DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2025.02.004

人工智能在畜禽养殖机器人中的应用与展望

王克林[1,2], 刘龙申[2,3], 陈金鑫[1,2], 李鹏[2,3],
OKINDA Cedric[1,2,4], 沈明霞[2,3*]

(1. 南京农业大学工学院,江苏南京,210031; 2. 农业农村部养殖装备重点实验室,江苏南京,210031;
3. 南京农业大学人工智能学院,江苏南京,210031; 4. 马辛德穆利罗科技大学,
肯尼亚卡卡梅加,190-50100)

摘要:我国畜禽养殖量常年居于世界前列,不仅养殖种类齐全,且产业链与相关配套完整,在农业产业中占有举足轻重的地位。近年来,由于规模化养殖的快速发展以及动物疫病流行、劳动力短缺等因素,养殖产业对智能化、无人化的养殖设备提出了更高的需求。其中,养殖机器人作为实现智慧化养殖的重要载体,可有效替代或协助人类完成部分工作,且对于提升动物福利、提高生产效率、减少污染浪费等方面具有重大意义和广阔前景。本研究综述了图像识别、深度学习、强化学习、自主导航等智能技术及热红外相机、深度相机、激光雷达等关键零部件在养殖机器人上的应用,并介绍了其可实现的例如动物生理信息检测、行为姿态识别、环境监测调控、饲料蛋奶管理等多种功能。此外,由于我国自动化养殖产业起步较晚,目前与发达国家仍存在一定差距,因此,本研究亦针对目前国内外智能化养殖机器人的产业现状和方向进行了介绍,并探讨了其背后发展历程、市场前景和政策支撑。本研究还展望了未来智能养殖行业的发展,指出了当前技术在经济性、稳定性、动物接受度等方面存在的挑战,并提出了未来可能的前进方向和改进目标,旨在为相关研究人员进一步推动技术革新和产业应用提供参考。

关键词:人工智能;农业机器人;智慧养殖;深度学习;畜禽养殖
中图分类号:S24;TP2 **文献标识码**:A **文章编号**:2096-7217(2025)02-0044-14

王克林, 刘龙申, 陈金鑫, 李鹏, OKINDA Cedric, 沈明霞. 人工智能在畜禽养殖机器人中的应用与展望[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(2): 44-57
WANG Kelin, LIU Longshen, CHEN Jinxin, LI Peng, OKINDA Cedric, SHEN Mingxia. Application and prospect of artificial intelligence in livestock and poultry farming robots [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(2): 44-57

0 引言

2013年,我国肉类产量为8 536 t,到2023年,这一数字已达到96 410 kt,10年间的增幅达12.9%[1]。其中,猪肉产量为57 940 kt,禽肉产量25 630 kt,拥有世界第一大的生猪养殖量和世界第二大的肉鸡养殖量[2]。在这一成绩背后,是近年来我国养殖行业向集约化、精细化、标准化发展的缩影。2023年全国规模前20的生猪养殖企业累计出栏1.99亿头,占全国总量的28%,已产生一定的产业聚集效应[3]。

对于大型规模化养殖场而言,智能化的养殖装备可有效降低企业成本、提高生产效率、减少动物应激。特别是在经过非洲猪瘟、禽流感等动物疫情后,无人化的工厂养殖模式愈发受到重视,又恰逢人工智能(AI)浪潮的兴起,因此相关企业和科研单位在智能畜禽养殖机器人上投入了大量的研发资源,陆续取得了一些科研成果和应用案例[4]。但是,相较于国内,国外对于养殖机器人的研发起步较早,也存在着不少值得国内借鉴的相关经验。截至2022年,中国畜牧业机械化率约为35.79%;而根据农业农村部的目标,到2025年,畜牧业机械化率将达到50%以上,由此可见相关行业拥有巨大的需求空间和发展前景[5]。

畜禽养殖机器人作为智能养殖重要的技术载体和养殖装备,对于现代畜牧业发展的重要性不言而喻。在农业农村部印发的《"十四五"全国畜牧兽医行业发展规划》中明确指出:要大力推进智慧畜牧业建设,以

收稿日期:2024-09-18 修回日期:2024-12-05
基金项目:国家重点研发计划(2021YFD2000800)
第一作者:王克林,男,1998年生,江苏徐州人,博士研究生;研究方向为机器视觉和信息农业。E-mail: 2024212017@stu.njau.edu.cn
*通信作者:沈明霞,女,1964年生,江苏常熟人,博士,教授,博导;研究方向为机器视觉与信息农业。E-mail: mingxia@njau.edu.cn

生猪、奶牛、家禽为重点，加快现代信息技术与畜牧业深度融合步伐[6]。在此背景下，本研究将从畜禽的巡检监测、设施清洁、环境控制、自主导航等人工智能在养殖机器人中的应用领域出发，对相关现状进行总结，对未来的机遇和挑战进行分析展望，望能为广大科研人员进一步的研究提供参考。

1　养殖机器人和人工智能发展概述

养殖机器人是指在畜牧和家禽养殖中用于完成自动化任务的智能设备，能够减少人工劳动，提高养殖效率。养殖机器人可根据功能分为环境监控机器人（检测温湿度、气体浓度等环境参数）、自动喂养机器人（按需投喂饲料和水）、清洁机器人（自动清理养殖区域的废弃物）、巡检机器人（监测动物状态）等。随着技术进步，一些养殖机器人还具备自然语言处理（NLP）和数据分析功能，可协助工作人员优化养殖管理。目前，养殖设备的发展主要经历了机械化、自动化、智能化3个阶段。20世纪中期出现的早期养殖机器人功能较为单一，通常用来帮助工人完成机械化的重复操作，例如简单的挤奶和上料机械；20世纪90年代至21世纪初期，随着传感器、自动化和互联网技术的发展，养殖设备的自动化程度有所提升，实现了远程监控、机械饲喂、自动挤奶等功能[7]；而近10年来，随着人工智能、物联网浪潮的兴起，基于相关技术的新一代养殖机器人可以使用多种方法，通过采集高精度的动物和环境数据，来代替人工实现智能化的喂养、清洁、巡检、监测、决策等。且随着技术的进步，机器人也不再局限于满足单一的功能需求，而是向着集成化和个性化的目标快速发展[8-9]。其主要类型和功能如图1所示。

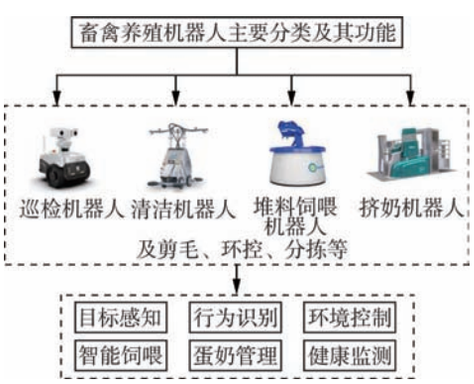


图1　畜禽养殖机器人主要类型与功能

Figure 1　Classification and functions of livestock and poultry farming robots

自人工智能学科于1956年首次提出以来，大致经历了通用问题求解器（general problem solver，GPS）、专家系统（expert system）、机器学习（machine learning）和深度学习（deep learning）几个阶段，其能力不断增长强化[10]。特别是在2010年以后，深度学习和神经网络技术快速发展使得机器人在图像识别、语音识别和自然语言处理等方面的能力大幅提升，能够胜任越来越多样化和复杂的工作。因此，计算机视觉、深度学习、自主导航等基于人工智能的技术因其速度快、精度高、客观性强等特性被越来越多地应用于畜禽养殖机器人上，被用作实现自动化养殖的主要技术。

随着“精准畜牧业（precision livestock farming，PLF）”概念的提出，养殖设备与人工智能产业的结合已成为必然[11]。未来势必将有更多的智能养殖机器人投入研发和应用，并在人工智能技术的帮助下实现越来越多元丰富的功能。但是，在日益增长的系统复杂性和数据量面前，受到人工智能加持的畜禽养殖机器人仍有不少挑战需要面对。

