

无人农场系统分析与发展展望

李道亮^{1,2} 李震^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国家数字渔业创新中心, 北京 100083)

摘要: 随着工业化与城镇化的不断推进,我国农业劳动力成本日趋增高,传统农业劳动力逐渐减少,农业劳动力的老龄化与短缺问题逐渐突显,“机器换人”的需求日趋增加。无人农场是采用物联网、大数据、人工智能、5G、智能装备与机器人等新一代信息技术,通过对设施、装备、机械等进行远程控制、全程自动控制或机器人自主控制,完成所有农场生产作业的一种全天候、全过程、全空间的无人化生产作业模式。本文系统地阐述了无人农场的概念、技术架构和发展历程;提出并分析了物联网技术、大数据技术、人工智能技术和智能装备与机器人技术等无人农场的四大共性关键技术,基础设施系统、作业装备系统、测控系统和管控云平台系统等无人农场的四大系统组成,以及无人大田、无人温室、无人果园、无人牧场和无人渔场等无人农场的五大类型;最后,提出了我国无人农场的发展策略。

关键词: 无人农场; 物联网; 大数据; 人工智能; 智能装备与机器人

中图分类号: S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0001-12 OSID: 

System Analysis and Development Prospect of Unmanned Farming

LI Daoliang^{1,2} LI Zhen^{1,2}

(1. College of Information and Electronics Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. National Innovation Center for Digital Fishery, Beijing 100083, China)

Abstract: With the development of industrialization and urbanization, Chinese labor cost is gradually increasing, and the aging and shortage of agricultural labor force has become increasingly noticeable. As the traditional agricultural labor force withdraws from the first-line production, therefore, the needs for “machine substitute for man” is increasing too. Unmanned farm is a kind of all-weather, entire-process, whole-space unmanned production mode, which uses the new generation of information technology such as Internet of things, big data, artificial intelligence, 5G, and robot to complete farm production operations through remote automatic control of facilities, equipment, machinery or autonomous robot control. It included four parts: firstly, the concept, technical framework and three development stages of the unmanned farm were systematically introduced; secondly, four key technologies were systematically put forward: Internet of things, big data, artificial intelligence, intelligent equipment and robot, and four system components: infrastructure system, operation equipment system, measurement and control system and cloud management and control platform system, and five typical farm applications of the unmanned farm: unmanned fields, unmanned greenhouses, unmanned orchards, unmanned livestock farms and unmanned fisheries; finally, the forward of the development strategy of unmanned farm in China was suggested.

Key words: unmanned farm; Internet of things; big data; artificial intelligence; intelligent equipment and robot

0 引言

我国是农业大国,耕地面积占全世界的7%,农业人口众多,占全国人口的70%^[1]。农业劳动力是

农业生产中最重要的资源,传统农业需要大量的人力和物力,随着我国人口老龄化的日趋严重,人口红利即将消失,农业劳动力缺乏问题日渐突显。按照国际劳工组织的划分标准,老年劳动力是指45岁以

上的劳动人口。在全部劳动力中,我国老年人口占比从 2010 年的 29.20% 上升到 2015 年的 39.42%, 平均每年上升 2.04 个百分点。劳动力成本增加,农村劳动力向城市流动趋势明显^[2],劳动生产率、农业生产效率和资源利用率亟需提高,传统农业生产模式已无法适应市场要求。

随着科学技术的发展,物联网、大数据、人工智能、机器人、智能装备制造、5G 等新一代信息技术的不断进步使得机器换人成为可能^[3-10]。农业物联网技术完成农场信息的感知和传输,实现了农业智能装备的互联;大数据与云计算技术完成农业信息的获取、存储、分析和处理,实现了农业生产的精准化;人工智能与智能装备技术能够完成智能学习、智能决策以及装备与机器人的自主精准作业,真正实现了机器代替人。因此,无人农场能够实现农业生产、管理全过程的信息感知、定量决策、智能控制、精准投入和个性化服务,进而实现农业生产集约、高产、优质、高效、生态、安全等可持续发展的目标^[11]。无人农场是推动现代农业发展的重要举措,能够以现代化、自动化装备提升传统农业产业,实现农业生产和管理全程的无人化,从而大大提高劳动生产效率。无人农场的本质是实现农业生产的机器换人,是未来农业发展的趋势。

随着物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的发展,英国、美国、以色列、挪威、荷兰、德国、日本等发达国家已经陆续开始构建无人农田、无人温室、无人猪场、无人渔场等。2017 年,英国哈珀亚当斯大学创建了全球第一家无人农场,同年,日本的无人蔬菜工厂和挪威的深海半潜式无人渔场也相继投入使用。2019 年,我国山东、福建、北京等地也开始了对无人农田、无人猪场的研究探索。无人农场作为未来农业的一种新技术,已经开启全新的农场模式。本文针对无人农场的内涵、发展历程,物联网、大数据、人工智能、智能装备与机器人技术等四大共性关键技术,基础设施、作业装备、测控和云管控平台等四大系统,以及无人农场的五种典型应用进行阐述和总结,分析无人农场的发展瓶颈,并提出我国无人农场的发展策略。

1 无人农场

1.1 无人农场概念

无人农场是在人不进入农场的情况下,采用物联网、大数据、人工智能、5G、机器人等新一代信息技术,通过对农场设施、装备、机械等远程控制或智能装备与机器人的自主决策、自主作业,完成所有农场生产、管理任务的一种全天候、全过程、全空间的

无人化生产作业模式,无人农场的本质是实现机器换人。无人农场是新一代信息技术、智能装备技术与先进种养殖工艺深度融合的产物,是对农业劳动力的彻底解放,代表着农业生产力的最先进水平。全天候、全过程、全空间的无人化作业是无人农场的基本特征。

全天候无人化是指从种植或养殖的开始到结束时间段里,农场所有业务工作都能够在不需要人参与的情况下由机器自主完成。全天候无人化需要无人农场对农业动植物的生长环境、生长状态、各种作业装备的工作状态进行全天候监测,从而根据监测到的信息开展农场作业与管理。全过程无人化是指农业生产的各个工序和环节都无需人工参与,由机器自主完成。特别是在业务对接环节,无人农场装备之间通过相互通信和识别,完成自主对接。全空间无人化是指在农场的物理空间内,无人车、无人船、无人机在不需要人的介入下自主完成移动作业,并实现固定装备与移动装备的无缝对接。无人农场在物联网、大数据、人工智能、智能装备与机器人技术的支撑下,由基础设施系统、作业装备系统、测控系统和管控云平台系统组成,如图 1 所示。

1.2 无人农场发展历程

1.2.1 农场的历史变迁

人类经历了农业社会、工业社会后,目前正处在信息社会阶段^[12]。随着劳动工具的改进,农业也经历了从青铜器到铁器,从畜力到农业机械,从自动化农业到智能化生产的过程。因此劳动工具的演变体现了农业 1.0 到农业 4.0 的演变^[13]。

农业 1.0——传统农场:所谓农场是指农业生产单位、生产组织或生产企业,以从事农业生产、畜牧养殖和水产养殖为主。传统农场历史悠久,是农业社会的产物。传统农场的农业生产以人力、畜力为主,劳动力和土地处于核心地位,劳动工具是简单的手工工具(如铁器)和畜力,农业生产方式延续了古老而原始的传统农耕方式。17 世纪,农场成为欧洲农业生产的基本单位^[14]。目前,我国传统农场基本消失。

农业 2.0——机械化农场:机械化农场起源于工业革命时代,是工业社会的产物。机械化农场是指利用各种动力和配套农机具装备农业,使用现代农业机械取代人力和畜力,实现生产工具的机械化,从而进行大规模农业生产的农场形态。欧美国家是最早实现农业生产机械化的国家,我国目前的农场已经实现了机械化^[15]。

