

陆地巡检机器人关键技术及其在水产养殖中的应用前景

李道亮^{1,2,3}, 王恩培^{1,2,3}, 王柄雄^{1,2,3}, 王帅星^{1,2,3}, 索雪松⁴

(1. 国家渔业数字中心, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 3. 农业农村部智慧养殖技术重点实验室, 北京 100083; 4. 河北农业大学机电工程学院 保定 071000)

摘要: 将陆地巡检技术引入水产养殖工厂可有效解决传统养殖模式低效率、错漏检的关键问题。该文综述了陆地巡检机器人的关键技术及在水产养殖中的应用前景, 介绍陆地巡检机器人的定义及其应用发展趋势, 重点探讨陆地巡检机器人的关键技术: 包括传感器技术、机械驱动技术以及控制技术, 详细讨论这些技术的分类、应用、挑战与趋势, 进而分析水产养殖陆地巡检机器人的特定应用及技术适配, 最后根据使用环境进行水产养殖陆地巡检机器人的技术预测, 并根据未来发展挑战提出合理建议。未来水产养殖行业将向无人化巡检养殖发展, 通过多传感器实现信息交融, 通过交互平台实现远程观测控制, 以应对未来复杂水产养殖环境下的数据融合处理, 高效率高精度巡检的挑战。

关键词: 传感器; 机器人; 智慧渔业; 陆地巡检; 水产养殖

doi: [10.11975/j.issn.1002-6819.202404102](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.202404102)

中图分类号: S969.39

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-21-0001-13

李道亮, 王恩培, 王柄雄, 等. 陆地巡检机器人关键技术及其在水产养殖中的应用前景[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21):

1-13. doi: [10.11975/j.issn.1002-6819.202404102](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.202404102) <http://www.tcsae.org>

LI Daoliang, WANG Enpei, WANG Bingxiong, et al. Key technologies of land inspection robots and potential in aquaculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 1-13. (in Chinese with English abstract) doi: [10.11975/j.issn.1002-6819.202404102](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.202404102) <http://www.tcsae.org>

0 引言

随着科技的发展, 机器人技术已逐步深入各个领域, 为人们的日常生活与工作带来前所未有的便捷与高效, 该技术在水产养殖领域也具有广阔的应用前景, 如通过陆地巡检技术, 可以有效解决传统水产养殖中依赖大量人工操作的问题, 大幅降低作业成本, 提高养殖效率。李道亮教授团队分析了水下机器人-机械手系统 (underwater vehicle - manipulator system, UVMS) 捕捞作业的关键技术^[1], 讨论了水产养殖机器人的发展前景, 包括目标识别、动力学模型、定位模型和优化控制。

陆地巡检机器人具有自主导航、避障、移动等功能, 能够在各种复杂地形和多变环境中执行巡检任务。例如传统的人工电力巡检方式存在高风险、低效率、易漏检的缺点, 陆地巡检机器人可以代替人工进行线路巡检, 提高巡检效率和安全性^[2]; 在道路巡检、交通疏导等工作中, 李军等结合病害的定位计算, 将传统的人工巡检-纸质病害管理模式, 优化为机器人巡检-数字化病害管理模式^[3], 提高了巡检效率和质量; 陆地巡检机器人还被用于公共安全巡逻、消防救援工作, 李金良等运用蒙特卡洛法和 MATLAB 软件对机器人机械臂的工作空间进行仿真分析, 为管廊消防巡检机器人的控制和优化设计奠定了基础^[4]。

在水产养殖领域, 传统的养殖方式已经无法满足现代渔业的需求^[5]。陆地巡检机器人可对水产养殖工厂内的环境进行实时监测和巡检, 提高养殖效率和品质, 通过智能化管理和监测, 有效提升养殖效率和品质, 减少对环境的影响和污染。本文首先从基础概念出发, 逐步介绍陆地巡检机器人的技术架构, 最后分析和展望其在渔业当中的应用前景与挑战。