2　畜禽目标感知和行为识别

随着在规模化、高密度的养殖设施逐渐普及，依赖人工对畜禽进行计数、巡检、识别的传统方法已经难以适应效率和精度方面的需求。因此，研究人员尝试过使用多种方法对养殖对象进行数量和行为识别。

2.1　目标感知与计数

目标感知和计数是开展很多智能化养殖研究的基础。早期，研究人员常通过给动物佩戴耳标、项圈、射频芯片等实现对目标的计数和追踪，但是这类方法因成本较高、设备易损坏且容易造成动物应激等原因逐渐被计算机视觉等方法替代。

以色列的GEFFEN等[12]开发了一种基于Faster R-CNN网络的笼养母鸡识别与计数方法，通过沿机械臂水平运动的摄像机对母鸡图像进行采集并追踪，实现了89.6%的准确率；张岩琪等[13]使用改进的YOLOv8x-Ous模型开发了基于实例分割的区域养殖生猪计数系统，并支持使用手机拍照计数。XIAO等[14]使用改进的Mask R-CNN和SVM（支持向量机）融合的方法进行了散养奶牛的背部图像识别和技术，准确率达到了98.67 %；丁奇安等[15]基于轻量化的YOLO v5模型提出了一种哺乳期仔猪目标检测方法，并将之部署在Jetson Nano开发板上，实现了对哺乳期仔猪近97%的正确识别率；张燕飞[16]试制了一款两轮自主控制鸡舍巡检机器人（图2）并进行了路径规划算法的研究，且通过将算法移植到ROS平台验证了其可行性；沈明霞等[17]提出了一种深层卷积神经网络的新生仔猪识别方法，并比较了不同通道数对识别效果的影响，可实现对视频和监控画面的实时检测。



图2 鸡舍巡检小车实验平台

Figure 2 Experimental platform for chicken coop inspection robots

2.2 行为和姿态识别

通常在完成了动物的目标识别后,下一步即是对其行为进行判断,包含对畜禽的进食、饮水、躺卧、争斗等,从而为进一步判断其健康和状态奠定基础。

MASELYNE等[18]设计了一种高频射频识别(HF RFID)系统对猪的饮水行为进行识别,通过给55只育肥猪佩戴耳标进行试验验证,取得了93%的准确率;杨断利等[19]开发了基于YOLO v5的散养蛋鸡行为识别模型,并通过视频帧数和帧率的比值对站立、啄羽、饮水等6种行为进行了持续时间的统计,实现了近85%的准确度;刘龙申等[20]构建了基于EfficientDet的围产期母猪姿态识别模型,发现了母猪侧卧方向与仔猪窝均质量的关系,为预测分娩时间提供了依据;马肆恒[21]研发了基于ROS通信的鸭舍巡检机器人(图3),其搭载通过多目标追踪(MOT)和实例分割构建的模型对肉鸭行为进行判断,并能够利用卷积神经网络对0~7日龄和8~15日龄的死鸭进行识别。陆舟等[22]使用轻量化的卷积神经网络对育肥猪采食行为进行了识别,建立的侧视视角采食行为检测模型精度达到了96.4%。LI等[23]开发了基于Openpose的猪只姿势识别方法,并使用KNN进行姿态分类,可识别爬行、侧卧、站立和坐下4种典型姿态。

目前,行业内已有不少针对畜禽目标感知和行为识别的研究,他们通常使用算法搭配巡检机器人或固定式设备完成工作。这些信息对于了解养殖对象的基本情况十分重要,同时也是展开精准饲喂、繁育、环控等养殖工作所必需的信息。

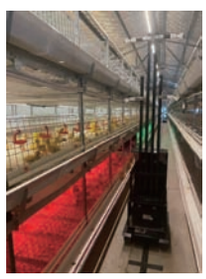


图3 鸭舍巡检机器人

Figure 3 Duck house inspection robot

3 畜禽的生理状态监测

动物的状态一直是养殖产业关注的重点,研究人员可以透过分析动物的行为、声音或采集体温、体重等生理信息来判断其是否处于疾病、应激、发情等不同状态。这些工作过往主要依赖人工完成,但是由于养殖密度的提高以及主观性较强的原因,正逐渐被巡检机器人等自动化的设备取代。

3.1 生理指标的获取

动物的体重、体温、体尺等客观性指标是评估和预测动物生理状态的重要数据。在传统养殖业,这些工作同样大量依赖人工完成,例如,人工采集1 000头母猪的体温需要44 h,而非接触的红外温度传感器可以实现24 h的不间断测量[24-25]。因此,不少研究人员开发了针对畜禽生理数据的自动化提取方法,部分研究成果如表1所示。

表1 畜禽生理指标检测(预测)研究

Table 1 Research on detection(prediction) of physiological indexes of livestock and poultry

研究对象	检测指标	主要设备	主要技术	实现效果	参考文献	年份	国家
生猪	重量	CCD	视觉图像分析(VIA)系统	R^2=0.905	[26]	2004	英国
蛋鸡	体温	热红外相机	方差分析	R^2=0.44	[27]	2021	韩国
羊	体尺	双目CCD	图像分割、轮廓拟合	MRE≤2.10%	[28]	2024	中国
肉鸡	重量	Kinect深度相机	贝叶斯线性回归、ANN	平均误差55 g	[29]	2016	丹麦
生猪	耳温	热红外相机	目标检测、图像分割	MRE≤0.6%	[30]	2021	中国
肉鸡	体温	热红外相机	椭圆拟合、K均值聚类	最大误差≤0.1 ℃	[31]	2019	中国
奶牛	眼温	热红外相机	改进YOLO v4	MRE≤0.14%	[32]	2022	中国
生猪	重量	手动测量体尺	径向基函数(RBF)	R^2=0.79	[33]	2023	中国
肉牛	重量	CCD	CNN/RNN	MAE=19.83 kg	[34]	2020	美国

随着相关技术的发展，红外成像、计算机视觉、深度相机等先进技术和设备被广泛应用于养殖动物的生理指标获取。XUE等[35]使用机器人进行数据采集（图4），构建了基于YOLOv5s和DeepLabv3＋的母猪外阴区域提取模型和基于随机森林（RF）的母猪体温预测模型，有效地取代了传统的插入式测量方法。ZHANG等[36]将可见光图像与红外图像进行了配准，从而实现了对猪眼部区域温度的准确测量，并将之部署于边缘计算平台，提高了模型的实用性。李卓等[37]在先前研究的基础上，采集了猪的面积、体长、体宽等信息，并在经过对比后选用了多元线性回归模型建立了猪体质量估算模型，其估算量和实际值的相关系数为0.998。

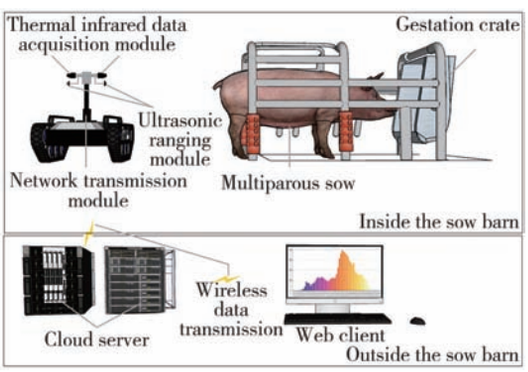


图4　猪只信息采集系统

Figure 4　Pig information collection system

3.2　畜禽的状态感知

动物经常在某个特定阶段或受到某些外部刺激后表现出特定的状态，这些信息的及时获取对于养殖人员及时调整养殖饲喂策略非常重要。例如，及时发现哺乳动物的发情和分娩状态可以确保在最佳时间进行人工授精或干预，提高受孕成功率和幼崽存活率[38-39]。