农业 3.0——自动化农场:自动化农场出现在 20 世纪后期,是信息社会的产物。自动化农场是将

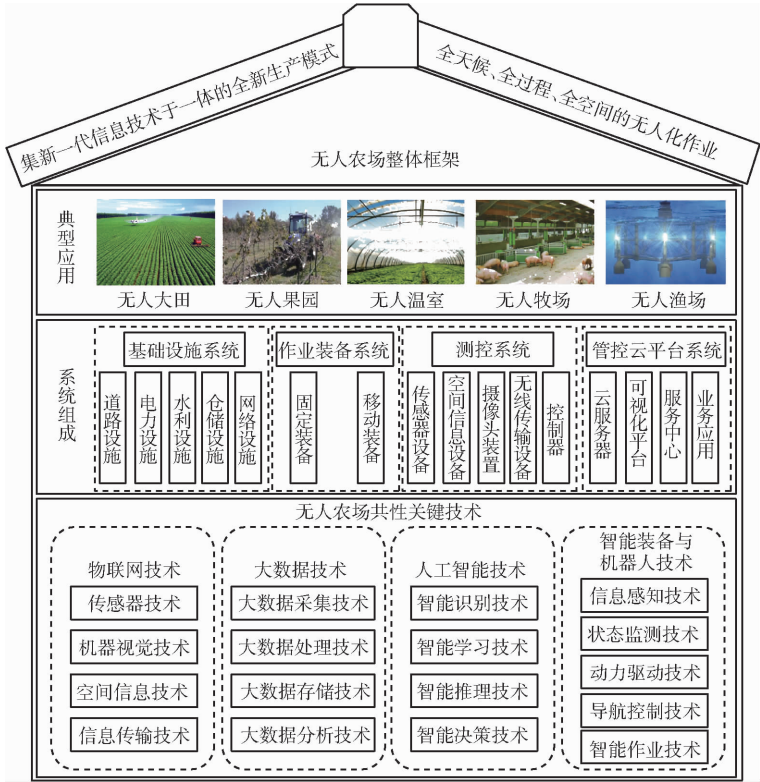


图 1 无人农场系统框架
Fig. 1 Theoretical framework of unmanned farm

计算机等信息技术与传统农业机械设备结合,使用自动化装备代替传统农机装备,实现农业生产管理自动化的农场^[16]。美国、荷兰和挪威等欧美国家已经分别实现了大田种植、设施蔬菜、畜禽养殖和水产养殖等大部分农场的高度自动化,我国目前处于机械化与自动化的过渡阶段^[17]。

农业 4.0——无人农场:随着物联网、人工智能与机器人的发展,无人农场将会在 21 世纪中后期逐渐出现。无人农场是指在不需要进入农场情况下,采用新一代信息技术,通过智能装备与机器人自主完成农业生产、管理任务的农场终极形态,真正实现了机器代人。欧、美、日等发达国家的无人农场已进入小范围应用阶段,以日本为首的发达国家各种农场作业机器人已相继研制成功,我国目前无人农场还处于试验示范阶段^[18]。

1.2.2 无人农场的阶段形态

无人农场的发展目标是智能装备与机器人深度参与农业生产全过程,逐步替代人力,并参与决策管理。根据机器人参与深度的不同,无人农场可以划分为 3 个不同阶段的形态,依次为远程控制、无人值守和自主作业的无人农场。

初级阶段——远程控制:初级阶段的无人农场采用远程控制技术,通过对智能装备与机器人等远程控制,实现农场的无人化作业。远程控制阶段是机器代替劳力的初级阶段,其特点是不需要人到现

场劳作农场,但需要人工远程操作、参与决策与控制,因此也称徒手农场(Handfree farm),或者是有人值守的无人农场。

中级阶段——无人值守:中级阶段的无人农场无需专人 24 h 在远程监控室里对农场装备进行远程操作。无人值守阶段作业装备可以自主巡航作业,但仍需要人参与计划,并负责指令的下达与生产的决策。人在此阶段无需时刻值守,是无人值守(Unattended operation farm)的无人农场。

高级阶段——自主作业:高级阶段的无人农场完全不需要人的参与。农场所有的作业与管理,都通过云管控平台自主计划、自主决策、自主作业,并由装备自主完成所有农场业务。高级阶段的无人农场彻底地将人从农业生产管理中解放出来,是完全无人的(Unmanned farm),是农场发展的顶级水平。

2 农场无人化的共性关键技术

无人农场是一个复杂的系统工程,是新一代信息技术不断发展的产物。无人农场通过对农业生产资源、环境、种养对象、装备等各要素的在线化、数据化,实现种养殖对象的精准化管理、生产过程的智能化决策和无人化作业,其中物联网技术、大数据技术、人工智能技术和智能装备与机器人技术等 4 大技术在无人农场中起关键性作用(如图 2 所示)。

