

农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析

刘成良^{1,2} 林洪振¹ 李彦明¹ 贡亮¹ 苗中华³

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;
3. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要: 智能控制是农业装备实现智能化的关键核心技术。从农业装备智能感知、智能控制、智能决策、自主作业、智能管控五方面阐述分析了国内外智能农机的发展现状,着重阐述了约翰迪尔、凯斯、科乐收、爱科等国际农机企业在农机智能控制方面的最新技术进展,分析了我国智能农机与国外的差距,指出了制约我国农机智能控制发展的关键问题。为实现我国从农机制造大国向农机制造强国的转变,融合大数据、云计算、物联网、人工智能等信息领域的前沿技术,提出了“智能在端、智慧在云、管控在屏”的智能农机系统发展新思路,指明现场控制智能化、云端决策智慧化、监控调度移动终端化是未来智能农机的发展方向。

关键词: 农业机械; 智能控制; 感知; 决策

中图分类号: S126; S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)01-0001-18 OSID:



Analysis on Status and Development Trend of Intelligent Control Technology for Agricultural Equipment

LIU Chengliang^{1,2} LIN Hongzhen¹ LI Yanming¹ GONG Liang¹ MIAO Zhonghua³

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
3. School of Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Intelligent control is the key technology for the intelligentization of agricultural equipment. From the aspects of intelligent perception, intelligent control, intelligent decision-making, autonomous operation, and intelligent control of agricultural equipment, this paper analyzes the development status and trends of intelligent agricultural machinery at home and abroad. The latest technological advances in agricultural machinery intelligent control by agricultural machinery enterprises, as well as the gap between China's intelligent agricultural machinery and foreign countries, the key issues restricting the development of agricultural machinery intelligent control in China. In order to realize China's transformation from a big country in agricultural machinery manufacturing to a strong country in agricultural machinery manufacturing, integrating cutting-edge technologies in information fields such as big data, cloud computing, the Internet of Things, artificial intelligence, etc. New ideas for the development of intelligent agricultural machinery systems, namely, intelligent field control, intelligent cloud decision-making, and mobile terminal monitoring and dispatching.

Key words: agricultural machinery; intelligent control; perception; decision-making

0 引言

随着我国社会的老龄化、城镇化的推进以及青壮年劳动力就业观念的变化,农业劳动力日益短缺,“谁来种地、如何种地”已成为严峻的社会问题。改变农业生产对劳动力的强依赖性,农业机械融合电子信息、物联网、云计算等技术,实现农业生产过程的

自动化、智能化、机器人化是解决上述问题的根本途径。“智能在端、智慧在云、管控在屏”,即现场控制智能化、云端决策智慧化、监控调度移动终端化是未来智慧农业的发展方向。美国^[1]、德国^[2]、日本^[3]等相继提出了各自智慧农业发展战略,我国农业装备领域的专家分别从不同角度阐述了我国智慧农业及智能农业装备的发展方向^[4-9]。中国制造 2025 计划也将

收稿日期: 2019-11-20 修回日期: 2019-12-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD07001)和上海市科技兴农项目(2019-02-08-00-08-F01122)
作者简介: 刘成良(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事农机智能控制和农业机器人研究, E-mail: chlliu@sjtu.edu.cn

智能农业装备列为十大发展领域之一。

智能农业装备是集复杂农业机械、智能感知/智能决策/智能控制、大数据/云平台/物联网等技术为一体的现代农业装备,可自主、高效、安全、可靠地完成农业作业任务。以智能农业装备为核心的智能农机系统(图 1)包括田间信息感知获取、田间智能作业机械、田间互通互联以及云-端互联系统、云平台决策管控中心。本文针对农业生产“耕、种、管、收”环节,阐述分析智能农业装备的智能感知、智能控制、智能决策、自主作业、智能管控五大关键技术现状、技术前沿及发展趋势。

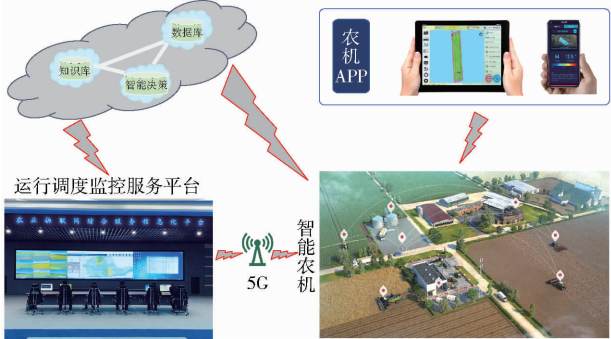


图 1 智能农机系统构成示意图

Fig. 1 Schematic of intelligent agricultural machinery system

1 智能感知技术

参考汽车自动驾驶^[10],智能农业装备感知分为机外感知和机内感知。机外感知是指对农机作业环境和对象信息参数的感知,包括作物生长及其病虫害信息感知、作业环境与障碍信息感知等。机内感知是指对农业装备自身的工作参数及作业状态参数的感知,包括农业装备共性状态参数感知、耕整机械作

业参数感知、施肥播种机作业参数感知、植保机械作业参数感知、收获机械作业参数感知等,如图 2 所示。

1.1 机外感知

1.1.1 作物生长与病虫害感知技术

(1)作物生长信息感知技术

叶绿素、氮素含量是作物生长的重要营养指标,直接决定了农产品产量和质量,鉴于作物光谱反射特征直接反映了作物叶绿素和氮素含量,因此,基于光谱特征分析法实时获取作物叶绿素和氮素含量是变量施肥和精准植保作业亟待解决的难题。

在叶绿素含量检测研究方面,俄克拉荷马州立大学的 JONES 等^[11]使用多光谱成像传感器检测叶绿素含量和浓度,使用超声波传感器估算植被高度来提高叶绿素含量检测精度,爱达荷大学的 EITEL 等^[12]使用平板彩色扫描仪检测植物叶片叶绿素含量,德国慕尼黑工业大学的 BARESEL 等^[13]将光谱技术和数字图像处理技术结合用于叶绿素含量检测。国内,李民赞团队^[14]研究了基于近红外光谱技术的叶绿素含量检测方法;朱艳团队^[15]基于高光谱遥感特征进行小麦叶片含氮量检测、小麦氮素积累动态检测等技术研究。

检测传感器及仪器产品开发方面,国内外已有较为成熟的叶绿素含量及氮含量检测仪器(表 1)。上述便携式手持产品可实现参数的离线检测。而 Yara 公司的 N-sensor 传感器(图 3)可直接安装在车载机具上进行作物叶绿素含量以及氮素含量的在线检测^[16],精度还有待进一步提高。

综上所述,目前叶绿素和氮素的光谱检测分析技术已相对成熟,离线手持式测量仪器已实现产品化,而车载叶绿素和氮素含量高精度实时在线快速

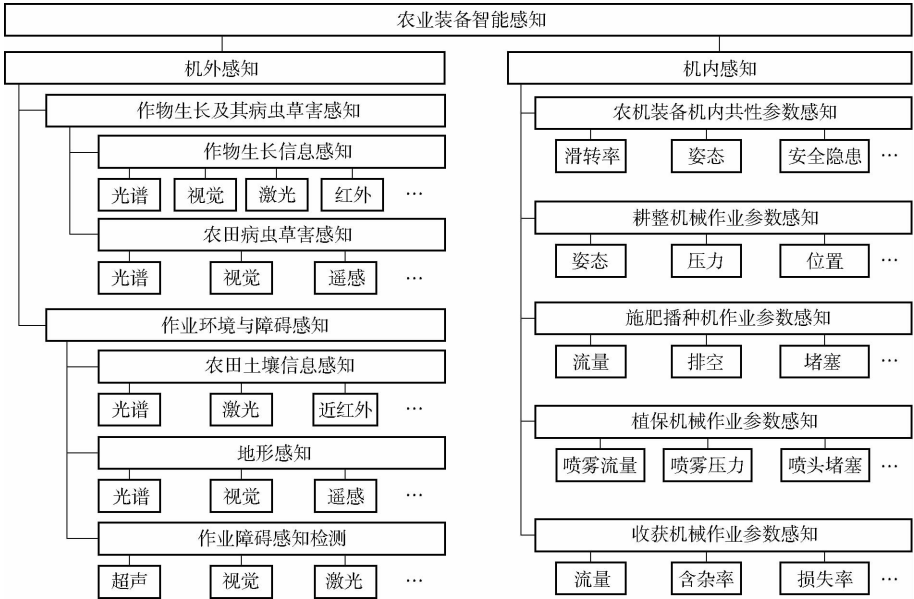


图 2 农业装备智能感知技术框图

Fig. 2 Agricultural machinery equipment intelligent sensing technology framework

检测是变量施肥和精准植保作业的关键,是亟待解决的难题。

表 1 叶绿素检测传感器产品特点

Tab.1 Product features of chlorophyll detection sensor			
公司名称	传感器名称	技术类型	检测方式
Apogee	chlorophyll concentration meter	光谱	手持
Konica Minolta	SPAD - 502 PLUS	光谱	手持
Trimble	GreenSeeker System	光谱	手持
Aquaread	chlorophyll meter	荧光	手持
Yara	N-sensor	光谱	车载在线
Hansatech	Chlorophyll Fluorimeter	荧光	手持
郑州锦农	SPAD/JN - YLS	光谱	手持
杭州绿博	LYS - A	光谱	手持



图 3 N-sensor 传感器

(2) 农田病虫草害信息感知技术
作物病虫草害信息准确感知是精准变量靶向喷施和季节性病虫害预测预防的依据。

目前病虫害的检测方法主要有荧光光谱法、可见/近红外光谱法、高光谱成像和数字图像处理法等。国外学者较早开始这方面的研究工作,如美国爱达荷州立大学的 GRIFFEL 等^[17],基于光谱特征,使用支持向量机(SVM)来检测感染病毒的马铃薯植株;德国波恩大学的 RÖMER 等^[18],基于荧光光谱特征,使用支持向量机来检测小麦叶锈病,比利时鲁汶大学的 MOSHOU 等^[19],基于高光谱反射信息,使用荧光成像技术来检测冬小麦黄锈病;KAUR 等^[20]使用图像处理和支 持向量机技术对植物的叶面图像检测植物病变,计算出患病面积的百分比。国内何勇团队^[21]利用可见光和近红外光等光谱信息对茄子叶片灰霉病、大豆豆荚炭疽病进行检测;王儒敬团队^[22-23]研究了基于深度学习的病虫害智能化识别系统,使用多分类器融合的方法对玉米叶部病害进行识别。文献[24-26]采用光谱技术对苹果、柑橘、枣等实现虫害的无损检测。上述检测手段都是离线检测方法。

鉴于病虫害信息具有实时可变性,需要进一步解决在线检测实时靶向喷药处理。自然环境下基于机器学习的车载高精度、快速作物病虫害识别技术是要攻克的难题。

杂草去除是提高作物产量的重要环节,机器代人靶向定点去除是发展方向,杂草、作物、背景环境快速实时精确识别定位是难点。杂草的检测识别定位主要有视觉法和光谱法。昆士兰科技大学的 HALL 等^[27]开发了一个可快速部署的杂草分类系统,该系统使用可视数据来实现自动精确除草,无需事先确定田地中存在的杂草物种;日本名古屋大学的 WATCHAREERUETAI 等^[28]使用单目相机,基于纹理和颜色特征检测草坪中的杂草;丹麦奥尔堡大学的 KAZMI 等^[29]使用单目相机,基于叶片颜色和边缘形状特征进行杂草检测;法国勃艮第大学的 MARINE 等^[30]提出了结合空间信息和光谱信息,用于农作物杂草早期检测的无监督分类算法;比利时让布卢大学的 PIRON 等^[31]使用立体视觉传感器,基于株高特征进行杂草识别分类;BAKHSIPOUR 等^[32]将神经网络技术应用于杂草识别。李伟团队^[33]研究了基于视觉形态特征的杂草识别方法,将其应用到移栽类蔬菜用苗间锄草机器人上。何东健等^[34]和李先锋等^[35]分别将支持向量机和 DS (Shafer - Dempster) 证据理论用于多特征融合的杂草识别方法。国内外一些农机企业也推出了农田杂草识别系统,科乐收(CLAAS)、蓝河科技(Blue River Technology)分别在 CULTI CAM 和 See & Spray 解决方案中使用了基于视觉的田间杂草感知系统(图 4a)。碳蜂(Carbon Bee)公司推出了一种车载的高光谱传感器 AQiT - Sensor,可以识别出作物中间生长的杂草(图 4b)。