薛鸿翔等[40]研制了一款仿生公猪机器人来替代使用人工对进行母猪查情（图5），并提出了一种基于改进YOLO v5的母猪发情检测方法，灵敏度达到90%。GILOH等[41]探究了环境温度与肉鸡核心温度之间的联系，并发现了他们与肉鸡的应激有着很强的关联性。XUE等[42]建立了基于CNN和Transformer的母猪体况自动评分方法，可利用机器视觉技术自动将母猪的体况分为由胖至瘦的5个等级。毛燕茹等[43]建立了基于YOLO v4、卡尔曼滤波和Hungarian算法的奶牛嘴部跟踪和反刍行为检测模型，可准确获取奶牛的咀嚼次数和反刍状态的持续时长。WANG等[44]提取了母猪音频的Log-mel声谱图，并通过轻量化卷积神经网络对其发情声音进行识别，实现了97.52%的准确率。LIU等[45]通过Libra R-CNN网络对妊娠后期母猪姿态变换特征进行检测，并发现了母猪筑巢行为和姿势变化频率与分娩时间存在着密切联系。SCHAEFER等[46]利用自动实时红外热成像系统确定了猪的代谢效率，为精准饲喂提供了参考依据。



图5　仿生公猪机器人

Figure 5　Bionic boar robot

3.3　畜禽的健康监测

随着禽流感、非洲猪瘟等动物传染病的流行，养殖动物的健康愈发受到公众的重视，其直接关系着消费者的食品安全、养殖动物的福利和养殖企业的效益。动物在健康出现问题时会表现出不同的特异性症状，例如精神不佳、呼吸困难、咳嗽、跛行等等。相比于聘请兽医或技术人员进行长时间的现场观察，现代养殖场可以利用传感器和其他设备获取到的多种动物信息，再结合相关兽医知识实现畜禽健康情况的自动监测和预测[47-48]。

袁超等[49]通过FBank和MFCC对白羽鸡的发声特征进行采集和处理，再基于VGG16和ResNet18网络建立了针对白羽鸡的全生命周期咳嗽检测方法，可作为呼吸系统疾病诊断的辅助手段。许志强等[50]出了一种基于红外热图像和姿态提取的肉鸡跛行检测模型，并利用YOLO v3和随机森林算法分别进行特征提取和分类训练，可对肉鸡3个等级的腿部异常进行识别。沈明霞等[51]通过与其他算法的对比，建立了基于MFCC和卷积神经网络的猪音频识别方法，可准确识别山猪的咳嗽、喷嚏、鸣叫、呼噜发出的声音，为猪只呼吸道传染病的诊断提供了依据。WU等[52]首先利用YOLOv3算法对牛腿进行跟踪检测，随后使用LSTM（长短期记忆网络）实现了基于相对步长特征向量的奶牛跛行检测，准确率为98.57%。BANAKAR等[53]使用SVM对肉鸡的声音信号进行分类，可识别正常鸡只和患有新城疫、传染性支气管炎、禽流感鸡只所发出的声音，准确率在88%～95.8%之间。陈佳等[54]通过对鸡只头部的目标识别和短时追踪来检测其“张口—闭口”现象出现的频率，从而动态检测其是否存在呼吸困难现象，进而识别鸡只是否存在早期呼吸道疾病。

畜禽的生理指标和健康状态关系着养殖产业的命脉。随着人工智能技术的发展、养殖场对于生物安全的重视以及连带的人员进出限制,进一步促进了无人化巡检设备的发展,并吸引了大量研究人员投入其中,相关领域应用前景广阔。

4 养殖环境管理

养殖设施内外环境的质量与动物的健康福利息息相关。传统养殖场往往对于环境清洁缺乏重视,极易导致蚊虫滋生、疾病传播、污染环境甚至危害食品安全。因此,现代化的养殖场通常会使用各种设备和技术对养殖场内的环境进行干预,包括通风换气、温湿度调节、病虫害消杀、有害微生物防治等。

4.1 环境监控与调节

养殖场的空气质量、温湿度、光照强度等环境因素会在很大程度上影响动物的行为和健康。例如养殖场内空气颗粒物的增加意味着畜禽患呼吸道疾病的风险上升;而氨气、硫化氢等有害气体的浓度上升可能意味着存在大量需要清洁的粪便。文献[55]指出,不同照明和饲养方案下肉鸡的进食和饮水模式,指出肉鸡的饮水模式受到照明条件的影响较大,且黑暗条件下肉鸡的进食量较小。

现代养殖场环境的监控又依赖于机器人、物联网、传感器等技术。

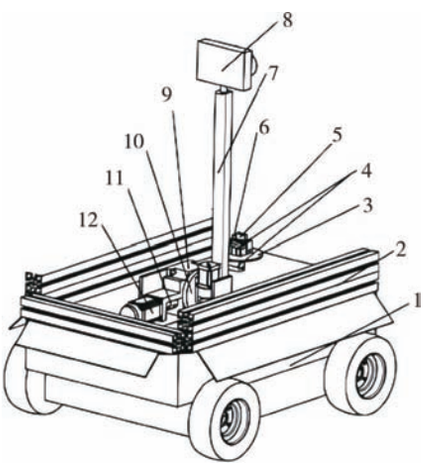


图 6 养殖场移动环境监测车

Figure 6 Mobile environmental monitoring vehicle in farm

1. 车体 2. 型材架 3. 分度盘 2 4. 舵机 5. 视频监控 6. 红外测温头 7. 步进电机推杆器 8. 传感器 9. 齿轮箱 10. 分度盘 1 11. 联轴器 12. 步进电机

龙长江等[56]研制了一款畜禽养殖设施环境移动监测车(图 6),可对养殖场内的 $PM_{2.5}$、PM_{10}、二氧化碳、硫化氢、氨气等的浓度及温湿度进行采集并实时上传物联网平台,实现养殖场内环境的远程监控。巴西的 PEREIRA 等[57]开发了基于物联网的家禽养殖场环境监测系统和配套的 Android App,可针对舍内空气质量、光照、温湿度进行实时监测。崔琼等[58]设计了调整猪舍环境多参数无模型自适应控制算法(MMFAC),可根据空气中有害气体的含量智能调节风机的转速,确保环境有利于猪只生长。李嘉豪[59]研发了轨道式的猪舍环境巡检机器人,并建立了猪舍环境综合评价模型,根据二氧化碳、硫化氢、氨气等 5 项指标将猪舍环境定为 3 个等级。王恩宇等[60]使用 FLUENT 和 TRNSYS 软件对某张家口地区的圆形猪舍的污染气体和温控进行了仿真分析,发现了调整养殖密度策略相比非供热策略、供热策略能够有效提升猪只的全年平均月舒适时间。

4.2 清洁和消杀

DOERFLER 等[61]研制的机器人刮刀能够自动地从漏缝地板上清除奶牛的液态粪便,从而有效降低奶牛传染性蹄病的概率。史文杰[62]研发了一款气液一体式猪舍消毒喷雾机,并通过流体仿真、静力学仿真、模态分析等确定了机器的结构设计与喷头安装参数。樊士冉等[63]研制了一款在有限空间作业的畜牧业清洗机器人(图 7)用于清洁猪舍粪沟,机器人采用 STM32 作为主控,由舵机控制高压喷头进行冲洗,经试验,其用时、用水和清洁率等指标均优于人工清洗。刘凯歌[64]设计制造了一款基于 DEM-CFD(离散元—计算流体力学)的猪舍高压清洗机器人,采用 PLC 作为主控,并通过模拟不同喷嘴结构及参数下水射流清洗猪粪层的效果确定了最佳设计方案。德国波恩大学的 EBERTZ 等[65]研发了一款刮粪机器人,可以在有效清洁漏缝板的同时大幅降低用水量(相较于人工冲洗),且不会造成母猪伤害或应激。FENG 等[66]设计了一种畜禽舍防疫消杀机器人(图 8),其采用磁性标签和 RFID 标签组合方式进行导航,配备的空气辅助式药液喷雾喷嘴可同时实现雾化和扩散功能。赵文文等[67]试制的猪舍消杀巡检机器人拥有超声波雾化单元、紫外线辐射单元对环境进行消杀,同时具有监测舍内空气质量和猪只体温的功能。