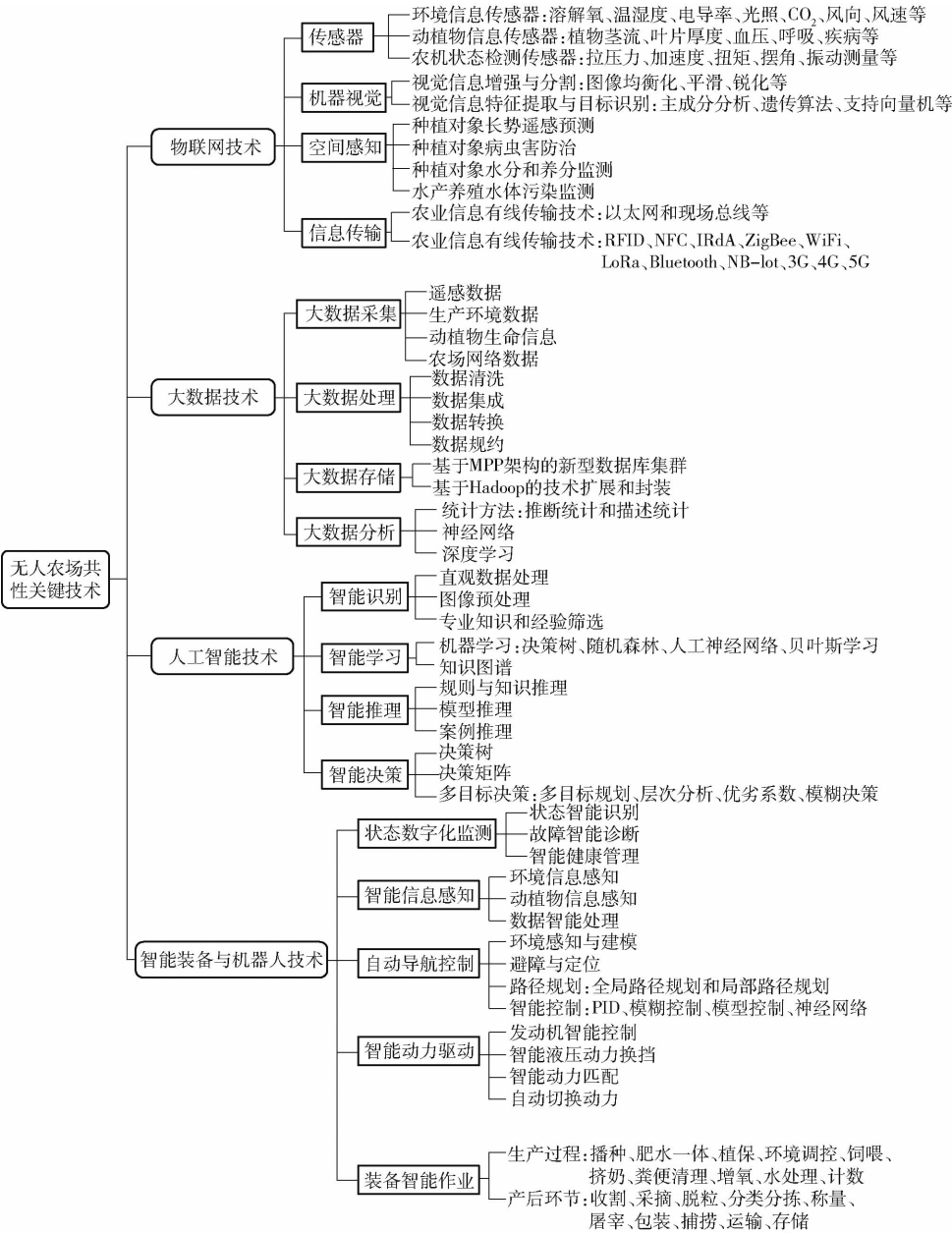


图 2 无人农场共性关键技术框架

Fig. 2 Common key technology framework of unmanned farm

2.1 物联网与无人农场

物联网是通过各种传感器、射频识别 (RFID)、视频采集终端、激光扫描仪、空间信息装备等信息感知设备及无线传感网络,进行信息的采集和传输,最终形成一个万物互联的网络^[19-30]。农业物联网技术的广泛应用已经实现了大田种植、果园种植、温室大棚、畜禽养殖、水产养殖等领域整个农业生产、管理过程的信息感知和可靠传输^[31-36]。

农场要实现无人化作业,智能装备、农业种养殖对象和云管控平台如何形成一个实时通信的实体网络是面临的首要问题。农场装备能够根据环境、动植物生长实时状态开展相应作业,物联网技术使农场装备网联化成为可能。物联网技术作为无人农场重要的支撑技术,主要体现在以下方面:物联网技术

为无人农场提供以传感器为基础的环境全面感知技术,确保动植物生长在最佳环境下^[37-39];物联网技术提供以机器视觉和遥感为核心的动植物表型技术和视觉导航技术,确保动植物生长状态的实时感知,为其生长调控提供关键参数^[40-41];物联网技术提供装备的位置和状态感知技术,为装备导航、作业的技术参数获取提供可靠保证^[42-44];物联网技术提供以5G或更高通信协议的实时通信技术,确保装备间的实时通信^[45-46]。

高精度、高精度、可现场测量为主要特征的新一代农业传感器技术是推动农业物联网技术发展的底层驱动力^[47-54]。集无线技术、网络技术和通信技术为一体的5G,以及未来的6G等新一代无线传输技术为农业物联网技术的发展提供了一条“高速公路”。

路”。无人农场环境、装备、动植物信息的全面感知技术和信息可靠传输技术是物联网应用于无人农场的两大关键支撑技术,是实现农场无人化作业的基础。

2.2 大数据与无人农场

无人农场通过智能装备完成精准作业,而装备是依靠农场海量实时数据的分析开展精准作业。无人农场时刻产生大量高维、异构、多源数据,因此如何获取、处理、存储、应用这些数据,并从中挖掘出有用的信息,是必须解决的问题。大数据应用于无人农场体现在4方面^[55-64]:大数据为无人农场提供多源异构数据的处理技术,进行数据去粗存精、去伪存真、分类等处理方法;大数据能在众多数据中挖掘分析和知识发现,形成规律性的农场管理知识库;大数据能对各类数据进行有效的存储,形成历史数据,以备农场管控平台进行学习与调用;大数据与云计算和边缘计算技术结合,形成高效的计算能力,确保装备作业的迅速反应,实现精准自主作业^[65-69]。

综上,数据的实时获取、智能处理、智能存储和智能分析(图2)是无人农场采用的四大关键大数据技术^[70-77]。基于大数据和云计算的无人农场数据智能分析、处理与农场深度融合,实现了无人农场环境信息、动植物信息、装备状态信息等各种数据的智能快速获取、处理、存储及分析,为智能装备的精准自主作业提供了数据支撑,从而实现农场的无人化精准化管控。

2.3 人工智能与无人农场

无人农场的本质是实现机器对人的替换,因此机器必须具有生产者的判断力、决策力和操作技能。人工智能技术的支撑给无人农场装上了“智能大脑”,让无人农场具备了“思考能力”^[78-81]。一方面人工智能技术给农场装备端以识别、学习、导航和作业的能力。人工智能技术首先体现在装备端的智能感知技术,包括农业动植物生长环境、生长状态和装备本身工作状态的智能识别技术^[82-85];其次是装备端的智能学习与推理技术,实现对农场各种作业的历史数据、经验与知识的学习,基于案例、规则与知识的推理,机器智能决策与精准作业控制^[86-89];另一方面人工智能技术为农场云管控平台提供基于大数据的搜索、学习、挖掘、推理与决策技术^[90-91]。无人农场中复杂的计算与推理都交由云平台解决,给装备提供了智能的大脑。

综上,人工智能承担无人农场信息的优化和决策任务,智能识别、智能学习、智能推理和智能决策等技术让无人农场具有“思考能力”,实现云管控平台的无人化,是无人农场的关键所在,为实现智能装

备与机器人的精准作业控制奠定了基础。

2.4 智能装备、机器人与无人农场

无人农场智能装备与机器人是指农业生产、管理及产后环节等整个过程中所用到设备的统称。无人农场智能装备由移动装备和固定装备组成。移动装备主要包括无人车、无人机、无人船和移动作业机器人等,固定装备主要包括智能饲喂机、分类分级机、自动增氧机和水肥一体机等^[92-98]。无人农场机器人分为采摘机器人、自动巡航管理机器人、除草机器人、种植机器人、水产养殖水下机器人等^[99-101]。智能装备与机器人是人工智能与装备技术的深度融合,结合现代信息化技术,智能装备与机器人将逐渐满足农场的无人化生产、信息化监测、最优化控制、精准化作业和智能化管理等需求。

智能装备与机器人能够完成传统农场人工应完成的工作,是无人农场实现机器完全替换人工劳动的关键。智能装备与机器人依靠状态智能识别、故障智能诊断以及健康管理等技术实现无人农场装备与机器人状态的数字化监测^[102-103];智能装备与机器人依靠智能计算、机器视觉、导航定位、路径规划以及传感器、遥感等技术的支撑,实现智能装备与机器人的自动导航与控制 and 农场信息的智能感知^[104-107];高效发动机/电动机智能控制、智能液压动力换挡和多动力智能匹配等动力驱动智能化技术的应用,为农场装备与机器人提供动力来源,保障机器智能作业在最佳状态下^[108];针对农业生产场景的各种作业的运动空间、时间、能耗、作业强度,智能装备与机器人通过智能控制系统,实现精准控制和智能作业^[109-110]。此外,在农场数据上传至云端之前,无人农场智能装备与机器人能够进行源数据的边缘计算,并将结果发送至云端,提升了整个无人农场系统的智能化和计算能力。无人农场中固定装备与移动装备的协同作业,完成了无人农场的精准自主作业任务,无人车、无人船、无人机在移动装备中发挥了重要作用^[111-113]。

随着物联网、大数据、人工智能、5G等与智能装备和机器人的融合应用,无人农场智能装备与机器人将逐步替代农民手工劳动进入农场完成自主作业任务。智能装备与机器人在无人农场中的广泛应用能够彻底实现“农民足不出户,通过智能终端发出指令,就能种好庄稼、种好菜、养好牛、养好鱼”等农业生产任务。无人农场四大关键技术农场中扮演着不同的角色,缺一不可,随着四大关键技术的不断进步、完善与成熟,机器换人逐渐成为可能,无人农场未来可期。

3 无人农场的系统组成

不同场景无人农场的具体表现形式不同,但无人农场基本是由基础设施系统、作业装备系统、测控

系统和管控云平台系统等组成。无人农场四大系统各司其职,又相互联系、协同运行,共同完成无人农场智能生产和管理等任务,共同保障整个无人农场的正常运行。无人农场系统组成如图 3 所示。

