

农业领域自动定向技术研究进展分析

崔永杰^{1,2} 王明辉^{1,3}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100;
3. 陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 随着信息感知、机器人等技术的快速发展,自动定向作业具有更多的需求和实现方法。自动定向技术为智慧农业生产过程自动化、智能化提供有利条件,是提高作业效率和品质的重要环节之一,已成为农业生产自动化、智能化作业技术的发展方向。本文首先阐述了自动定向技术的基本概念与内涵,综述了在田间播种、采后处理、畜产养殖加工等农业领域自动定向技术的国内外研究进展,并分析比较了不同应用领域的特征和优缺点。然后对自动定向关键技术应用研究进行了系统分析,包括定向机理与方法、定向机构与装置、自动检测与控制等多方面的共性问题,归纳了该领域技术的开放性问题。最后总结了当前自动定向技术面临的挑战和机遇,展望了农机农艺高度融合的自动定向、专用与通用自动定向、多功能全面融合的自动定向和融合智能化技术的自动定向等农业领域自动定向技术和装备的未来研究方向。

关键词: 自动定向; 农业装备; 综述

中图分类号: S-1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)04-0001-20

OSID:



Research Progress Analysis of Auto-orientation Technologies in Agriculture

CUI Yongjie^{1,2} WANG Minghui^{1,3}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Service, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With the rapid development of information perception technology and robotics technology, automatic orientation has more requirements and implementation methods. Automatic orientation technology provides favorable conditions for the automation and intelligence of intelligent agricultural production process. Automatic orientation is one of the important links to improve operation efficiency and quality. Automatic orientation technology has become the development direction of agricultural production automation and intelligent operation technology. Firstly, the basic concept and connotation of automatic orientation technology was expounded, the research progress of automatic orientation technology at home and abroad in agricultural fields such as field sowing, post mining treatment, livestock breeding and processing was summarized, and the characteristics, advantages and disadvantages of different application fields were analyzed and compared. Then the application research of the key technology of automatic orientation was systematically analyzed, including the common key problems of the orientation mechanism and method, the orientation mechanism and device, the automatic detection and control, and the openness of the technology in this field was summarized. Finally, the challenges and opportunities of automatic orientation technology were summarized. And the future research direction of automatic orientation technology and device were prospected, such as automatic orientation technology and equipment for agricultural machinery and agronomy integration, special and general automatic orientation technology and equipment, automatic orientation technology and equipment with multi-function and comprehensive integration, automatic orientation technology and equipment combined with intelligent technology.

Key words: automatic orientation; agricultural equipment; overview

收稿日期: 2023-01-06 修回日期: 2023-03-01

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLNY02-04)、国家自然科学基金项目(31971805)和山东省科技创新工程战略咨询研究专项(202103SDYB29)

作者简介: 崔永杰(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事果蔬生产自动化研究,E-mail: cuiyongjie@nwsuaf.edu.cn

0 引言

据国家统计局发布数据,2020 年我国农业总播种面积 $1.67 \times 10^8 \text{ hm}^2$,农业(农牧渔业)生产总产量 $1.34 \times 10^9 \text{ t}$,产生经济效益 1.38×10^5 亿元,成为中国经济的重要组成部分^[1]。农业生产作为典型的劳动密集型产业,在播种、管理、收获和后处理等环节对作业对象的预处理能有效提高其作业效率和质量,全程机械化作业是实现农业生产高效高产的关键环节,占全部投入成本比例越来越大^[2-4]。田间播种、采后处理和畜产养殖加工等农业生产过程的标准化预处理是降低人工成本和提质增效的关键手段^[5-6]。针对农业生产全程机械化发展遇到的瓶颈,自动定向作为作业对象预处理的关键技术是农业智能化重要研究领域之一^[7],已成为国际农业机械化技术的重要发展方向。

农业生产过程中,针对播种、管理、收获和后处理的机械化作业技术与装备,已经取得了较为成熟的发展。其中为满足农业生产高效高质的作业要求,针对需要定向的农业生产对象,需在其预处理环节进行快速准确目标识别定位和高效自动化调向。在农业生产全程高度机械化和自动化作业水平下,自动定向技术得到了快速发展和深度应用;在田间播种中应用以提升作物产量和质量^[8];在采后处理中应用以提升作业效率和品质^[9];在畜产养殖加工中应用以便于统一管理^[10]。可见,自动定向技术在农业领域的应用,有助于促进农业全程机械化发展,提高农业生产效率和质量。

我国农业生产作业对象大多具有朝向各异性,即需要根据形状、尺寸、姿态等特征进行定向,以满足对作业效率和质量的要求,因此对自动定向技术和装备的应用更加急迫、要求也更高,已成为农业生产发展的重大现实需求。国内外专家学者针对自动定向技术开展了大量研究并取得了重要成果^[7]。然而,目前农业生产中自动定向装备的作业性能难以满足作业需求且市场化率较低,高精度、高效率 and 低损伤的自动定向技术亟待取得突破^[11-12]。

本文综述自动定向技术的发展历程,从自动定向的特点出发,结合不同应用场景要求,详解现有田间播种、采后处理、畜产养殖加工等农业领域自动定向技术和装备的工作原理,进而围绕自动定向涉及的定向机理与方法、定向机构与装置、自动检测与控制 3 个关键技术进行分析、归纳,最后分析自动定向技术的研究趋势,旨在为自动定向技术在农业领域的理论研究和深入应用提供参考。

1 自动定向概念与内涵

依据农业生产的作业对象是否需要朝向一致,作业方式分为定向作业和非定向作业两种,如图 1 所示。其中,非定向作业的对象大多是朝向对作业效率和产品品质无影响或影响不大的农业生产方式,每次生产作业对象不需要具有一致且固定的朝向。定向作业依据作业对象和要求的不同又可分为田间播种定向、采后处理定向和畜产养殖加工定向 3 种。田间播种定向是指使所有种子在播种时具有相同的方向,如玉米、小麦、粳稻等粮食作物种子以及大蒜、南瓜等果蔬大粒种子;采后处理定向是指果蔬在采后处理时进行固定朝向调整,如苹果、杏、枣、柑橘等水果和甘蓝、番茄、辣椒、莲子等蔬菜;畜产养殖加工定向是指使动物具有一致的行为且对其进行方向调整,如猪、牛、鸡等动物的统一行为和禽蛋、鱼虾等的定向调整。农业生产的作业对象是否需要定向作业,主要考虑非定向作业和定向作业成本比较、对作业效率和产品品质的影响、农业生产过程的定向需求、以及对农业全程机械化发展的影响等与农业生产收益间的综合平衡。

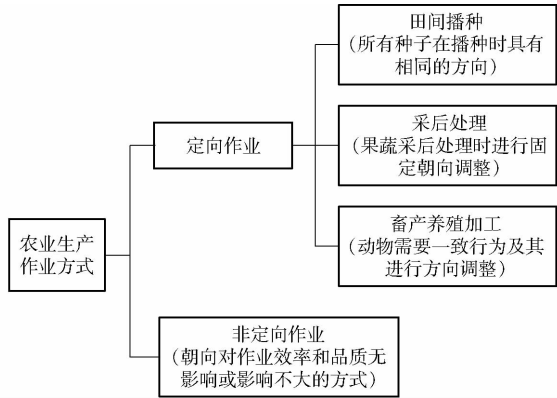


图 1 农业生产作业方式分类

Fig. 1 Classification of agricultural production operation mode

农业生产中的定向作业方式最早来源于农业机械自动导航定位定向作业。目前对自动定向技术比较可行的定义为:自动调整动物和植物的本体或本体某部分的空间位置的行为^[13]。但这个定义并不适用于农业领域的农业生产过程。在农业生产的全过程中,由于田间播种、采后处理和畜产养殖加工等主要农业生产阶段目标和要求的差异以及作业环境等的不同,导致相应的自动定向技术和装备等发展不均匀,在实际应用过程中发展不均匀的特征更加明显。自动定向作业不仅能促进农业全程机械化和标准化作业模式的发展,而且能够提升作业效率和产品质量。此时相应的自动定向过程需要对目标物

进行调向,依据其形状、尺寸和姿态等特征或动作行为等单个或多个指标综合评价,并根据农业生产特点、产后用途、作业目标和要求等,确定其自动定向作业标准,决定其自动定向作业的原理、方法、技术和装置,进行农业生产过程的自动定向作业^[14-16]。综上所述,自动定向可定义为:针对在作业时有朝向要求的农业生产过程,通过使用相应的方法技术使作业对象在进入下一步作业前具有相同的表征和行为。

综合分析可知,自动定向技术在农业领域具有刚性需求,但是距离市场化应用还具有较大差距。原因在于:相比于现有基于自动定向技术的农业生产作业装备,尽管人工定向存在作业效率低、质量参差不齐和劳动强度大的问题,人工定向因其具有功能多样性的优势,仍为现阶段农业生产定向作业的主要方式。只有当定向速度和定向效果的综合质量不低于人工作业或定向作业标准(作业对象朝向基本一致)的情况下,自动定向技术才具有市场化应用的优势。目前,国内外自动定向技术的研究多集中于定向机理和规律、定向方法和机构等方面,其成熟度和应用成本还未达到进入市场条件。然而在劳动力短缺加剧和成本持续提高的情况下,通过农业机械化和自动化的发展来降低生产成本已成为重要发展方向,为此各国都在加大农业领域自动定向技术研发和应用进程。

2 自动定向技术研究进展

农业生产在作业环境、时间以及空间上存在较大的差异,基于其本质上的不确定性对自动定向装置提出了更高的效率、精度和适应性要求。定向过程中涉及到装置与作业对象的互动,是提高农业生产效率和产品质量的具有技术集成度的重要环节,而自动定向技术更是因作业要求快速且精准成为农业全程机械化自动化发展具有挑战性的任务之一。随着信息感知、自动控制和仿生设计技术的快速发展,近年来自动定向技术得到了快速发展。特别是以玉米^[17]、稻谷^[18]等为代表的田间播种定向领域,以苹果^[19]、杏^[20]、甘蓝^[21]等为代表的采后处理定向领域,以鱼^[22]、虾^[23]、蛋^[24]等为代表的畜产养殖加工定向领域成为最具活力的自动定向技术研究领域。近年来,对农业生产的自动定向技术已经进行了较多研究,一方面是定向机理与方法^[25]的理论研究;另一方面是定向机构与装置^[26]的产品研究;还有自动检测与控制^[27]的智能化技术研究。上述对定向技术在不同作业领域和不同发展方向的研究,对农业生产中自动定向理论、技术与装备的发展具

有重要意义。

本文根据农业生产作业过程和对象的不同,分田间播种、采后处理和畜产养殖加工 3 类,按照研究发展和实际应用情况,分析国内外自动定向技术与装备发展进程。

2.1 田间播种

田间播种定向指在农业生产中使种子形成统一的播种模式,即针对不同作物种子理化特性,在种子的播种过程中通过一定外力的作用对种子方向进行干预的一种播种方式,使种子具有相同的播种特点。小麦、玉米、水稻等是全世界广泛种植的粮食作物,总收获面积和总产量分别占全球禾谷类作物的 79% 和 90%^[28]。定向播种能使作物的生长呈现一定的规律性,提高作物对光能的利用率以及田间的通风效果,同时还能保证播种精确性,提高播种质量等优点^[18],因此得到了广泛的研究。田间播种的定向作业主要有小麦、玉米、水稻、大蒜、大粒种子等播种。田间播种的定向难度在于:不同播种方式、种子之间粘碰聚集,外形尺寸复杂多变、理化特性和动力学特征差异大等因素^[29-30],造成识别上的不确定性和定向机理与机构上的差异,从而造成田间播种自动定向难以实现高效率、高质量、高精度和鲁棒性。

在小麦播种领域,目前常采用的播种装备^[8]有:气力式排种器、窝眼轮式排种器、槽轮式排种器、气吸型孔式排种器等,主要研究包括排种装置^[31]、检测控制^[32]、行走系统^[33]等方面。王英博等^[31]提出一种机械式射播的非接触式播种方法,设计一种机械式小麦射播排种器,提高了覆土后种子深度的均匀性,如图 2a 所示。刘俊孝等^[34]设计了一种基于气力吸附、定点打穴、精准投种的针孔管式小麦精准点播装置,保证播种作业的播量、播深及株距的均匀度,如图 2b 所示。小麦播种定向主要是进行播种过程中种子位置和姿态的定向作业,以提高播种的精准性和均匀性。