图 7 畜牧业有限空间清洗机器人

Figure 7 Animal husbandry limited space cleaning robot

养殖场的环控与消杀工作通常复杂繁重且环境恶劣，往往需要消耗大量人力物力。尽管目前由于技术限制，机器人无法完全替代人工作业，但已有的自动或半自动装备已经有效降低了人力开支。随着智能化程度的提高，机器人逐渐替代人类完成这类工作已经成为必然趋势。



图 8　畜禽舍防疫消杀机器人

Figure 8　Livestock and poultry house epidemic prevention and disinfection robot

5　人工智能在养殖机器人的其他应用

5.1　蛋奶管理

挤奶与捡蛋是传统养殖场人力消耗较大的工作，也是直接关系到养殖场经济收益的部分，同时因其重复性较高，也是相对容易被机械化设备替代的工作。

世界上第一台真空挤奶机于1903年问世，是世界上最早投入实用的机械化畜牧设备之一[68]。早期的真空挤奶机结构简单、功能单一，主要原理是通过真空系统模仿人类手部动作完成挤奶。经过漫长的技术演进，精密流量传感器、自动脱杯套杯、个体化挤奶等技术的投入使用让挤奶设备进入了智能化、精准化的新时代[69]。现代挤奶设备主要存在单站式、并列式、旋转式、自走式等，它们在设计和功能上存在各自的特点，农户可以根据场地和需求进行选择。德国GEA公司的DairyRobot R9500挤奶机器人采用配备ToF镜头的MilkRack组件，可以快速准确地从奶牛下方滑入挤奶位置，并且自带的细胞计数分类传感器可以检测潜在的乳腺炎风险[70]。加拿大的Milkomax公司开发的Tie-Stall AMS挤奶机器人可以在牛栏式牛舍的中央过道中自由移动，单个机器人每天可完成150～160次挤奶[71]（图9）。李硕等[72]开发了一款7自由度的挤奶机器人，使用ANSYS、MATLAB等对其进行了工作空间、动力学、静力学仿真，验证了设计的合理性。北京京鹏环宇畜牧科技开发了一款高效转盘式挤奶机，相比于并列式挤奶机效率可提升2～3倍，并节省16%的劳动力，但占用空间较大，较适合大中型牧场的使用[73]。



图 9　Tie-Stall AMS挤奶机器人

Figure 9　Tie-Stall AMS milking robot

蛋管理是家禽养殖场的一项重要工作，主要包括集蛋和分拣等。由于禽蛋易碎的特性，在抓取和运输时通常需要柔性材料保护，也需要在分拣环节对破损的鸡蛋进行剔除。台湾屏东大学的CHANG等[74]制造了一款用于散养农场捡蛋的智能机器人，使用RGB-HSV建立了鸡蛋检测和语义分割模型，采用超声波与视觉联合方案进行导航避障，在室内平坦的地面对鸡蛋的拾取率为60%～88%。JOFFE等[75]研发了一款适用于禽舍内的自主鸡蛋捡拾机器人，对鸡蛋和肉鸡的目标检测使用Kinect v2深度相机和NVIDIA Jetson TX1开发板（运行基于VGG-M的检测模型），在模拟环境中进行试验的成功率为91.57%。荷兰瓦赫宁根大学研发的PoultryBot机器人（图10）可以在鸡舍中自主导航行进超过2 400 m，对于鸡蛋的正确检测率为86%，完成收集率为54%，对结果的分析显示，大部分案例失败的原因在于控制系统而非检测系统[76]。苑进等[77]设计制造了一款禽蛋自动捡拾系统，首先由震动校正装置对传送带上的禽蛋位置进行校正，再由机械手及末端吸盘将禽蛋转移至托盘，经试验，捡蛋成功率为98.3%，最快速度达到2.4 s/个。



图 10　PoultryBot鸡蛋收集机器人

Figure 10　PoultryBot egg collection robot

5.2　饲喂堆料

传统养殖场基本采用人工上料进行饲喂，这种方式不仅费时费力且效率低下，因此自动化的饲喂系统和机器人被广泛投入实践。规模化养猪企业采用的自

动饲喂系统通常由储料塔、料线管、给料装置等固定式设施组成,而牛羊等反刍动物则多使用移动式堆料机器人进行饲喂[78]。瑞典 Sveaverken 公司生产的 RoboPusher推料机器人(图 11)使用计算机视觉技术进行导航,每分钟可推料 18 m,单次充电可续航 22 h[79]。赵大庆等[80]设计的生猪液态饲料饲喂车使用 PLC 进行控制和 ZigBee 进行通信,每次可运送 500 kg 饲料,实投喂量误差小于 2.5%。唐诗杰等[81]设计了一种笼养种鸭的精准饲喂器,并使用 EDEM 进行了三因素三水平的正交试验,确定了饲料通过间距、叶片转速等参数的最佳组合。闫银发等[82]设计了一款料药一体生猪饲喂器,使用离散元仿真模拟了在饲料中添加药物颗粒时的分布情况并进行了样机台架试验,验证了装置的排药均匀性。

随着精准养殖概念的提出,研究人员发现根据动物个体差异进行精准可以有效提升种群均匀和动物福利。王鑫杰[83]提出了一种基于孪生网络和三维点云的奶牛进食信息监测模型,针对个体奶牛的进食量的预测平均绝对误差为 121.3~100.6 g。ZUIDHOF 等[84]设计的精准饲喂站可以通过识别肉鸡的 RFID 标签和它们的实时体重调整的饲料供应量,经过 20 周的试验,鸡群很好地维持了目标体重,且体重的变异系数可低至 2%。荷兰 Lely 公司生产的 Lely Vector 自动饲喂机器人可针对不同奶牛的消耗量来差异化地补充饲料,也可对进个体进食量和群体进食量进行记录,并根据历史数据对饲料的补充时间进行预测[85]。



图 11 RoboPusher 推料机器人

Figure 11 RoboPusher feed pushing robot

5.3 自主定位与导航

目前主流的畜禽养殖机器人的运行方式可分为自走式和轨道式两大类。其中,轨道式机器人基本以实现巡检功能为主,不需要与动物产生直接接触,因此它们可以沿轨道(通常在高处)以固定路线行进[86]。轨道式机器人的定位和导航一般并不困难,在设计时主要以启停和速度的控制为重点。自走式机器人有多种导航方式,主流方法有固定路径、视觉方案、激光雷达、无线电等,它们之间的对比如表 2 所示。

表 2 畜禽养殖机器人导航方案对比

Table 2 Comparison of navigation solutions for livestock and poultry farming robots

导航方案	特点	优点	缺点
固定路径的导航	沿预设的磁条、电缆或标志物行走	实现简单、成本较低	灵活性差、适应能力弱
基于视觉的导航	使用 CCD、深度相机和机器视觉进行图像识别	适应性强、可处理复杂问题	对计算能力要求较高
激光雷达(LiDAR)导航	利用激光扫描生成高精度地图(SLAM)	高精度、实时环境感知	成本较高
无线电导航	利用 Wi-Fi、蓝牙、RFID 等无线信号定位	适合室内环境、成本较低	精度低,设备易相互干扰
超声波和红外传感器导航	使用超声和红外监测距离和障碍物	成本较低、实现简单	难以适应复杂环境
卫星定位	利用卫星信号进行定位和导航	覆盖范围广、方案成熟	不适用于室内养殖环境

机器人或无人驾驶车辆定位导航方案在全世界范围内仍充满争论[87]。现有畜禽养殖机器人通常视其需求来决定导航方案的单独或联合使用,并无优劣之分。例如使用磁条引航的马肆恒[21];采用红外避障的樊士冉等[63];采用超声波传感器导航的 EBERTZ 等[65];采用磁性-RFID 标签联合方案的 FENG 等[66];采用激光雷达(SLAM 技术,图 12)和 UWB 联合的赵文文等[67];以及采用视觉—超声波联合方案的 CHANG 等[74],他们都实现了良好的定位、导航、路径规划功能并完成了既定任务。因此,科研人员在选用这些方案时应平衡需求、预算和使用场景进行合理判断。

