方法[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(11): 421-430.
- XU Lihong, CHEN Rongquan, YUAN Hongliang. Path tracking control method for wheeled tractors with slope disturbance[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(11): 421-430. (in Chinese with English abstract)
- [98] 张朝宇, 董万静, 熊子庆, 等. 履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(12): 105-114.
- ZHANG Chaoyu, DONG Wanqing, XIONG Ziqing, et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(12): 105-114. (in Chinese with English abstract)
- [99] 石佳晨. 基于 MPC 的智能稻麦收获机路径追踪方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- SHI Jiachen. Research on Path Tracking Method for Intelligent Harvester Based on Model Predictive Control[D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [100] 唐小涛, 陶建峰, 李志腾, 等. 自动导航插秧机路径跟踪系统稳定性模糊控制优化方法[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(1): 29-34.
- TANG Xiaotao, TAO Jianfeng, LI Zhiteng, et al. Fuzzy control optimization method for stability of path tracking system of automatic transplanter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1): 29-34. (in Chinese with English abstract)
- [101] 朱家明, 李安娜, 何晶华. 停车场车位优化设计的实证研究[J]. *长春师范大学学报*, 2021, 40(2): 6-13.
- ZHU Jiaming, LI Anna, HE Jinghua. Empirical study on

- optimized design of parking spaces[J]. Journal of Changchun Normal University, 2021, 40(2): 6-13. (in Chinese with English abstract)
- [102] ZHANG L, LI X, HUANG J, et al. Vision-based parking-slot detection: A benchmark and a learning-based approach[J]. Symmetry, 2018, 10(3): 1-18.
- [103] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [104] EISING C, HORGAN J, YOGAMANI S. Near-field perception for low-speed vehicle automation using surround-view fisheye cameras[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(9): 13976-13993.
- [105] WANG C, ZHANG H, YANG M, et al. Automatic parking based on a bird's eye view vision system[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 847406.
- [106] DEGERMAN P, POHL J, SETHSON M. Hough transform for parking space estimation using long range ultrasonic sensors[C]//Proceedings of the SAE 2006 World Congress & Exhibition. Detroit, USA: SAE, 2006: Paper 2006-01-0810.
- [107] BHASKAR H, WERGHY N. Comparing Hough and Radon transform based parallelogram detection[C]//Proceedings of the 2011 IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC). Dubai, UAE: IEEE, 2011: 641-644.
- [108] LEE S, SEO S W. Available parking slot recognition based on slot context analysis[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2016, 10(9): 594-604.
- [109] NIETO M, SALGADO L, JAUREGUIZAR F, et al. Robust multiple lane road modeling based on perspective analysis[C]//Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). San Diego, USA: IEEE, 2008: 2396-2399.
- [110] LI Q, LIN C, ZHAO Y. Geometric features-based parking slot detection[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2821.
- [111] VON GIOI R G, JAKUBOWICZ J, MOREL J M, et al. LSD: A line segment detector[J]. Image Processing On Line, 2012, 2: 35-55.
- [112] LI L, ZHANG L, LI X, et al. Vision-based parking-slot detection: A benchmark and a learning-based approach[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). Hong Kong, China: IEEE, 2017: 649-654.
- [113] ZHANG L, HUANG J, LI X, et al. Vision-based parking-slot detection: A DCNN-based approach and a large-scale benchmark dataset[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(11): 5350-5364.
- [114] HUANG J, ZHANG L, SHEN Y, et al. DMPR-PS: A novel approach for parking-slot detection using directional marking-point regression[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). Shanghai, China: IEEE, 2019: 212-217.
- [115] GUPTA S, ARBELAEZ P, MALIK J. Perceptual organization and recognition of indoor scenes from RGB-D images[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Portland, USA: IEEE, 2013: 564-571.
- [116] WANG Z, LIU H, QIAN Y, et al. Real-time plane segmentation and obstacle detection of 3D point clouds for indoor scenes[C]//Computer Vision—ECCV 2012. Workshops and Demonstrations: Florence, Italy, Proceedings, Part II 12. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 22-31.
- [117] HAN J, SHAO L, XU D, et al. Enhanced computer vision with Microsoft Kinect sensor: A review[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43(5): 1318-1334.