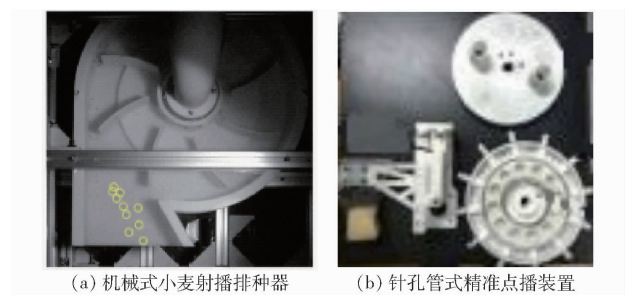


图 2 小麦播种定向装置

Fig. 2 Wheat sowing orientation device

在玉米播种领域,具有代表性的大田播种装备^[5,12]有:带式排种器、勺匙式排种器、指夹式排种器、盘式玉米精量排种器、气吸式排种器、气压式排

种器、气吹式排种器等^[35-36]。权龙哲等^[17]设计了一种基于电磁振动的玉米粒群定向整列系统,系统以交流电的频率做往复运动,实现籽粒的输送,如图 3a 所示。王侨等^[37]基于图像处理技术研制了一种玉米种粒定向定位摆放装置,根据尖端朝向信息,精确旋转调整种粒朝向,实现可控式、多方位的定向,如图 3b 所示。刘长青等^[38]研究玉米种粒动态检测算法并设计了一种玉米种子精选装置,玉米种子精选装置使用两层传输机构和翻面装置,应用机器视觉实现玉米籽粒双面检测,如图 3c 所示。邢洁洁等^[39]在电磁振动的基础上设计了一种玉米种子侧立定向定距输出装置,对侧立姿态的玉米种子进行定向和定距,使其尖端统一朝前,且相邻种子间距一致,如图 3d 所示。

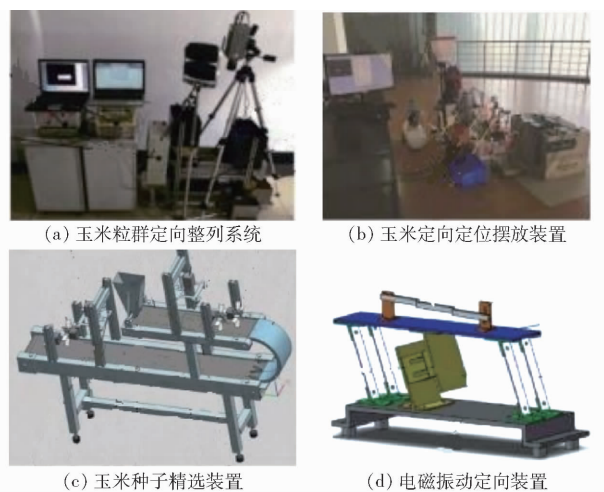


图 3 玉米播种定向装置

Fig. 3 Corn sowing directional device

在水稻播种领域,美国、意大利、澳大利亚等发达国家采用机械化直播方式种植水稻^[40-42],日本、韩国等国家采用机械式排种器^[43],我国多采用机械式^[44]、振动式^[45]和气力式^[46]播种方式,研究内容主要包括定向排种和定向排序等^[47]。徐洪岩等^[48]研发出了一种新型超级稻定向排种装置,可以将种箱中杂乱无章的稻种分离出来,并在组合滑道上沿其长轴方向排列成连续的种子流,如图 4a 所示。韩豹等^[49]研制出粳稻定向精量播种装置,建立了定距输送板输送频率、输送板齿距和滑道夹角与定向精量排种合格率之间的数学模型,如图 4b 所示。俞亚新等^[50]基于稻种单轴对称特性设计了振动式稻种定向排序排种器,提高了超级稻机械化播种位置的精度,如图 4c 所示。XING 等^[51]基于吸种区水稻种子流动的特点,设计了一种基于气动式精密搅拌装置的水稻排种器,解决气动水稻排种器吸种阻力大、吸种稳定性差、播种精度低的问题,如图 4d 所示。

在大粒种子播种领域,主要是针对瓠瓜、南瓜、

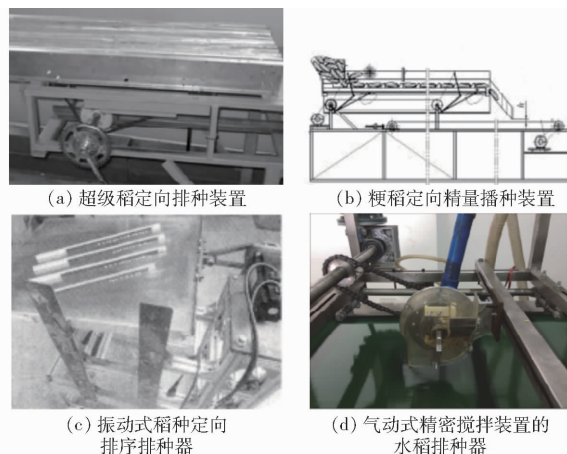


图 4 水稻播种定向装置

Fig. 4 Rice sowing orientation device

西瓜等体积大、质量大且不呈球形的种子,日本、韩国在对大粒种子的精量播种方面的研究较早^[52]。日本洋马农机株式会社开发出 SF70 型大粒种子定向播种机,单粒率达到 95%,定向播种角度偏转小于 30°,播种生产率 5 000 穴/h^[53-54]。韩国 Helper Robotech 公司开发的 SD-1212 型针式播种机和意大利 Mosa 的滚筒播种机也可实现大粒种子的精量播种^[55-56],如图 5a、5b 所示。辜松研究团队^[52,57]基于直线振动器定向送种、气缸驱动种穴转向及负压针式播种技术,开发了一种可实现大粒种子 45°定向精量播种的装置,如图 5c 所示。孔艳山等^[58]设计了一套振动种盘搭配两套种子定向机构,实现了往复式的无空行程取种和播种,如图 5d 所示。陈同等^[59]研制了调向排种机构,实现对大粒种子长轴保持 45°方向、种子发芽口朝向一致并位于穴孔重心位置定向定位排种,如图 5e 所示。侯加林研究团队^[60-62]研究设计了一种大蒜正头装置,采用可视化方法提取试验过程中蒜种运动动态图像,蒜种调向的正头率可达 95.67%,如图 5f 所示。

总体来看,在小麦、玉米、水稻、大粒种子等农作物的田间播种过程中,多采用机械定向的方式进行自动定向播种,定向原理简单,但是部分定向过程偏复杂,需要进行作业工艺和结构优化,自动定向精度并不高。引入机器视觉等智能化技术,采用可视化方法可提高自动定向作业质量,但对于田间播种等复杂多变环境下的自动定向作业仍存在适应性差等问题。因此,针对田间播种的自动定向作业应结合智能化技术开发高集成、适应性强的装备。

2.2 采后处理

果蔬采后处理包括剪切、分级、包装和贮藏等作业,定向是影响采后处理效率和效果的关键环节^[63-64]。果蔬采后处理定向是指在农业生产中使收获后果蔬具有相同的形态特征,即针对不同果蔬



图 5 大粒种子定向播种装置

Fig. 5 Large seed directional seeding device

的特性,在采后处理前通过一定外力的作用对果蔬的位置和方向进行干预的一种处理方式,使采后果蔬具有相同的姿态特点。采后处理定向能够使农产品在采后处理过程中呈现姿态的一致性,能够较大程度上提高采后处理的效率和质量,同时对提高果蔬品质、树立品牌,增强果蔬市场竞争力具有重要意义^[65],因此自动定向技术在果蔬采后处理领域得到了广泛的研究与应用。采后处理的定向作业应用主要包括蔬菜(甘蓝^[66]、马铃薯^[67]、辣椒^[68]、番茄^[69]等)和水果(苹果^[16]、杏^[26]、大枣^[70]、柑橘^[71]等)的自动定向。采后处理的定向难度在于:不同果蔬的形状、尺寸等物理特征存在较大的差异性,造成目标检测与定向机理的独特性较强;且因其鲜食特性而具有低损的要求,对定向机构的要求较高,从而造成采后处理自动定向难以实现高效率、高精度和低损伤作业^[6]。主要针对果蔬连续输送过程中的自动定向方法、技术和装备展开研究。

在蔬菜采后处理领域,崔永杰研究团队^[9,21,66]设计了一种采后甘蓝单体排序定向输送装置,实现了空间堆叠的采后甘蓝单体有序输送及自动定向作业,采后甘蓝单体排序成功率为 96.50%,定向成功率为 95.17%,提高了采后甘蓝处理的作业效率和质量,如图 6a 所示。王相等^[67]设计了一种适用于规模化作业的定向排列纵横切分马铃薯种薯切块机,其定向排列装置可实现种薯位姿调整,种薯设置合格率为 92.13%,损耗率为 10.21%,满足种薯切块的农艺要求,如图 6b 所示。MOTABAR 等^[69]和马月虹等^[72]基于准球形番茄在旋转过程的惯性效

应,提出了一种基于两条平行轨道的自动定向方法,定向率可达 90%,为准球形物料的定向提供了有效的方法,如图 6c 所示。王春耀团队^[68,73]设计了一种辣椒去核机的定向输送装置,适用于具有外形圆直且粗细分明特征的对象,可以满足辣椒定向后按照确定方向均匀排列在输送带上,如图 6d 所示。

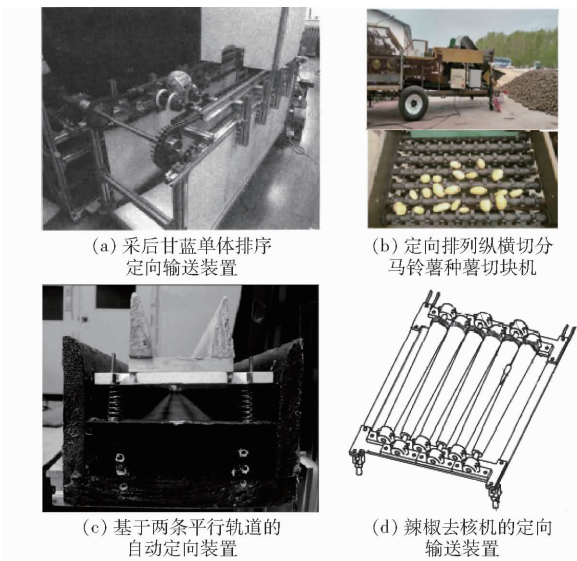


图 6 蔬菜采后处理定向装置

Fig. 6 Directional device for vegetable post harvest treatment

在水果采后处理领域,THROOP 等^[7]、WHITELOCK 等^[19]、EUDELL 等^[74]、NARAYANAN 等^[16]、LEFCOURT 等^[75]、黄秀玲等^[76]、李晶等^[77]、蒋维栋等^[78]、马焱等^[79]基于自动定向原理,开发了苹果输送自动定向装置,实现苹果连续输送过程中的定位和均匀定向,如图 7a 所示。王春耀研究团队^[80-86]提出了基于空间最小作用量原理的差速式鲜杏动态定向原理,设计了鲜杏动态定向输送装置,

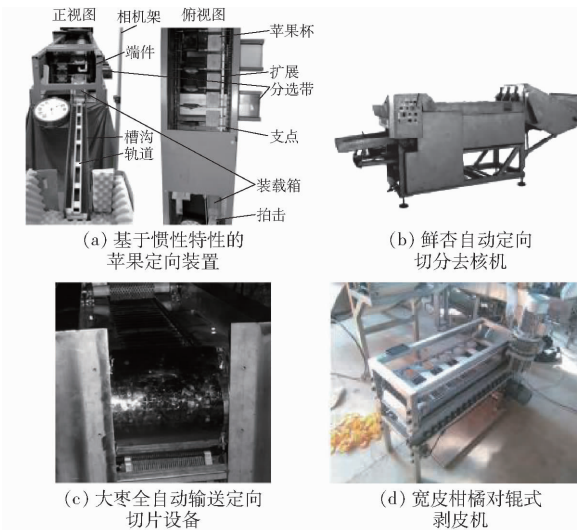


图 7 水果采后处理定向装置

Fig. 7 Directional device for fruit post harvest processing

输送过程中的定向准确率达 87.4%,如图 7b 所示。史鹏涛等^[70,87-88]基于大枣加工工艺过程的分析研究,设计了一种大枣全自动输送定向切片设备,实现定向输送和低破损率切片,平均生产效率达到 300 kg/h 以上,成品率达到 96% 以上,如图 7c 所示。陈红团队^[71,89]针对宽皮柑橘的物理特性,设计了一种快速去皮的宽皮柑橘对辊式剥皮机,可以实现宽皮柑橘的连续翻转运动与定向输送,如图 7d 所示。

因果蔬具有复杂多样的形状、尺寸等物理特征,自动定向的难度更大,特别是在鲜食果蔬当中非常容易引起破裂等损伤问题。目前果蔬自动定向装备的研发多基于其惯性特性,在运动过程中进行自动定向,自动定向质量较差且损伤程度较高。因而需要结合定向机理研究、柔性材料应用等相关技术完成对果蔬的低损有效定向,这也是目前研究的一个难点之一。