除本研究以上所列举的情况外,人工智能在农业机器人上仍有相当多的应用,如剪毛、分群、分拣等环节,但是目前应用规模还相对较小,未有大规模投入产业应用的报告[88-90]。

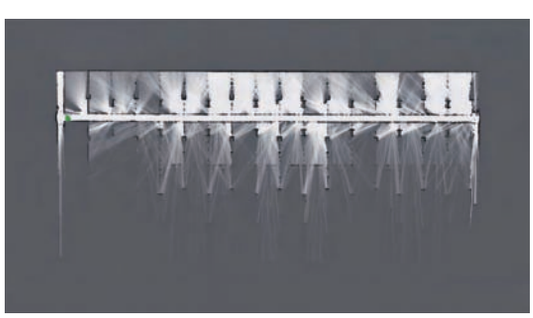


图 12 基于 SLAM 技术的猪舍地图重建

Figure 12 Pig house map reconstruction based on SLAM

6　产业分析与展望

6.1　养殖机器人产业分析

随着农业机械化的迅速发展，同时在农村劳动力短缺、动物传染病流行和第四次工业革命等原因的复合影响下，农业机器人近年迎来了一波新的发展高潮。据 KBVresearch 的预测（图 13）[91]，到 2030 年，全球农业机器人总产值将从 2019 年的 81 亿美元上升至到 473 亿美元，具有非常广阔的市场前景。

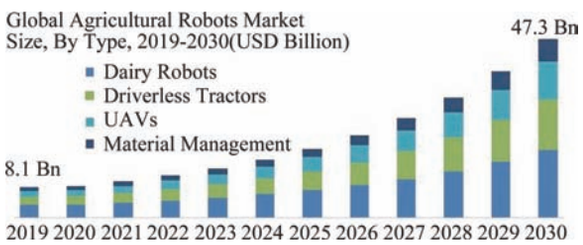


图 13　全球农业机器人产值增长预测

Figure 13　Global agricultural robot output value growth

数据来源：www. kbvresearch. com。

目前，我国已经培育出了华大智农、牧原集团、小龙潜行、国科农牧等一批养殖装备“专精特新”小巨人企业，并在市场上占有一席之地。然而，相较于农业大类的其他学科领域，我国在农业机器人上的优势并不突出，市场占有率也低于 Lely、GEA、DeLaval 等国际一线大厂。据中国农业科学院农业信息研究所发布的报告指出：2023 年，我国在农业机器人领域的国家专利竞争力指数仍落后于以色列、美国、英国等老牌农业强国，排名仅为世界第六[92]。但是，由于养殖业的特殊性，即使是目前世界领先企业也难以实现养殖机器人的完全自动化，这也给了国内相关领域“弯道超车”的机会，即能否借助人工智能的迅猛发展实现对世界先进养殖装备的赶超。因此，人工智能与传统机器人技术的结合势必成为我国未来养殖机器人产业发展的趋势。但是，想要做到成熟的人工智能应用仍然有以下几点问题亟须解决：

1）经济效益问题。目前养殖自动化设备的初期投资对于中小型养殖户来说仍是一笔较大的费用。尤其是相关技术未有进行足够普及宣传的情况下，很难让个体养殖户甘愿付出风险采购相关设备。

2）技术成熟度较低。目前不少深度学习、计算机视觉等技术的应用仍处于研究阶段，模型的稳定性、鲁棒性和泛化能力并未在复杂的养殖环境中加以检验，抑或由于训练数据有限而造成使用效果的下降。

3）动物的接受程度和安全性。机器人面对突发问题时的处置能力往往不如人类灵活，在进行作业时更有可能与动物产生碰撞接触，且某些机械化的动作更易造成动物出现应激反应。

4）功能单一。尽管目前专攻某些领域的机器人在效率上可能超过人类，但单一工人所能胜任的工作种类往往超过机器人。例如在高度自动化的养猪场内，可能仅需极少的工作人员即可胜任数万头仔猪从繁育出栏的所有工作。

6.2　未来展望

受到生物安全、劳动力短缺和动物福利等多重因素的影响，养殖业的自动化、智能化、无人化已经成为必然趋势。经过近年的高速发展，养殖机器人与人工智能的结合已经愈发紧密，实现的功能也逐渐丰富。但是，从实际应用的角度，现有技术和装备的稳定性、准确度和可靠性方面仍有一定的提升空间。综合本研究的综述和分析不难看出，畜禽养殖机器人是一个机遇与挑战并存的市场，在养殖舍复杂的条件和日趋激烈的市场竞争下，笔者认为我国的智能畜禽养殖机器人产业应有以下的改进和发展方向：

1）关键零部件的国产化。目前国内不少机器人关键零部件仍然依赖进口，如伺服电机和边缘计算平台等。零件的国产化不仅有助于我国的科技自主，也可促使整机价格进一步降低。

2）功能的复合化和模块化。随着技术的进步，未来单台养殖机器人将不再满足于巡检、清洁、环控等单一的功能，而是将更多的功能以模块形式集成于一体，并可以根据需求对功能进行替换和升级。

3）更多的政策扶持和规范。从产业和国家层面确立扶持政策并制定产品标准有助于提高不同设备和系统之间的互操作性，并帮助设备和技术的大规模推广应用。

7　结论

本研究从发展历程、研究现状、技术背景、市场调研等角度分析了人工智能在养殖机器人上的应用和前景。结合前文分析可以发现，人工智能技术在畜禽养殖机器人中的应用已展现出巨大的潜力和广阔的前景。当前，基于机器学习和深度学习的算法已经能够实现畜禽养殖过程中多种复杂任务的自动化，如饲喂、挤奶、环境监控和健康管理等。然而，这一领域仍面临许多挑战，包括数据采集的准确性和完整性、算法实用性、设备的成本效益以及与传统养殖模式的兼容性等。随着未来多模态数据融合、实时智能决策、机器人自主导航和协作等技术的不断进步和产业生态的逐步完善，人工智能驱动的畜禽养殖机器人势必为现代农业的可持续发展和生产效率提升带来更加深远的影响。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国农业农村部. 农村农业部生猪专题[EB/OL]. (2023－12－31)[2024－07－10]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/szcpxx/.

[2] 中国国家统计局. 中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2024－02－29)[2024－07－10]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.

[3] 前瞻产业研究院. 2023年中国生猪养殖行业市场规模、竞争格局及发展前景[EB/OL]. (2023－01－15)[2024－07－10]. https://bg.qianzhan.com/trends/detail/506/230202－f2d95fd4.html.

[4] 沈明霞, 陈金鑫, 丁奇安, 等. 生猪自动化养殖装备与技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 1－19.
SHEN Mingxia, CHEN Jinxin, DING Qi'an, et al. Current situation and development trend of pig automated farming equipment application [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 1－19.

[5] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部关于加快畜牧业机械化发展的意见[EB/OL]. (2020－02－17)[2024－07－10]. http://www.njhs.moa.gov.cn/tzggjzcjd/202002/t20200217_6337230.htm.

[6] 中华人民共和国农业农村部. "十四五"全国畜牧兽医行业发展规划[EB/OL]. (2021－12－14)[2024－07－11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021－12/22/5663947/files/fd62c2ed4d3d450e8b0f87c2dc8ff326.pdf.

[7] 王儒敬, 孙丙宇. 农业机器人的发展现状及展望[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 803－809.
WANG Rujing, SUN Bingyu. Current status and prospects of agricultural robots [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6): 803－809.