- [118] CHOI J, KIM D, YOO H, et al. Rear obstacle detection system based on depth from Kinect[C]//Proceedings of the 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Anchorage, USA: IEEE, 2012: 98-101.
- [119] ZHANG R, YANG Y, WANG W, et al. An algorithm for obstacle detection based on YOLO and light field camera[C]//Proceedings of the 2018 12th International Conference on Sensing Technology (ICST). Auckland, Limerick, Ireland: IEEE, 2018: 223-226.
- [120] GUPTA N, MAKAR J S, PANDEY P. Obstacle detection and collision avoidance using ultrasonic sensors for RC multirotors[C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC). Noida, India: IEEE, 2015: 419-423.
- [121] GAGEIK N, BENZ P, MONTENEGRO S. Obstacle detection and collision avoidance for a UAV with complementary low-cost sensors[J]. IEEE Access, 2015, 3: 599-609.
- [122] ROZSA Z, SZIRANYI T. Obstacle prediction for automated guided vehicles based on point clouds measured by a tilted LIDAR sensor[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(8): 2708-2720.
- [123] FU G, CORRADI P, MENCIASSI A, et al. An integrated triangulation laser scanner for obstacle detection of miniature mobile robots in indoor environment[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 16(4): 778-783.
- [124] 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: JARQ, 2014, 48(3): 307-316.
- [125] LEE I, LEE K, LEE J, et al. Autonomous greenhouse sprayer navigation using automatic tracking algorithm[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2015, 31(1): 17-21.
- [126] 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(2): 921-931.
- [127] 杨鹏强, 张艳伟, 胡钊政. 基于改进 RepVGG 网络的车道线检测算法[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(2): 73-81.
- YANG Pengqiang, ZHANG Yanwei, HU Zhaozheng. A lane detection algorithm based on improved repVGG network[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40(2): 73-81. (in Chinese with English abstract)
- [128] 贾远鹏, 陈学文, 哈瑞峰. 双注意力机制下自动驾驶汽车车道线深度感知研究[J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2023, 37(7): 44-50.
- JIA Yuanpeng, CHEN Xuewen, HA Ruifeng. Research on lane depth perception of autonomous vehicles with dual attention mechanism[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(7): 44-50. (in Chinese with English abstract)
- [129] KALAITZAKIS M, CAIN B, CARROLL S, et al. Fiducial markers for pose estimation: Overview, applications and experimental comparison of the ARTag, AprilTag, ArUco and STAG markers[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 101: 1-26.
- [130] 刘青松. 化工厂巡检机器人自动充电系统的设计[D]. 淮安: 淮阴工学院, 2023.
- LIU Qingsong. Application and Research of Automatic Charging Technology for Inspection Robots in Chemical Plants[D]. Huai'an: Huaiyin Institute of Technology, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [131] 代进洪, 向振文, 喻会福. 基于 Apriltag 的室外抗干扰识别定位系统研究[J]. 电子科技, 2023, 36(11): 47-55.
- [132] 许佳斌. 室内移动机器人导航系统研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2023.
- XU Jiabin. Research on Indoor Mobile Robot Navigation System[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [133] 李鑫, 李凌雁, 李楠. 基于 RFID 和 WSN 的采摘机器人自主定位与导航设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(9): 215-218, 268.
- LI Xin, LI Lingyan, LI Nan. Autonomous positioning and navigation design of picking robot based on RFID and WSN[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(9): 215-218, 268. (in Chinese with English abstract)
- [134] 张九通, 唐维东, 刘鸿瑞, 等. 基于 RFID 与 GPS 的拖拉机机库信息管理系统的设计与开发[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(5): 154-160.
- ZHANG Jiutong, TANG Weidong, LIU Hongrui, et al. Design and development of tractor hangar information management system based on RFID and GPS[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(5): 154-160. (in Chinese with English abstract)
- [135] 于兵, 柳鑫, 程海波, 等. 一种 WiFi 混合滤波的 RSSI 室内定位算法[J]. 导航定位学报, 2024, 12(3): 102-111.
- [136] 赵一智. 低功耗蓝牙室内定位的指纹定位方法研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2024.
- ZHAO Yizhi. Research on Fingerprint Localization Method for Bluetooth Low Energy Indoor Positioning[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2024. (in Chinese with English abstract)
- [137] 林相泽, 王祥, 林彩鑫, 等. 基于超宽带的温室农用车辆