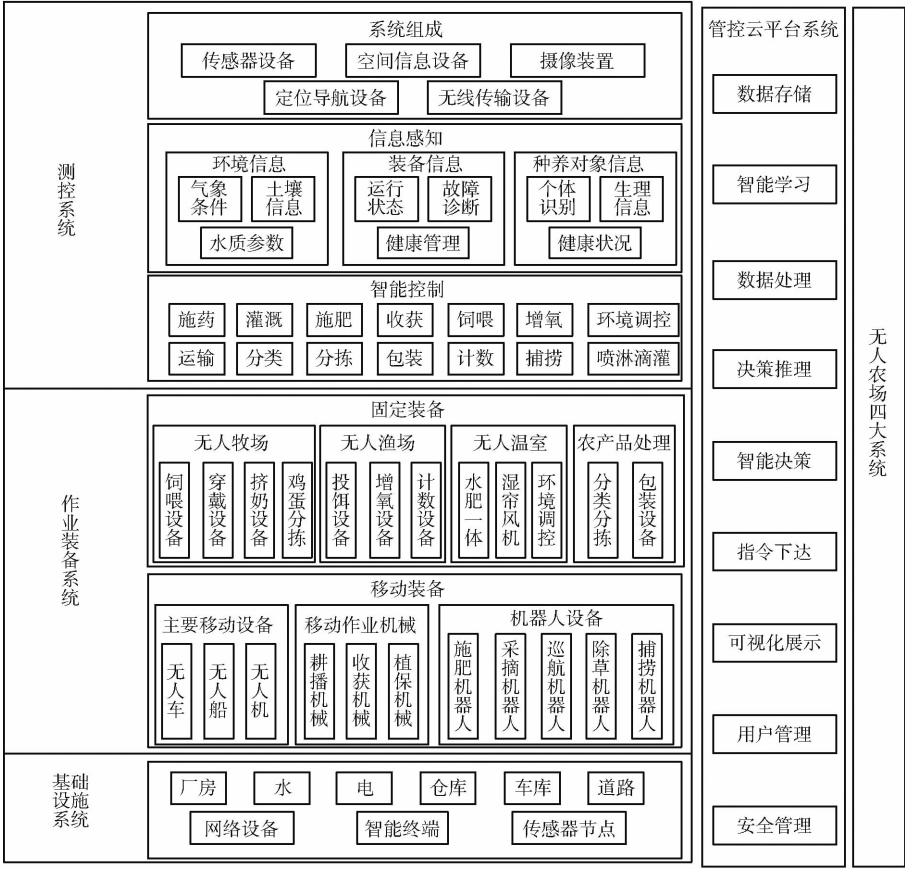


图 3 无人农场的系统组成
Fig. 3 System composition of unmanned farm

3.1 基础设施系统

无人农场基础设施系统通常包括厂房、道路、水、电、仓库、车库、通信节点和传感器安装节点等基础条件,是无人农场的基础物理构架,为农场无人化作业提供了工作环境保障。基础设施系统为无人农场作业装备系统、测控系统和管控云平台系统提供了基础工作条件和环境,是整个无人农场运行的基础。由于农业场景差异大,无人农场的基础设施系统有较大差异,但基础前提都是为机器换人提供必要条件。加强农场基础设施建设,推进水林路电房综合配套,提高无人农场规模和生产水平,为无人农场的持续稳定运行创造基础条件。

3.2 作业装备系统

作业装备系统是无人农场生产和管理过程中使用的设备和装置的统称,根据作业任务特点分为固定装备和移动装备,是无人农场的核心组成部分。固定装备即不需移动即可完成无人农场的自主作业任务的设备,如图 3 所示,主要包括无人牧场的饲喂设备、智能穿戴设备、奶牛挤奶设备和鸡蛋分拣设备

等,无人渔场的投饵、增氧、计数和循环水处理设备,无人温室的水肥一体化设备、湿帘风机、环境调控等设备。此外,固定装备还包括农产品分拣装备和包装装备等。固定装备具有单独可调控能力,并可以与其他设备和移动装备结合,在自身不移动的条件下进行系统的作业控制。移动装备系统是指在移动过程中完成农场作业任务,如大田农场中耕播种机械、收获机械、植保机械等各种作业机械。无人车、无人船、无人机是无人农场中最重要的移动装备,不仅能够实现无人运输任务,还可以作为搭载其他智能作业装备的平台。此外,移动装备还包括各种移动机器人设备。移动装备与固定装备是农场作业的执行者,它们之间的有效对接和配合作业,增加了无人农场智能装备与机器人的环境适应能力和工作效率,提高了无人农场智能化水平,实现了机器对人工作业的替换。

3.3 测控系统

测控系统是指无人农场信息的智能感知系统和装置、设备的智能控制系统,是无人农场关键信息的

数据来源,主要由“测”和“控”两部分组成。测控系统主要是通过各种传感器、空间信息设备、摄像装置、定位导航装置和无线传输模块等快速获取农场环境信息、种养对象的生长状态、装备的运行状态,以保障各种信息的实时监测和通信,从而进行装备端的精准自主作业控制。测控系统是农场的感官系统,为无人农场提供了关键信息支撑,如畜禽养殖场的畜禽健康状况、喂养情况、位置信息及发情预测等,大田的气候气象、农作物面积、密度、土壤及病虫害等数据,智能装备运行状态数据、故障诊断以及健康管理等信息。测控系统为无人农场建立了数据服务平台,提供了数据支撑,完成了智能装备与机器人的智能控制,从而实现了种养对象的精准生产管理。

3.4 管控云平台系统

无人农场具有海量的信息资源,且不同场景作业任务复杂多变,因此无人农场需要对各类数据进行智能存储、识别、学习,并完成知识的推理以及机器的智能决策。无人农场云平台系统能够进行无人农场各种信息和数据的存储、学习,数据处理、推理、决策的云端计算,以及有效信息的挖掘和各种作业指令、命令的下达,并建立可视化模型,是无人农场的神经中枢。无人农场海量数据的存储、处理和大量计算都在云端进行,并通过云平台进行可视化展示。此外,云平台系统还具有用户管理和安全管理等基础功能。整个管控云平台系统不需人的干预独立完成各项任务,实现了农场无人管理和决策。

无人农场四大系统的角色、结构和功能各不相同,但进行无人农场作业时,四大系统之间互相密切配合,形成完整的无人农场生态系统。无人农场四大系统协调统一,协同运行,系统工作,共同完成无人农场农业生产和管理任务,实现农场机器对人工作业的替换。

4 无人农场类型

农业一般分为种植业、林业、畜牧业和渔业 4 种产业模式,根据农业应用方式及类型的不同,无人农场可以分为大田种植、温室大棚、果园种植、畜禽养殖和水产养殖等五大典型应用场景(图 4)。五大场景的农业生产方式各有差异,但本质都是实现完全的机器代替人工,完成农场各种生产、管理任务。

4.1 无人大田

无人大田农场是最早提出无人农场概念的类型,英国哈珀亚当斯农业大学一个农业工程师团队建立了全球首家无人大田农场。该农场的耕、种、播、收、灌和植保作业等全部流程都通过无人驾驶拖拉机及相应的作业机械实现,进而实现无人操作,该



图 4 无人农场五大类型
Fig. 4 Five types of unmanned farm

研究团队认为这种无人农场模式代表了农业未来基本的设计思路。研究者在此基础上通过增加无人机遥感、物联网技术等实现农作物的种植面积、种植密度、长势信息和病虫害信息的实时动态监控,通过无人车实现农业生产资料运输和仓储的无人化作业等,从而真正实现了不需要人进入农场就可以完成所有农业生产和管理任务。