[8] 胡惠玥, 杨小玲, 刘仁鑫, 等. 畜禽养殖机器人研究现状与展望[J]. 南方农机, 2023, 54(19): 1－6, 10.
HU Huiyue, YANG Xiaoling, LIU Renxin, et al. Research status and prospects of livestock and poultry breeding robots [J]. Southern Agricultural Machinery, 2023, 54(19): 1－6, 10.

[9] ROWE E, DAWKINS M S, GEBHARDT-HENRICH S G. A systematic review of precision livestock farming in the poultry sector: Is technology focussed on improving bird welfare [J]. Animals, 2019, 9(9): 614.

[10] 唐瑜嵘, 沈明霞, 薛鸿翔, 等. 人工智能技术在畜禽养殖业的发展现状与展望[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(1): 1－16.
TANG Yurong, SHEN Mingxia, XUE Hongxiang, et al. Development status and prospect of artificial intelligence technology in livestock and poultry breeding [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(1): 1－16.

[11] BANHAZI T M, BLACK J L. Precision livestock farming: A suite of electronic systems to ensure the application of best practice management on livestock farms [J]. Australian Journal of Multi-disciplinary Engineering, 2009, 7(1): 1－14.

[12] GEFFEN O, YITZHAKY Y, BARCHILON N, et al. A machine vision system to detect and count laying hens in battery cages [J]. Animal, 2020, 14(12): 2628－2634.

[13] 张岩琪, 周硕, 张凝, 等. 基于改进实例分割算法的区域养殖生猪计数系统[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(4): 53－63.
ZHANG Yanqi, ZHOU Shuo, ZHANG Ning, et al. Regional pig counting system based on improved instance segmentation algorithm [J]. Smart Agriculture, 2024, 6(4): 53－63.

[14] XIAO J, LIU G, WANG K, et al. Cow identification in free-stall barns based on an improved Mask R-CNN and an SVM [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106738.

[15] 丁奇安, 刘龙申, 陈佳, 等. 基于Jetson Nano＋YOLO v5的哺乳期仔猪目标检测[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 277－284.
DING Qi'an, LIU Longshen, CHEN Jia, et al. Target detection of suckling piglets based on Jetson Nano＋YOLO v5 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 277－284.

[16] 张燕飞. 两轮自主控制鸡舍巡检机器人路径规划研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
ZHANG Yanfei. Research on path planning of two-wheeled autonomous control chicken house inspection robot [D]. Taiyuan: North University of China, 2023.

[17] 沈明霞, 太猛, CEDRIC Okinda, 等. 基于深层卷积神经网络的初生仔猪目标实时检测方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 270－279.
SHEN Mingxia, TAI Meng, CEDRIC Okinda, et al. Real-time detection method for newborn piglets based on deep convolutional neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 270－279.

[18] MASELYNE J, ADRIAENS I, HUYBRECHTS T, et al. Measuring the drinking behaviour of individual pigs housed in group using radio frequency identification (RFID) [J]. Animal, 2016, 10(9): 1557－1566.

[19] 杨断利, 王永胜, 陈辉, 等. 基于SEEC-YOLO v5s的散养蛋鸡日常行为识别与统计系统[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 316－328.
YANG Duanli, WANG Yongsheng, CHEN Hui, et al.

Daily behavior recognition and statistical system of free-range laying hens based on SEEC-YOLO v5s [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 316－328.

[20] 刘龙申，舒翠霓，李波，等. 基于EfficientDet的围产期母猪姿态识别[J]. 农业机械学报，2022，53(4)：271－279.
LIU Longshen, SHU Cuini, LI Bo, et al. Posture recognition of peripartum sows based on EfficientDet [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 271－279.

[21] 马肄恒. 面向笼养肉鸭行为与死亡识别的自主巡检装备创制[D]. 杭州：浙江科技大学，2024.
MA Yiheng. Creation of autonomous inspection equipment for behavior and death identification of caged ducks [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2024.

[22] 陆舟，沈明霞，刘龙申，等. 基于轻量化网络与注意力机制的育肥猪采食行为识别方法研究[J]. 南京农业大学学报，2023，46(4)：802－812.
LU Zhou, SHEN Mingxia, LIU Longshen, et al. Research on the recognition method of fattening pig feeding behavior based on lightweight network and attention mechanism [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(4): 802－812.

[23] LI G, JV Q, LIU F, et al. Pig pose recognition method based on openpose [C]// Advances in Precision Instruments and Optical Engineering: Proceedings of the International Conference on Precision Instruments and Optical Engineering, 2021. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 533－545.

[24] 田浩楠，华婧伊，张少帅，等. 基于红外热成像与线性回归拟合的母猪体温检测技术研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2023，4(1)：36－41.

[25] 谢秋菊，刘学飞，郑萍，等. 畜禽体温自动监测技术及应用研究进展[J]. 农业工程学报，2022，38(15)：212－225.
XIE Qiuju, LIU Xuefei, ZHENG Ping, et al. Research progress on automatic monitoring technology and application of livestock and poultry body temperature [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(15): 212－225.

[26] DOESCHL A B, WHITTEMORE C T, KNAP P W, et al. Using visual image analysis to describe pig growth in terms of size and shape [J]. Animal Science, 2004, 79(4): 415－427.

[27] KIM N Y, KIM S J, OH M, et al. Changes in facial surface temperature of laying hens under different thermal conditions [J]. Animal Bioscience, 2020, 34(7): 1235－1242.

[28] 周艳青，薛河儒，白洁，等. 基于图像的羊体尺参数测点检测方法的研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版)，2024，45(2)：69－77.
ZHOU Yanqing, XUE Heru, BAI Jie, et al. Research on the detection method of sheep body size parameters based on image [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2024, 45(2): 69－77.

[29] MORTENSEN A K, LISOUSKI P, AHRENDT P. Weight prediction of broiler chickens using 3D computer vision [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123: 319－326.

[30] 肖德琴，林思聪，刘勤，等. 基于红外热成像的生猪耳温自动提取算法[J]. 农业机械学报，2021，52(8)：255－262.
XIAO Deqin, LIN Sicong, LIU Qin, et al. Automatic extraction algorithm of pig ear temperature based on infrared thermal imaging [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 255－262.

[31] XIONG X, LU M, YANG W, et al. An automatic head surface temperature extraction method for top-view thermal image with individual broiler [J]. Sensors, 2019, 19(23): 5286.

[32] WANG Y, KANG X, CHU M, et al. Deep learning-based automatic dairy cow ocular surface temperature detection from thermal images [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 107429.

[33] CHEN H, LIANG Y, HUANG H, et al. Live pig-weight learning and prediction method based on a multilayer RBF network [J]. Agriculture, 2023, 13(2): 253.

[34] GJERGJI M, DE MORAES WEBER V, SILVA L O C, et al. Deep learning techniques for beef cattle body weight prediction [C]// 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). IEEE, 2020: 1－8.

[35] XUE H, SHEN M, SUN Y, et al. Instance segmentation and ensemble learning for automatic temperature detection in multiparous sows [J]. Sensors, 2023, 23(22): 9128.

[36] ZHANG B, XIAO D, LIU J, et al. Pig eye area temperature extraction algorithm based on registered images [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108549.

[37] 李卓，毛涛涛，刘同海，等. 基于机器视觉的猪体质量估测模型比较与优化[J]. 农业工程学报，2015，31(2)：155－161.
LI Zhuo, MAO Taotao, LIU Tonghai, et al. Comparison and optimization of pig body mass estimation models based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 155－161.

[38] 李伟，董国忠，周艳，等. 浅析机器人在猪生产中的应用前景[J]. 中国畜牧杂志，2022，58(6)：270－273.
LI Wei，DONG Guozhong，ZHOU Yan，et al. A brief analysis of the application prospects of robots in pig production [J]. China Animal Husbandry Magazine，2022，58(6)：270－273.

[39] 沈明霞，刘龙申，闫丽，等. 畜禽养殖个体信息监测技术研究进展[J]. 农业机械学报，2014，45(10)：245－251.
SHEN Mingxia，LIU Longshen，YAN Li，et al. Research progress in individual information monitoring technology for livestock and poultry breeding [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery，2014，45(10)：245－251.