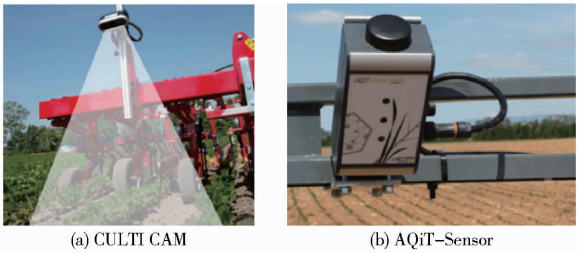


图 4 农田杂草传感器

目前农田杂草的感知技术主要基于视觉特征,对于不同的杂草需要不同的算法,用于学习训练的数据库比较单一和独立,未来可以将杂草的特征进行整合建立一个统一的数据库,使用机器学习的方式将各种杂草最主要的特征进行提取,减少终端的运算量,提高杂草感知的准确性和实时性。

1.1.2 作业环境与障碍感知技术

(1) 农田土壤信息感知技术

车载农田土壤信息感知是提高精准变量肥水施用生产率的有效手段。车载土壤信息获取包括土壤养分、水分、酸碱度、压实度等信息。

车载土壤养分精确测量目前还没有成熟的手段,但国内外学者都对此进行了大量深入研究。何勇团队^[36-37]利用土壤的光谱特征来检测土壤的有机质含量、含水率、氮磷含量、pH 值等信息;李民赞团队^[38-39]基于卤钨灯光源和多路光纤法设计了土壤全氮含量检测仪,基于近红外光谱信息对土壤参数进行实时分析,使用神经网络和支持向量机对土壤参数进行预测,研发了车载式土壤电导率与机械阻力实时测量系统;王儒敬团队^[40-41]设计了土壤钾离子非接触电导检测装置,基于光谱、卷积神经网络、深度稀疏学习等方法对土壤有机质含量进行预测;张小超团队^[42-43]利用近红外光谱法分析了北京典型耕作土壤的养分信息,研究了基于激光诱导击穿光谱的土壤钾素检测方法,应用傅里叶变换近红外光谱技术分析了土样的全氮、全钾、有机质养分含量和 pH 值;孙宇瑞团队^[44]开发了土壤水分剖面实时测量传感器、农田土壤含水率与坚实度信息快速采集系统,设计了基于激光反射的土壤表面粗糙度测量装置,运用近红外光谱分析方法对土壤质地进行分类。

国外从事土壤信息感知技术研究的有美国乔治亚大学的 HAMRITA 等^[45]使用射频识别技术对土壤的温度信息进行快速无线实时监测;意大利卡西诺大学的 ANTONUCCI 等^[46]使用主动红外热成像法实现了实验室和现场的土壤含水量快速检测;比利时列日大学的 GENOT 等^[47]使用近红外反射光谱法检测土壤有机质含量。

目前与农田土壤信息感知相关的企业和产品,如奥地利 POTTINGER 公司的车载综合土壤传感器 TSM,可以实时地扫描土壤表层和深层土质结构,得到不同区块的压实度、含水率、电导率和土壤类型等信息(图 5a)。美国精密种植(Precision Planting)公司的 Smart Firmer 传感器和 Delta Force 压力传感器能够感知土壤的有机质含量,收集温度和湿度信息,采集土壤的硬度信息(图 5b)。美国 Veris technologies 公司的 iScan 车载传感器可以实时检测土壤的质地、含水率、温度、土壤阳离子交换容量、有机质含量等信息。

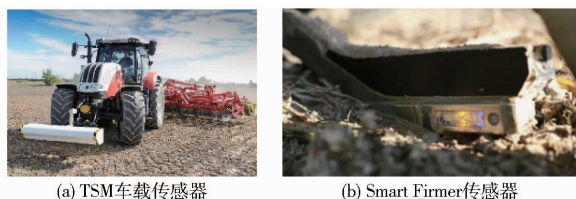


图 5 土壤传感器产品
Fig. 5 Soil sensor products

土壤养分车载精确测量是未来努力的方向,车载含水率、酸碱度、压实度、有机质含量等参数测量

技术相对成熟,但高可靠性、高精度、多参数组合量传感器是未来的发展方向。此外,为配合智能农业装备处方作业,在土壤中预埋大量物联网传感器的智慧农田系统是未来智慧农业的发展趋势,研发低功耗、低成本、小型化、无线通信土壤信息传感器,将土壤参数上传至云端,农业装备按需取用,实现闭环控制是未来的创新发展模式。

(2) 作业障碍信息感知技术

障碍物信息感知是智能农业装备在复杂的非结构化农田环境中安全可靠作业的保障。农业装备作业环境中的障碍物复杂多变,静态有树木、电线杆、水井、房屋等,动态有人、动物、作业农机等。目前障碍物检测手段主要有超声雷达、激光雷达、红外传感、视觉传感器以及多传感融合等。美国肯塔基大学的 DVORAK 等^[48]使用超声波传感器检测农业环境中的障碍物。韩国国立韩国外国语大学的 KIM 等^[49]、西班牙阿卡拉德赫拿勒斯大学的 DIEGO 等^[50]使用多个超声波传感器组成阵列来检测障碍物,该方法可以有效地提高稳定性。德国汉诺威大学的 BRENNEKE 等^[51]使用三维激光雷达检测障碍物,受天气、光照等环境因素的影响较小。PENG^[52]使用成本略低的二维激光雷达,配合算法可以准确地检测障碍物。美国斯坦福大学的 MICHELS 等^[53]、MAIER 等^[54]使用单目视觉传感器检测障碍物,配合强化学习算法提高检测稳定性(图 6a)。BRAND 等^[55]、德国凯泽斯劳滕大学的 FLEISCHMANN 等^[56]使用双目立体视觉生成点云信息,识别障碍物比单目视觉更加准确。OHYA 等^[57]、DING^[58]、LIU^[59]研究了视觉、激光雷达、红外成像和超声波等多传感融合的障碍感知方案(图 6b)。刘成良团队^[60]研究了基于支持向量机的视觉水田田埂边界检测方法。周俊等^[61]基于机器视觉技术检测作业环境中的运动障碍,采用帧差法消除机器人自身运动的影响。何东健团队^[62]基于机器视觉技术,使用贝叶斯决策图像分割法进行障碍物检测。奥地博田公司的车载 Sensosafe 传感器通过光学红外传感器检测在收割时隐藏在草丛中的野生动物。

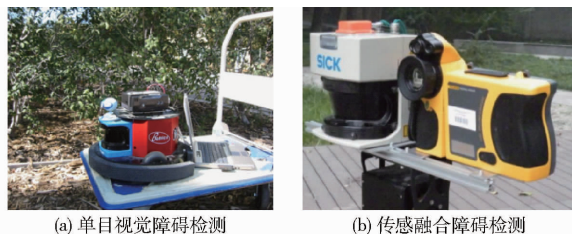


图 6 障碍物检测传感器
Fig. 6 Various types of obstacle detection sensors

农业装备作业环境中的障碍物感知技术中,红

外技术是检测人和动物的有效方法,超声与激光雷达测量范围大,对距离、速度检测精度高,三维雷达测量精度高,但成本也高,基于视觉、二维雷达组合的障碍物检测是较理想的方案,多传感融合是农田障碍感知的研究重点。

1.2 机内感知

农业装备机内感知的目的是实现机器运行的闭环控制,以及作业参数的优化匹配。

1.2.1 农业装备共性参数感知技术

农业装备机内共性参数包括发动机信息、动力输出信息、扭矩信息、滑转率、姿态信息、安全隐患信息等。其中发动机信息、动力输出信息等可通过 CAN 总线按照 ISO 11783 协议读出,姿态信息一般可采用北斗模块和陀螺仪获得,而扭矩信息、滑转率是农业装备共性参数检测的难点。RAJABI-VANDECHALI 等^[63]基于径向基函数(Rdial basis function, RBF)神经网络和自适应神经网络模糊推理系统(Adaptive network-based fuzzy inference system, ANFIS),使用低成本传感器对拖拉机发动机的扭矩进行了估测。王书茂团队^[64]使用多模多频卫星定位与惯导测速技术,采用扭振补偿的旋转编码测速方法,实现了低速扭振动力机械的驱动轮边速的高精度测量。未来农业装备机内共性参数感知的研究重点是扭矩信息和车轮滑转率精确测量。

1.2.2 耕整机械作业参数感知技术

耕整机械的作业参数有姿态、压力、位置、深度等。实现深松作业的关键前提是耕整深度的准确检测。孟志军团队^[65]提出一种基于深松机组姿态估测的耕深检测方法。朱忠祥团队^[66]提出一种基于倾角传感器的自动测量农机具耕深的方法。苑严伟团队^[67]提出一种基于超声波测距传感器的悬挂式深松机耕深在线检测方法。博世力士乐公司推出了用于耕整机械的液压控制解决方案,方案使用了多种传感器实现了耕整机具姿态感知、耕整作业阻力感知、耕整深度感知。未来耕整机械的作业参数感知可以结合土壤信息感知技术,在耕整阶段全方位、多参数地感知土壤信息,建立土壤信息图,实现“一次感知,全过程使用”。

1.2.3 施肥播种机械作业参数感知技术

施肥播种机械的作业参数有种肥流速流量、播施深度等。施肥播种机械作业参数的准确感知是施肥播种机械精准自主作业的基础。SWISHER 等^[68]使用激光发生器和光学传感器设计了一种用于测量气流中颗粒肥料流量的传感器。苑严伟团队^[69-70]设计了一种差分结构的电容传感器,在排料管道外壁构建阵列式电容传感器来提高检测精度。刘成良团队^[71]基于电容法设计了一套用于小麦播种量检

测的系统,建立了种子数量与电容变化量之间的线性关系。余洪锋等^[72]设计了一种基于皮带秤的施肥机施肥性能检测装置,装置可以检测排肥口的实时流量。精密种植公司的 SpeedTube 是高速种植系统的一个组件,可以在高速播种的情况下精确测量播种施肥的速率,WaveVision 使用高频无线电波测量播种量,有效消除了灰尘的干扰,vSet 是一种圆盘式的解决方案,基于转速检测播种量。

目前施肥播种精量控制技术比较成熟,但在肥种流量检测方面,虽然有光电、电容等不同方法,但其精度不高、可靠性还有待进一步提高,应侧重于检测数据的智能处理方法以及创新感知原理新型传感器设计的研究。

1.2.4 植保机械作业参数感知技术

植保机械作业状态参数包括喷雾压力、喷雾流量、喷杆姿态等。李树江团队^[73-74]通过多传感信息采集,建立基于总线的作业速度、喷雾流量、喷雾压力、喷杆作业状态、喷头堵塞、喷杆高度探测、药液体积、气象环境等参数的在线监测系统,并实现喷头堵塞及低流量自动报警、喷杆高度自动仿形,解决了传统植保机械容易出现的农药漏喷、不均匀和飘移等问题。精密种植公司开发了用于液体测量的传感器,该传感器可以实时测量包括液体农药和液体肥料在内的液体流量。目前对于植保机械的作业参数感知研究较少,未来应研究液体肥料和农药的感知机理,解决传感器的抗腐蚀性和精度保持性问题。

1.2.5 收获机械作业参数感知技术

收获机械种类繁多,本文主要以稻麦、玉米联合收获和棉花采摘机械为例进行收获机械作业参数感知技术分析。稻麦、玉米等联合收获机械的作业参数有含水率、流量、损失率、含杂率等。巴西圣保罗大学的 DA 等^[75]使用 6 个双板差分冲击式传感器形成阵列来测量谷物产量,有效地减小了振动引起的噪声干扰。印度旁遮普农业大学的 SINGH 等^[76]基于称量传感器开发了安装在储罐底部的收获机械产量传感器,并且使用此传感器结合 GPS 系统开发了产量制图系统。丹麦电气工程技术大学的 HERMANN 等^[77]使用谷物流量模型和谷物吞吐量传感器,对谷物流量进行预测。印度农业工程学院的 HIREGOUDAR 等^[78]使用人工神经网络技术评估田间条件下的谷物收获损失。加拿大阿尔伯塔大学的 LIU 等^[79]使用 9 个声学谷物撞击传感器布置在收割机分离格栅下方,通过对声学撞击信号的分析检测谷物损失量。比利时鲁汶大学的 WALLAYS 等^[80]基于多光谱视觉传感器和遗传算法检测谷物流中的谷壳、稻草等杂质,得到谷物清洁度数据。罗