2.3 畜产养殖加工

畜产养殖加工过程主要包括品种选育管理、养殖管理、运输管理、副产品加工管理等,对畜产养殖中动物及其副产品的精准定向是决定畜产养殖过程管理效果的关键因素^[90]。畜产养殖加工过程定向是指在农业生产中使动物及其副产品在养殖加工过程中具有相同的行为,即针对不同畜产业的养殖要求以及动物及其副产品特性,通过一定的技术手段对动物的行为和副产品的方向进行干预的一种方式,使畜产养殖的动物及其副产品具有相同的行为和姿态特点^[91],能够较大幅度上提高动物养殖质量以及副产品加工效率,同时对于促进智能化装备的研发具有重要意义^[92],因此在畜产养殖领域的自动定向技术与装备得到了快速的发展。畜产养殖加工的定向作业应用主要包括畜禽^[93]、水产^[94]、蛋^[95]等在养殖与副产品加工过程中的自动定向。由于畜产养殖管理过程中动物具有行为的不确定性,因此畜产养殖的定向难度在于:不同种类动物自身以及养殖要求等特性间存在较大的差异,造成定向机理及方法具有较强的独特性,且因动物的特性而具有无伤无损的要求,对定向机构与装置的要求较高,从而造成畜产养殖过程管理自动定向难以实现高效率和高精度的作业^[22]。

在鱼类加工定向领域的研究多为基于振动平台的头尾定向方法,DOWGIALLO^[22]研究了鱼类定向系统对鱼类后处理的影响因素。谭鹤群研究团队^[96-98]基于水平往复振动原理提出淡水鱼头尾定向输送的方法,并通过试验分析了主要因素对鱼体头尾定向输送效果的影响规律,设计了一种淡水鱼

头尾与腹背定向装置,头尾定向率达到 97.53%,腹背定位率达到 97.5%,如图 8a 所示。在虾类加工定向领域,熊师等^[99]提出了一种分流式对虾腹背定向方法,基于对虾腹背轮廓曲线斜率差异的特征判断腹背朝向,然后通过分选的方式实现腹部朝向和背部朝前两类对虾的分流,达到腹背定向的目的,如图 8b 所示。张秀花团队^[100-102]设计了一种对辊式对虾定向机,通过相邻尼龙辊在轴线方向上直径的变化以及在轴段设置的凸棱和凹槽完成对虾定向,如图 8c 所示。在禽蛋加工定向领域,姜松研究团队^[24-25,95,103-104]设计了一种禽蛋大小头自动定向排列系统,可以实现禽蛋轴向运动、翻转过程、翻转姿态的稳定可靠,禽蛋定向正确率达到 100%,如图 8d 所示。

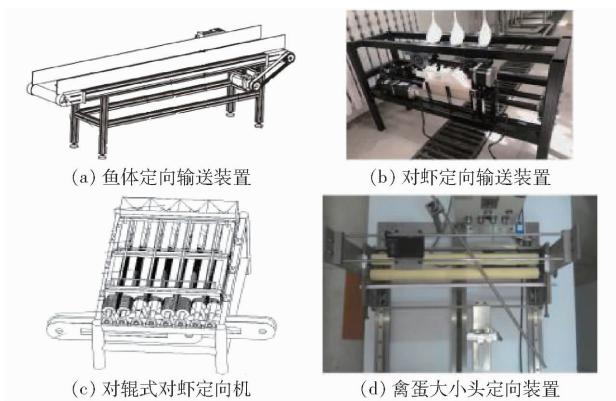


图 8 畜产养殖加工定向装置

Fig. 8 Livestock breeding directional device

利用振动特性和运动特性进行畜产养殖加工过程自动定向作业的主要优势在于装备结构简单、作业所需时间较少,且对象物受外形尺寸影响较小。然而目前常用的畜产养殖加工过程自动定向方法与装备在对象物运动过程中会破坏原有的姿态特征,仅凭运动特征难以完成自动定向任务,因而在实际自动定向作业中需添加其他智能化技术与定向辅助机构以提升自动定向效果。

3 自动定向关键技术

近年来,随着传感器感知精度、识别速度、新型定向机构及其智能控制方法的快速更新和不断完善,自动定向技术在田间播种、采后处理和畜产养殖加工等领域的研究已取得较大进展。但是由于农业生产种类繁多、环境多样、特征差异大,农业生产的用途、目标和要求不同,以及定向过程涉及环节多等因素,造成自动定向机构与装置存在执行速度低、定向质量差、成本过高、适应性低以及定向过程不可靠等问题,自动定向技术还需要结合农艺创新共同攻克现有技术瓶颈。

自动定向技术最重要的目标是高效率、高质量、高适应性、低损伤和低成本。其技术水平可参考的衡量指标为：定向效率,单位时间内定向的农业产物数量;识别准确率,成功识别完成定向的农业产物的数量占符合定向标准的农业产物数量的比例;定向成功率,定向成功的农业产物数量占所有农业产物数量的比例;损伤率,损伤数量占所有定向成功农业产物数量比例;人机定向比,相同时间内人工定向作业数量与其定向作业数量比例,该指标可作为自动定向装置作业能力的综合评价特征。

上述指标的重要程度根据自动定向实现难度、投入产出比、技术成熟度、产品市场化程度和定向需求程度的具体情况存在差异,可作为机构装置选择或商业化运营的参考依据。

自动定向包括3个步骤,分析待定向目标的定向机理与方法、对目标与环境的感知和对待定向目标的识别与检测、驱动自动定向机构和装置完成定向作业,如图9所示。依据目前自动定向技术进展与动态,仅涉及直接相关的关键技术:定向技术机理与方法;定向机构与装置;定向目标识别定位与智能检测控制技术。下面整理出自动定向领域的主要技术特征和演化脉络,并给出本领域的研究开放性问题的。

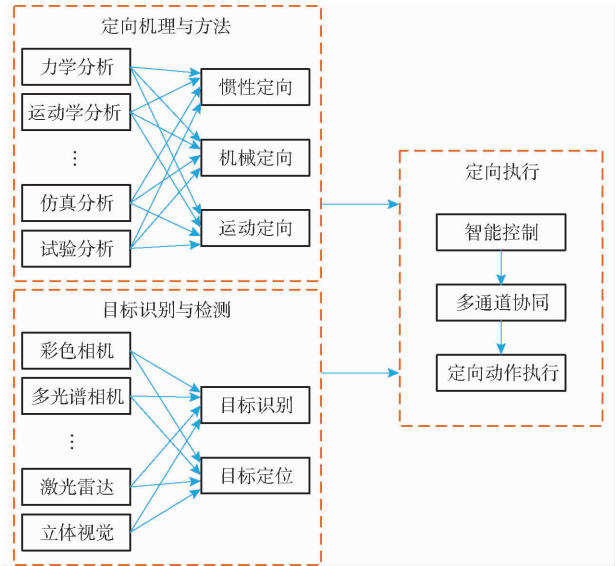


图9 自动定向步骤
Fig.9 Automatic orientation steps

3.1 定向机理与方法

在定向过程中,通过理论分析和现场试验等方法进行农业生产过程定向机理与方法的研究,具体包括:力学分析、运动学分析、仿真分析和现场试验等全部或部分方法。由于待定向目标物因形状、力学特性、运动学特性、定向目标等属性的差别,定向方式不一而同,其定向机理与方法也具有较大的差异。自动定向技术的定向机理与方法多借鉴或集成

应用动力学、虚拟仿真和试验分析领域中技术成果,如图10所示。

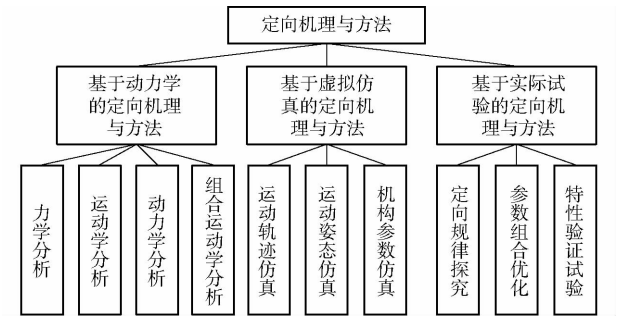


图10 定向机理与方法分类
Fig.10 Orientation mechanism and method classification

3.1.1 基于动力学的定向机理与方法

基于动力学的定向机理与方法更多采用力学分析^[39,68]、运动学分析^[16,105]或动力学组合分析^[9,50]的方式,主要提供定向过程中待定向目标和作业机构的动力学模型,用来表征待定向目标的传动原理、运动规律等运动特性^[60,96],如表1所示。主要任务包括:动力学模型简化和建立、自动定向评估和动力学分析^[79]。由于待定向目标物存在特征差异大、形状不规则、运动方式各异等因素,以及动力学模型存在泛化不足等问题,导致自动定向机理与方法的准确性低、鲁棒性差等问题,定向机理与方法普遍适用性需提高。近年来随着现代数学的发展,研究人员将这些函数、算法、方法创新并应用于农业生产过程的研究,大幅提高了待定向目标定向机理与方法理论研究水平^[80,106]。

3.1.2 基于虚拟仿真的定向机理与方法

虚拟仿真技术因其安全、快速和低成本的特性,而广泛应用于各行业的研究中,其中基于ADAMS、EDEM、Matlab等软件的虚拟仿真技术已成为研究自动定向机理与方法的主要技术手段^[9,55]。徐丽明团队^[39,107,112-113]利用ADAMS软件建立参数化的玉米种子电磁振动定向装置和种子仿真模型,基于振动分析、接触力和模型振动效果3方面对建立的模型进行定向机理分析,如图11a所示。王春耀团队^[82,85,106]基于ADAMS和Matlab软件对杏果定向过程进行动态仿真,通过分析质心运动轨迹,得出椭圆球绕着最大惯性矩主轴可以进行稳定旋转的定向机理,如图11b所示。崔永杰团队^[9,66]基于ADAMS软件分析了26种初始姿态的采后甘蓝在定向过程中的位移差值和采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角随时间的变化规律,进而分析了其运动过程中的稳定性,如图11c所示。马焱等^[79]运用ADAMS运动仿真技术,对苹果在定向过程进行了仿真分析,验证了定向方法的可行性,如图11d所示。侯加林等^[60]

表 1 基于动力学的定向机理与方法研究现状

Tab.1 Research status of orientation mechanism and method based on dynamics

类型	研究方法	研究内容
力学分析	进行对辊作业模式下对虾外形受力情况分析 ^[99,102]	研究对虾的头尾定向机理与定向输送装置
	结合电磁振动料斗的周期性激励作用对玉米种子进行力学分析 ^[39,107]	研究成堆玉米种子分散与排序输送机理
	对小龙虾头朝下或尾朝下不同姿态进入定向槽进行受力分析 ^[108]	研究小龙虾形态参数及定向机理
	进行不同作业速度下大蒜调头过程的力学分析 ^[60]	研究蒜种不同状态下的定向作业机理
运动学分析	进行杏果在输送装置中实际运动状态分析 ^[85]	研究杏果运动学方程与定向机理
	结合水平往复振动原理对鱼体头尾定向输送进行运动学分析 ^[97]	研究鱼体头尾定向输送运动过程
	进行水果沿平行轨道滚动过程的运动学分析 ^[16,75,109]	研究轴对称物体的惯性特性的定向机理
动力学分析	进行白鲢在倾斜振动平台上的运动规律分析以及 Matlab 的运动数值模拟分析 ^[96]	研究白鲢头尾定向机理
	进行禽蛋翻转运动过程中传动系统和传动参数间关系分析 ^[100]	研究禽蛋大小头自动定向排列翻转运动机理
	进行采后甘蓝惯性主轴的转动惯量及其运动稳定性分析 ^[9]	研究基于转动惯量的采后甘蓝定向机理
	进行稻种惯性特性及表面特性动力学分析并建立欧拉动力学方程 ^[50]	研究基于单轴对称特性的稻种定向机理
	进行电磁振动下玉米粒群定向排列过程动力学分析及定向阶段籽粒受力分析 ^[17]	研究玉米粒群定向排列机理
	运用达朗贝尔原理进行简化的苹果模型在轮摩擦力作用下围绕轴线运动情况分析 ^[79]	研究苹果绕轴线运动的定向机理
组合动力学分析	运用李雅普诺夫稳定性原理进行杏果动力学方程的稳定性判定 ^[84,106,110]	研究杏果在实际定向输送过程中的定向机理
	运用欧拉动力学方程进行单轴对称杏果的定向输送过程动力学模型分析 ^[80,82,111]	研究单轴对称杏果的运动规律和定向机理