[40] 薛鸿翔，沈明霞，刘龙申，等. 基于改进YOLO v5s的经产母猪发情检测方法研究[J]. 农业机械学报，2023，54(1)：263－270.
XUE Hongxiang，SHEN Mingxia，LIU Longshen，et al. Research on estrus detection method for multiparous sows based on improved YOLO v5s [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery，2023，54(1)：263－270.

[41] GILOH M，SHINDER D，YAHAV S. Skin surface temperature of broiler chickens is correlated to body core temperature and is indicative of their thermoregulatory status [J]. Poultry Science，2012，91(1)：175－188.

[42] XUE H，SUN Y，CHEN J，et al. CAT-CBAM-Net：An automatic scoring method for sow body condition based on CNN and transformer [J]. Sensors，2023，23(18)：7919.

[43] 毛燕茹，牛童，王鹏，等. 利用Kalman滤波和Hungarian算法的多目标奶牛嘴部跟踪及反刍监测[J]. 农业工程学报，2021，37(19)：192－201.
MAO Yanru，NIU Tong，WANG Peng，et al. Multi-target cow mouth tracking and rumination monitoring based on Kalman filter and Hungarian algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2021，37(19)：192－201.

[44] WANG Y，LI S，ZHANG H，et al. A lightweight CNN-based model for early warning in sow oestrus sound monitoring [J]. Ecological Informatics，2022，72：101863.

[45] LIU L，ZHOU J，ZHANG B，et al. Visual detection on posture transformation characteristics of sows in late gestation based on Libra R-CNN [J]. Biosystems Engineering，2022，223：219－231.

[46] SCHAEFER A，VON GAZA H，COOK N，et al. PSXVII-38 Metabolic efficiency in swine determined with automated real time infrared thermography [J]. Journal of Animal Science，2018，96(Suppl 3)：146.

[47] 姚文，邓为，许毅，等. 家禽亚健康状态监测与健康预警展望[J]. 南京农业大学学报，2023，46(4)：635－644.
YAO Wen，DENG Wei，XU Yi，et al. Monitoring of subhealth status and health warning of poultry [J]. Journal of Nanjing Agricultural University，2023，46 (4)：635－644.

[48] MONTEIRO A，SANTOS S，GONÇALVES P. Precision agriculture for crop and livestock farming—Brief review [J]. Animals，2021，11(8)：2345.

[49] 袁超，沈明霞，姚文，等. 基于发声特征和深度学习的白羽肉鸡全生命周期咳嗽检测方法[J]. 南京农业大学学报，2023，46(5)：975－985.
YUAN Chao，SHEN Mingxia，YAO Wen，et al. Cough detection method for white-feathered broiler chickens throughout their life cycle based on vocalization features and deep learning [J]. Journal of Nanjing Agricultural University，2023，46(5)：975－985.

[50] 许志强，沈明霞，刘龙申，等. 基于红外热图像的肉鸡腿部异常检测方法[J]. 南京农业大学学报，2021，44(2)：384－393.
XU Zhiqiang，SHEN Mingxia，LIU Longshen，et al. Broiler leg abnormality detection method based on infrared thermal image [J]. Journal of Nanjing Agricultural University，2021，44(2)：384－393.

[51] 沈明霞，王梦雨，刘龙申，等. 基于深度神经网络的猪咳嗽声识别方法[J]. 农业机械学报，2022，53(5)：257－266.
SHEN Mingxia，WANG Mengyu，LIU Longshen，et al. Pig cough sound recognition method based on deep neural network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery，2022，53(5)：257－266.

[52] WU D，WU Q，YIN X，et al. Lameness detection of dairy cows based on the YOLOv3 deep learning algorithm and a relative step size characteristic vector [J]. Biosystems Engineering，2020，189：150－163.

[53] BANAKAR A，SADEGHI M，SHUSHTARI A. An intelligent device for diagnosing avian diseases：Newcastle，infectious bronchitis，avian influenza [J]. Computers and Electronics in Agriculture，2016，127：744－753.

[54] 陈佳，丁奇安，刘龙申，等. 基于YOLO v5与短时跟踪的鸡只呼吸道疾病早期检测[J]. 农业机械学报，2023，54(1)：271－279.
CHEN Jia，DING Qi'an，LIU Longshen，et al. Early detection of respiratory diseases in chickens based on YOLO v5 and short-term tracking [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery，2023，54(1)：271－279.

[55] XIN H，BERRY I L，BARTON T L，et al. Feeding and drinking patterns of broilers subjected to different feeding and lighting programs [J]. Journal of Applied Poultry

Research, 1993, 2(4): 365－372.

[56] 龙长江, 谭鹤群, 朱明, 等. 畜禽舍移动式智能监测平台研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 68－75.
LONG Changjiang, TAN Hequn, ZHU Ming, et al. Development of a mobile intelligent monitoring platform for livestock and poultry houses [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7): 68－75.

[57] PEREIRA W F, DA SILVA FONSECA L, PUTTI F F, et al. Environmental monitoring in a poultry farm using an instrument developed with the Internet of Things concept [J]. Computers and electronics in agriculture, 2020, 170: 105257.

[58] 崔琼, 刘勇, 徐顺来. 猪舍环境的多参数无模型自适应控制算法设计[J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(5): 702－708.
CUI Qiong, LIU Yong, XU Shunlai. Design of multi-parameter model-free adaptive control algorithm for pig house environment [J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(5): 702－708.

[59] 李嘉豪. 猪舍环境智能巡检与监控机器人系统研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022.
LI Jiahao. Research on intelligent inspection and monitoring robot system for pig house environment [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.

[60] 王恩宇, 苏永屹, 于浦, 等. 基于CFD与TRNSYS的圆形猪舍内环境控制研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2024, (10): 47－54, 112.
WANG Enyu, SU Yongyi, YU Pu, et al. Research on environmental control of circular pig houses based on CFD and TRNSYS [J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2024(10): 47－54, 112.

[61] DOERFLER R L, MARTIN R, BERNHARDT H. Implications of robotic walkway cleaning for hoof disorders in dairy cattle [J]. International Journal of Engineering Research and Application, 2017, 7(1): 98－104.

[62] 史文杰. 气液一体式猪舍消毒喷雾机的研制与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
SHI Wenjie. Development and experiment of gas-liquid integrated pig house disinfection sprayer [D]. Tai′an: Shandong Agricultural University, 2023.

[63] 樊士冉, 张志勇, 李远伟, 等. 畜牧业有限空间清洗作业机器人设计与研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2023(17): 55－60.
FAN Shiran, ZHANG Zhiyong, LI Yuanwei, et al. Design and research of limited space cleaning robot for animal husbandry [J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2023(17): 55－60.

[64] 刘凯歌. 基于DEM-CFD耦合的猪舍高压清洗机器人关键技术研究[D]. 杭州: 浙江科技大学, 2024.
LIU Kaige. Research on key technologies of pig house high pressure cleaning robot based on DEM-CFD coupling [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2024.

[65] EBERTZ P, KROMMWEH M S, BÜSCHER W. Feasibility study: improving floor cleanliness by using a robot scraper in group-housed pregnant sows and their reactions on the new device [J]. Animals, 2019, 9(4): 185.

[66] FENG Q, WANG B, ZHANG W, et al. Development and test of spraying robot for anti-epidemic and disinfection in animal housing [C]//2021 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA). IEEE, 2021: 24－29.

[67] 赵文文, 王海峰, 朱君, 等. 猪舍消杀巡检机器人系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S2): 270－277.
ZHAO Wenwen, WANG Haifeng, ZHU Jun, et al. Design and experiment of pig house disinfection inspection robot system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2022, 53(S2): 270－277.

[68] 柳忠魁. 国内外奶牛挤奶设备综述[J]. 粮油加工与食品机械, 1984(4): 1－9.
LIU Zhongkui. Overview of domestic and foreign dairy cow milking equipment [J]. Grain and Oil Processing and Food Machinery, 1984(4): 1－9.