锡文团队^[81]设计了一种双板冲量式谷物流量传感器及其差分消振电路,以消除车身振动对测产精度的影响。刘成良团队^[82-83]设计了冲量式谷物联合收获机智能测产系统和基于计算机视觉的谷物测产系统。张小超团队^[84-85]研究了基于称重法的联合收获机测产方法,设计了用于联合收获机谷物损失测量的聚偏氟乙烯阵列传感器,研究了基于电容法的棉管籽棉质量流量检测方法。刘成良团队^[86]研究了基于光电原理的棉花流量产量测量装置,引入网络神经元进行数据的分析。郑传涛团队^[87-89]提出采用可调谐二极管激光吸收光谱技术,探测痕量CO,研制抗干扰新型红外CO传感器,实现收获作业过程中隐性火灾的探测。

目前收获机械的作业参数传感原理已基本成

熟,国外科乐收等机型也安装有成熟的水分、流量等传感器,国内缺乏成熟的产品,主要在于检测精度与可靠性不高,虽然多年来国内学者一直进行此方面的研究,但在精度、可靠性、算法模型等方面与实际应用还有差距。

2 智能控制技术

2.1 总线控制

多传感以及多智能控制单元是智能农机的一个显著特点,对此国际标准化组织制定 ISO 11783 标准^[90],详细规定了智能农机的控制系统网络整体架构、物理层、网络层、数据通讯、各种电子控制单元(ECU)及任务控制器结构。图 7 为基于 ISO 11783 的智能农机控制系统结构组成和示例说明。

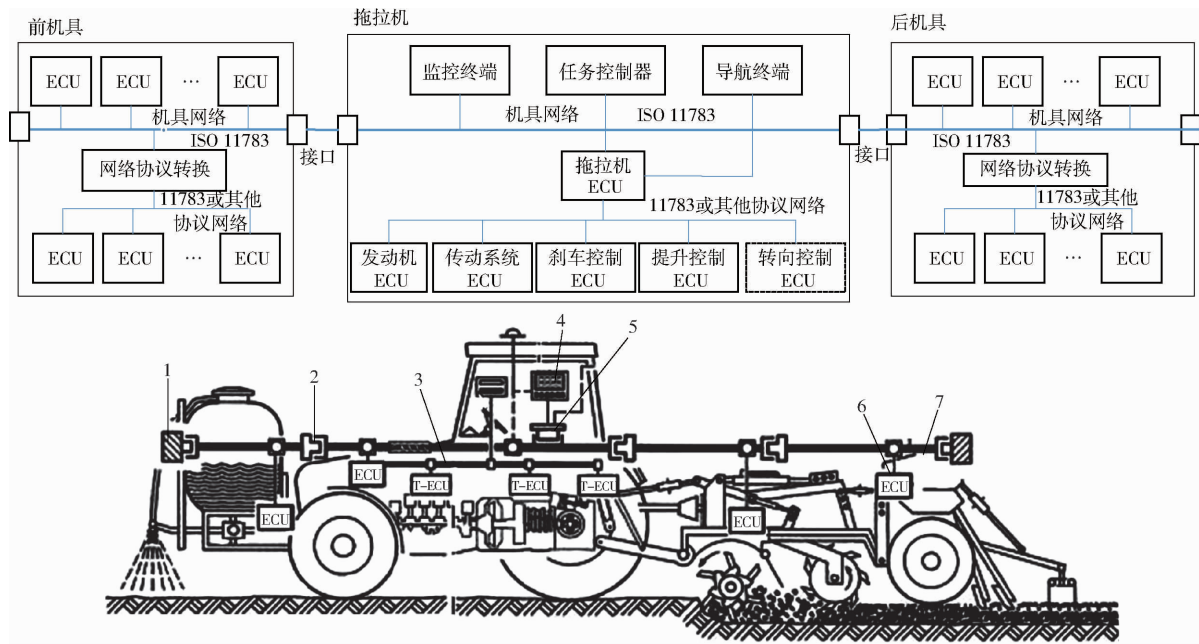


图 7 ISOBUS 示意图

Fig. 7 ISOBUS schematic

1. 总线末端 2. 总线插座 3. 自带控制器的拖拉机内部总线 4. 用户终端 5. 到运营计算机的数据终端 6. 机具 ECU 7. 拖拉机-机具总线

为了推行 ISO 11783 标准,美国制造商协会(National association of manufacturers, NAM)、德国机械设备制造业联合会(Verband deutscher maschinen- und anlagenbau, VDMA)和格立莫(GRIMME)、格兰(KVERNELAND)、爱科、奥地博田、克拉斯、约翰迪尔、凯斯纽荷兰于 2008 年共同成立了农业电子协会(Agricultural industry electronics foundation, AEF),拥有 230 个世界主要农机企业及科研机构成员。世界著名农机公司目前大都采用 ISOBUS 控制结构,图 8 是凯斯公司的总线结构。

国内自 2008 年开始关注 ISOBUS 在农机中的应用,开始借鉴其通讯结构并在导航系统中应用^[91],自 2017 年开始采用 ISO 11783 系列标准,颁布了 GB/T 35381 系列标准^[92]。国内福田雷沃、一

拖、五征、中联重机等主要农机公司开始采用 ISOBUS 系统。总线控制系统的研究热点集中在监控终端、主机和机具控制器方面。

2.2 监控终端

监控终端是一个状态监控系统,实时显示农机的运行状态,ISO 11783 对监控终端的功能、界面布局等做了详细规定^[93]。

由于监控终端是农业装备产品化的部件,所以对其研究较多的是农业装备企业。欧美等高端农机都配备有符合标准的监控终端(图 9),约翰迪尔公司 Green Star 系列总线化车载智能终端提供了高低不同的一整套显示屏交互方案,获得了 AEF 的授权,使用 ISO Task Control 功能控制第三方机具。凯斯公司推出的 AFS DISPLAY 终端可以监控和控制

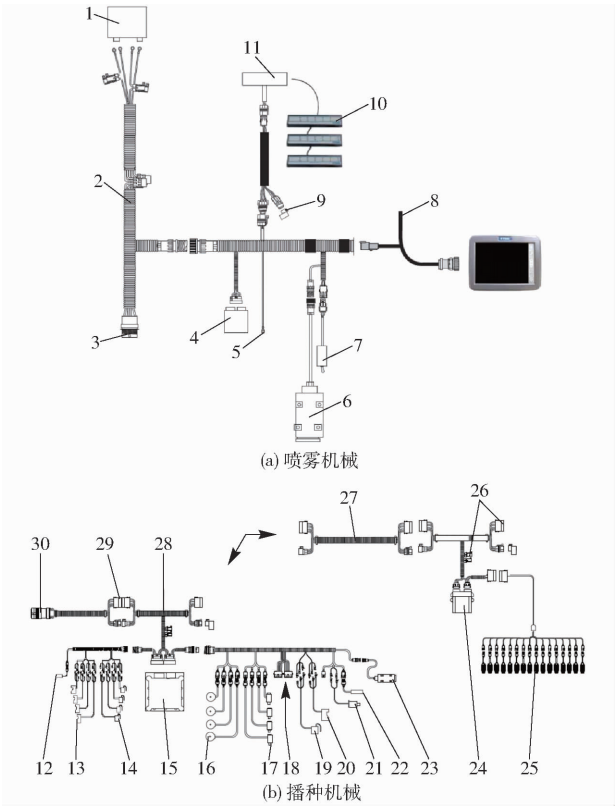


图 8 凯斯公司 ISOBUS 总线结构

Fig. 8 CASE IH company ISOBUS bus structure

1. 电源 2. 拖拉机电源线 3. 连接机具 CAN 线 4. 拖拉机 ECU 5. 点火开关 6. 雷达接口 7. 总开关 8. AgGPS 现场管理显示 线 9、26. CAN 末端 10. 通用扩展交换机模块 11. 喷雾器 12. 风扇转速传感器 13. 料斗余量传感器 14. 气压传感器 15. 气吸式播种机控制器 16. 应用速率传感器 17. PWM 电磁阀 18. 伺服阀 19. 气压传感器 20. 料斗平面传感器 21. 机具 提升传感器 22. 风扇转速传感器 23. 雷达速度传感器 24. 种 子监视器 25. 排线 27. 机具 CAN 扩展线 28. 气吸式播种机 控制线 29. CAN 牵引扩展线 30. 连接驾驶室线

凯斯的车辆和工具,记录重要的数据和路线,用于将来的管理和决策,终端符合 ISOBUS 标准。科乐收公司为其自动转向系统 GPS PILOT 配备了一个集成了 10.4 英寸触摸屏和双频接收器的 S10 终端,具有操作自动转向系统、控制接入 ISOBUS 的机具等功能。格兰公司发布的 iM FARMING 精准农业解决方案包括 Iso Match 特勒斯专业版(Tellus Pro)通用终端。爱科旗下麦赛弗格森(Massey Ferguson)的 FUSE Technologies 解决方案中包括了 AgCommand 监控终端。除了农业装备主机企业自研的监控终端外,还有一些配套企业提供的监控终端,例如美国 MC Elettronica 公司、DICKEY-john 公司、AIS 公司、STW 公司、Agleader 公司等都推出了相关产品(图 10),JCA 公司还将监控终端功能移植到 Android 或者 IOS 系统的平板电脑上。国外农业装备不论是主机企业还是配套企业的终端设备,基本都符合 ISOBUS 标准。



图 9 国外农机企业的监控终端

Fig. 9 Virtual terminals of foreign agricultural machinery enterprises



图 10 国外配套企业的监控终端

Fig. 10 Virtual terminals of foreign supporting enterprises

国内农业装备企业目前在跟进监控终端的研究发展,与国外不同的是,国内农业装备主机企业一般使用配套公司的监控终端产品。例如司南公司农机智能终端用于卫星导航自动驾驶,是集用户界面显示、作业数据显示、作业模式调整等功能于一体的综合性农机智能终端。中海达公司农机智能终端采用一体化设计,内置北斗卫星导航定位系统,采用其独有的 Smart Heading 等多项专利技术,实现对农机驾驶数据的显示和农机驾驶的操控。除此之外其他监控终端供货商有长沙硕博电子、贵州永青电子、北京博创联动、上海宏英科技等公司,基本上都是从工程机械领域向农业装备领域拓展的。国内企业开发的监控终端大部分没有通过 AEF 的认证,对 ISO 11783 标准的兼容性未知,甚至有的企业和单位使用 LabView 等第三方组态软件编写上位机界面实现监控终端的功能。

目前国内的农业装备监控终端存在的主要问题

是没有实现接口、功能和界面的标准化,没有互换性,不能实现不同企业农机和机具之间的互联互通,未来需要解决的问题是监控终端的标准化问题。

2.3 主机和机具控制器

控制器是实现农业装备智能控制的核心部件。ISO 11783 规定的 ISOBUS 按照设计功能和安装位置的不同将农业装备中的 ECU 分为主机 ECU 和机具 ECU 两类^[94]。主机 ECU 可以完成的功能包括电源管理、拖拉机设备响应、附加悬挂参数、机具与拖拉机照明控制、估计和测量辅助阀流量、悬挂命令、动力输出装置(Power Take - Off, PTO)命令、辅助阀命令等,可以读取处理的信息包括辅助阀信息、PTO 信息、速度和距离信息、时间/日期信息、悬挂信息、语言信息等;机具 ECU 主要完成机具作业时的控制,如耕整机具的犁深控制、喷施机具的变量喷药施肥、播种机具的精度播种等。

如图 11 所示,国外智能农机控制器主要有两类,一类是企业自主研发的控制器,比如约翰迪尔公司的 M50、M700、2000 控制器。凯斯的 AFS 控制解决方案中包括了 EZ 系列控制器,有 EZ - PILOT、EZ - STEER 等型号。一类是配套企业研发的符合 ISOBUS 标准的产品,如博世力士乐开发了可用于农业装备行走机械控制的 BODAS 控制器,用于电液提升控制和犁深控制的 EHC - 8 控制器;STW 公司开发了符合 ISOBUS 标准的 ESX 系列控制器。国内博创联动开发了 SF9507 车载控制器、TTC60 通用控制器,派芬开发了 HE20 系列控制器。