采用 EDEM 技术,建立了 3 种双鸭嘴式大蒜正头机构动力学模型,研究了蒜种在正头机构中的运动规律,如图 11e 所示。陈健等^[114]基于 ADAMS 软件进行强迫振动下核桃定向输送装置的仿真,研究了核桃纵径振动定向的机理,如图 11f 所示。梁丽娜等^[47]建立了单粒粳稻种子分离机构的数学模型,基于 Visual Basic 6.0 语言编写该机构的辅助分析和

仿真程序,分析运动轨迹的姿态和位移。赖庆辉等^[115]利用 DEM – CFD 气固两相流耦合仿真方法对三七种苗吸附调姿过程进行分析,阐明了种苗吸附调姿的机理,如图 11g 所示。XING 等^[51]基于 EDEM 软件模拟了水稻在气动排种器中种子流动性与种子搅拌装置参数之间的关系,分析了水稻种子的定向机理,如图 11h 所示。

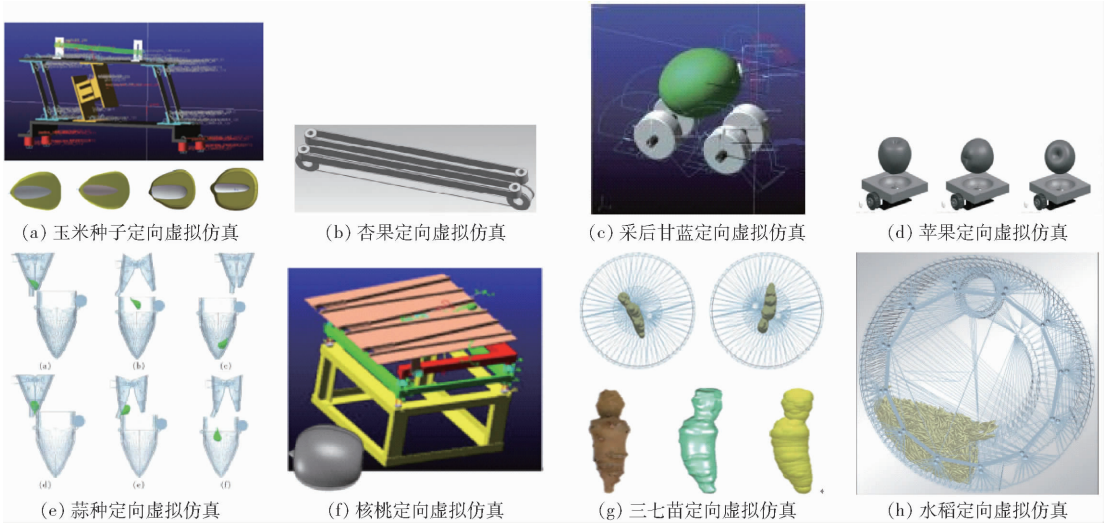


图 11 基于虚拟仿真的定向机理与方法

Fig.11 Orientation mechanism and method based on virtual simulation

3.1.3 基于试验的定向机理与方法

试验是相关作业机理与方法研究的主要手段之一,基于试验的定向机理与方法研究主要方向包括规律探究试验、参数优化试验和效果验证试验

等^[116-118],主要提供定向作业过程中待定向目标和作业机构的特性、规律和最佳作业参数组合,用来表征待定向目标的运动特性^[119],如表 2 所示。主要任务包括:试验设计与实施、数据获取与分析 and 结果

表 2 基于试验的定向机理与方法研究现状

Tab.2 Research status of experiment based orientation mechanism and method		
类型	研究方法	研究内容
试验探究 定向规律	牛油果定向运动的单因素试验和正交试验 ^[116]	牛油果大小头自动定向运动规律
	卵形体脐橙定向运动的单因素试验 ^[65]	脐橙定向中轴向运动和翻转运动规律
	苹果沿两条平行轨道向下滚动试验 ^[69]	惯性效应对准球形物体的定向效应
	桃子的物理特性对定向点位的影响试验 ^[120]	桃子定向的运动距离
参数组合优化 试验	分析影响杏果定向成功率的主要因素 ^[83,119]	入口通道宽度、加持带的速度参数值
	牛油果大小头定向运动规律试验和脐橙定向运动规律试验 ^[65,116]	装置最佳工作参数
	不同初始方向和初始速度对马铃薯定向运输的影响试验 ^[117]	对马铃薯运动轨迹的显著影响因素
	长粒型梗稻定向精量播种装置排种性能试验 ^[49]	排种性能的影响规律
特性验证试验	不同品种淡水鱼完成鱼体定向输送所需时间试验 ^[97]	装置参数对鱼体头尾定向输送影响规律
	基于浮力定向的山楂去芯机作业性能试验 ^[118]	山楂自身形状和介质流速对定向成功率的影响规律
	不同储藏方式下鸡蛋的自动定向试验 ^[25]	鸡蛋新鲜度与其定向运动的关系
	不同形状和大小苹果的不同运动起始位置的定向能力试验 ^[19]	苹果形状对定向的影响规律

凝练与讨论^[49]。通过试验进行定向机理与方法的研究具有操作方便、结果直观等优点,而得到了快速的发展。但是由于待定向目标之间特征差异大,仍存在准确性低、适应性差等问题。

定向机理与方法研究作为研发自动定向装备的前提,具有十分重要的地位。目前常通过使用动力学分析、虚拟仿真和试验分析等方法进行农业领域自动定向机理与方法的研究。现有的多种定向机理与方法存在准确性低、适应性差等问题,难以达到理想效果。因而应采用多技术融合的方法研究具有繁杂特征属性的待定向目标物的定向机理,且设计适用于复杂多变环境与目标的定向方法。

3.2 定向机构与装置

在定向过程中,定向机构依靠待定向目标的惯性特性,在力的作用下直接或间接使待定向目标达到朝向一致的目的,具体包括:放置待定向目标物、固定方向有序排列目标物、朝向相同输送至下一作业环节的全部或部分过程。基于待定向目标物基础特性和定向目标等属性和要求的不同,定向方式也具有较大的独特性,其定向机构的实现形式也不同。这种直接或间接的互作方式是自动定向的本质属性,考虑对待定向目标的损伤和外观保持完整的程度、定向环节长短、定向机构灵活性等因素,进而影响定向机构、控制方式等子系统的复杂度和成本,从而影响自动定向装置的作业速度、定向精度和适应性。

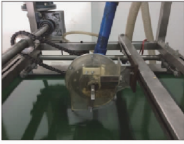
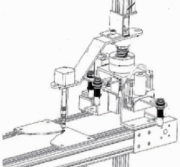
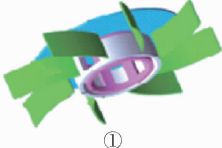
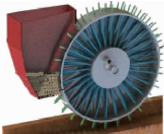
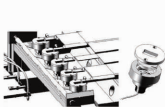
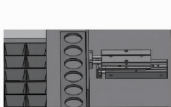
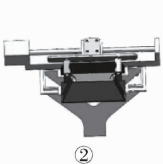
3.2.1 田间播种过程定向机构与装置

针对田间播种的自动定向场景,定向机构与装置完成目标物定向分为 4 个步骤:输种、分种、定向送种和投种^[31]。输种发生在整个作业过程的初始阶段,为后续机构的工作提供所需要的种子,多采用

足量供种方式。分种是从输种过程形成的种子堆中以一定的作业方式实现定量供给的作业过程,分种可归纳为定距输送、分种轮和取种勺 3 种分种方式,定距输送一般采用振动的方式将成堆物料进行分散和排序输送,例如马齿型玉米种子的分种^[39]。分种轮是利用其上开有的凹槽,使一定数量的种子在重力的作用下进入凹槽内,并随分种轮进行转动,进而达到分种的目的,例如机械式小麦种子的分种^[31]。取种勺主要是针对大粒种子和大蒜等具有较大体积的种子^[121]进行分种,采用勺式取种方式舀取种子,多余种子在刷种器和振动机构作用下落回种箱,实现单粒取种。定向送种是田间播种定向的核心子过程,大致可分为先调向再输送^[37]和调向输送同步进行^[39]两种定向方式。由于种子具有相对较小的体积且存在坚硬致密的种皮,具有较小的惯性力,如小麦、玉米等,通过正确的力作用下,即可实现种子的惯性运动并将其朝向调整为固定一致,这种方式更有利于种子萌发和田间管理。对于大粒种子、大蒜等姿态容易保持的种子,多采用定种轮、旋转盘或取种勺以及上述多种作用方式组合的实现方式,首先进行朝向姿态调整,然后以固定姿态进行输送。对于具有单轴对称性的种子,因其朝向不易保持,需要使用定向输送同步进行的方式以达到目标需求。投种作为田间播种的最后阶段,是将定向完成的种子以相同姿态播种的过程,包括自重投种^[121]和外力投种^[31]两种方式。自重投种主要针对具有较好对称性且方向差异不大的种子,在完成定向和分散排序输送后,依靠自身重力下落完成播种,例如黄豆、绿豆等规则种子。对于形状复杂或定向效果易改变的种子,需要借助外力进行投种,外力投种分为气力式投种、机械式投种和机械手式投种 3 种实现形式,如表 3 所示。

表 3 田间播种过程定向机构与装置

Tab.3 Directional mechanism and device for field seeding process

对象	定向方式	图示	存在问题
水稻种子	①V形槽分种与定向输送同时进行的梗稻“植生带”定向排种装置 ^[48]	  	所述水稻种子的定向方案均未提及定向播种过程中的检测与控制问题
	②凹槽分种、调向与输送依次进行的定向排种装置 ^[45]		
	③负压吸种进行分种、种盘旋转进行调向的定向排种装置 ^[51]		
玉米种子	①足量供种输种、侧立排序分种、调向与输送同步进行定向送种、机械式投种的定向播种方式 ^[39,112]	  	对靶作业方式提高了作业精度和效果,但其作业效率较低,大田作业不适用
	②机械手对靶作业依次完成单粒玉米的取种、定向和投种的定向播种方式 ^[37]		
小麦种子	①足量供种输种、分种轮分种、定向送种轮调向输送、机械式投种的机械式射播定向播种方式 ^[31]	 	小麦种型较小,播种时易发生聚集堵塞,定向机构需考虑种子精量准确获取技术
	②足量供种输种、气力式吸附取种、定向轮调向输送、定点打穴自重投种的针孔管式定向播种方式 ^[34]		
大粒种子	①单粒供种、调向输送同步、自重投种的穴盘南瓜种子定向播种 ^[59]	  	考虑不同尺寸种子的适应性,同时对于定向后输送过程和投种过程的种子角度是否有保证
	②定向种穴模块供种、气吸式取种与播种的瓠瓜种子定向播种 ^[57]		
	③单粒供种、定向输送同步(仿形刮板对种子进行约束,在种子运动过程中完成定向)的设施穴盘嫁接苗种子定向播种方式 ^[58]		
大蒜种子	①单粒喂入、方向调整后输送、自重投种的大蒜定向播种方式 ^[62]	  	蒜种落入调向机构后的姿态是否与采集图像保持一致,调向不能保证
	②图像实时获取大蒜形状和朝向,仿形机构对朝向进行调整 ^[61]		
	③取种勺取种、调向输送同步(三级料斗式定向机构)、机械式导向播种的大蒜定向播种方式 ^[121]		

3.2.2 果蔬采后处理过程定向机构与装置

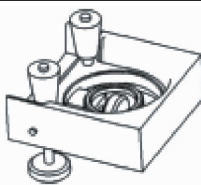
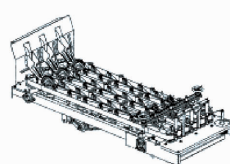
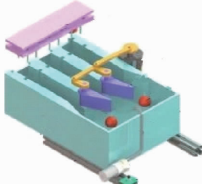
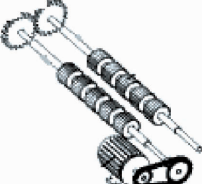
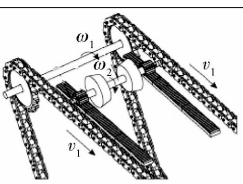
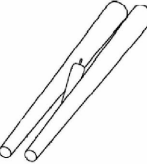
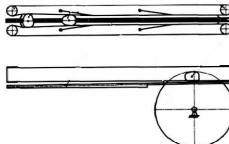
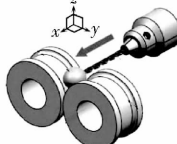
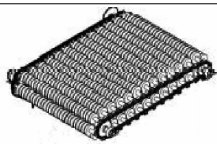
针对果蔬等产品采后处理过程的自动定向场景,定向机构及装置完成果蔬采后处理过程定向分为2个步骤:果蔬输送和果蔬定向,理论上这两步可以分开,也可以一体^[26]。果蔬输送可能发生在果蔬定向前后两个阶段中,前阶段是为果蔬定向而输送,后阶段是为采后处理而输送。果蔬输送可归纳为果蔬固定输送和果蔬运动输送两种输送方式,前者如山楂^[118]、禽蛋^[25]等,果蔬运动输送方式如苹果^[76]、杏^[86]、甘蓝^[21]等。果蔬固定输送的方式可归纳为3种:机械抓取、托盘固定运输和负压吸取式。机械抓取一般采用表面为柔性材料的机械手,多使用机械驱动或气动驱动等。托盘固定运输是利用固定形状的托盘对果蔬进行约束和运输^[77],多采用基于仿形的原则设计不同形状的托盘,然后采取机械或气动