4.2 无人果园

无人果园是指智能感知、智能分析、智能作业和智能装备技术在果园生产中的集成应用。无人果园通过除草机器人、剪枝机器人、植保无人机、套袋机器人、无人运输车、仓储搬运机器人等设备实现果园的日常无人作业;通过对水肥一体化装备的智能调控实现果园的精准灌溉和施肥,确保果树生长在最佳状态;通过采摘机器人、自动分拣装备、自动包装装备实现果园的采收;通过无人运输车和装载机器人对肥料、农药等生产资料开展库房与果园间运输与加注等工作。无人果园模式的出现实现了果园环境自主调控、无人植保以及农产品的无人收获、运输和处理。

4.3 无人温室

无人温室是指集数字化、智能化于一体的无人

温室大棚种植。一方面无人温室通过自主调节风机、湿帘机、遮阳网、补光灯等自主调控温室环境,保障温室作物(蔬菜、花卉、水果)生长在最佳的环境下;另一方面无人温室通过园艺整枝机器人开展日常剪枝打叉等管理,通过水肥一体化施用装备实现温室大棚精准灌溉和施肥,通过采摘机器人、无人运输车、自动分拣装备、自动包装装备实现温室的采收,通过无人运输车和装载机器人运输肥料、农药等以开展库房与温室间运输与加注等工作。

4.4 无人牧场

无人牧场是无人畜禽圈舍等养殖牧场的统称,是指畜禽育种、繁育、饲养和疾病防疫等环节以及产后运输、处理等全过程的无人化精细养殖模式。一方面无人牧场通过无人运输车和装载机器人开展饲料等库房与养殖间运输与饲料仓加注,通过自主饲喂设备实现畜、禽等精准饲喂,通过空气过滤装置和温湿度调控装置,确保畜、禽等养殖动物生长在最佳的环境;另一方面通过挤奶机器人、粪便清扫机器人、饲草(料)给喂机器人、自动捡蛋机和自动包装机完成畜、禽场的日常作业。此外,无人牧场通过智能穿戴设备提高畜禽个体特征智能识别水平,加强动物疫病疫情的精准诊断、预警和防控。无人牧场利用环境控制系统、智能装备系统以及信息化管理系统等进行牧场无人化精细养殖,降低了畜禽死亡率,提升了畜、禽质量,实现了畜、禽养殖场的机器人目的。

4.5 无人渔场

无人渔场类型较多,主要包括无人池塘养殖、陆基工厂养殖、网箱养殖、海洋牧场等。渔场无人化主要体现在以下方面:无人渔场通过自动增氧和水处理装备自主调控养殖水体环境,保证鱼虾蟹贝等生长在最佳环境下;通过无人运输船和装载机器人开展饲料等库房与养殖间运输与饲料仓自主加注,并提供自主饲喂设备,实现鱼虾蟹贝的精准自动饲喂;通过无人机、无人船、水下机器人等实现养殖现场的巡检;通过智能吸鱼泵、分鱼器、捕鱼船等装置实现鱼虾蟹贝类的收获;通过水下机器人实现死鱼捡拾、网衣巡检、鱼类生长监测、网衣清洗等智能作业。

5 结论与展望

无人农场代表着最先进农业生产力,可以极大提高劳动生产率,提高资源利用率和单位土地产出

率,特别是水肥药的利用率,将实现农业劳动力的彻底解放,是未来农业的发展方向,必将引领数字农业、精准农业、智慧农业等现代农业方式的发展。也必须清醒地认识到,无人农场的成本与劳动力成本密切相关,当前在农业劳动力成本低的情况下,无人农场的成本昂贵,随着劳动力成本的进一步提高和无人农场技术规模化应用,无人农场成本会相对越来越低。在 2050 年前后,当 2020 年以后出生人口以及 2030 年以后出生人口逐渐成为主流农业劳动力时,无人值守农场必将迎来快速推广普及。从现在开始布局无人农场理论、技术、产品研发,对加速推进我国农业现代化意义重大。

(1)加强无人农场基础理论、关键技术和实用产品研发:无人农场是新生事物,无人农场的基础理论关键技术有许多问题值得进一步深入探索。当前迫切需要加强农业传感器、动植物表型及生长优化调控模型、自主作业机器人等卡脖子技术的研发;在农机无人驾驶、无人机、无人猪场、无人鸡场、无人渔场等数字化基础好、可控性强的领域进行率先尝试,通过技术转让、联合开发、委托开发和共建研发基地、产业化中试基地等手段,促进无人农场技术试验示范与产业化发展。

(2)编制无人农场发展规划:围绕无人农场技术研发、转化、推广、应用和服务过程中的重大问题,做好顶层设计,制定无人农场在农业主导产业和特色区域的发展方向、重点领域、发展模式及推进路径,合理布局无人农场重大应用示范和产业化项目,强化政府对无人农场工作的宏观指导和统筹协调,集聚项目、资金、科技、人才等资源,促进无人农场的应用发展。

(3)探索无人农场发展商业模式:无人农场最终都要商业化、企业化,要充分发挥协会、联盟、企业的作用,构建以应用需求为牵引,以企业为主体,以市场需求为导向、产学研相结合的无人农场合作发展模式,鼓励大型农业龙头企业积极探索。

(4)进一步优化和完善无人农场政策环境:无人农场是我国战略性新兴产业,是未来发展趋势,在当前技术和商业模式尚不成熟的条件下,其成本高、投入大,因此需要政府构建无人农场发展的政策支持环境,加快制订包括补贴、投资、金融、信贷、税收、重大项目建设等政策支撑体系,鼓励民营资本进入,促进无人农场产业化发展。

参 考 文 献

- [1] 刘彦随, 吴传钧, 鲁奇. 21 世纪中国农业与农村可持续发展方向和策略[J]. 地理科学, 2002, 22(4):385-389.
LIU Yansui, WU Chuanjun, LU Qi. Orientation and tactics for 21st century sustainable agriculture and rural development in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(4):385-389. (in Chinese)