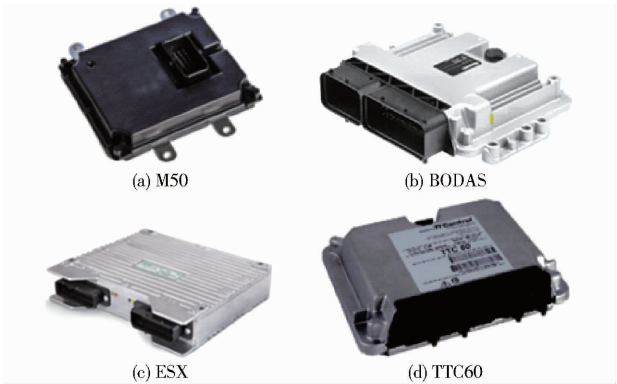


图 11 拖拉机主机控制器
Fig.11 Tractor main controller

研究方面,TUMENJARGAL 等^[95]在 ISOBUS 的基础上开发了一种施肥机械液压控制系统,基于 OSB - Ag 公司的 ISOBUS 商用库,开发了面向服务器 ECU 和客户端的应用程序。BACKMAN^[96]将 ISOBUS 应用于农业机械的导航控制系统,使用了 ISOBUS 规定的标准接口和通信通道、标准信息流等。苗中华等^[97]将 CAN 应用层协议应用到采棉机智能监控系统中,搭建了基于 CAN 总线的数字化智

能监控系统。杨卫平团队^[98]基于拖拉机的 ISOBUS 实现了拖拉机的故障诊断。目前我国的农机主机控制器主要是来自第三方配套生产,不符合标准,不利于高端智能拖拉机的推广。

如何为用户提供开放的编程环境是目前农机控制器使用中的一个问题。目前的农业装备控制部分没有操作系统的概念,使用基于 Windows、Linux 的上位机程序,或者是基于 LabView 编写的界面来完成应该由操作系统完成的功能。部分企业开始进行农业装备操作系统的研究,博世力士乐公司为其开发的 BODAS 控制器配备了 BODAS 系列的配套软件,利用配套软件可以实现对控制器的图形和文本编程,已经具有了操作系统的基本功能;约翰迪尔的 MECA 控制器搭载了约翰迪尔操作系统(John Deere operating system, JDOS),可以实现强大的软件后期开发;STW 公司的 ESX 系列控制器使用 CoDeSys 搭建了开发环境,可以使用 C 语言或 Matlab/Simulink 支持包进行自由编程,实现功能扩展和后期升级。目前大部分农业装备企业还没有建立起农机操作系统的概念,未来应将操作系统纳入标准化的范畴,研究基于农机操作系统的云传输、云控制技术。

3 智能决策技术

硬件是智能控制的躯体,决策是智能控制的大脑。决策和协同是保证智能农机高效、高精度及高品质作业的关键,主要技术包括变量作业决策技术、路径规划决策技术、多机协同作业技术。

3.1 变量作业决策

变量作业智能决策是指根据作业过程中的传感器数据,结合专家系统、知识库和数据库里的信息,得出控制策略。美国蒙大拿州立大学的 PEERLINCK 等^[99]使用机器学习算法,通过分析冬小麦的施肥配方对产量进行预测,进而实现了对小麦施肥配方的辅助决策;芬兰于韦斯屈莱大学的 KAIVOSOJA 等^[100]使用遥感信息估计土壤的氮含量,将此数据用来对变量施肥的配方进行决策,实现精准施肥。国内孟志军等^[101]开发了基于处方图的变量作业控制和辅助导航软件;魏新华团队^[102]设计了脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统;苑严伟团队^[103 - 104]设计了变量配肥施肥机和小麦精度播种变量施肥机,开发了基于作业处方图的氮磷钾配比施肥决策支持系统;赵春江团队^[105]论述了基于空间信息的精准施药分析决策方法;刘成良团队^[106]研究了基于模糊系统的开度转速双变量施肥控制序列生成方法。凯斯公司研发了 ST820 型气力输送式变量施肥播种机,施肥作业前在计算机上制作处方图,

生成处方文件,施肥机自动实施变量作业。科乐收公司研发了一种振动式切线脱粒系统,该系统能根据农学策略自动优化决策调整脱粒滚筒转速和脱粒间隙宽度等参数。农机变量作业决策是专家经验、农机动力学模型和人工智能的综合应用,国内在这方面研究较为深入,研究成果也较多。今后变量作业决策的发展一方面是新模型算法的深入研究,另一方面是大数据、人工智能及云计算在变量决策方面的深入应用。

3.2 路径规划决策

农业装备的作业路径规划是指必须满足相关农艺规范的要求,实现作业区域内不重、不漏前提下,对作业距离、时间、转弯次数、能耗等参数优化,寻找合理的行走路线,是农机无人驾驶与自主作业的不可或缺的一环。

农田环境下农业装备的行驶路径包括跟踪作物行的直线段路径和连接直线段之间的曲线段路径。直线段的路径规划主要依靠 A-B 线导航技术。对于全区域覆盖路径规划而言,考虑的不仅仅是转弯路径而是包括转弯路径在内的农田区域内的所有行驶轨迹,目前的规划方案有 S 形、口字形、回字形、对角形 4 种(图 12)。对全区域路径规划的研究多集中在转弯路径(图 13),转弯路径的规划方案有弓形、半圆形、梨形、鱼尾形 4 种。国内外学者对于路径规划的研究成果总结如表 2,日本岩手大学的 TORISU^[107] 结合拖拉机的机械参数和农田的几何约束,以转弯路径的时间最短为目标优化拖拉机的地头转弯路径规划。日本北海道大学的 KISE^[108] 以最小转弯半径和最大转弯速度为目标,利用 3 阶样条函数创建了两种转弯路径,即前向转弯路径和后退转弯路径。美国康奈尔大学的 RYERSON 等^[109] 将农田区域划分为多个单元块后,基于遗传算法寻找

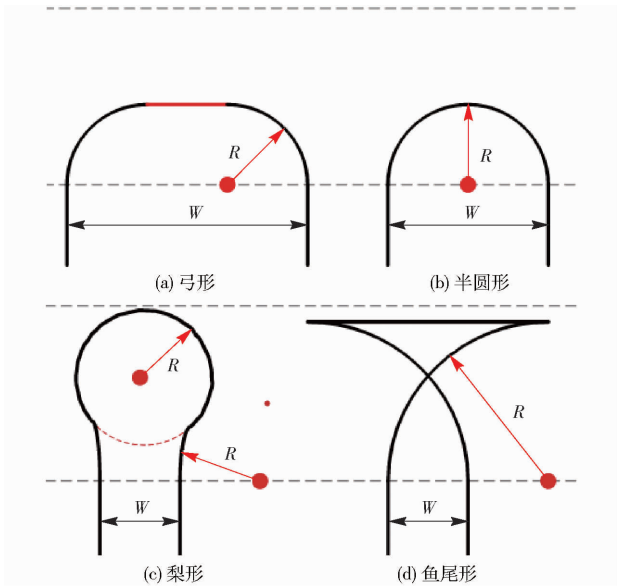


图 13 农业装备地头转弯策略^[116]

Fig. 13 Turning strategy of agricultural machinery equipment

全区域路径来实现最大的覆盖面积和最小的行驶距离。美国阿肯色大学的 KAREN^[110] 将决策支持系统用于拖拉机导航,决策系统会选取最节省时间、最节省燃料、盈利最高的行驶路径。日本国家农业研究中心的 NAGASAKA 等^[111] 设计了采用梭形法进行转弯作业的自动驾驶插秧机。德国斯图加特大学的 STOLL^[112] 提出了一种根据目标地块最长边将其分割成子田块,再分别对子田块进行全覆盖作业的规划路径方法。HAMEED^[113] 以成本最小化为路径规划的准则,提出了一种多目标优化覆盖规划方法。国内刘刚等^[114] 提出了一种基于 GNSS 的农田平整自动导航路径规划方法,该方法以空载或满载时间最短为最优评价基准。孟志军等^[115] 提出了一种面向农田作业机械的地块全区域覆盖路径优化方法,该方法将田间作业划分为不同区域,根据先验信息选择不同的路径优化目标:转弯数最少、作业消耗最小、总作业路径最短或有效作业路径比最大。

目前规则地块的全覆盖路径规划算法已经比较成熟,未来的研究方向是不规则地块及多障碍、多约束的全覆盖路径规划算法,解决主机和机具不同转弯半径时的自适应路径规划算法,以及绕过不同障碍物继续进行作业的路径规划算法。

3.3 多机协同作业

现代农机有两种不同发展方向,一是朝超大型化、复杂化方向发展;另一个方向是通过多台小型农机协同作业,提高生产效率,多机协同作业对具有严格的作业窗口期要求抢种抢收的意义重大。

农业装备的多机协同控制分为主从协同控制和共同作业控制。日本北海道大学 NOGUCHI 团队^[117-118] 研究了一种手动驾驶拖拉机跟随自动驾驶

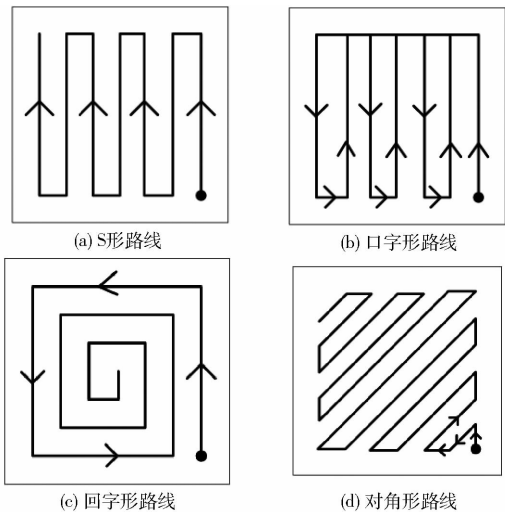


图 12 全区域覆盖路径规划策略^[116]

Fig. 12 Regional coverage path planning strategy

表 2 路径规划研究成果

Tab.2 Summary of path planning studies

优化目标	方法	代表性研究人员	技术指标
直线轨迹跟踪	PID 控制	日本国家农业研究中心 YOSHISADA	最大偏差 12 cm,均方根误差 5.50 cm (0.60 m/s),转弯半径约为 2 m
转弯时间最短	利用庞特里亚金的极大值原理	日本岩手大学 TORISU	时间节省 28%
轨迹跟踪最小偏差	3 阶样条函数拟合	日本北海道大学 KISE	地头最大横向偏差 17.00 cm(0.55 m/s)
最大的覆盖面积	遗传算法	美国康奈尔大学 RYERSON	覆盖率超过 90%
最小的行驶距离			
时间最短	支持向量机	美国阿肯色大学 KAREN	成本减少的前提下产量增加 1%
能耗最少、盈利最高			
空载或满载时间最短	K-均值与密度均值,聚类农田栅格	中国农业大学刘刚	满载和空载率总和在 20% 左右

拖拉机的 Leader – follower 系统,研究了多机器人系统在日本水稻、小麦和大豆农业中的应用,该机器人农业系统包括水稻种植机器人、播种机器人、机器人拖拉机、联合收获机以及附加在机器人拖拉机上的各种机具。李民赞团队^[119]研究了基于蚁群算法的多机协同作业任务规划,建立了多机协同作业任务分配模型。胡静涛团队^[120]提出一种基于领航-跟随结构的收获机械机群协同导航控制方法,该方法在建立收获机群运动学模型的基础上,结合反馈线性化理论和滑模控制理论设计了渐近稳定的路径跟踪控制律和队形保持控制律。张漫团队^[121]设计了基于 Web – GIS 的多机协同作业远程监控平台,其中数据分析模块可以实时分析处理多机位置和航姿信息,对各农机进行决策分析和任务调度,从而实现多机协同作业。陈军^[122]设计了拖拉机机组的主从跟踪控制模型,实现了一个驾驶员控制两台拖拉机的目的。芬特公司研发的 MARS 系统是群体智能控制技术在农业工程领域的第一个商业化应用,一个主机负责给多个自走小型农机添料,监控和带领小型农机协同作业。

多机协同是农机智能控制领域的新技术,目前主要侧重于领航-跟随协同算法的研究,而未来协同技术走向实用化除了领航-跟随算法,还需解决协同作业中单机异常诊断及队形恢复、跨区域空-地协同、云-端协同调度,农业装备机群协同作业管控平台技术,多农业装备集群协作云调度技术,分布式多机协同远程运维技术,人机伴行控制技术。

4 自主作业技术

辅助驾驶、无人驾驶与自主作业是农业装备智能化研究的热点之一。根据驾驶员对驾驶活动主体的参与度的不同,国际自动机工程师学会(Society of Automotive Engineers,SAE)将自动驾驶分为 L0 ~ L5 共 6 级(表 3);美国高速公路安全管理局(National