驱动的方式运输。负压吸取是利用果蔬光滑表面与真空吸嘴的吸附关系提取果实,然后采用机械或气动驱动的方式运输。果蔬运动输送是指基于果蔬的摩擦特性,通过输送辊或输送带的转动同时带动果蔬运动以达到输送的目的。一般使用柔性材料覆盖的刚性部件或刚性部件直接接触转动。

果蔬定向是自动定向的核心子过程,大致可分为摩擦轮定向、输送带定向和辊子定向3种分类方式。由于大部分果蔬都具有较为明显的形状特征,如苹果、杏、甘蓝、辣椒、番茄和禽蛋等,通过一定规律的运动^[122],即可使果蔬具有一致的方向,这种方式更有利于果蔬采后加工和果蔬商品化价值。摩擦轮定向是指将果蔬放置在具有固定形状与尺寸的盘式定向机构中,果蔬在周围分布摩擦轮的带动下旋转运动,进行定向^[76]。输送带定向是指采用夹持带

和摩擦定向带共同作用的方式,在果蔬的输送过程中完成其定向作业^[72]。辊子定向是指使用一对辊轮或辊轴的同向转动带动果蔬的旋转运动,完成其定向和输送作业^[9],如表 4 所示。

表 4 果蔬采后处理过程定向机构与装置
Tab.4 Orientation mechanism and device for fruit and vegetable postharvest processing

对象	定向方式与图示		技术特点分析
水果采后处理			输送带定向或辊子定向具有较高的效率,但作业效果相对摩擦轮较差;摩擦轮定向基于接触式运动进行,易产生损伤
	托盘固定运输、摩擦轮调向的苹果定向和输送方式 ^[77]		
			
	输送带运输、输送带夹持调向的杏定向和输送方式 ^[26]		
蔬菜采后处理			蔬菜定向运输多采用辊子式的定向方法,且使用多通道同时作用以提高作业效率
	使用液体浮力与流量冲击的山楂定向与输送方式 ^[118]		
			
	输送辊运输、辊轮调向进行松果定向和输送方式 ^[123]		
其他农副产品处理			易损易碎物体定向使用柔性材料覆盖刚性部件以减少刚性接触和损伤
	输送辊运输、锥形辊调向的甘蓝定向和运输方式 ^[21]		
			
	滑轨输送、辊杠组合调向的辣椒定向和运输方式 ^[68]		
其他农副产品处理			易损易碎物体定向使用柔性材料覆盖刚性部件以减少刚性接触和损伤
	输送带运输、夹持带调向的番茄定向和运输方式 ^[72]		
			
	双辊子调向的莲子定向方式 ^[122]		
其他农副产品处理			易损易碎物体定向使用柔性材料覆盖刚性部件以减少刚性接触和损伤
	输送辊运、辊子调向的禽蛋定向和运输方式 ^[95]		
			
	辊轮运输、辊子调向的马铃薯定向和运输方式 ^[67]		

3.2.3 畜产养殖加工过程定向机构与装置

以典型畜产养殖产品对虾的自动定向为例,分析其定向方式和机构实现。针对畜产养殖加工的自动定向场景,一般地,定向机构与装置完成目标物定向需 3 个步骤:连续喂料、自动定向和有序输送。其中,连续喂料子过程的要求是尽量保持对虾离散连续喂入以避免对虾堆叠利于后续作业,减少喂入时间和距离以减小对虾喂入过程的损伤。目前其实现形式分为:垂直下落和斜面滑入两种方式。前者对虾的破坏和损伤较大,因此目前多数采取斜面滑入的连续喂料方式。自动定向是指将对虾的头部和尾部调向的过程,其可分为:振动型、转动型、分流型 3 种定向方式,前两种是指定向机构配有振动电机或旋转电机的动力源,可以完成对虾在定向机构的运动;后者是指在自动定向前先进行头尾不同朝向

的对虾的分流,然后继续完成自动定向。定向完成的对虾的输送又分为:输送带直接输送和通过输送推板约束的均匀排布输送;均匀排布输送的优点在于同时完成了对虾单体排序和均匀输送,且基本不需要后续的人工摆放过程。如果采用输送带直接输送,则需要后续的排序环节。

图 12 给出了对虾自动定向机构的不同形态,河北农业大学研究的基于摩擦特性的轮式对虾背腹定向机构^[100,102,124]如图 12a 所示,中国农业大学研究的输送辊式对虾腹背定向机构^[23,99]如图 12b 所示。河北农业大学科研人员利用对虾与不同表面动摩擦因数的不同采用 3 个转向轮装置实现对虾背腹定向,而中国农业大学科研人员采用分流式腹背定向方法通过分选的方式实现腹部朝前和背部朝前两类对虾的分流,提高了定向的速度和准确性。并且分

流式腹背定向装置采取了双行光电检测与智能控制的方法,实现了对虾的精准分流与自动定向。

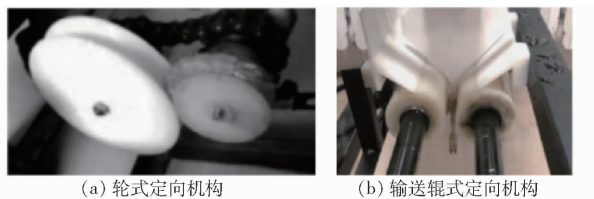


图 12 对虾自动定向方式对比

Fig. 12 Comparison of automatic orientation modes of prawn

傅润泽等^[108]通过分析小龙虾形态参数以及头尾定向机理,设计并研制了小龙虾头尾定向试验装置。并且通过试验以定向成功率(头朝下捕获率、尾朝下通过率)为评价指标,探究捕捉网角度、定向槽宽度、网孔大小等参数对小龙虾头尾定向的影响规律。

定向机构与装置的研发需充分考虑自动定向作业工艺过程,如田间播种包括输种、分种、定向送种和投种;果蔬采后处理包括果蔬输送和果蔬定向;畜产养殖加工过程包括连续喂料、自动定向和有序输送。目前常用的自动定向机构与装置在生产现场应用过程中即使进行优化调整后,其作业效果仍难以达到目标要求。因而需要设计定向环节和高灵活性的定向机构与多通道并行的定向方案,减少目标物损伤和提高作业效率。

3.3 目标识别与控制

自动定向装置的优势之一是借助目标物感知,可靠地判断目标物的方向是否符合后续作业指标的能力且设置不同的调向指标阈值,可方便地决定定向标准。自动定向过程中,需要使用传感器感知目标物的大小、形状、颜色和表面缺陷等信息,进行目标物识别、外部品质检测和确定朝向位置信息。基于目标物识别与朝向位置判别信息,使用调向机构与装置在智能控制技术的作用下对目标物朝向等姿态进行调整。

3.3.1 定向过程目标检测与识别

定向过程的目标检测与识别多采用彩色相机、深度相机、激光雷达等图像信息采集装置,主要提供感知范围内目标物的2D形态特征和3D坐标特征,用来表征目标物及其变化。多借鉴或集成应用机器视觉、模式识别和机器学习领域中技术成果。

LI等^[61]提出一种多特征算法用来有效识别图像中大蒜的方向,如图13所示,特别是针对特征差异较大的大蒜品种,该算法比单一特征识别方法具有更高的准确性,结果表明该方法对“金香”和“苍山”蒜瓣的定位成功率分别为94.6%和97.5%。

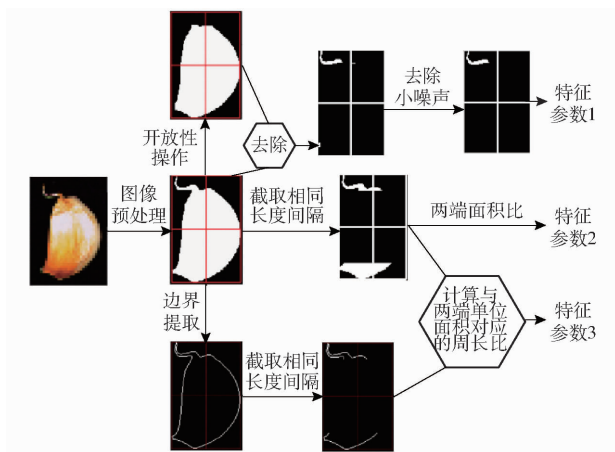


图 13 大蒜定向特征提取

Fig. 13 Directional feature extraction of garlic

李玉华等^[62]采用双卷积神经网络模型结构,大蒜检测深度学习网络(5层卷积神经网络模型)通过对大蒜和背景图像进行实时分割及大蒜检测,鳞芽朝向判断深度学习网络(ResNet-18)对大蒜鳞芽的朝向进行实时判断,鳞芽的识别成功率均值为97.25%。双卷积神经网络模型可以有效提高识别准确率,便于训练、提高系统的实时性。

3.3.2 定向过程自动控制技术

定向机构的控制性能也极大地影响着定向性能^[122]。为了实现定向动作的有效控制,依据信息感知获取待定向对象位姿信息,并结合定向运动过程、位姿计算及智能控制技术,实现定向机构的伺服控制^[62]。

孔艳山等^[58]考虑大粒种子定向播种的供种、取种、送种、定向等全部工作过程,使用欧姆龙的CPM1A型PLC,通过一定的逻辑、时序关系编写了控制系统的软件,完成整个工作过程的循环作业,一个循环可播种12粒种子,提高定向播种效率。

MAKKY等^[27]基于传统控制方法,使用具有可编程能力的单片微控制器进行油棕鲜果自动分级机控制系统的设计。控制系统通过USB端口与计算机通信,通过光电传感器信号、限位开关信号等信号的输入,进行作业状态的判断,进而控制输送电机、步进电机等部件作业。

YAMAMOTO等^[6]研制了一种草莓自动包装机的控制系统,协同控制供应单元和包装单元的机器视觉系统、机械手和并联操作吸力手。供应单元通过检测采摘容器中任意姿态的水果,并使用机械手将其轻放在输送机上。包装单元确定输送带上供应水果的方向和位置,根据其质量进行分级,并将其放入运输托盘中。研制的自动包装系统的任务成功率为97.3%,每个水果的加工时间为7.3s。

随着深度学习等目标识别方法与智能控制技术

的广泛应用,自动定向过程目标识别和自动控制的精度与速度有较大幅度的提高。目前自动定向装置对于遮挡问题仍不能实现精准识别和定位,且由于使用环境限制,自动定向装置的智能化程度较低。因而需结合多模态技术,研究实时、高鲁棒性和高定位定向精度的识别与控制方法。

3.4 自动定向技术研究的开放性问题

农业生产种类繁多、环境多样、特征差异大,农业生产的用途、目标和要求不同,以及定向过程涉及子环节多,造成自动定向过程中存在诸多不确定性,对实现支撑商业运营的定向速度、定向质量、装置适应性、低损伤率和低成本均带来极大的挑战,自动定向技术研发仍存在以下开放性问题亟待解决:

(1) 繁杂特征对象物定向机理与方法

国内外学者通过理论分析和现场试验等方法研究了农业生产过程不同待定向目标物的定向机理与方法,已取得了诸多研究成果,为自动定向提供理论和方法支撑。但不同待定向目标物的定向机理和方法差异性很大,现有的多种定向机理和方法,其准确性不高、鲁棒性不强且普遍适用性较差,难以达到理想试验效果。因此,在待定向目标物形状、力学特性、运动学特性、定向目标等属性差别较大的条件下,一方面,如何研究具有繁杂特征属性的待定向目标物的定向机理,理论上解决目标姿态各异的问题;另一方面,如何设计适用于复杂多变环境与目标的定向方法是主要技术挑战,成为影响提高自动定向技术适用性和定向效果的瓶颈问题。

(2) 定向机构与装置设计及优化

国内外学者针对定向过程中放置待定向目标物、固定方向有序排列目标物、朝向相同输送至下一作业环节的全部或部分过程,研究和设计了不同的定向机构与装置。但不同定向方式和定向机构,定向性能差异性很大,田间播种的定向技术领域通常采用足量供种进行输种、分种轮进行分种、定向送种轮进行调向输送以及机械式进行投种的定向播种方式;果蔬采后处理的定向技术领域通常使用倾斜滑道或输送辊进行果蔬运输、辊子和辊杠组合运动进行旋转定向;在畜产养殖加工的定向技术领域通常根据对象物的形态特征,采用仿形机构进行定向。然而现有的多种定向机构与多通道并行的定向方案,即使生产现场的各作业环节经过优化调整后,定向装置的作业效果仍难以达到目标要求。