- [2] 齐元静,唐冲.农村劳动力转移对中国耕地种植结构的影响[J].农业工程学报,2017,33(3):233-240.
QI Yuanjing, TANG Chong. Effect of labor migration on cultivated land planting structure in rural China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3):233-240. (in Chinese)
- [3] BIGS P, SRIVASTAVA L. ITU internet reports 2005: the Internet of things[M]. Geverna: International Telecommunication Union, 2005.
- [4] 汪懋华.物联网农业领域应用发展对现代科学仪器的需求[J].现代科学仪器,2010(3):5-6.
WANG Maohua. The demand for modern scientific instruments in the application and development of Internet of things in agriculture[J]. Modern Scientific Instruments, 2010(3):5-6. (in Chinese)
- [5] MAJUMDAR J, NARASEEVAPPA S, ANKALAKI S. Analysis of agriculture data using data mining techniques: application of big data[J]. Journal of Big Data, 2017, 4(1):1-15.
- [6] 许世卫,王东杰,李哲敏.大数据推动农业现代化应用研究[J].中国农业科学,2015,48(17):3429-3438.
XU Shiwei, WANG Dongjie, LI Zheming. Application research on big data promote agricultural modernization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(17):3429-3438. (in Chinese)
- [7] BAIRWA N, AGRAWAL N, JOSHI S, et al. Development of counting algorithm for overlapped agricultural products[J]. IJCA Proceedings on Recent Advances in Wireless Communication & Artificial Intelligence, 2014(3):16-19.
- [8] 马菁泽,甘诗润,魏霖静.人工智能在农业领域的应用现状与未来趋势[J].软件导刊,2019,18(10):8-11.
MA Jingze, GAN Shirun, WEI Linjing. Current and future development of the application of artificial intelligence in agriculture[J]. Software Guide, 2019, 18(10):8-11. (in Chinese)
- [9] 赵德安,贾伟宽,张云,等.农业机器人自主导航改进自适应滤波控制器研究[J/OL].农业机械学报,2015,46(5):1-6.
ZHAO De'an, JIA Weikuan, ZHANG Yun, et al. Design of agricultural robot autonomous navigation control based on improved self-adaptive filter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):1-6. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150501&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.001. (in Chinese)
- [10] 严蕾.5G关键技术及其在精准农业中的应用前景[J].热带农业工程,2016,40(2):8-11.
YAN Lei. Key technologies of 5G and its prospects in precision agriculture tropical agricultural engineering[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2016, 40(2):8-11. (in Chinese)
- [11] 赵春江.人工智能引领农业迈入崭新时代[J].中国农村科技,2018(1):29-31.
ZHAO Chunjiang. Artificial intelligence leads agriculture into a new era[J]. China Rural Science & Technology, 2018(1):29-31. (in Chinese)
- [12] 李道亮.农业4.0——即将到来的智能农业时代[J].农学学报,2018,8(1):207-214.
LI Daoliang. Agriculture 4.0, the approaching age of intelligent agriculture[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1):207-214. (in Chinese)
- [13] 安筱鹏.工具的革命与信息社会的黎明[J].天府新论,2005(4):50-53.
AN Xiaopeng. The revolution of tools and the dawn of information society[J]. Tian Fu New Idea (Bimonthly), 2005(4):50-53. (in Chinese)
- [14] 刘运梓.英国几百年来农场制度的变化[J].世界农业,2006(12):12-15.
LIU Yunzi. The changes of farm system in Britain in the past few hundred years[J]. World Agriculture, 2006(12):12-15. (in Chinese)
- [15] 刘鹏.浅析美国农业机械化进程及对中国的启示[J].农村经济与科技,2015,26(9):227-229.
LIU Peng. Analysis of the process of American agricultural mechanization and its enlightenment to China[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2015, 26(9):227-229. (in Chinese)
- [16] 王铁军.开启中国农业4.0新时代[J].农经,2015(7):9.
WANG Tiejun. Open the new era of China's agriculture 4.0[J]. Agriculture Economics, 2015(7):9. (in Chinese)
- [17] 李瑾,冯献,郭美荣.“互联网+”现代农业发展模式的国际比较与借鉴[J].农业现代化研究,2018,39(2):194-202.
LI Jin, FENG Xian, GUO Meirong. The international comparison, tendency and reference of the development mode of “Internet+” modern agriculture[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(2):194-202. (in Chinese)
- [18] 杨萍萍,黄晓诗,边晓蓉.农业机器人的现状与未来发展趋势[J].时代农机,2015,42(7):8-9.
YANG Pingping, HUANG Xiaoshu, BIAN Xiaorong. An analysis on present situation and future development trend of agricultural robots[J]. Times Agricultural Machinery, 2015, 42(7):8-9. (in Chinese)
- [19] 姚世凤,冯春贵,贺园园,等.物联网在农业领域的应用[J].农机化研究,2011,33(7):190-193.
YAO Shifeng, FENG Chungui, HE Yuanyuan, et al. Application of IoT in agriculture[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(7):190-193. (in Chinese)
- [20] 李道亮.农业物联网导论[M].北京:科学出版社,2012.
- [21] ACHILLES D B, MARIA S P, PANAGIOTIS D, et al. Internet of things (IoT) and agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) in smart farming: a comprehensive review[J]. Internet of Things, 2020:100187.
- [22] ZECHA C W, LINK J, CLAUOEIN W. Mobile sensor platforms: categorisation and research applications in precision farming[J]. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2013, 2(1):51-72.
- [23] KROULIK M, KVIZ Z, MASEK J, et al. Benefits of GPS agricultural guidance for sustainable agriculture[J]. Agrociencia, 2012, 16(3):107-116.
- [24] 李道亮,杨昊.农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J/OL].农业机械学报,2018,49(1):1-20.
LI Daoliang, YANG Hao. State-of-the-art review for internet of things in agriculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1):1-20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180101&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.001. (in Chinese)
- [25] ELIJAH O, RAHMAN T A, ORIKUMHI I, et al. An overview of Internet of things (IOT) and data analytics in agriculture: benefits and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(5):3758-3773.
- [26] SABRI N, ALJUNID S A, AHMAD R B, et al. Smart prolong fuzzy wireless sensor-actor network for agricultural application[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2012, 28(2):295-316.
- [27] PIRES N M M, DONG T, YANG Z. A fluorimetric nitrite biosensor with polythienothiophene-fullerene thin film detectors for on-site water monitoring[J]. Analyst, 2019, 144:4342-4350.
- [28] WANG Zhiqiang, SUN Xia, LI Caihong, et al. On-site detection of heavy metals in agriculture land by a disposable sensor based virtual instrument[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123:176-183.
- [29] 孙文通,郑汝莲,李海山.纳米传感器检测重金属离子的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2017,8(11):4277-4281.
SUN Wentong, ZHENG Rulian, LI Haishan. Research progress on the detection of heavy metal ions via nano sensors[J].

- Journal of Food Safety and Quality, 2017, 8(11):4277-4281. (in Chinese)
- [30] WEI Yaoguang, DING Qisheng, LI Daoliang, et al. Design of an intelligent electrical conductivity sensor for aquaculture[J]. Sensor Letters, 2011, 9(3):1044-1048.
- [31] 吴久江, 汪星, 李群, 等. 简易草莓大棚智慧管理系统设计与性能分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12):288-296.
WU Jiujiang, WANG Xing, LI Qun, et al. Design and performance analysis of intelligent management system in simple strawberry greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12):288-296. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191233&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.033. (in Chinese)
- [32] HANGGORO A, PUTRA M A, REYNALDO R, et al. Green house monitoring and controlling using Android mobile application[C]//International Conference on Qir. IEEE, 2013:79-85.
- [33] 杜尚丰, 何耀枫, 梁美惠, 等. 物联网温室环境调控系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊):296-301.
DU Shangfeng, HE Yaofeng, LIANG Meihui, et al. Greenhouse environment network control system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):296-301. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s045&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.50.045. (in Chinese)
- [34] DOWLATI M, MOHTASEBI S S, OMID M, et al. Freshness assessment of gilthead sea bream (*Sparus aurata*) by machine vision based on gill and eye color changes[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(2):277-287.
- [35] 何勇, 聂鹏程, 刘飞. 农业物联网与传感器研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(10):216-226.
HE Yong, NIE Pengcheng, LIU Fei. Advancement and trend of Internet of things in agriculture and sensing instrument[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):216-226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131035&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.035. (in Chinese)
- [36] LIN Qi, JIAN Zhan, XU Mark, et al. Developing WSN-based traceability system for recirculation aquaculture[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 53(11):2162-2172.
- [37] 葛文杰, 赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7):222-230.
GE Wenjie, ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and developing strategies of agricultural Internet of Things[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7):222-230. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140735&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.035. (in Chinese)
- [38] 杨信廷, 吴滔, 孙传恒, 等. 基于 WMSN 的作物环境与长势远程监测系统[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(1):167-173.
YANG Xinting, WU Tao, SUN Chuanheng, et al. Remote monitoring system of crop environment and growing based on WMSN[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1):167-173. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130132&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.032. (in Chinese)
- [39] PRATHIBHA S R, HONGAL A, JYOTHI M P. IoT based monitoring system in smart agriculture[C]//2017 International Conference on Recent Advances in Electronics and Communication Technology (ICRAECT). IEEE Computer Society, 2017.
- [40] 韩瑞珍, 何勇. 基于计算机视觉的大田害虫远程自动识别系统[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3):156-162.
HAN Ruizhen, HE Yong. Remote automatic identification system of field pests based on computer vision[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3):156-162. (in Chinese)
- [41] 刘建刚, 赵春江, 杨贵军, 等. 无人机遥感解析田间作物表型信息研究进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24):98-106.
LIU Jiangang, ZHAO Chunjiang, YANG Guijun, et al. Review of field-based phenotyping by unmanned aerial vehicle remote sensing platform[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24):98-106. (in Chinese)
- [42] 吴才聪, 傅成, 苏怀洪, 等. 面向农业移动管理的信息获取技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊):169-172.
WU Caicong, FU Cheng, SU Huaihong, et al. Collection technology for agriculture mobile management[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):169-172. (in Chinese)
- [43] 黎永键, 赵祚喜, 黄培奎, 等. 基于 DGPS 与双闭环控制的拖拉机自动驾驶系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2):11-19.
LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Automatic navigation system of tractor based on DGPS and double closed-loop steering control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):11-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170202&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.002. (in Chinese)
- [44] CHITNIS G, MALEKI T, SAMUELS B, et al. A minimally invasive implantable wireless pressure sensor for continuous IOP monitoring[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2013, 60(1):250-256.
- [45] BORKAR S, PANDE H. Application of 5G next generation network to Internet of things[C]//International Conference on Internet of Things & Applications. IEEE, 2016.
- [46] HAMID K, BAHMAN J, MAHDI J, et al. Artificial intelligence and Internet of things for autonomous vehicles[M]//REZA N J, DAI Lining. Nonlinear Approaches in Engineering Applications, Switzerland: Springer, 2020.
- [47] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Science breakthroughs to advance food and agricultural research by 2030[M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2018.
- [48] SHEHATA N, KANDAS I, SAMIR E. In-situ gold-ceria nanoparticles: superior optical fluorescence quenching sensor for dissolved oxygen[J]. Nanomaterials (Basel, Switzerland), 2020, 10(2):314.
- [49] KUMAR S S, TANWAR A. Development of a MEMS-based barometric pressure sensor for micro air vehicle (MAV altitude measurement[J]. Microsystem Technologies, 2020, 26(3):901-912.
- [50] WANG Cong, LI Zhen, PAN Zhongli, et al. A high-performance optoelectronic sensor device for nitrate nitrogen in recirculating aquaculture systems[J]. Sensors, 2018, 18(10):3382.
- [51] HALLAJ R, SALIMI A, KAVOSI B, et al. Highly sensitive and ultra-selective amperometric nitrite sensor using cyclometalated Rh(III)-complex/CNTs modified glassy carbon electrode integrated with flow injection analysis[J]. Sensors and Actuators B Chemical, 2016, 233:107-119.
- [52] THAKUR D, KUMAR Y, KUMAR A, et al. Applicability of wireless sensor networks in precision agriculture: a review[J]. Wireless Personal Communications, 2019, 107:471-512.
- [53] ZOU Sai, YANG Fan, TANG Yuliang. Optimized algorithm of sensor node deployment for intelligent agricultural monitoring[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127:76-86.
- [54] SURESH N. Recent advances in wearable sensors for animal health management[J]. Sensing and Bio. Sensing Research, 2017, 12:15-29.
- [55] WOODARD J. Big data and Ag-analytics: an open source, open data platform for agricultural & environmental finance,