Highway Traffic Safety Administration, NHTSA) 则将其分为 5 级。类似的,凯斯纽荷兰(CNH Industrial)也将农业装备的自动驾驶进行了分类(表 4)。本文根据表 3 和表 4 对农机无人驾驶与自主作业技术进行分类阐述。

表 3 SAE 关于汽车自动驾驶的分级

Tab.3 SAE’s classification of auto driving

级别	名称	描述
L0	无自动化	需要人类驾驶者全权操作
L1	驾驶支援	针对方向盘和加减速其中一项操作提供驾驶支援,其他由驾驶者操作
L2	部分自动化	针对方向盘和加减速中多项操作提供驾驶支援,其他由驾驶者操作
L3	有条件自动化	由无人驾驶系统完成所有驾驶操作,根据系统请求,人类驾驶者提供适当操作
L4	高度自动化	在限定的道路和环境中可由无人驾驶系统完成所有驾驶操作
L5	完全自动化	无需人类驾驶者任何操作,全靠无人驾驶系统操作,在有需要时可切换至人工操作模式

表 4 农业装备自动驾驶分类

Tab.4 Classification of automatic driving for agricultural equipment

类型	名称	描述
1	导航	仍由操作员操作车辆,导航可以提高对行准确性,提高工作效率
2	协调和优化	使用农机和环境的数据形成信息枢纽,使得操作员控制的装备之间实现通信
3	操作员协助下的自动驾驶	自动驾驶系统可以接管基础的行进对行任务,操作员可以专注于装备的作业
4	有监督的自动驾驶	操作员需要现场监督监控无人驾驶的设备作业,同时可以进行其他工作
5	完全的自动驾驶	完全的自动驾驶装备,可以在远程监督下作业,或通过人工智能进行操作

4.1 定位导航技术

农业装备的自动定位与导航技术是实现农机自动驾驶的基础,研究重点包括位置定位、行线检测两

方面。

位置定位主要有 GNSS 定位技术和视觉定位技术。随着 GNSS 导航定位技术向民用领域的开放, 利用载波相位差分技术的实时动态定位 (Real-time kinematic, RTK) 精度已小于等于 2.5 cm, RTK-GPS 和 RTK-BDS 在精准农业领域得到了广泛应用并促进了农业装备自动驾驶技术的发展。日本东京大学的 KAIZU 等^[123]使用增强现实技术构建环境的三维图像, 来确定拖拉机在环境中的位置; 美国斯坦福大学的 O'CONNOR 等^[124]将高精度 RTK-GPS 应用于农机导航中; 美国林肯大学的 DAYOUB 等^[125]使用全向视觉传感器来确定农业移动机器人在环境中的位置。罗锡文团队^[126]在东方红 X-804 型拖拉机上开发了基于 RTK-DGPS 的自动驾驶控制系统, 设计了基于 PID 算法的导航控制器, 在雷沃 M904-D 型拖拉机上开发了基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法。

行线检测技术有激光法和视觉法两种, 主要用来识别作物行, 确定导航的基准线。美国德州农工大学的 SEARCY^[127]最早将 Hough 变换引入到农机导航特征提取中来, 提出了一种基于 Hough 变换的作物行参数提取方法。美国华盛顿州立大学的 DICKSON 等^[128]将光纤陀螺仪、RTK-GPS 和机器视觉 3 种传感器融合实现行线检测和定位导航。法国昂热大学的 MALAVAZI 等^[129]研究了使用激光雷达从 2D 点云中提取行线的技术, 使用了 PEARL 算法。澳大利亚昆士兰科技大学的 ENGLISH 等^[130]研究了一种基于纹理特征的视觉行线检测方法, 在夜间也可以准确检测行线。韩国高等科学技术学院的 CHOI 等^[131]研究了一种基于形态学特征的视觉行线检测方法, 形态学特征包括农作物的叶片、茎的方向和密度等。SHKANAIEV 等^[132]将视觉行线检测技术应用到联合收获机上, 基于秸秆的颜色和纹理信息识别行线。姬长英团队^[133]基于光照无关图提出一种农业机器人视觉导航算法。

国内外相关企业也推出了各自的相关定位导航产品。凯斯公司的 AFS 解决方案中包含了 AFS ACCUSTAR 系列 GPS 定位接收机, 可以和 AFS 系列的监控终端 AFS Pro 700 连接, 配合 AFS AccuGuide 程序完成农机的定位导航。科乐收公司推出了 GPS PILOT 解决方案, 高精度 GPS 接收机配合激光传感器, 后者作用是检测已收割作物和未收割作物之间边缘的精确位置。约翰迪尔公司推出了 Radio RTK 系列接收机, 使用 RTK-GPS 技术的解决方案。芬特 (Fendt) 公司推出了 Vario、Katana、Rogator 等多个系列的农机定位解决方案, 适用于不同的场合。除

了几大主机企业外, 国外的一些配套企业也开发了用于农业装备的定位导航产品, 如拓普康 (Topcon) 公司开发了 Hiper、NET 系列, AutoFarm 公司开发了 GR 系列, AgLeader 公司开发了 GPS 6000 系列, 天宝公司开发了 NAV 和 GFX 系列。国内农业装备导航产品有合众思壮的 G9 系列、联适导航的 R 系列、博创联动的 HOMER 系列、华测的 X 和 T 系列等。

综上所述, 目前农机卫星导航定位技术相对成熟, 并得到了广泛应用, 在高端农机中成为标配。而基于视觉和激光的行线检测目前是一种辅助手段, 尤其是视觉行线检测的环境鲁棒性是影响其实际应用的重要因素。未来卫星定位与视觉导航结合将满足更多作业场景的需求。

4.2 辅助驾驶技术

目前农业装备的自动驾驶技术大多处于辅助驾驶阶段, 辅助驾驶是传统驾驶到无人驾驶之间的过渡阶段, 其特点是直线跟踪和地头转弯等行驶项目采用自动驾驶, 机具控制等作业项目采用人工辅助, 使操作员更专注于农机作业, 有利于提高作业质量。凯斯的 AFS 解决方案中包含了 AFS AccuGuide、AccuTurn 辅助驾驶技术, 可以在现有普通拖拉机基础上安装这种电动方向盘。约翰迪尔公司的 AutoTrac 解决方案可以实现大半径的自动转弯, 减少作业面积的重叠。科乐收公司的 CEMOS 解决方案可以实现自动对行, 自适应半径转弯等功能。格兰发布的 iM FARMING 精准农业解决方案里包含了 IsoMatch 自动驾驶系统, 可以实现自动转向功能。德国 Holmer 公司与 Reichardt 公司联合研发的智能转弯系统 SmartTurn, 可以实现甜菜挖掘机的全自动转向。我国农业装备自动驾驶系统大多由配套企业研制, 主要功能是通过北斗卫星定位导航系统实现拖拉机直线跟踪行驶。以北京合众思壮的“慧农”产品为例, 该产品包括了固定式基站、GNSS 定位装置、姿态传感器、智能驾驶控制器、转向轮角度传感器、压力传感器、液压转向电磁阀组和显示终端等。除合众思壮外, 还有上海司南、上海联适、上海华测、广州中海达、无锡卡尔曼等公司也推出了农机辅助驾驶产品。

目前的农业装备辅助驾驶产品大部分属于后装系统, 增加了精确跟踪及作业控制参数调整匹配的复杂性。

4.3 无人驾驶技术

无人驾驶是自动驾驶发展的最高阶段。发展无人驾驶的一个瓶颈是拖拉机的无级变速和动力换挡。约翰迪尔、爱科 (AGCO)、凯斯和道依茨法尔 (DEUTZ-FAHR) 等世界一流农机企业都推出了具

有¹³⁴无级变速功能的大功率拖拉机。国外比较成熟的农机用动力换挡传动系的零部件供货商有德国采埃孚(ZF)公司、意大利卡罗拉(Carraro)公司等,其中道依茨法尔公司使用的是德国采埃孚公司提供的动力换挡传动系。目前国内也有主机企业和配套企业研究动力换挡技术。一拖在收购了法国 ARGO 集团旗下研究动力换挡技术的企业之后,推出了自己的动力换挡拖拉机 LF2204,使用的是一拖(法国)公司生产的 TX4A 传动系;五征公司使用德国采埃孚公司提供的动力换挡传动系,推出了 WZ2104 型拖拉机;雷沃重工推出了搭载其欧洲技术中心研发的动力换挡传动系的拖拉机 P5000;中联重机公司推出了动力换挡拖拉机 RN1004,其动力换挡技术由中联重机北美的团队提供。目前国内主机企业使用的动力换挡技术几乎全部来自于国外,国内也有第三方配套企业开始攻关动力换挡技术,浙江海天公司联合广西玉柴公司推出了两款动力换挡传动系 HT2404 和 HT1604;杭州前进齿轮集团推出了应用于农业机械的动力换挡传动系 DB200。具有动力换挡和无级变速功能的大功率拖拉机在我国的需求不断变大,未来我国配套企业研发动力换挡产品会不断完善,逐渐打破国外的技术垄断,会有更多搭载我国自主研发的动力换挡传动系的大功率拖拉机投入使用。

无人驾驶的农业装备目前停留在概念机阶段,主要开发单位是农业装备制造企业,较为典型的没有驾驶室的无人驾驶拖拉机有凯斯公司的 Magnum 和一拖公司的“超级拖拉机 1 号”。凯斯公司推出了无人驾驶概念拖拉机 Magnum(图 14a),该拖拉机结合了目前在定位、遥控、数据共享和农艺管理上的最新突破,拖拉机的作业过程从现场边界输入开始,控制器会根据边界和机具宽度自动规划好行驶路径,并在使用多台互联的机器时规划好最高效的协同路线,操作人员可以使用台式计算机、平板电脑等多种终端来监控拖拉机运行,拖拉机机身上安装的摄像机将拖拉机的运行状态、工作环境实时展示给操作人员参考,操作人员可以浏览发动机转速、燃油油位、机具设置等拖拉机参数并进行手动修改。为了保障无人驾驶的安全性,拖拉机上安装了雷达、激光测距传感器、摄像机等传感器来实现障碍物检测。该拖拉机能够使用实时气象信息等大数据信息进行自主决策,天气条件变得恶劣以至于不能继续作业时拖拉机会自动停止作业,在条件改善时自动恢复作业。中国一拖集团有限公司在 2016 年中国国际农业机械展览会上展出了中国首台真正意义上的无人驾驶拖拉机“超级拖拉机 1 号”(图 14b),“超级

拖拉机 1 号”由中科晶上公司提供整机系统方案和卫星通信等核心技术,中科院微电子所提供无人驾驶技术,中科院合肥物质院提供传感器,中国一拖提供拖拉机车架、传动系等技术和应用场景数据。“超级拖拉机 1 号”由无人驾驶系统、动力电池系统、智能控制系统、中置电机及驱动系统、智能网联系统等五大核心系统构成,具有整车状态监控、故障诊断及处理、机具控制、能量管理等功能,并实现恒耕深、恒牵引力等智能识别与控制功能。“超级拖拉机 1 号”通过路径规划技术和无人驾驶技术,可实现障碍物检测与避障、路径跟踪以及农具操作等功能。



(a) 凯斯的Magnum无人拖拉机



(b) 一拖的超级拖拉机1号

图 14 无人驾驶拖拉机

Fig. 14 Unmanned tractor

在未来的一段时间内,搭载辅助驾驶系统的农业装备仍旧是农民实际使用的主要产品,随着农业智能化的发展,越来越多的企业将推出更为成熟的、更加具有实用价值的无人驾驶拖拉机产品及其配套附件。

4.4 无人作业技术

农业装备的无人驾驶技术与智能机具技术相结合可实现农业装备的智能无人作业。罗锡文团队^[134-135]在久保田和井关水稻插秧机的基础上开发了基于 CAN(Contoller area network)总线的水稻插秧机 GPS 导航控制系统和无人作业系统。胡静涛团队^[136-137]设计了与 GPS 导航系统相配合的插秧机无人作业控制系统。刘成良团队^[138]研究了水田环境下水稻直播机的无人驾驶和作业控制系统。目前农业装备的无人作业主要有三大瓶颈:①电液提升控制技术,传统的机具与主机的连接部分使用的