综上,在待定向目标物基础特性和定向目标等属性和要求不同条件下,一方面,如何设计用于待定向目标物低损伤、高外观保持完整度以及短定向环节和高灵活性的定向机构,解决目标物损伤和定向

效率低的问题;另一方面,如何优化多通道同时作业对复杂环境和目标物的作业适应能力,平衡定向装置与控制系统的复杂程度和成本间的关系是主要技术挑战,成为影响自动定向技术走向成熟和生产应用的瓶颈问题。

(3) 复杂场景下目标动态识别与智能控制

目前自动定向装置的作业效果与作业效率仍然存在较大的问题,主要原因在于:复杂场景下目标识别精度低以及信息感知与控制决策之间的匹配性不够。随着深度学习的引入,学者针对背景复杂以及遮挡严重目标物的识别方法开展了较多研究,自动定向装置对目标物识别的性能已经有所提高,但是对于遮挡问题仍然不能实现精准识别和定位。由于自动定向装置使用环境的限制,多采用传统的自动化作业的逻辑和顺序的控制方式,对智能控制方法的引入和使用较少,导致自动定向装置的智能化程度低且作业效果较差。

综上,在定向过程中定向目标物存在分布随机、遮挡严重、背景信息复杂和全方位检测困难以及传感器的振动、传播路径误差、感知误差等问题,针对定向目标识别、品质检测和定位定向过程中存在诸多不确定性,因此能够实现实时、高鲁棒性与定位定向精度的识别与控制是复杂场景下目标动态识别与智能控制的开放性研究问题。

4 我国自动定向技术应用面临的挑战与机遇

自动定向应用于农业生产的全过程,具有较强的农艺需求和现实需求,其技术应用与市场化是不可回避的问题。由于我国农业产业复杂,且受农艺与成本约束强,其自动化、智能化发展难度大。我国自动定向机构与装置的研发以高校和科研院所为主,由于缺乏市场主体参与,产业发展缓慢。

近年来,我国提出了对农业生产高效率、高质量和高标准的要求,且随着劳动力成本上升与自动化装备成本下降、农业生产全程管理水平和品质控制需求的日益提升以及对农业装备智能化的推进,自动定向技术已经出现在农业生产的各个过程中。目前我国农业生产的自动定向技术仍处于发展的初始阶段,一方面我国农业生产作业对象的形状、尺寸、姿态等特征大多具有各异性,研究适应性强的自动定向装置难度大,另一方面受限于作业环境和成本的约束,限制了自动定向机构和装置全部功能的应用。基于此,未来自动定向技术的技术应用与市场化需要关注以下发展方向:

(1) 定向装置与农艺要求融合发展

我国农业生产的对象物具有各异性“群体”特

征,对其自动定向技术与装置的发展有较高的要求。农机农艺融合作为当前农业机械领域发展的主要方向,定向装备的研究与应用需充分融合农艺要求。如棚架式猕猴桃、V 形空间苹果园、矮化苹果等农艺生产模式,基于不同农作物的特殊要求,通过对其生产过程的标准化种植,以实现农艺模式的定向作业。根据农业生产中规范作业对象的位置、形状、尺寸、姿态、集中度、均匀度和流动性等“群体”特征,设计原理简单、制造容易、科学合理的适用于大规模作业的装置,农艺的调整和改革要充分考虑对定向作业规模化生产和智能化作业的促进作用。通过定向装置与农艺要求的高度融合发展,促进自动定向装置的规模化发展,提高市场化率。

(2) 专用与通用定向装置协同发展

我国农业生产的种类繁多,农艺不统一,因此增加了定向环节的复杂性和不确定性。专用的定向装置中定向机构、信息感知和主控系统部分均有所差异,由此提高了装备成本,限制了其推广应用范围。农业生产中需要定向的场景较多,因此在自动定向装置设计中既要考虑定向专用性,又要考虑相近对象物定向原理的通用性。再者,利用定向装置功能的模块化设计,提升部件通用性,进而提高部件利用率,降低使用成本。

(3) 多功能全面融合的定向装置发展

农业生产的定向作业是一个复杂的过程,涉及到较多的步骤,定向机构仅是其中一个关键部件。目前普遍使用的定向装置作业功能单一,缺少配套的预处理和后处理装置,装置利用率低,限制了其推广应用发展。农业生产中要考虑农业装备功能的完整性和系统性,因此在自动定向装置设计中要考虑与其配套使用的前处理装置和后处理装置的设计。有效促进装备轻简化和集成化,提高作业效率和作

业质量。

(4) 融合智能化技术的自动定向装置发展

为适应现代化农业的发展,以及不同农业生产定向作业的需要,自动定向装置将向自动化与智能化方向发展。农业生产的定向作业要充分使用中央处理器芯片的智能化控制技术,结合信息感知技术对目标物的高精度识别定位以及位姿判断,使用智能控制方法对定向作业全过程的耦合控制,以及基于物联网技术的定向过程实时监测与远程遥控。融合智能化技术的自动定向装置的研发,以有效进行定向过程的科学管理决策,提高作业安全性和可靠性。

5 结 论 与 展 望

(1) 由于农业生产作业对象特征具有各异性的限制、人工定向成本的约束以及对农业生产过程品质控制的需求,自动定向技术是农业产业可持续发展的瓶颈问题已成为共识。

(2) 自动定向技术在田间播种中应用提升作物产量和质量,采后处理中应用提升作业效率和品质,畜产养殖加工中应用便于统一管理,近年来自动定向装置发展迅速,使装备市场化成为可能。

(3) 基于定向过程涉及子环节多,造成自动定向过程中存在诸多不确定性的问题,繁杂特征对象物定向机理与方法、定向机构与装置设计与优化、复杂场景下目标动态识别与智能控制,成为自动定向技术亟待研发的开放性问题。

(4) 通过装备技术和农艺发展的深度融合,研究专用自动定向装备和通用定向装备,融合智能化技术研发农业生产全程的多功能自动定向装置,减少装置复杂度,降低装置成本,提高农业生产效率和质量,是加速实现自动定向装置市场化应用的发展方向。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 - 2021 [EB/OL]. (2021 - 10 - 09) [2023 - 01 - 06]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2021/indexch.htm>.

[2] 农业农村部. “十四五”农业机械面临的重大挑战与战略任务[Z/OL]. (2020 - 04 - 30) [2023 - 01 - 06]. http://www.jhs.moa.gov.cn/zlyj/202004/t20200430_6342839.htm.

[3] 潘彪, 田志宏. 中国农业机械化高速发展阶段的要素替代机制研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 1 - 10. PAN Biao, TIAN Zhihong. Mechanism of factor substitution during rapid development of China's agricultural mechanization [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 1 - 10. (in Chinese)

[4] YANG M L, LI M Z, LUO X W. 50 years of agricultural mechanization in China [J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 2020, 51(4): 86 - 92.

[5] 权龙哲, 奚德君, 王建森, 等. 玉米定向栽培及机械化定向种植技术研究综述[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(9): 78 - 85. QUAN Longzhe, XI Dejun, WANG Jiansen, et al. A review on the theory and mechanization cultivation technology of maize [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 78 - 85. (in Chinese)

[6] YAMAMOTO S, OCHIAI Y, SAITO S, et al. Study on an automatic packing system for strawberries [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2012, 28(4): 593 - 601.

- [7] THROOP J A, ANESHANSLEY D J, UPCHURCH B L, et al. Apple orientation on two conveyors: performance and predictability based on fruit shape characteristics[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1): 99–109.
- [8] TETIANA K, VICTOR S, VLADYSLAV Z, et al. Increasing yields of winter wheat by means of sowing orientation of grain[C]// The 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, 2018: 687–694.
- [9] 崔功佩, 郑昕萌, 崔永杰, 等. 基于转动惯量的采后甘蓝自动定向方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 183–195.
CUI Gongpei, ZHENG Xinmeng, CUI Yongjie, et al. Automatic orientation method for postharvest cabbage based on moment of inertia[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 183–195. (in Chinese)
- [10] 王德福, 黄会男, 张洪建, 等. 生猪养殖设施工程技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 1–14.
WANG Defu, HUANG Huinan, ZHANG Hongjian, et al. Analysis of research status and development on engineering technology of swine farming facilities[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 1–14. (in Chinese)
- [11] SINGH G, ZHAO B. Agricultural mechanization situation in Asia and the Pacific region[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 2016, 47(2): 15–25.
- [12] 侯彦龙, 徐丽明, 陈莉明. 玉米机械化定向播种技术的现状和发展趋势[J]. 农机化研究, 2012, 34(2): 10–14.
HOU Yanlong, XU Liming, CHEN Liming. The current situation and development trend of corn mechanization oriented seeding technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(2): 10–14. (in Chinese)
- [13] Meaning orientation[Z/OL]. (2022–04–11)[2023–01–06]. <https://dictionary.university/Orientation>.
- [14] PAN L, WU Y. Theoretical research of corn orientation device[J]. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 2022, 16(1): 73–78.
- [15] 张艳龙, 李祥辉, 聂馨晨, 等. 农产品上料定向排序技术研究现状[J]. 新疆农机化, 2019(1): 12–16.
ZHANG Yanlong, LI Xianghui, NIE Xinchun, et al. Research status of directional ording technique for agricultural products [J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2019(1): 12–16. (in Chinese)
- [16] NARAYANAN P, LEFCOURT A, TASCH U, et al. Theoretical analysis of stability of axially symmetric rotating objects with regard to orienting apples[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(4): 1353–1364.
- [17] 权龙哲, 奚德君, 肖云瀚, 等. 基于电磁振动的玉米粒群定向整列系统的参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 59–66.
QUAN Longzhe, XI Dejun, XIAO Yunhan, et al. Parameters optimization and experiment of oriented alignment system for maize seed group based on electromagnetic vibration[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 59–66. (in Chinese)
- [18] LIU C, LI Y, SONG J, et al. Simulation design and experiment of a directional seed-feeding device[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2017, 26(4): 16–24.
- [19] WHITELOCK D, BRUSEWITZ G, STONE M. Apple shape and rolling orientation[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 2(1): 87–94.
- [20] DING X, WANG C, HUANG C, et al. Attitude control of apricot during orientation transmission[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(5): 9–16.
- [21] 崔功佩, 王京峥, 文双涛, 等. 采后甘蓝单体排序定向输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 351–360.
CUI Gongpei, WANG Jingzheng, WEN Shuangtao, et al. Design and test of monomer sorting and orientational conveying device for postharvest cabbage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 351–360. (in Chinese)
- [22] DOWGIALLO A. The effect of cutting and fish-orientation systems on the deheading yield of carp[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2008, 43(9): 1688–1692.
- [23] 熊师, 李璐, 董鑫, 等. 对虾腹背定向系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 449–456.
XIONG Shi, LI Lu, DONG Xin, et al. Design and experiment of orientation system of abdomen and back for shrimp[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 449–456. (in Chinese)
- [24] JIANG S, SUN K, WANG G, et al. Study on the mechanical automatic orientation regulations about the axial and the turnover motions of eggs[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 133: 46–52.
- [25] JIANG S, ZHU T, JIA D, et al. Effect of egg freshness on their automatic orientation[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(7): 2642–2650.
- [26] 刘向东, 王学农, 王春耀, 等. 差速式三通道鲜杏动态定向输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 35–43.
LIU Xiangdong, WANG Xuenong, WANG Chunyao, et al. Design and test of apricot dynamic orientation and conveying device with 3-path differential belt[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 35–43. (in Chinese)
- [27] MAKKY M, SONI P. Development of an automatic grading machine for oil plam fresh fruits bunches (FFBs) based on machine vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 93: 129–139.
- [28] 黄耀. 粮食作物产量对气候变暖的响应[J]. 科学通报, 2017, 62(36): 4220–4227.
HUANG Yao. Response of grain crop yields to climate warming[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(36): 4220–4227. (in Chinese)