[69] 于燚, 李鑫. 挤奶设备终端发展概况[J]. 中国奶牛, 2022(6): 38－43.
YU Yi, LI Xin. Overview of the development of milking equipment terminals [J]. China Dairy, 2022(6): 38－43.

[70] GEA. GEA DairyRobot R9500机器人挤奶系统[EB/OL]. https://www.gea.com/zh/products/milking-farming-barn/dairyrobot-automated-milking/ dairyrobot-r9500-robotic-milking-system, 2022－10－10.

[71] MILKOMAX. Milking robot-milkomax solutions laitières [EB/OL]. https://milkomax.com/en/milking-robot, 2020－01－31.

[72] 李硕. 七自由度挤奶机器人的设计与研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
LI Shuo. Design and research of seven-degree-of-freedom milking robot [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2023.

[73] 高继伟, 李彩琴, 庞建建, 等. 9JZP-80高效转盘式挤奶机的研发与应用[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2022(12): 50－55, 127－129.
GAO Jiwei, LI Caiqin, PANG Jianjian, et al. Research and development and application of 9JZP-80 high-efficiency rotary milking machine [J]. Heilongjiang Animal

Husbandry and Veterinary Medicine, 2022(12): 50－55, 127－129.

[74] CHANG C L, XIE B X, WANG C H. Visual guidance and egg collection scheme for a smart poultry robot for free-range farms [J]. Sensors, 2020, 20(22): 6624.

[75] JOFFE B P, USHER C T. Autonomous robotic system for picking up floor eggs in poultry houses [C]// 2017 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017.

[76] VROEGINDEWEIJ B A, BLAAUW S K, IJSSELMUIDEN J M M, et al. Evaluation of the performance of PoultryBot, an autonomous mobile robotic platform for poultry houses [J]. Biosystems Engineering, 2018, 174: 295－315.

[77] 苑进, 李扬, 刘雪美, 等. 禽蛋自动捡拾系统结构设计及机械手运动规划[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 48－55.
YUAN Jin, LI Yang, LIU Xuemei, et al. Structural design of automatic egg picking system and manipulator motion planning [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 48－55.

[78] 李伟, 董国忠, 周艳, 等. 浅析机器人在猪生产中的应用前景[J]. 中国畜牧杂志, 2022, 58(6): 270－273.
LI Wei, DONG Guozhong, ZHOU Yan, et al. A brief analysis of the application prospects of robots in pig production [J]. China Animal Husbandry Magazine, 2022, 58(6): 270－273.

[79] SVEAVERKEN. RoboPusher Pro [EB/OL]. https://www. sveaverken. com/products/robopusher-pro, 2024－05－31.

[80] 赵大庆, 管延华, 齐自成, 等. 生猪液态饲料智能喂料车设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(12): 91－98.
ZHAO Daqing, GUAN Yanhua, QI Zicheng, et al. Design and experiment of intelligent feeding vehicle for liquid feed of pigs [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(12): 91－98.

[81] 唐诗杰, 谷月, 李传珍, 等. 基于EDEM的笼养种鸭精准饲喂器的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(5): 269－277.
TANG Shijie, GU Yue, LI Chuanzhen, et al. Design and experiment of precision feeder for caged breeder ducks based on EDEM [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(5): 269－277.

[82] 闫银发, 刘冠鲁, 宋占华, 等. 精准配比料药一体化生猪饲喂器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(S2): 142－149.
YAN Yinfa, LIU Guanlu, SONG Zhanhua, et al. Design and experiment of pig feeder with integrated precise feed and medicine ratio [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2023, 54(S2): 142－149.

[83] 王鑫杰. 基于机器视觉的奶牛个体进食信息自动监测方法研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
WANG Xinjie. Research on automatic monitoring method of individual cow eating information based on machine vision [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.

[84] ZUIDHOF M J, FEDORAK M V, OUELLETTE C A, et al. Precision feeding: Innovative management of broiler breeder feed intake and flock uniformity [J]. Poultry Science, 2017, 96(7): 2254－2263.

[85] LELY. Lely Vector[EB/OL]. https: //www. lely. com/solutions/feeding/vector/, 2019－10－30.

[86] 李波. 基于巡检机器人的母猪体尺智能检测系统研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
LI Bo. Research on intelligent detection system of sow body size based on inspection robot [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.

[87] EDWARDS D J, AKHTAR J, RILLIE I, et al. Systematic analysis of driverless technologies [J]. Journal of Engineering, Design and Technology, 2022, 20(6): 1388－1411.

[88] KING A J, PORTUGAL S J, STRÖMBOM D, et al. Biologically inspired herding of animal groups by robots [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2023, 14(2): 478－486.

[89] PARANJAPE A A, CHUNG S J, KIM K, et al. Robotic herding of a flock of birds using an unmanned aerial vehicle [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(4): 901－915.

[90] TREVELYAN J P. Robots in the shearing shed: Automated shearing of sheep using robots [J]. Advanced Robotics, 1987, 2(1): 3－8.

[91] 田儒雅, 王红彦, 孙巍, 等. 2023中国农业科技论文与专利全球竞争力分析[J]. 农学学报, 2024, 14(3): 10－12.
TIAN Ruya, WANG Hongyan, SUN Wei, et al. Analysis on the global competitiveness of China′s agricultural science and technology papers and patents in 2023 [J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 14(3): 10－12.

[92] KBV RESEARCH. KBV reGlobal Agricultural Robots Market Size, Share & Industry Trends Analysis Report 2023－2030 [R/OL]. https://www. kbvresearch. com/agricultural-robots-market/, 2023－10.

Application and prospect of artificial intelligence in livestock and poultry farming robots

WANG Kelin[1, 2], LIU Longshen[2, 3], CHEN Jinxin[1, 2], LI Peng[2, 3], OKINDA Cedric[1, 2, 4], SHEN Mingxia[2, 3*]

(1. *College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210031, *China*; 2. *Key Laboratory of Farming Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210031, *China*; 3. *College of Artificial Intelligence, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210031, *China*; 4. *Masinde Muliro University of Science and Technology, Kakamega* 190-50100, *Kenya*)

Abstract: Chinese livestock and poultry farming sector consistently ranks among the global leaders in production volume. It not only has a comprehensive range of farming types, but also has a complete industrial chain with associated supporting infrastructure, and occupies a pivotal position in the agricultural industry. In recent years, due to the rapid development of large-scale farming, increased prevalence of animal diseases, persistent labor shortages and other factor shave intensified the demands for intelligent and automated farming equipment. Farming robots, as an important carrier for realizing intelligent agriculture, can effectively replace or assist humans in various tasks, and have great significance and broad prospects for enhancing animal welfare, improving production efficiency, and reducing pollution and waste. This article reviews the application of intelligent technologies such as image recognition, deep learning, reinforcement learning, and autonomous navigation, as well as key components such as thermal infrared cameras, depth cameras, and LiDAR in farming robots, and introduces its achievable functions such as animal physiological information detection, behavior posture recognition, environmental monitoring and control, and feed and milk management. In addition, considering that China's automated commenced development more recently, there is still a developmental gap compared to some developed countries. Therefore, this article examines the current industrial status and direction of intelligent farming robots both domestically (in China) and internationally, which includes an exploration of its development history, market prospects and policy support. This article also looks forward to the future development of the smart farming industry, points out the challenges of current technologies in terms of economy, stability, animal acceptance, etc., and proposes possible future directions and improvement goals, aiming to provide a reference for relevant researchers to further promote technological innovation and industrial applications.

Keywords: artificial intelligence; agricultural robots; smart farming; deep learning; livestock and poultry farming

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2021YFD2000800)

First Author: WANG Kelin, E-mail: 2024212017@stu.njau.edu.cn

* **Correspondence Author:** SHEN Mingxia, E-mail: mingxia@njau.edu.cn