是机械液压提升,以机械反馈提升器为主,不利于实现自动化和智能化控制,国外的农机企业如凯斯、约翰迪尔、道依茨法等公司在大功率拖拉机上都标配了电液提升控制系统^[139]。德国力士乐(Bosch Rexroth)推出了完整的电液提升控制解决方案,可以实现犁深控制等功能。五征公司使用力士乐的电液提升控制技术推出了 PH1404 型拖拉机。②智能机具技术,无人作业的实现不仅需要拖拉机主机实现无人驾驶,还需要机具实现无人操作,需要研究机具的智能决策控制等技术。③控制的鲁棒性,实现无人作业必须解决控制系统的鲁棒性问题,农业装

备的作业环境是典型的非结构化环境,对农业装备控制系统的干扰因素多样且复杂,需要解决农业装备的侧滑补偿、滑移控制等技术来提高控制系统的鲁棒性。

5 智能农机系统

未来智能农机系统是集智能农业装备、云端智慧、服务平台为一体的跨区域作业管控系统(图 15)。其核心思想是“智能在端、智慧在云、管控在屏”,即现场控制智能化、云端决策智慧化、监控调度移动终端化。

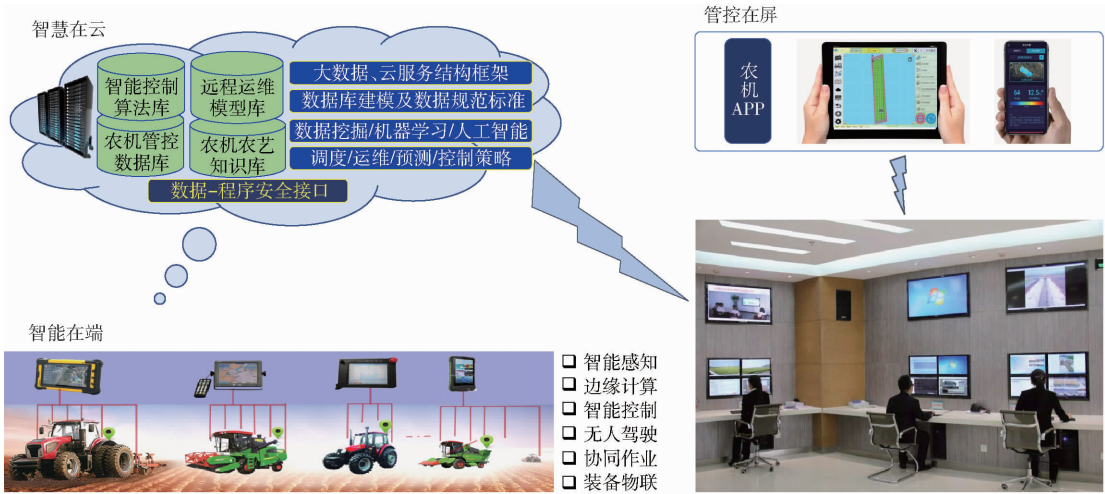


图 15 智能农机系统示意图

Fig. 15 Schematic of intelligent agricultural machinery system

“智能在端”是指装备本身的智能化,作业运行的数字化,包括现场智能感知与边缘计算、智能控制与无人驾驶、装备物联与协同作业,现场数据到云端大数据发送以及云端决策指令的接收执行等。

“智慧在云”是指决策管理的云端智慧化,包括农机大数据云服务架构的构建、知识库/算法库/模型库的生成、基于数据挖掘/机器学习的运维调度和预测控制策略的自生长、以及云对端的闭环控制等。

“管控在屏”是指农机调度监控的网络终端化,通过 APP 和电脑客户端实现对分布各地的农业装备进行远程调度管控。

目前苑严伟团队开发的农业全程机械化云管理服务平台、黑龙江建三江七星农场研发的农业物联网综合服务信息平台初步具备了智能农机系统功能。约翰迪尔、凯斯、芬特、科乐收、格兰等主机公司分别开发了网络化农业装备管控平台(表 5)。

表 5 农业装备企业的网络化管理解决方案

Tab. 5 Networked management solution for agricultural equipment enterprises

公司	解决方案	功能
约翰迪尔	JDLink	查看设备位置、故障信息,设置围栏和宵禁,管理维护计划和警报,诊断故障代码,共享地图和 AB 线,生成报告
凯斯	AFS Connect	远程监控农机的状态和位置,管理维修计划,故障信息分享,警报处理,远程诊断维护
芬特	FendtONE	远程查看、分析和优化机器的状况,查看故障代码
科乐收	AGROCOM	通过 CLAAS API 与 TELEMATICS 进行数据交换,管理数据,远程监控,多平台共享
格兰	iM Calculator	使用 GPS 数据计算施肥、喷药、播种的成本,给出合理化建议

6 展望

从农业装备智能感知、智能控制、智能决策、自主作业、智能管控五方面,系统分析了国外和国内智

能农机发展的现状,以及我国智能农机与国外的差距,为实现我国从农机制造大国向农机制造强国的转变,提出了“智能在端、智慧在云、管控在屏”的发展新思路。

未来需要从以下几方面实现突破:

(1)农业装备智能感知技术:研究叶绿素和氮素、土壤养分、动静态障碍物的车载、高精度、快速实时传感器的新原理和算法。研究扭矩信息传感器的感知机理,开发漏施漏播、耕深、喷雾流量、谷物棉花测产等传感器的感知新原理,提高传感器的精度和可靠性。

(2)智能农业装备云脑技术:构建农机全程作业云端大数据库、云端知识图谱知识库,开发以人工智能算法为理论支撑的云脑决策库,为智能农业装

备的脑决策提供强力的数据、知识和决策支持。

(3)农业装备智能控制技术:加快基于国际标准 ISO 11783 的主控系统 TCU、传动控制子系统 ECU、刹车控制子系统 ECU、提升控制子系统 ECU、转向控制子系统 ECU 等,以及智能机具 ECU 的研究开发,快速装备国产农机。

(4)农业装备智能管控技术:突破基于云端数据库、决策库、知识库支撑的智能农机管控云平台关键技术,实现对农业装备的远程监控调度运维,开发农机管控 APP,实现对农业装备的移动终端管控。

参考文献

- [1] ZHANG N, WANG M, WANG N. Precision agriculture—a worldwide overview[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36(2-3): 113-132.
- [2] MICHAEL C. Farming 4.0 und andere anwendungen des internet der dinge[J]. Gesellschaft für Informatik, 2016(33): 33-36.
- [3] MORIMOTO E, HAYASHI K. Design of smart agriculture Japan model[J]. Advances in Animal Biosciences, 2017, 8(2): 713-717.
- [4] 汪懋华. 助力乡村振兴,推进“智慧农业”创新发展[J]. 智慧农业, 2019, 1(1): 3.
- [5] 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.
- [6] LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Xuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese)
- [7] 武建设,陈学庚. 新疆兵团棉花生产机械化发展现状问题及对策[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 5-10.
- [8] WU Jianshe, CHEN Xuegeng. Present situation, problems and countermeasures of cotton production mechanization development in Xinjiang Production and Construction Corps[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 5-10. (in Chinese)
- [9] 赵春江. 智慧农业发展现状与战略目标研究[J]. 智慧农业, 2019, 1(1): 1-7.
- [10] ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture [J]. Smart Agriculture, 2019, 1(1): 1-7. (in Chinese)
- [11] 陈志. 中国农业机械化科学技术研究方向和重点任务[J]. 农业机械, 2010(12): 44-46, 48.
- [12] 方宪法,吴海华. 农业装备亟待智能化转型升级[J]. 中国农村科技, 2018(2): 54-57.
- [13] VARGHESE J Z, BOONE R G. Overview of autonomous vehicle sensors and systems [C] // Proceedings of the 2015 International Conference on Operations Excellence and Service Engineering. IOEM Society, 2015: 178-191.
- [14] JONES C L, MANESS N O, STONE M L, et al. Chlorophyll estimation using multispectral reflectance and height sensing[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(5): 1867-1872.
- [15] EITEL J U H, VIERLING L A, LONG D S, et al. Simple assessment of needleleaf and broadleaf chlorophyll content using a flatbed color scanner[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 41(7): 1445-1451.
- [16] BARESEL J P, RISCHBECK P, HU Y, et al. Use of a digital camera as alternative method for non-destructive detection of the leaf chlorophyll content and the nitrogen nutrition status in wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 140: 25-33.
- [17] 孙红,邢子正,张智勇,等. 基于 RED-NIR 的主动光源叶绿素含量检测装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 175-181, 296.
- [18] SUN Hong, XING Zizheng, ZHANG Zhiyong, et al. Design and experiment of chlorophyll content detection device for active light source based on RED-NIR[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 175-181, 296. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s027&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.027. (in Chinese)
- [19] 冯伟,朱艳,姚霞,等. 小麦氮素积累动态的高光谱监测[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 1937-1946.
- [20] FENG Wei, ZHU Yan, YAO Xia, et al. Monitoring plant nitrogen accumulation dynamics with hyperspectral remote sensing in wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(7): 1937-1946. (in Chinese)
- [21] ROBERT B. Sensors key to advances in precision agriculture[J]. Sensor Review, 2016, 37(1): 1-6.
- [22] GRIFFEL L M, DELPARTE D, EDWARDS J. Using Support Vector Machines classification to differentiate spectral signatures of potato plants infected with Potato Virus Y[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 153: 318-324.
- [23] RÖMER C, BÜRLING K, HUNSCHE M, et al. Robust fitting of fluorescence spectra for pre-symptomatic wheat leaf rust detection with support vector machines[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 180-188.
- [24] MOSHOUD, BRAVO C, OBERTI R, et al. Plant disease detection based on data fusion of hyper-spectral and multi-spectral fluorescence imaging using Kohonen maps[J]. Real-Time Imaging, 2005, 11(2): 75-83.
- [25] KAUR R, KANG S S. An enhancement in classifier support vector machine to improve plant disease detection[C] // IEEE International Conference on Moocs. IEEE, 2016.
- [26] 冯雷,陈双双,冯斌,等. 基于光谱技术的大豆豆荚炭疽病早期鉴别方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 139-144.
- [27] FENG Lei, CHEN Shuangshuang, FENG Bin, et al. Early detection of soybean pod anthracnose based on spectrum technology[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 139-144. (in Chinese)
- [28] 陈天娇,曾娟,谢成军,等. 基于深度学习的病虫害智能化识别系统[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(4): 26-34.
- [29] CHEN Tianjiao, ZENG Juan, XIE Chengjun, et al. Intelligent identification system of disease and insect pests based on deep learning[J]. China Plant Protection, 2019, 39(4): 26-34. (in Chinese)
- [30] 许良凤,徐小兵,胡敏,等. 基于多分类器融合的玉米叶部病害识别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 194-201, 315.
- [31] XU Liangfeng, XU Xiaobing, HU Min, et al. Corn leaf disease identification based on multiple classifiers fusion[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 194-201, 315. (in Chinese)
- [32] 田有文,程怡,王小奇,等. 基于高光谱成像的苹果虫害检测特征向量的选取[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 132-139.
- [33] TIAN Youwen, CHENG Yi, WANG Xiaoqi, et al. Feature vectors determination for pest detection on apples based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(12): 132-139. (in Chinese)
- [34] 李震,洪添胜,王建,等. 柑橘全爪螨虫害快速检测仪的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 49-56.
- [35] LI Zhen, HONG Tiansheng, WANG Jian, et al. Development and experiment of *Panonychus citri* infestation fast detector[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14): 49-56. (in Chinese)
- [36] WANG J, NAKANO K, OHASHI S, et al. Detection of external insect infestations in jujube fruit using hyperspectral