1 陆地巡检机器人技术架构

陆地巡检机器人通过信息采集、自主导航等技术进行高效的自动化巡检, 其技术架构包含信息采集, 控制下发, 数据上传与数据展示四部分。根据其应用行业与检测对象的不同, 陆地巡检机器人有些许差异, 如应用于电力行业的线路巡检机器人, 一般搭载红外热像仪和可见光摄像机, 对电力设备进行实时监测和故障诊断。QIN 等提出一种基于电缆检测机器人 CIR (cable inspection robot) LiDAR 数据的输电线路自主检测方法, 利用位置和方向系统 POS (position and orientation system) 数据进行原始点云划分、地面点过滤和结构化分区, 建立层次分类策略识别异常点的类别和位置, 在矿山活动中, 巡检机器人被用于监测矿山的各种参数, 确保采矿工作的安全和稳定运行。YOU 等提出一种低照度长期相关跟踪器 LLCT (long-term Correlation Tracker) 模型, 应用于低光照环境中的煤矿巡逻机器人^[6]。仓库、运输场所安全监测的物流巡检机器人采用红外线、摄像头等实现货物追踪, 货品安全检测。王殿君等采用悬架系统 AGV 使得物流巡检机器人在行驶过程中保持平稳, 提高了机

收稿日期: 2024-04-16 修订日期: 2024-09-26

基金项目: 国家重点研发项目 (2022YFD2001703)

作者简介: 李道亮, 教授, 博士生导师, 研究方向为渔业先进感知与智能信息处理。Email: ldliang@cau.edu.cn

机器人的运行效率和保护运输的货物^[7]。安防巡检机器人进行安保监测与消防预警,何光层等提出一种室内智能消防机器人和路径规划方法,机器人由激光雷达、移动底盘、机械臂、深度相机、热成像深度相机、灭火剂喷头和控制箱等组成,具备遥控操作、建图、自主导航、巡检和灭火等功能^[8]。图 1 所示为陆地巡检机器人主体设计实例。

图 a 为一种基于激光雷达数据的输电线路电缆巡检机器人,通过激光雷达主机与固定移动天线,满足双天线方向图的基线长度,两侧安装 PTZ 摄像机以避免干扰^[9];图 b 为 MOROZOVKY 提出的 SkySweeper 机器人,避障过程中机器人手臂通过可调节的夹具使一只手臂脱

高线,机身能够旋转整个身体越过障碍物^[10];图 c 为一种井下带式输送机维修检测机器人^[11];图 d 为攀爬机器人,根据附着和运动原理,攀爬方式可分为磁性附着机构、气动附着机构和仿生抓取夹具三种,可以在不牺牲机动性的同时附着在不同类型的墙壁和表面^[12]。陆地巡检机器人配备多种传感器,如摄像头、红外传感器、气体传感器、激光雷达等,对环境进行全面的监测和信息采集,采用惯性导航、GPS、激光雷达等导航技术实现精准的定位和导航,远程控制工厂设备实现自动化巡检,同时对收集的数据进行处理,实现故障预警、性能评估,将结果上传至云平台,并在网站或手机 APP 等前端页面展示,图 2 为陆地巡检机器人技术架构。