- [29] ZHOU Long, YU Jianquan, WANG Yang, et al. A study on the modelling method of maize-seed particles based on the discrete element method[J]. Powder Technology, 2020, 374: 353–376.
- [30] DU Jun, HENG Yifan, XIA Junfang, et al. Simulation of non-spherical rice seed motion in pneumatic conveying with bend by CFD–DEM[J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2021, 14(3): 300–308.
- [31] 王英博, 李洪文, 王庆杰, 等. 机械式小麦射播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 73–84.
WANG Yingbo, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of wheat mechanical shooting seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 73–84. (in Chinese)
- [32] 陈建国, 李彦明, 覃程锦, 等. 小麦精量播种机排种高精度检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 66–74.
CHEN Jianguo, LI Yanming, QIN Chengjin, et al. Design and experiment of precision detecting system for wheat-planter seeding quantity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 66–74. (in Chinese)
- [33] 徐琪蒙, 李洪文, 何进, 等. 小麦播种自走式农用移动平台设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 1–11.
XU Qimeng, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment of the self-propelled agricultural mobile platform for wheat seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(14): 1–11. (in Chinese)
- [34] 刘俊孝, 王庆杰, 李洪文, 等. 针孔管式小麦精准点播装置设计与吸种性能研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 10–18.
LIU Junxiao, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and seed suction performance of pinhole-tube wheat precision seeding device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 10–18. (in Chinese)
- [35] KARAYEL D, WIESEHOFF M, ZMERZI A, et al. Laboratory measurement of seed drill seed a spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2006, 50(2): 89–96.
- [36] IVANCAN S, SITO S, FBIJANIC G. Effect of precision drill operating speed on the intra-row seed distribution for parsley [J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(3): 238–240.
- [37] 王侨, 陈兵旗, 寇春荣, 等. 基于机器视觉的玉米种粒定向定位摆放装置研制[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 19–28.
WANG Qiao, CHEN Bingqi, KOU Chunrong, et al. Development of corn seed directional positioning machine based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 19–28. (in Chinese)
- [38] 刘长青, 陈兵旗, 张新会, 等. 玉米定向精播种粒形态与品质动态检测方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 47–54.
LIU Changqing, CHEN Bingqi, ZHANG Xinhui, et al. Dynamic detection of corn seeds for directional precision seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 47–54. (in Chinese)
- [39] 邢洁洁, 徐丽明, 袁全春, 等. 马齿型玉米种子侧立定向定距输出装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 55–63.
XING Jiejie, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Design and test of dent corn seed directional and fixed-distance output device with lateral standing posture[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 55–63. (in Chinese)
- [40] VERMA A. Design, development and evaluation of manually-operated check row planter for dry sowing of rice[J]. AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 2020, 51(1): 79–83.
- [41] YOO S, CHOI Y, SUH S. Development of a precision seed metering device for direct seeding of rice [J]. Journal of Biosystems Engineering, 2005, 30(5): 261–267.
- [42] 李洪昌, 高芳, 赵湛, 等. 国内外精密排种器研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 12–16, 56.
LI Hongchang, GAO Fang, ZHAO Zhan, et al. Domestic and overseas research status and development trend of precision seed metering device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 12–16, 56. (in Chinese)
- [43] 李泽华, 马旭, 李秀昊, 等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 1–20.
LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 1–20. (in Chinese)
- [44] 鹿芳媛, 马旭, 齐龙, 等. 振动式水稻精密播种装置机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 119–214.
LU Fangyuan, MA Xu, QI Long, et al. Theory and experiment on vibrating small-amount rice sowing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 119–214. (in Chinese)
- [45] ZHANG M, WANG Z, LUO X, et al. Review of precision rice hill-drop drilling technology and machine for paddy[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(3): 1–11.
- [46] HE X, WANG Z, LUO X, et al. Mechanism modeling and experimental analysis of seed throwing with rice pneumatic seed metering device with adjustable seeding rate[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105697.
- [47] 梁丽娜, 韩豹, 孟繁超, 等. 粳稻定向排种装置种子分离机构仿真分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(9): 10–15.
LIANG Li'na, HAN Bao, MENG Fanchao, et al. Simulation analysis of seed separation mechanism of directional precision seeding device for super rice[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(9): 10–15. (in Chinese)
- [48] 徐洪岩, 蒋恩臣, 梁丽娜, 等. 北方粳稻“植生带”育秧设备定向排种装置的研制[J]. 农机化研究, 2015, 37(6): 93–96.
XU Hongyan, JIANG Enchen, LIANG Li'na, et al. The development of northern japonica directional metering device of “Vegetation Zone” seeding equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6): 93–96. (in Chinese)

- [49] 韩豹, 孟繁超, 梁丽娜, 等. 粳稻定向精量播种装置排种性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 8–15.
HAN Bao, MENG Fanchao, LIANG Li'na, et al. Performance experiment of directional precision seeding device for japonica rice[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 8–15. (in Chinese)
- [50] 俞亚新, 林佳辉, 赵匀, 等. 基于单轴对称特性的稻种定向排序仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 62–74.
YU Yaxin, LIN Jiahui, ZHAO Yun, et al. Simulation and test on rice seed orientation based on single axisymmetric properties [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 62–74. (in Chinese)
- [51] XING H, ZANG Y, WANG M, et al. Design and experimental analysis of a stirring device for a pneumatic precision rice seed metering device[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(4): 799–808.
- [52] 杨艳丽, 辜松, 潘汝琼, 等. 大粒种子调向精量播种机构的设计[J]. 农机化研究, 2009, 31(12): 68–70.
YANG Yanli, GU Song, PAN Ruqiong, et al. Design of the directional precision seeding mechanism for big seeds[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(12): 68–70. (in Chinese)
- [53] KOBAYASHI K, FUJII M, YAMADA H, et al. Development of aligning seeder for big and elliptical seeds[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2005, 67(5): 109–116.
- [54] 山田久也. 大粒種子整列播種裝置[J]. 农业机械学会誌, 2004, 66(2): 21–23.
- [55] HelperRobotech[EB/OL]. [2022–05–26]. <http://helpersys.co.kr/home/seeder-machine.html>.
- [56] Mosagreen[EB/OL]. [2022–05–26]. <http://www.mosagreen.it/en/prodotti/132/Products/Sowing-Machines>.
- [57] 杨艳丽, 辜松, 李恺, 等. 大粒种子定向精量播种装置参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 15–22.
YANG Yanli, GU Song, LI Kai, et al. Parameters optimization of directing precision seeder for large cucurbitaceous seeds [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(13): 15–22. (in Chinese)
- [58] 孔艳山, 张铁中, 褚佳, 等. 嫁接用大粒种子定向播种机构的设计研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(4): 73–77, 87.
KONG Yanshan, ZHANG Tiezhong, CHU Jia, et al. Research design on a directional seeding mechanism for big seeds of grafting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(4): 73–77, 87. (in Chinese)
- [59] 陈同, 刘海彬, 隽杰, 等. 大粒种子调向排种机构的试验研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(10): 158–162.
CHEN Tong, LIU Haibin, JUAN Jie, et al. Experimental study on adjustment direction and seeding mechanism for large cucurbitaceous seeds[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(10): 158–162. (in Chinese)
- [60] 侯加林, 黄圣海, 牛子濡, 等. 双鸭嘴式大蒜正头装置调头机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 87–96.
HOU Jialin, HUANG Shenghai, NIU Ziru, et al. Mechanism analysis and test of adjusting garlics upwards using two duckbill devices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 87–96. (in Chinese)
- [61] LI Yuhua, WU Yanqiang, LI Tianhua, et al. Design and experiment of adjustment device based on machine vision for garlic clove direction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174: 105513.
- [62] 李玉华, 刘全程, 李天华, 等. 基于 Jetson Nano 处理器的大蒜鳞芽朝向调整装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 35–42.
LI Yuhua, LIU Quancheng, LI Tianhua, et al. Design and experiments of garlic bulbil orientation adjustment device using Jetson Nano processor[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7): 35–42. (in Chinese)
- [63] PAREEK S. Novel postharvest treatments of fresh produce[M]. CRC Press, 2018.
- [64] 高海生, 赵希艳, 李润丰. 果蔬采后处理与贮藏保鲜技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 273–278.
GAO Haisheng, ZHAO Xiyan, LI Runfeng. Review of postharvest treatment and preservation technologies of fruit and vegetable [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 273–278. (in Chinese)
- [65] 姜松, 朱杰, 伍娟. 卵形体赣南脐橙自动定向运动规律的研究[J]. 食品科技, 2016, 41(7): 109–114.
JIANG Song, ZHU Jie, WU Juan. The automatic orientation motion law of ovoid Gannan navel orange[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(7): 109–114. (in Chinese)
- [66] 郑昕萌, 崔功佩, 王京峥, 等. 甘蓝采后整修系统自动调向装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2015, 43(2): 64–70.
ZHENG Xinmeng, CUI Gongpei, WANG Jingzheng, et al. Design and experiment of automatic orientation device for post-harvest cabbage trimming system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 43(2): 64–70. (in Chinese)
- [67] 王相友, 祝珊, 李学强, 等. 定向排列纵横切分马铃薯种薯切块机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 334–345.
WANG Xiangyou, ZHU Shan, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of directional arrangement vertical and horizontal cutting of seed potato cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 334–345. (in Chinese)
- [68] 郑兴帅, 王春耀, 唐文波, 等. 辣椒去核机定向输送机构的设计[J]. 农机化研究, 2015, 43(10): 112–115.
ZHENG Xingshuai, WANG Chunyao, TANG Wenbo, et al. Design and directional mechanism for a kind of chili pitter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 43(10): 112–115. (in Chinese)
- [69] MOTABAR P, LEFCOURT A, TASCH U, et al. Use of inertial properties to orient tomatoes[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(2): 517–525.
- [70] 史鹏涛, 文怀兴, 王宁侠. 大枣全自动输送定向切片机设计与应用效果[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 28–34.
SHI Pengtao, WEN Huaixing, WANG Ningxia. Design and application effects of automatic conveying and directional slicer for jujube[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 28–34. (in Chinese)
- [71] 潘海兵, 王振亚, 陈红. 宽皮柑橘对辊式剥皮机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 239–245.

- PAN Haibing, WANG Zhenya, CHEN Hong. Design and experiment on dual rollers peeling machine for *Satsuma mandarin* [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 239 – 245. (in Chinese)
- [72] 马月虹, 史建新, 梁勤安, 等. 制干番茄定向切分机的设计与研究[J]. 中国农机化学报, 2011, 32(5): 116 – 120.
MA Yuehong, SHI Jianxin, LIANG Qin'an, et al. Study on the design of directional slicer for drying tomato[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2011, 32(5): 116 – 120. (in Chinese)
- [73] 唐文波, 王春耀, 闵磊, 等. 辣椒定向去核机凸轮机构的设计[J]. 机械设计与制造, 2013(7): 28 – 30.
TANG Wenbo, WANG Chunyao, MIN Lei, et al. Design of CAM mechanism for a kind of chili directional pitter[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(7): 28 – 30. (in Chinese)
- [74] EUDELL V, DAVID F, STOUT B, et al. Experimental evaluation of physical properties of apple fruit pertaining to orientation [J]. Transactions of ASAE, 1969, 12(5): 673 – 676.
- [75] LEFCOURT A, NARAYANAN P, TASCH U, et al. Orienting apples for imaging using their inertial properties and random apple loading[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1): 64 – 71.
- [76] 黄秀玲, 郑加强, 赵茂程. 基于自动定向的苹果品质智能分级生产线设计[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(7): 3037 – 3038, 3041.
HUANG Xiuling, ZHENG Jiaqiang, ZHAO Maocheng. Study on the production line for the intelligent grading of apple quality based on automatic orientation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(7): 3037 – 3038, 3041. (in Chinese)
- [77] 李晶, 张东兴, 刘宝. 苹果分级机输送与翻转机构设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 158 – 161, 157.
LI Jing, ZHENG Dongxing, LIU Bao. Design of conveyer and turnover mechanism of apple grader[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 158 – 161, 157. (in Chinese)
- [78] 蒋维栋, 王春耀, 闵磊, 等. 一种苹果自动定向输送机构的设计及仿真[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(3): 518 – 523.
JIANG Weidong, WANG Chunyao, MIN Lei, et al. Design of automatic apple oriented mechanism and its simulation[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(3): 518 – 523. (in Chinese)
- [79] 马焱, 俞经虎. 一种苹果定向机构设计及定向单元动力学仿真[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 55 – 58.
MA Yao, YU Jinghu. Modeling and dynamic simulation of automatic apple oriented mechanism[J]. Food & Machinery, 2016, 32(11): 55 – 58. (in Chinese)
- [80] 黄春阳, 王春耀, 张红梅, 等. 四元数在杏果定向输送过程中的应用与研究[J]. 农机化研究, 2015, 43(4): 32 – 35.
HUANG Chunyang, WANG Chunyao, ZHANG Hongmei, et al. Application and research apricost of directional transport process using quaternion[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 43(4): 32 – 35. (in Chinese)
- [81] 刘向东, 王学农, 王春耀, 等. 鲜杏单体排序间隔输送装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 31 – 38.
LIU Xiangdong, WANG Xuenong, WANG Chunyao, et al. Design and test on transmitting device for fresh apricot with single fruit rank in certain interval[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 31 – 38. (in Chinese)
- [82] 徐春梅, 王春耀, 丁湘燕, 等. 杏果定向输送的稳定性分析[J]. 机械设计与制造, 2016(1): 20 – 23.
XU Chunmei, WANG Chunyao, DING Xiangyan, et al. Stability analysis during directional transport of apricot fruit[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(1): 20 – 23. (in Chinese)
- [83] 罗建清, 王春耀, 梁勤安, 等. 杏果输送过程中向稳定性的试验研究[J]. 农机化研究, 2015, 43(10): 153 – 157.
LUO Jianqing, WANG Chunyao, LIANG Qin'an, et al. Experimental study on stability of orientation in apricot fruit transportation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 43(10): 153 – 157. (in Chinese)
- [84] 罗建清, 王春耀. 杏果输送过程中稳定性的数值模拟与试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(13): 115 – 120, 145.
LUO Jianqing, WANG Chunyao. Dynamic stability of apricots motion in their directional conveying[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(13): 115 – 120, 145. (in Chinese)
- [85] 罗建清, 王春耀, 梁勤安, 等. 杏果输送过程中稳定性的研究与仿真分析[J]. 农机化研究, 2014, 42(12): 79 – 82, 86.
LUO Jianqing, WANG Chunyao, LIANG Qin'an, et al. The dynamic stability research and simulation analysis of apricots orientation during conveying[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 42(12): 79 – 82, 86. (in Chinese)
- [86] 梁勤安, 刘向东, 张杰, 等. 杏果自动定向工作部件设计与试验[J]. 现代食品科技, 2011, 27(3): 283 – 286.
LIANG Qin'an, LIU Xiangdong, ZHANG Jie, et al. Design and experiment of an automatic orientation component for apricot [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(3): 283 – 286. (in Chinese)
- [87] 史鹏涛, 文怀兴, 王宁侠, 等. 盘式自动定心大枣去核设备的设计及试验[J]. 农机化研究, 2014, 42(11): 160 – 163.
SHI Pengtao, WEN Huaixing, WANG Ningxia, et al. Design and experiment of the disc type self-centering jujube kernel removing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 42(11): 160 – 163. (in Chinese)
- [88] 史鹏涛, 文怀兴, 王宁侠. 全自动大枣输送定向切片机的设计与试验分析[J]. 农机化研究, 2013, 41(11): 171 – 175.
SHI Pengtao, WEN Huaixing, WANG Ningxia. Design and experimental analysis of jujube automatic transmission, directional and slice equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 41(11): 171 – 175. (in Chinese)
- [89] 陈红, 余豹, 王振亚, 等. 宽皮柑橘剥皮机对辊式剥皮装置工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 293 – 298.
CHEN Hong, YU Bao, WANG Zhenya, et al. Process parameter optimization of dual-roller peeling device for Satsuma mandarin peeling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 293 – 298. (in Chinese)
- [90] 杨信廷, 王伟杰, 邢斌, 等. 基于区块链的畜牧养殖资产监管身份认证研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 170 – 180.
YANG Xinting, WANG Jiwei, XING Bin, et al. Identification of animal husbandry assets supervision based on blockchain