- reflectance imaging[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 108(4): 345–351.
- [27] HALL D, DAYOUB F, PEREZ T, et al. A rapidly deployable classification system using visual data for the application of precision weed management[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 148: 107–120.
- [28] WATCHAREERUETAI U, OHNISHI N. A new color-based lawn weed detection method and its integration with texture-based methods: a hybrid approach[J]. *IEEJ Transactions on Electronics Information & Systems*, 2011, 131(2): 355–366.
- [29] KAZMI W, GARCIA-RUIZ F, NIELSEN J, et al. Exploiting affine invariant regions and leaf edge shapes for weed detection[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 118: 290–299.
- [30] MARINE L, GAWAIN J, ROMAIN F, et al. Unsupervised classification algorithm for early weed detection in row-crops by combining spatial and spectral information[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 761.
- [31] PIRON A, HEIJDEN F V D, DESTAIN M F. Weed detection in 3D images[J]. *Precision Agriculture*, 2011, 12(5): 607–622.
- [32] BAKHSHIPOUR A, JAFARI A. Evaluation of support vector machine and artificial neural networks in weed detection using shape features[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 145: 153–160.
- [33] 张春龙, 黄小龙, 刘卫东, 等. 苗间锄草机器人信息获取方法的研究[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(9): 142–146.
ZHANG Chunlong, HUANG Xiaolong, LIU Weidong, et al. Information acquisition method for mechanical intra-row weeding robot[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(9): 142–146. (in Chinese)
- [34] 何东健, 乔永亮, 李攀, 等. 基于 SVM-DS 多特征融合的杂草识别[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(2): 182–187.
HE Dongjian, QIAO Yongliang, LI Pan, et al. Weed recognition based on SVM-DS multi-feature fusion [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(2): 182–187. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130234&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.034. (in Chinese)
- [35] 李先锋, 朱伟兴, 孔令东, 等. 基于 SVM 和 D-S 证据理论的多特征融合杂草识别方法[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(11): 164–168, 163.
LI Xianfeng, ZHU Weixing, KONG Lingdong, et al. Method of multi-feature fusion based on SVM and D-S evidence theory in weed recognition[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(11): 164–168, 163. (in Chinese)
- [36] 宋海燕, 何勇. 基于 OSC 和 PLS 的土壤有机质近红外光谱测定[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(12): 113–115, 189.
SONG Haiyan, HE Yong. Near infrared determination of organic matter content in soil based on OSC and PLS [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(12): 113–115, 189. (in Chinese)
- [37] 袁石林, 马天云, 宋韬, 等. 土壤中总氮与总磷含量的近红外光谱实时检测方法[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(增刊): 150–153.
YUAN Shilin, MA Tianyun, SONG Tao, et al. Real-time analysis of soil total N and P with near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40 (Supp.): 150–153. (in Chinese)
- [38] 李民赞, 姚向前, 杨玮, 等. 基于卤钨灯光源和多路光纤的土壤全氮含量检测仪研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 169–174.
LI Minzan, YAO Xiangqian, YANG Wei, et al. Design of new portable detector for soil total nitrogen content based on high-power tungsten halogen lamp and “one-six” special optical fiber[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 169–174. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191119&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.019. (in Chinese)
- [39] 邓小蕾, 李民赞, 武佳, 等. 集成 GPRS/GPS/ZigBee 的土壤水分移动监测系统[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(9): 130–135.
DENG Xiaolei, LI Minzan, WU Jia, et al. Development of mobile soil moisture monitoring system integrated with GPRS, GPS and ZigBee[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(9): 130–135. (in Chinese)
- [40] 张俊卿, 高钧, 陈翔宇, 等. 土壤钾离子非接触电导检测装置设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(增刊): 360–364, 392.
ZHANG Junqing, GAO Jun, CHEN Xiangyu, et al. Design and experiment of capacitively-coupled contactless conductivity detection device for rapid measurement of soil potassium ion[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49 (Supp.): 360–364, 392. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018048&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.048. (in Chinese)
- [41] 王儒敬, 陈天娇, 汪玉冰, 等. 基于深度稀疏学习的土壤近红外光谱分析预测模型[J]. *发光学报*, 2017, 38(1): 109–116.
WANG Rujing, CHEN Tianjiao, WANG Yubing, et al. Soil near-infrared spectroscopy prediction model based on deep sparse learning[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(1): 109–116. (in Chinese)
- [42] 李颀, 张小超, 苑严伟, 等. 北京典型耕作土壤养分的近红外光谱分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 176–179.
LI Jie, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. Analysis of soil nutrient content based on near infrared reflectance spectroscopy in Beijing region[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(2): 176–179. (in Chinese)
- [43] 张俊宁, 方宪法, 张小超, 等. 基于激光诱导击穿光谱的土壤钾素检测[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 294–299.
ZHANG Junning, FANG Xianfa, ZHANG Xiaochao, et al. Detection of soil potassium content based on laser-induced breakdown spectroscopy[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 294–299. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141046&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.046. (in Chinese)
- [44] 蔡祥, 孙宇瑞, 林剑辉, 等. 基于激光反射的土壤表面粗糙度测量装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(1): 68–71, 91.
CAI Xiang, SUN Yurui, LIN Jianhui, et al. Design of a laser scanner for characterizing soil surface roughness [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(1): 68–71, 91. (in Chinese)
- [45] HAMRITA T K, HOFFACKER E C. Development of a ‘smart’ wireless soil monitoring sensor prototype using RFID technology[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2005, 21(1): 139–143.
- [46] ANTONUCCI F, PALLOTTINO F, COSTA C, et al. Development of a rapid soil water content detection technique using active infrared thermal methods for in-field applications[J]. *Sensors*, 2011, 11(11): 10114–10128.
- [47] GENOT V, COLINET G, BOCK L, et al. Near infrared reflectance spectroscopy for estimating soil characteristics valuable in the diagnosis of soil fertility[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2011, 19(2): 117–138.
- [48] DVORAK J S. Object detection for agricultural and construction environments using an ultrasonic sensor [J]. *Journal of Agricultural Safety & Health*, 2016, 22(2): 107–119.
- [49] KIM S, KIM H B. High resolution mobile robot obstacle detection using low directivity ultrasonic sensor ring [C] // *International Conference on Advanced Intelligent Computing Theories & Applications*. Springer-Verlag, 2010.
- [50] DIEGO C, HERNÁNDEZ A, JIMÉNEZ A, et al. Ultrasonic array for obstacle detection based on CDMA with Kasami codes [J]. *Sensors*, 2011, 11(12): 11464–11475.
- [51] BRENNEKE C. As based navigation system for autonomous operation of mobile robots in man-made environments [C] // *International Conference of Systems Engineering*, 2003.
- [52] PENG Y. The obstacle detection and obstacle avoidance algorithm based on 2-D LiDAR [C] // *IEEE International Conference on Information and Automation*. IEEE, 2015: 1648–1653.

- [53] MICHELS J, SAXENA A, NG A Y. High speed obstacle avoidance using monocular vision and reinforcement learning[C]// Proceedings of the 22nd International Conference on Machine Learning. ACM, 2005: 593 – 600.
- [54] MAIER D, STACHNISS C, BENNEWITZ M. Vision-based humanoid navigation using self-supervised obstacle detection[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2013, 10(2): 1350016.
- [55] BRAND C, SCHUSTER M J, HIRSCHMÜLLER H, et al. Stereo-vision based obstacle mapping for indoor/outdoor SLAM[C]// 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2014: 1846 – 1853.
- [56] FLEISCHMANN P, BERNIS K. A stereo vision based obstacle detection system for agricultural applications[C]// Field and Service Robotics. Springer, Cham, 2016: 217 – 231.
- [57] OHYA A, KOSAKA A, KAK A. Vision-based navigation of mobile robot with obstacle avoidance by single camera vision and ultrasonic sensing[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. IEEE, 2010.
- [58] DING X. Obstacles detection algorithm in forest based on multi-sensor data fusion[J]. Journal of Multimedia, 2013, 8(6): 108 – 117.
- [59] LIU P. Obstacle avoidance system for agricultural robots based on multi-sensor information fusion[C]// International Conference on Computer Science and Network Technology. IEEE, 2012: 1181 – 1185.
- [60] 蔡道清, 李彦明, 覃程锦, 等. 水田埂边界支持向量机检测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 22 – 27, 109. CAI Daoqing, LI Yanming, QIN Chengjin, et al. Detection method of boundary of paddy fields using support vector machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 22 – 27, 109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190603&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.003. (in Chinese)
- [61] 周俊, 程嘉煜. 基于机器视觉的农业机器人运动障碍目标检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 154 – 158. ZHOU Jun, CHENG Jiayu. Moving obstacle detection based on machine vision for agricultural mobile robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 154 – 158. (in Chinese)
- [62] 宋怀波, 何东健, 辛湘俊. 基于机器视觉的非结构化道路检测与障碍物识别方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 225 – 230. SONG Huaibo, HE Dongjian, XIN Xiangjun. Unstructured road detection and obstacle recognition algorithm based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 225 – 230. (in Chinese)
- [63] RAJABI-VANDECHALI M, ABBASPOUR-FARD M H, ROHANI A. Development of a prediction model for estimating tractor engine torque based on soft computing and low cost sensors[J]. Measurement, 2018, 121: 83 – 95.
- [64] 武仲斌, 谢斌, 迟瑞娟, 等. 基于滑转率的双电机双轴驱动车辆转矩协调分配[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 66 – 76. WU Zhongbin, XIE Bin, CHI Ruijuan, et al. Active modulation of torque distribution for dual-motor front- and rear-axle drive type electric vehicle based on slip ratio[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(15): 66 – 76. (in Chinese)
- [65] 尹彦鑫, 王成, 孟志军, 等. 悬挂式深松机耕整地耕深检测方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 68 – 74. YIN Yanxin, WANG Cheng, MENG Zhijun, et al. Operation quality measurement method for tilling depth of suspended subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 68 – 74. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180408&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.008. (in Chinese)
- [66] 谢斌, 李皓, 朱忠祥, 等. 基于倾角传感器的拖拉机悬挂机组耕深自动测量方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 15 – 21. XIE Bin, LI Hao, ZHU Zhongxiang, et al. Measuring tillage depth for tractor implement automatic using inclinometer[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 15 – 21. (in Chinese)
- [67] 苑严伟, 李树君, 杨炳南, 等. 一种牵引式农具耕深在线检测方法及其装置: 201310689296.8 [P]. 2015 – 10 – 14.
- [68] SWISHER D W, BORGELT S C, SUDDUTH K A. Optical sensor for granular fertilizer flow rate measurement[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(4): 881.
- [69] 周利明, 马明, 苑严伟, 等. 基于电容法的施肥量检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 44 – 51. ZHOU Liming, MA Ming, YUAN Yanwei, et al. Design and test of fertilizer mass monitoring system based on capacitance method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 44 – 51. (in Chinese)
- [70] 周利明, 李树君, 张小超, 等. 基于电容法的棉籽纤维质量流量检测[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 47 – 52. ZHOU Liming, LI Shujun, ZHANG Xiaochao, et al. Detection of seedcotton mass flow based on capacitance approach[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 47 – 52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140608&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.008. (in Chinese)
- [71] 陈建国, 李彦明, 覃程锦, 等. 小麦播种量电容法检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 51 – 58. CHEN Jianguo, LI Yanming, QIN Chengjin, et al. Design and test of capacitive detection system for wheat seeding quantity [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 51 – 58. (in Chinese)
- [72] 余洪锋, 丁永前, 谭星祥, 等. 施肥机施肥性能检测装置的设计与试验[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(3): 511 – 517. YU Hongfeng, DING Yongqian, TAN Xingxiang, et al. Design and experiments on equipment for detecting performance of fertilizer applicator[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(3): 511 – 517. (in Chinese)
- [73] 郑薇, 王向东, 李树江, 等. 植保机均匀性喷雾的优化控制方法[J]. 农机化研究, 2019, 41(5): 33 – 38.
- [74] 芦泽阳, 李树江, 王向东. 采用 RBF 网络的喷雾机喷杆自适应动态面跟踪控制[J]. 应用数学和力学, 2019, 40(7): 801 – 809.
- [75] DA SILVA L L G, ALVES L G, TOTH A, et al. Development of an impact-based yield monitor with can-bus[J]. Sensor Letters, 2011, 9(3): 974 – 980.
- [76] SINGH M, SHARMA A, SINGH B, et al. Investigations into yield monitoring sensor installed on indigenous grain combine harvester[C]// Sensing Technology (ICST), 2012 Sixth International Conference on. IEEE, 2012.
- [77] HERMANN D, BILDE M L, ANDERSEN N A, et al. On-the-go throughput prediction in a combine harvester using sensor fusion[C]// 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). IEEE, 2017.
- [78] HIREGOUDAR S, UDHAHKUMAR R, RAMAPPA K T, et al. Artificial neural network for assessment of grain losses for paddy combine harvester a novel approach[C]// International Conference on Logis, Information, Control and Computation, 2011.
- [79] LIU C, LEONARD J. Monitoring actual grain loss from an axial flow combine in real time[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1993, 9(3): 231 – 242.
- [80] WALLAYS C, MISSOTTEN B, BAERDEMAEKER J D, et al. Hyperspectral waveband selection for on-line measurement of grain cleanness[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1): 1 – 7.
- [81] 胡均万, 罗锡文, 阮欢, 等. 双板差分冲量式谷物流量传感器设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 69 – 72. HU Junwan, LUO Xiwen, RUAN Huan, et al. Design of a dual-plate differential impact-based yield sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 69 – 72. (in Chinese)
- [82] 杨刚, 雷军波, 刘成良, 等. 基于线结构光源和机器视觉的高精度谷物测产系统研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 29 – 36. YANG Gang, LEI Junbo, LIU Chengliang, et al. Development of yield monitoring system with high-precision based on linear structured light source and machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 29 – 36. (in Chinese)