图 1 陆地巡检机器人主体设计实例

Fig.1 Land inspection robot main design example

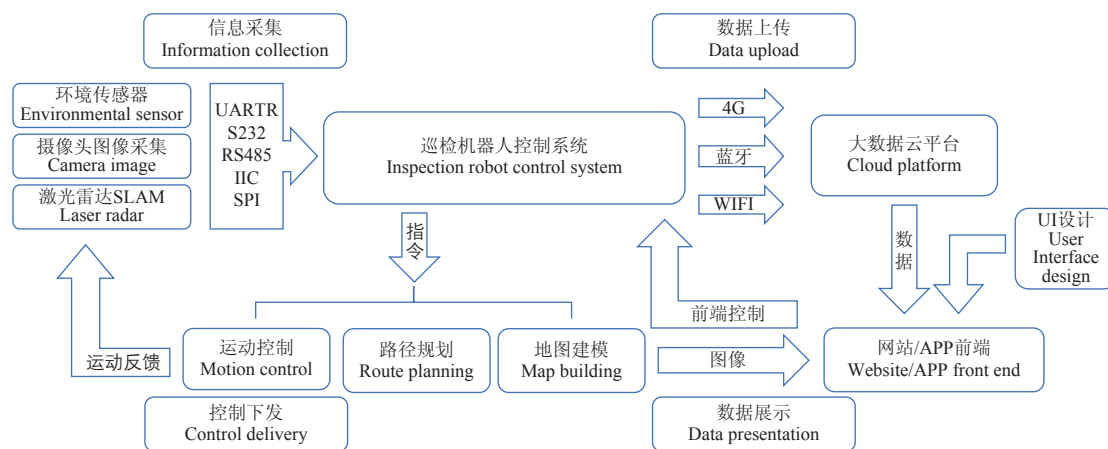


图 2 陆地巡检机器人技术架构

Fig.2 Workflow diagram of inspection robot

根据陆地巡检机器人的技术架构、应用领域及其多样性特点分析可知,陆地巡检机器人通过信息采集、自主导航等技术实现高效的自动化巡检,包括信息

采集、控制下发、数据上传与数据展示四个核心部分,依赖于多种传感器和导航技术确保精准的环境监测和定位。

2 陆地巡检机器人核心技术

2.1 传感器

陆地巡检机器人在执行各种任务时，需要感知周围环境、定位自身位置、识别目标对象等，这些功能的实现都依赖于传感器为机器人提供与外部环境交互的“感知器官”。传感器是陆地巡检机器人的重要组成部分，能够感知周围环境并获取相关信息，帮助机器人进行自主导航、避障、监测、抓取等工作。曹现刚等设计一种固定柔性轨道式悬挂巡检机器人平台，以解决煤矿井下特种巡检机器人在三维环境重建和非结构环境运动轨迹规划等关键技术，利用轨道，降低轨道铺设，为煤矿环境巡检提供新的特种巡检平台^[13]。张书亮等研究了室内移动机器人的定位问题，提出融合轮式里程计、惯性测量单元 IMU(inertial measurement unit)、超宽带 UWB(ultra wide band) 和激光雷达定位数据的方法，依次对不同传感器的定位数据进行融合，提高室内移动机器人的定位精度^[14]。梁莉娟等建立场景环境坐标系，利用传感器探测出障碍物信息，对探测到的障碍物进行定位，制定激光近场探测传感器的动态避障行为^[15]。李琳等提出基于条纹式激光传感器的机器人焊缝跟踪系统，采用机器人末端安装条纹激光传感器，通过小波变换模极大值理论分析焊缝轮廓，确定焊缝特征点^[16]。王正家等提出一种基于多传感器的机器人夹取系统，融合机器人内置传感器所测量的位置、速度和角度等信息，利用外置传感器完成对目标物的自动识别与定位^[17]。

2.1.1 传感器的使用场景及应用分类

巡检机器人能够识别并理解周围环境中的各种元素，如地形、障碍物、目标对象等，在这方面视觉传感器和红外传感器发挥着重要作用，通过深度学习算法对摄像头捕捉的图像进行处理，机器人能识别出环境中的不同物体和场景，如文献[19]展示的如何使用单目相机作为传感器的自动视觉引导驾驶的林场巡检机器人的设计、构建和实际测试情况^[18]。机器人可以通过激光雷达(LiDAR)技术实时感知周围环境，根据感知信息进行路径规划和避障，实时获取环境的详细 3D 点云数据，如沈跃等提出一种基于 LDAR/IMU 紧耦合框架的全局无偏状态估计果园机器人定位与建图模型，解决了果园环境中 GNSS 定位信号易丢失和传统 SLAM 算法鲁棒性较差的问题^[19]。

在电力巡检工作中，传感器检测线路的温度、湿度、气压等参数与线路的状态和故障情况，确定线路的健康状况，随后巡检机器人采取相应的措施进行维护和修复。在交通巡检机器人中，传感器检测道路的坑洼、裂缝、车辙等病害来帮助机器人准确感知道路状况，以对道路进行实时监测和维护^[20]。安全巡检方面，包加桐等提出在四轮移动底盘上集成多种传感器和设备，通过融合里程计和激光雷达，实现机器人的同时定位与建图，提高了高校危化品仓库的安全检查手段与应急响应能力^[21]。