- insurance, and risk[J]. *Agricultural Finance Review*, 2016, 76(1):15–26.
- [56] 吴楠. 国外新型农业生产经营管理信息系统研究——以 Farmlogs 为例[J]. *软件导刊*, 2016, 15(1):130–132.
WU Yu. Study on the new agricultural production and management information system in foreign countries—for example: Farmlogs[J]. *Software Guide*, 2016, 15(1):130–132. (in Chinese)
- [57] 王文生, 郭雷风. 农业大数据及其应用展望[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(9):1–5.
WANG Wensheng, GUO Leifeng. Agricultural big data and its application prospect[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(9):1–5. (in Chinese)
- [58] CHARVAT K, JUNIOR K C, REZNIK T, et al. Advanced visualisation of big data for agriculture as part of databio development[C]//2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2018: 415–418.
- [59] 林立忠. 大数据技术在现代农业中的应用研究[J]. *信息记录材料*, 2019, 20(2):88–89.
LIN Lizhong. Application of big data technology in modern agriculture[J]. *Information Recording Materials*, 2019, 20(2):88–89. (in Chinese)
- [60] STUBBS M. Big data in U. S. agriculture[R]. University of North Texas Libraries, 2016.
- [61] EVAGELOS D L, CHRYSANTHI C. Big data in agriculture: does the new oil lead to sustainability? [J]. *Geoforum*, 2020, 109(2):1–3.
- [62] TANOMIAT P, SRIPRAPH K, SINTUYA H, et al. The Development of smart farm with environmental analysis[C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Green and Human Information Technology, Lecture Notes in Electrical Engineering, 2018: 502.
- [63] KELLY B, IRENA K. Big data in food and agriculture[J]. *Big Data and Society*, 2016, 3(1):62–77.
- [64] CARIA M, SCHUDROWITZ J, JUKAN A, et al. Smart farm computing systems for animal welfare monitoring[C]//40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). IEEE, 2017.
- [65] MAHADEV S. Edge computing[J]. *Computer*, 2017, 50(10):36–38.
- [66] SHI Weisong, GAO Jie, ZHANG Quan, et al. Edge computing: vision and challenges[J]. *Internet of Things, IEEE Journal*, 2016, 3(5):637–646.
- [67] 施巍科, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算:万物互联时代新型计算模型[J]. *计算机研究与发展*, 2017, 54(5):907–924.
SHI Weisong, SUN Hui, CAO Jie, et al. Edge computing an emerging computing model for the internet of everything era[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2017, 54(5):907–924. (in Chinese)
- [68] WANG Huizhe, LIN Guowen, WANG Jianqin, et al. Management of big data in the Internet of things in agriculture based on cloud computing[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 548–549:1438–1444.
- [69] BO Y, WANG H. The application of cloud computing and the Internet of things in agriculture and forestry[C]//International Joint Conference on Service Sciences, Taipei, 2011:168–172.
- [70] ANDREAS K, FRANCESC X P B. Deep learning in agriculture: a survey[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2018, 147(1):70–90.
- [71] SJAAK W, LAN G, COR V, et al. Big data in smart farming—a review[J]. *Agricultural Systems*, 2017, 153:69–80.
- [72] JUNG F, BUSKENS C, LACHMANN M. Smart farm-data based optimization for optimal energy management[J]. *PAMM*, 2017, 17(1):741–742.
- [73] SUN Zhongfu, DU Keming, ZHENG Feixiang, et al. Perspectives of research and application of big data on smart agriculture [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15(6):63–71.
- [74] 闫峰, 李茂松, 王艳姣, 等. 遥感技术在农业灾害监测中的应用[J]. *自然灾害学报*, 2006, 15(6):131–136.
YAN Feng, LI Maosong, WANG Yanjiao, et al. Application of remote sensing technique to monitor agricultural disasters[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(6):131–136. (in Chinese)
- [75] 钱学梁. 农业大数据清洗方法比较研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2017.
QIAN Xueliang. Study on comparative of cleaning methods of agricultural big data [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. (in Chinese)
- [76] CASCIATI S, VECE M. Real-time monitoring system for local storage and data transmission by remote control[J]. *Advances in Engineering Software*, 2017, 112:46–53.
- [77] DELOWAR H, GENCI C, MITSUR J. Optimizing deep learning parameters using genetic algorithm for object recognition and robotgrasping[J]. *Journal of Electronic Science and Technology*, 2018, 16(1):11–15.
- [78] YAHYA N. *Agricultural 4.0: its implementation toward future sustainability*[M]. Springer, Singapore, 2018.
- [79] 罗锡文. 农业人工智能的应用和思考[J]. *中国农村科技*, 2019(5):16–19.
LUO Xiwen. Application and thinking of agricultural artificial intelligence[J]. *China Rural Science & Technology*, 2019(5):16–19. (in Chinese)
- [80] 刘双印, 黄建德, 黄子涛, 等. 农业人工智能的现状与应用综述[J]. *现代农业装备*, 2019, 40(6):7–13.
LIU Shuangyin, HUANG Jiande, HUANG Zitao, et al. Summary of agricultural artificial intelligence[J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2019, 40(6):7–13. (in Chinese)
- [81] 陈桂芬, 李静, 陈航, 等. 大数据时代人工智能技术在农业领域的研究进展[J]. *吉林农业大学学报*, 2018, 40(4):502–510.
CHEN Guifen, LI Jing, CHEN Hang, et al. A survey of researches on artificial intelligence in the field of agriculture in big data era[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40(4):502–510. (in Chinese)
- [82] 李德毅. AI-人类社会发展的加速器[J]. *智能系统学报*, 2017, 12(5):583–589.
LI Deyi. Artificial intelligence: an accelerator for the development of human society[J]. *CAAI Transactions on Intelligent System*, 2017, 12(5):583–589. (in Chinese)
- [83] BARBEDO J G A. Detection of nutrition deficiencies in plants using proximal images and machine learning: a review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 162:482–492.
- [84] GOMEZ-CHOVA L, MUNOZ-MARI J, LAPARRA V, et al. A review of kernel methods in remote sensing data analysis[M]//PRASAD S, BRUCE L, CHANUSSOT J. *Optical remote sensing: advances in signal processing and exploitation techniques*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011:171–206.
- [85] BILSKI P. Data set preprocessing methods for the artificial intelligence-based diagnostic module[J]. *Measurement*, 2014, 54(8):180–190.
- [86] REHMAN T U, MAHMUD M S, CHANG Y K, et al. Current and future applications of statistical machine learning algorithms for agricultural machine vision systems[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 156:585–605.
- [87] LIAKOS K G, BUSATO P, MOSHOU D, et al. Machine learning in agriculture: a review[J]. *Sensors*, 2018, 18(8):2674.
- [88] MAVRIDOU E, VROCHIDOU E, PAPAKOSTA G A, et al. Machine vision systems in precision agriculture for crop farming [J]. *Imaging*, 2019, 5(12):89.