- [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 170–180. (in Chinese)
- [91] 李保明, 王阳, 郑炜超, 等. 中国规模化养鸡环境控制关键技术与设施设备研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 212–221.
- LI Baoming, WANG Yang, ZHENG Weichao, et al. Research progress in environmental control key technologies, facilities and equipment for laying hen production in China[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(16): 212–221. (in Chinese)
- [92] QIAN Y, SONG K, HU T, et al. Environmental status of livestock and poultry sectors in China under current transformation stage[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622–623: 702–709.
- [93] YU X, YU H, ZHAO G. Study on regulation system of livestock breeding based on fuzzy control[J]. Energy Education Science and Technology—Part A: energy science and research, 2014, 32(6): 5351–5362.
- [94] WEI Y, WEI Q, AN D. Intelligent monitoring and control technologies of open sea cage culture: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 169: 105119.
- [95] 姜松, 王国江, 漆虹, 等. 禽蛋大小头自动定向排列系统设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 113–117.
- JIANG Song, WANG Guojiang, QI Hong, et al. Design and automatic orientation system of blunt and tip sides of eggs[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 113–117. (in Chinese)
- [96] 向云鹏, 谭鹤群, 万鹏, 等. 白鲢在振动平台上的头尾定向规律研究[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(1): 130–138.
- XIANG Yunpeng, TAN Hequn, WAN Peng, et al. Theoretical analysis and experimental study about head-tail orientation rule of silver carp on vibration platform[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(1): 130–138. (in Chinese)
- [97] 万鹏, 郭三琴, 杨俊, 等. 淡水鱼水平往复振动头尾定向输送方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 40–48.
- WAN Peng, GUO Sanqin, YANG Jun, et al. Horizontal reciprocating vibration method for head-to-tail directional transportation of fresh water fish[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(4): 40–48. (in Chinese)
- [98] 高星星, 谭鹤群. 淡水鱼头尾与腹背定向装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 342–347.
- GAO Xingxing, TAN Hequn. Design and experiment of transport device of freshwater fish bodies[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 342–347. (in Chinese)
- [99] 熊师, 方宪法, 牛康, 等. 对虾定向输送装置设计与参数优化试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 324–331.
- XIONG Shi, FANG Xianfa, NIU Kang, et al. Design and parameter optimization of directional conveying device for shrimp[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 324–331. (in Chinese)
- [100] 张秀花, 王泽河, 杨淑华, 等. 一种对虾头尾与背腹定向装置的设计与试验[J]. 河北农业大学学报, 2016, 39(1): 131–135.
- ZHANG Xiuhua, WANG Zehe, YANG Shuhua, et al. A design and experiment of directional transport device of penaeus vannamei[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2016, 39(1): 131–135. (in Chinese)
- [101] 王泽河, 张丽丽, 张秀花, 等. 对辊式对虾粗定向方法的试验与研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(6): 99–101.
- WANG Zehe, ZHANG Lili, ZHANG Xiuhua, et al. Testing and research on the shrimp's rough directed method of double rollers[J]. Food & Machinery, 2013, 29(6): 99–101. (in Chinese)
- [102] 赵庆龙, 张秀花, 李铎, 等. 对辊式对虾定向机的设计[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 410–412.
- ZHAO Qinglong, ZHANG Xiuhua, LI Duo, et al. Design of double roll shrimp orientation machine[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(7): 410–412. (in Chinese)
- [103] 姜松, 孙柯, 杨德勇, 等. 禽蛋大小头自动定向排列中翻转运动机理研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 215–222.
- JIANG Song, SUN Ke, YANG Deyong, et al. Turnover motion mechanism of automatic orientation of eggs according to pointed end and blunt end[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 215–222. (in Chinese)
- [104] 姜松, 姜奕奕, 孙柯, 等. 禽蛋大小头自动定向排列中轴向运动机理研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 209–215.
- JIANG Song, JIANG Yiyi, SUN Ke, et al. Axial motion mechanism of automatic orientation of egg's pointed end and blunt end[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 209–215. (in Chinese)
- [105] 姜松, 陈琦莹, 王婧, 等. 交错轴摩擦轮传动机理及应用[J]. 中国食品科学, 2020, 20(6): 65–72.
- JIANG Song, CHEN Qiyi, WANG Jing, et al. Mechanism and application of the crossed friction wheel drive[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(6): 65–72. (in Chinese)
- [106] 王春耀, 梁勤安, 闵磊, 等. 水果输送过程中定向机理的分析与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 95–98.
- WANG Chunyao, LIANG Qin'an, MIN Lei, et al. Analysis and test for orientation mechanism in fruit transportation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 95–98. (in Chinese)
- [107] 邢洁洁, 徐丽明, 刘旭东, 等. 电磁振动料斗内玉米种子分散与排序输送仿真及试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 32–39.
- XING Jiejie, XU Liming, LIU Xudong, et al. Simulation and test of corn seeds dispersion and arraying transport in electromagnetic vibration hopper[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 32–39. (in Chinese)
- [108] 傅润泽, 王爱民, 陈洪兴, 等. 小龙虾头尾定向装置设计及试验[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 81–87.
- FU Runze, WANG Aimin, CHEN Hongxing, et al. Design and test of head nad tail orientation device for crayfish[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 81–87. (in Chinese)
- [109] NARAYANAN P, LEFCOURT A, TASCH U, et al. Orientation of apples using their inertial properties[J]. Transactions of

the ASABE, 2008, 51(6): 2073 – 2081.

[110] 王春耀, 梁勤安, 蒋维栋, 等. 单轴对称水果输送过程定向机理的试验研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2012, 29(4): 395 – 398.

WANG Chunyao, LIANG Qin'an, JIANG Weidong, et al. Test study of the orientation mechanism about the monosymmetrical fruit conveying process[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2012, 29(4): 395 – 398. (in Chinese)

[111] 丁湘燕, 王春耀, 黄春阳, 等. 基于四元数的单轴对称水果定向控制力矩分析[J]. 振动测试与诊断, 2016, 36(2): 246 – 251.

DING Xiangyan, WANG Chunyao, HUANG Chunyang, et al. Analysis of uniaxial symmetric fruit orientation control torque based on quaternion[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(2): 246 – 251. (in Chinese)

[112] 邢洁洁, 徐丽明, 袁泉春, 等. 马齿型玉米种子定向播种推送装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 9 – 15.

XING Jiejie, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Design and test of pushing device for dent corn seeds directional sowing[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 9 – 15. (in Chinese)

[113] 邢洁洁, 徐丽明, 史丽娜, 等. 玉米种子电磁振动定向装置仿真模型的建立与验证[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(4): 129 – 134.

XING Jiejie, XU Liming, SHI Li'na, et al. Establishment and verification for the simulation model of directional device based on electromagnetic vibration for corn seeds[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(4): 129 – 134. (in Chinese)

[114] 陈健, 王应彪, 刘海江, 等. 强迫振动下核桃定向输送方法及仿真试验[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(6): 1035 – 1041.

CHEN Jian, WANG Yingbiao, LIU Haijiang, et al. The method and simulation experiment of walnut directional transportation under forced vibration[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(6): 1035 – 1041. (in Chinese)

[115] 赖庆辉, 赵瑾汶, 苏微, 等. 基于 DEM – CFD 的气吸式三七种苗定向移栽装置研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 60 – 70.

LAI Qinghui, ZHAO Jinwen, SU Wei, et al. Design and test of air suction directional transplanting device for *Panax notoginseng* seedlings based on DEM – CFD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 60 – 70. (in Chinese)

[116] 姜松, 贾丹凤, 朱杰, 等. 牛油果大小头自动定向运动规律的试验研究[J]. 中国食品学报, 2018, 18(12): 170 – 179.

JIANG Song, JIA Danfeng, ZHU Jie, et al. Study on automatic orientation motion of pointed end and blunt end of avocado[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(12): 170 – 179. (in Chinese)

[117] GENG J, WANG S, GAO Z, et al. Influence of initial orientations on potato conveyor trajectories by machine vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104838.

[118] XIE M, AN Z, XU L, et al. Design and experimental research of haw core removal machine based on buoyancy orientation mechanism[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 44(2): 1 – 12.

[119] 王跃东, 王春耀, 梁勤安, 等. 基于高速摄影水果定向理论及试验[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(8): 1501 – 1506.

WANG Yuedong, WANG Chunyao, LIANG Qin'an, et al. The theory of fruits orientation based on high-speed camera and its test[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(8): 1501 – 1506. (in Chinese)

[120] RIGNEY M, BRUSEWITZ G, STONE M. Peach physical characteristics for orientation[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(4): 1493 – 1497.

[121] 耿爱军, 栗晓宇, 侯加林, 等. 自动定向大蒜播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 17 – 25.

GENG Aijun, LI Xiaoyu, HOU Jialin, et al. Design and experiment of automatic directing garlic planter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 17 – 25. (in Chinese)

[122] 马秋成, 卢安舸, 陈锴, 等. 链子机械自动去芯自适应定心技术与样机试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 17 – 24.

MA Qiucheng, LU An'ge, CHEN Kai, et al. Study on self-adaptive centering method of removing core of lotus seed and prototype test[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 17 – 24. (in Chinese)

[123] 李禄禄, 张玉峰, 郝士成, 等. 关于松果破碎机定向输送机构的设计研究[J]. 吉林化工学院学报, 2017, 34(5): 53 – 56.

LI Lulu, ZHANG Yufeng, HAO Shicheng, et al. Research on the design of directional conveying mechanism of pine cones crusher[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2017, 34(5): 53 – 56. (in Chinese)

[124] 张秀花, 王泽河, 张丽丽, 等. 基于摩擦特性的轮式对虾背腹定向装置[J]. 河北农业大学学报, 2015, 38(1): 122 – 127.

ZHANG Xiuhua, WANG Zehe, ZHANG Lili, et al. Wheel directional device for shrimp based on the friction characteristics of it's back and abdomen[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2015, 38(1): 122 – 127. (in Chinese)