- [83] 刘成良,周俊,苑进,等. 新型冲量式谷物联合收割机智能测产系统[J]. 中国科学(信息科学), 2010, 40: 226-231.
- [84] 张小超,胡小安,张爱国,等. 基于称重法的联合收获机测产方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 125-129.
- ZHANG Xiaochao, HU Xiaolan, ZHANG Aiguo, et al. Method of measuring grain-flow of combine harvester based on weighing[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 125-129. (in Chinese)
- [85] 周利明,张小超,刘阳春,等. 联合收获机谷物损失测量 PVDF 阵列传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 167-171.
- ZHOU Liming, ZHANG Xiaochao, LIU Yangchun, et al. Design of PVDF sensor array for grain loss measuring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 167-171. (in Chinese)
- [86] 林昌建,李彦明,苗中华,等. 基于遗传算法和 GRNN 的棉花流量检测模型研究[J]. 机械与电子, 2013(4): 11-14.
- [87] 蔺百杨,党敬民,郑传涛,等. 中红外量子级联激光气体检测系统[J]. 光子学报, 2018, 47(4): 73-80.
- LIN Baiyang, DANG Jingmin, ZHENG Chuantao, et al. Mid-infrared quantum cascade laser gas detection system[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(4): 73-80. (in Chinese)
- [88] 郑玲娇,牛新涛,王嘉宁,等. 中红外二氧化碳传感器的研制及在农业中的应用[J]. 光子学报, 2017, 46(8): 156-163.
- ZHENG Lingjiao, NIU Xintao, WANG Jianing, et al. Development and agricultural application of a mid-infrared carbon dioxide sensor system[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(8): 156-163. (in Chinese)
- [89] 李春光,董磊,郑传涛,等. 中红外痕量乙烷传感器设计与稳定性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(3): 959-963.
- [90] ISO 11783 Tractors and machinery for agriculture and forestry—serial control and communications data network[S]. 2004.
- [91] 周建军,郑文刚,李素,等. 基于 ISO 11783 的拖拉机导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 184-188.
- ZHOU Jianjun, ZHENG Wengang, LI Su, et al. Automatic navigation control system for tractor based on ISO 11783[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 184-188. (in Chinese)
- [92] GB/T 35381—2017 农林拖拉机和机械—串行控制和通信数据网络[S]. 2017.
- [93] ISO 11783-6 Tractors and machinery for agriculture and forestry—serial control and communications data network—part 6: Virtual terminal[S]. 2004.
- [94] ISO 11783-9 Tractors and machinery for agriculture and forestry—serial control and communications data network—part 9: tractor ECU[S]. 2004.
- [95] TUMENJARGAL E. Development of ISOBUS universal terminal and client ECUs for agricultural machinery[C]//2018 ASABE Annual International Meeting, 2018.
- [96] BACKMAN J. Applicability of the ISO 11783 network in a distributed combined guidance system for agricultural machines[J]. Biosystems Engineering, 2013, 114(3): 306-317.
- [97] 苗中华,陆鸣超,胡晓东,等. 基于虚拟仪器技术的采棉机智能监控系统开发与应用[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 35-42.
- MIAO Zhonghua, LU Mingchao, HU Xiaodong, et al. Development and application of intelligent monitoring and controlling system of cotton-picking machine based on virtual instrument technology[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 35-42. (in Chinese)
- [98] 阳俊,杨卫平,谭俊杰,等. 拖拉机智能中央电器盒开发[J]. 拖拉机与农用运输车, 2018(3): 5.
- [99] PEERLINCK A, SHEPPARD J, MAXWELL B. Using deep learning in yield and protein prediction of winter wheat based on fertilization prescriptions in precision agriculture[C]//International Conference on Precision Agriculture (ICPA), 2018.
- [100] KAIVOSOJA J, PESONEN L, KLEEMOLA J, et al. A case study of a precision fertilizer application task generation for wheat based on classified hyperspectral data from UAV combined with farm history data[C]//Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XV. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [101] 孟志军,赵春江,刘卉,等. 基于处方图的变量施肥作业系统设计与实现[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2009, 30(4): 338-342.
- MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, LIU Hui, et al. Development and performance assessment of map-based variable rate granule application system[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2009, 30(4): 338-342. (in Chinese)
- [102] 魏新华,蒋杉,张进敏,等. 脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统施药量控制[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 87-92, 86.
- WEI Xinhua, JIANG Shan, ZHANG Jinmin, et al. Application rate control characteristics of blended pulse variable rate application system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 87-92, 86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130217&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.017. (in Chinese)
- [103] 张小超,胡小安,苑严伟,等. 精准农业智能变量作业装备研究开发[J]. 农业工程, 2011, 1(3): 26-32.
- [104] 苑严伟,李树君,方宪法,等. 氮磷钾配比施肥决策支持系统[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 240-244, 223.
- YUAN Yanwei, LI Shujun, FANG Xianfa, et al. Decision support system of N, P and K ratio fertilization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 240-244, 223. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130841&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.041. (in Chinese)
- [105] 赵春江,陈天恩,陈立平,等. 迁飞性害虫精准施药决策分析方法研究[C]//国际农产品质量安全检测与溯源技术研讨会, 2008.
- [106] 古玉雪,苑进,刘成良. 基于模糊系统的开度转速双变量施肥控制序列生成方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 134-139.
- GU Yuxue, YUAN Jin, LIU Chengliang. FIS-based method to generate bivariate control parameters regulation sequence for fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 134-139. (in Chinese)
- [107] TORISU R. Optimal path of head-land for tractors by optimal control theory (Part 1)[J]. J. Jpn. Soc. Agric. Mach., 1997, 59(4): 3-10.
- [108] KISE M. Field mobile robot navigated by RTK-GPS and FOG (Part3): enhancement of turning accuracy by creating path applied with motion constraints[J]. J. Jpn. Soc. Agric. Mach., 2002, 64(2): 102-110.
- [109] RYERSON A E F, ZHANG Q. Vehicle path planning for complete field coverage using genetic algorithms[C]//Proceedings of the Automation Technology for Off-road Equipment (ATOE) 2006 Conference, 2007.
- [110] KAREN L. A decision-support system for analyzing tractor guidance technology[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 153: 115-125.
- [111] NAGASAKA Y, KANETANI Y, UMEDA N, et al. High-precision autonomous operation using an unmanned rice transplanter[M]. TORIYAMA K. Rice is life scientific perspectives for the 21st century. Makati: International Rice Research Institute, 2005: 235-237.
- [112] STOLL A. Automatic operation planning for GPS-guided machinery[C]//Proceedings of 4th European Conference on Precision Agriculture. Berlin; Germany, 2003: 657-664.
- [113] HAMEED I A. Intelligent coverage path planning for agricultural robots and autonomous machines on three-dimensional terrain[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 74: 3-4.
- [114] 刘刚,李笑,康熙,等. 基于 GNSS 的农田平整自动导航路径规划方法[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 21-29.

- LIU Gang, LI Xiao, KANG Xi, et al. Automatic navigation path planning method for land leveling based on GNSS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):21-29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s004&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.004. (in Chinese)
- [115] 孟志军,刘卉,王华,等.农田作业机械路径优化方法[J/OL].农业机械学报,2012,43(6):147-152.
MENG Zhijun, LIU Hui, WANG Hua, et al. Optimal path planning for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6):147-152. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120627&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.027. (in Chinese)
- [116] 张亚娇.农机自动驾驶监控终端关键技术研究 with 系统开发[D].广州:华南农业大学,2016.
- [117] ZHANG C, NOGUCHI N. Development of a multi-robot tractor system for agriculture field work[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 79-90.
- [118] NOGUCHI N. Robot farming system using multiple robot tractors in Japan agriculture[C]// The 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control, 2011.
- [119] 曹如月,李世超,季宇寒,等.基于蚁群算法的多机协同作业任务规划[J/OL].农业机械学报,2019,50(增刊):34-39.
CAO Ruyue, LI Shichao, JI Yuhuan, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.):34-39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s006&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.006. (in Chinese)
- [120] 白晓平,王卓,胡静涛,等.领航-跟随结构的联合收获机机群协同导航控制方法[J/OL].农业机械学报,2017,48(7):14-21.
BAI Xiaoping, WANG Zhuo, HU Jingtao, et al. Harvester group corporative navigation method based on leader-follower structure[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):14-21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170702&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.002. (in Chinese)
- [121] 曹如月,李世超,魏爽,等.基于Web-GIS的多机协同作业远程监控平台设计[J/OL].农业机械学报,2017,48(增刊):52-57,14.
CAO Ruyue, LI Shichao, WEI Shuang, et al. Remote monitoring platform for multi-machine cooperation based on Web-GIS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):52-57, 14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s009&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.009. (in Chinese)
- [122] 陈军.拖拉机组主从跟踪控制系统研究[C]//中国农业工程学会2011年学术年会论文集,2011.
- [123] KAIJU Y, CHOI J. Development of a tractor navigation system using augmented reality[J]. Engineering in Agriculture Environment & Food, 2012, 5(3):96-101.
- [124] O'CONNOR M. Automatic steering of farm vehicles using GPS[C]// 3rd International Conference on Precision Agriculture. Minnesota, USA, 1996: 767-778.
- [125] DAIYOUT B, DUCKETT T. An adaptive appearance-based map for long-term topological localization of mobile robots[C]// 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2008: 3364-3369.
- [126] 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 CSAE, 2019, 35(4):11-19. (in Chinese)
- [127] SEARCY S W. Detecting crop rows using the Hough transform[C]// ASAE Annual Meeting. St. Joseph, MI,1986.
- [128] DICKSON M A, NOGUCHI N, ZHANG Q, et al. Sensor-fusion navigator for automated guidance of off-road vehicles; U S 6, 445,983[P]. 2002-09-03.
- [129] MALAVAZI F B P, GUYONNEAU R, FASQUEL J B, et al. LiDAR-only based navigation algorithm for an autonomous agricultural robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 71-79.
- [130] ENGLISH A, ROSS P, BALL D, et al. Vision based guidance for robot navigation in agriculture [C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014: 1693-1698.
- [131] CHOI K H, HAN S K, HAN S H, et al. Morphology-based guidance line extraction for an autonomous weeding robot in paddy fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 113: 266-274.
- [132] SHKANAIEV A Y, KROKHINA D A, POLEVOY D V, et al. Analysis of straw row in the image to control the trajectory of the agricultural combine harvester (Erratum) [C]//10th International Conference on Machine Vision (ICMV 2017), 2018.
- [133] 安秋,李志臣,姬长英,等.基于光照无关图的农业机器人视觉导航算法[J].农业工程学报,2009,25(11):208-212.
AN Qiu, LI Zhichen, JI Changying, et al. Agricultural robot vision navigation algorithm based on illumination invariant image [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11):208-212. (in Chinese)
- [134] 何杰,朱金光,张智刚,等.水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(3):17-24.
HE Jie, ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):17-24. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190302&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.002. (in Chinese)
- [135] 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):95-97,82.
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, 82. (in Chinese)
- [136] 白晓平,王卓,胡静涛.基于有限状态机的农机导航多任务调度研究[J].农机化研究,2017,39(5):26-31.
- [137] 郭娜,胡静涛,王鹤.基于GPS导航的插秧机作业控制系统[J/OL].农业机械学报,2013,44(1):200-204.
GUO Na, HU Jingtao, WANG He. Intelligent operation control system for rice transplanter based on GPS navigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1):200-204. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130138&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.038. (in Chinese)
- [138] 张雁,李彦明,刘翔鹏,等.水田环境下水稻直播机自动驾驶控制方法[J/OL].农业机械学报,2018,49(11):15-22.
ZHANG Yan, LI Yanming, LIU Xiangpeng, et al. An automatic drive control technique for rice drill seeder in uneven paddy fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):15-22. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181102&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.002. (in Chinese)
- [139] 邓小明,胡小鹿,柏雪岑,等.国家农业机械产业创新发展报告(2018)[M].北京:机械工业出版社,2019.