- 定位信息采集与优化[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 23-29, 45.
LIN Xiangze, WANG Xiang, LIN Caixin, et al. Location information collection and optimization for agricultural vehicle based on UWB[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 23-29,45. (in Chinese with English abstract)
- [138] 危双丰, 庞帆, 刘振彬, 等. 基于激光雷达的同时定位与地图构建方法综述[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(2): 327-332.
WEI Shuangfeng, PANG Fan, LIU Zhenbin, et al. Survey of LiDAR-based SLAM algorithm[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(2): 327-332. (in Chinese with English abstract)
- [139] 徐淑萍, 杨定哲, 熊小墩. 多传感器融合的室内机器人 SLAM[J]. 西安工业大学学报, 2024, 44(1): 93-103.
XU Shuping, YANG Dingzhe, XIONG Xiaodun. Indoor robot SLAM with multi-sensor fusion[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2024, 44(1): 93-103. (in Chinese with English abstract)
- [140] 孙国祥, 黄银锋, 汪小岳, 等. 基于 LIO-SAM 建图和激光视觉融合定位的温室自主行走系统[J]. 农业工程学报, 2024, 40(3): 227-239.
SUN Guoxiang, HUANG Yinfeng, WANG Xiaochan, et al. Autonomous navigation system in a greenhouse using LIO-SAM mapping and laser vision fusion localization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(3): 227-239. (in Chinese with English abstract)
- [141] 邱凯昌, 万文辉, 赵红颖, 等. 视觉 SLAM 技术的进展与应用[J]. 测绘学报, 2018, 47(6): 770-779.
DI Kaichang, WAN Wenhui, ZHAO Hongying, et al. Progress and applications of visual SLAM[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(6): 770-779. (in Chinese with English abstract)
- [142] 付悦欣. 动态场景下基于语义信息的视觉 SLAM 算法研究[D]. 海口: 海南大学, 2023.
FU Yuexin. Research on Visual SLAM Based on Semantic Information in Dynamic Scenes[D]. Haikou: Hainan University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [143] 殷嘉徽. 室内场景下基于点线特征的 RGB-D SLAM 系统[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
YIN Jiahui. Point-Line-Based RGB-D SLAM System in Indoor Environment[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [144] 张倩. 温室机器人多传感器定位与建图方法研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
ZHANG Qian. Research on Multi-sensor Positioning and Mapping Methods for Greenhouse Robots [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)

Research progress on autonomous agricultural machinery technology and automatic parking methods in China

MA Qin , TANG Gengyu , FU Zunyuan , DENG Honggang , FAN Jianing , WU Caicong^{*}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Machinery Monitoring and Big Data Applications, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: Autonomous agricultural machinery has been emerged as one of the core strategies in recent years. It is ever pressing from the aging population, shrinking agricultural workforce, large-scale rural migration, and agricultural labor costs in China. Autonomous agricultural machinery can be expected to alleviate the labor shortages for the high efficiency and precision. Fully functional unmanned farm can also enhance the agricultural productivity and sustainability. In this study, a comprehensive review was presented on the technical requirements of autonomous agricultural machinery. An emphasis was also put on the key research advancements in China, including the environmental perception, high-precision agricultural mapping, autonomous positioning and navigation, path planning, and tracking control. One of the hallmark features of unmanned farms was attributed to the seamless and fully automated transfer of machinery among storage facilities and fields. Specifically, the autonomous machinery was automatically departed from its designated storage location, thus navigating the roads to perform field operations, and finally returning to park precisely at its original position in the shed after task completion. As such, the autonomous machinery was used in fields, farm roads, and agricultural sheds, indicating the great potential to farming. Nevertheless, the unmanned farm system was remained underdeveloped within the storage shed. Machinery parking, implement attachment, and departure still heavily depended on the manual intervention. Full automation over all scenarios was required the advanced positioning and navigation. Precise perception to shed environment was also necessary for the safety and efficiency during operations. Storage sheds were often densely populated with machinery, rather than the open and relatively predictable environments of fields and farm roads. The maneuvering space was limited to the more rapid and accurate perception and navigation, compared with the open fields. While the significant progress was found in the autonomous machinery under the scenarios of fields and road. The perception and autonomous parking technologies were less developed for shed operations so far. These challenges were also addressed to bridge the automation gap, and then unlock the full potential of unmanned farms. Much effort was focused mainly on the automatic parking of autonomous agricultural machinery, particularly on returning to the shed after field operations. Indoor positioning and precise navigation were also explored with the perception during automatic parking. Some procedures were involved in the indoor navigation from the shed entrance to the parking spot without Global Navigation Satellite System (GNSS) signals. The safe and efficient routes were determined for the final docking after environmental perception and machinery position. The fixed- and non-fixed routes were categorized for the positioning and navigation. Fixed-route navigation offered the simplicity, precision and stability, including the visual navigation (lane tracking and visual marker localization), rail guidance, and magnetic navigation. Safe zones of shed were also delineated to enhance the accuracy of position and parking. In contrast, the non-fixed-route navigation was provided for the superior flexibility, scalability, and adaptability to the complex and dynamic indoor environments, such as the external source-based positioning (e.g., radio frequency identification, WiFi, bluetooth, and ultra-wideband) and simultaneous localization and mapping (SLAM). Finally, the technical and practical challenges were summarized for the autonomous agricultural machinery. Specifically, the diverse technologies were integrated for the dynamic environments, particularly for the robust safety mechanisms. Future directions were outlined to integrate the multiple technologies for all-weather operation in the complex environments. Autonomous agricultural machinery can be expected to serve as the critical technology in unmanned farming. In turn, the operational quality and efficiency can also be enhanced in the modern agriculture.

Keywords: unmanned agricultural machinery; environment perception; high-precision map; positioning and navigation; full-scenario application; automatic parking