- [89] LI J Q, BAI S C, DUAN P Y, et al. An improved artificial bee colony algorithm for addressing distributed flow shop with distance coefficient in a prefabricated system[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(22):1-21.
- [90] CHANDANAPALLI S B, REDDY E S, LAKSHMI D R. FTDT: rough set integrated functional tangent decision tree for finding the status of aqua pond in aquaculture[J]. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2017, 32(3):1821-1832.
- [91] 郑勇,王光华,杜鹏飞. 智慧农业云平台建设探索与实践[J]. *农业工程技术*, 2018, 38(21):31-35.
- [92] ZHENG Yong, WANG Guanghua, DU Pengfei. Exploration and practice of cloud platform construction for smart agriculture[J]. *Agriculture Engineering Technology*, 2018, 38(21):31-35. (in Chinese)
- [92] 韩树丰,何勇,方慧. 农机自动导航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.
- [92] HAN Shufeng, HE Yong, FANG Hui. Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture: a review[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2018, 44(4):381-391. (in Chinese)
- [93] 籍颖,张漫,刘刚,等. 农业机械导航系统综合评价方法[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(12):160-164.
- [93] JI Ying, ZHANG Man, LIU Gang, et al. Synthetical evaluation of agriculture machine navigation system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(12):160-164. (in Chinese)
- [94] 崔健,马天宇,杨松林,等. 高速无人船推进系统控制参数组合优化分析[J]. *舰船科学技术*, 2009, 9(1):69-73.
- [94] CUI Jian, MA Tianyu, YANG Songlin, et al. Optimized analysis of high-speed USV intelligence propulsion system[J]. *Ship Science and Technology*, 2009, 9(1):69-73. (in Chinese)
- [95] ZHANG Y, LIAN Q, ZHANG W. Design and test of a six-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) electrostatic spraying system for crop protection[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2017, 10(6):68-76.
- [96] 罗锡文,王在满,曾山,等. 水稻机械化直播技术研究进展[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(5):1-13.
- [96] LUO Xiwen, WANG Zaiman, ZENG Shan, et al. Recent advances in mechanized direct seeding technology for rice[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40(5):1-13. (in Chinese)
- [97] 周罕觅,张富仓,ROGER K,等. 苹果幼树生理特性和水分生产率对水肥的响应研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(4):77-87.
- [97] ZHOU Hanmi, ZHANG Fucang, ROGER K, et al. Response of physiological properties and crop water productivity of young apple tree to water and fertilizer[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4):77-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150413&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.013. (in Chinese)
- [98] 王志勇,湛志新,江涛,等. 标准化池塘养殖自动投饵系统设计[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(8):77-80.
- [98] WANG Zhiyong, SHEN Zhixin, JIANG Tao, et al. Automatic feeding system in standardization pond culture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(8):77-80. (in Chinese)
- [99] MARK L, AMIR D. A conceptual framework and optimization for a task-based modular harvesting manipulator[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 166:104987.
- [100] BAO Jianhua, LI Daoliang, QIAO Xi, et al. Integrated navigation for autonomous underwater vehicles in aquaculture: a review[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2020, 7(1):139-151.
- [101] 王立谦,汪小志,林卫国. 农业激光自动采摘定位机器人控制系统设计——基于PID控制[J]. *农机化研究*, 2015, 37(9):211-216.
- [101] WANG Liqian, WANG Xiaozhi, LIN Weiguo. Design of agricultural laser automatic picking positioning robot control system based on PID control[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015, 37(9):211-216. (in Chinese)
- [102] 吕信超,崔天时,张佳鑫,等. 农情监测四旋翼飞行器姿态控制仿真与实现[J]. *测控技术*, 2016, 35(9):59-69.
- [102] LÜ Xinchao, CUI Tianshi, ZHANG Jiaxin, et al. Simulation and implementation of attitude control for agricultural condition monitoring UAV[J]. *Measurement & Control Technology*, 2016, 35(9):59-69. (in Chinese)
- [103] ZHANG Q, WANG X Y, XIAO X, et al. Design of a fault detection and diagnose system for intelligent unmanned aerial vehicle navigation system[J]. *Proceedings Institution of Mechanical Engineering Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019, 233(6):2170-2176.
- [104] 汪沛,罗锡文,周志艳,等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(18):1-12.
- [104] WANG Pei, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan, et al. Key technology for remote sensing information acquisition based on micro UAV[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(18):1-12. (in Chinese)
- [105] 刘兆朋,张智刚,罗锡文,等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1):15-21.
- [105] LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(1):15-21. (in Chinese)
- [106] ESKI O, KU Z A. Control of unmanned agricultural vehicles using neural network-based control system[J]. *Neural Computing & Applications*, 2017, 31:583-595.
- [107] XUE X Y, TU K, QIN W C, et al. Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2014, 7(4):23-28.
- [108] 朱思洪,朱永刚,朱星星,等. 大型拖拉机动力换挡变速箱试验台[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(4):13-16.
- [108] ZHU Sihong, ZHU Yonggang, ZHU Xingxing, et al. Test-bed of power shift transmission for large-scale tractor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(4):13-16. (in Chinese)
- [109] FAICÇAL B S, FREITAS H, GOMES P H, et al. An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 138(1):210-223.
- [110] DEWI T, RISMA P, OKTARINA Y, et al. Visual servoing design and control for agriculture robot: a review[C]// *International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*, Pangkal Pinang, 2018:57-62.
- [111] HE S, WANG W, YANG H, et al. State-aware rate adaptation for UAVs by incorporating on-board sensors[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 69(1):488-496.
- [112] HUANG Y, THOMSON S J, LAN Y, et al. Multispectral imaging systems for airborne remote sensing to support agricultural production management[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2010, 3(1):50-62.
- [113] 王大帅,张俊雄,李伟,等. 植保无人机动态变量施药系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(5):91-98.
- [113] WANG Dashuai, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Design and test of dynamic variable spraying system of plant protection UAV[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(5):91-98. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170510&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.010. (in Chinese)