图 3 是陆地巡检机器人传感器分类。

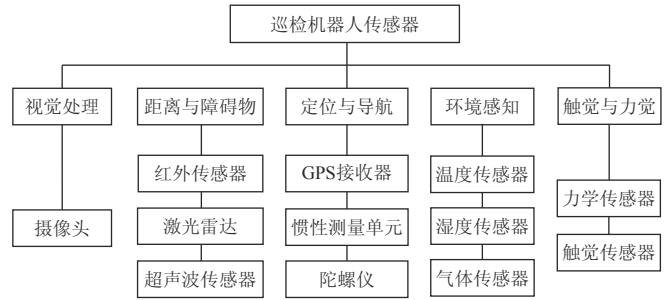


图 3 陆地巡检机器人传感器分类

Fig.3 Land inspection robot sensor classification

2.1.2 传感器技术的发展

陆地巡检机器人传感器技术面临的挑战主要有以下三个方面：首先是环境适应性，巡检机器人在各种环境中工作，如尘土，极端温湿度等，环境因素会对传感器的性能和稳定性造成影响，导致测量误差或失效。山东大学田国会等为提高机器人在不同环境下的服务任务执行能力，利用 TF-IDF 算法构建服务指令集、关键字序列集与服务策略数据集，可生成以当前环境物品信息为主导的服务策略^[22]。其次陆地巡检机器人搭载的多种传感器之间的数据存在冗余和冲突，需要进行融合处理，随着数据量的增加，如何高效实时处理数据也是一个技术难题。郭爱军等针对煤矿工作不同的巡检需求，设计多传感器融合的巡检机器人工作系统，每个单元由三个不同的传感器组成^[23]。最后是传感器自身的稳定性，传感器是巡检机器人的感知器官，其可靠性和稳定性直接关系到机器人的工作效果和安全性。

巡检机器人传感器的发展趋势较为明朗，柔性传感技术因其可拉伸性和生物相容性，在鱼类运动监测、水环境监测、水产品质量检测等方面得以应用^[24]。王文君等介绍机器学习在可穿戴智能传感系统中的应用和最新进展，以及机器学习在可穿戴传感系统中的应用前景和挑战^[25]。微型化和集成化也是陆地巡检机器人传感器的重要发展目标，将多个微型传感器集成在一个芯片或者将传感器与其他功能模块集成在一起，减小体积、重量和功耗。江朝军等成功将基于 IMU 和 UWB 技术的位姿检测方案应用于微型弹跳机器人上，提出了自复位和自主航向调节方法，平均定位误差约为 9 cm^[26]。

探索新工艺、新技术、新材料，探寻传感器微型化和集成化发展，将数据通过物联网、云计算技术与传感器技术相结合实现更高效的数据采集处理，通过将传感器数据上传到云端服务器进行分析和处理是未来陆地巡检机器人传感器发展的必由之路。

2.2 机械驱动架构及研究进展

机械驱动是陆地巡检机器人的基础，决定机器人的运动性能、负载能力以及稳定性，随着巡检任务的多样化和复杂化，对机械驱动的要求也越来越高。

2.2.1 陆地巡检机器人的机械架构

机械架构是机械驱动的核心，决定机器人的整体布局、运动方式和承载能力。机械架构方面需要考虑机器

人的尺寸、质量、稳定性、灵活性和耐用性等, 常见的机械架构包括轮式、履带式、足式等。轮式机器人移动速度快, 但在崎岖地形中通过性较差; 履带式机器人越野能力强, 但速度相对较慢; 足式机器人则能够适应更复杂的地形, 但控制难度较高。针对特定需求的陆地巡检机器人, CHABLAT 等提出一种针对管道检测机器人的机械设计优化策略, 考虑到耐腐蚀性、轻量化因素, 将机器人设计成多个动力模块, 包括后部和前部的三条

腿, 确保在所有移动阶段都能实现非超静态接触^[27]。高明建基于全驱全向方式运动的轮式机器人架构设计并实现一种面向巡检应用的运动控制系统, 通过步进电机和直流电机实现转向和移动^[28]。钟福祥等分析了交通隧道巡检机器人的运动形态和检测技术, 对比分析轮式、履带式、轨道式三类巡检机器人的适用环境和优劣势, 介绍了视觉、红外、三维激光和超声检测技术^[29], 图 4 为部分陆地巡检机器人机械结构案例。

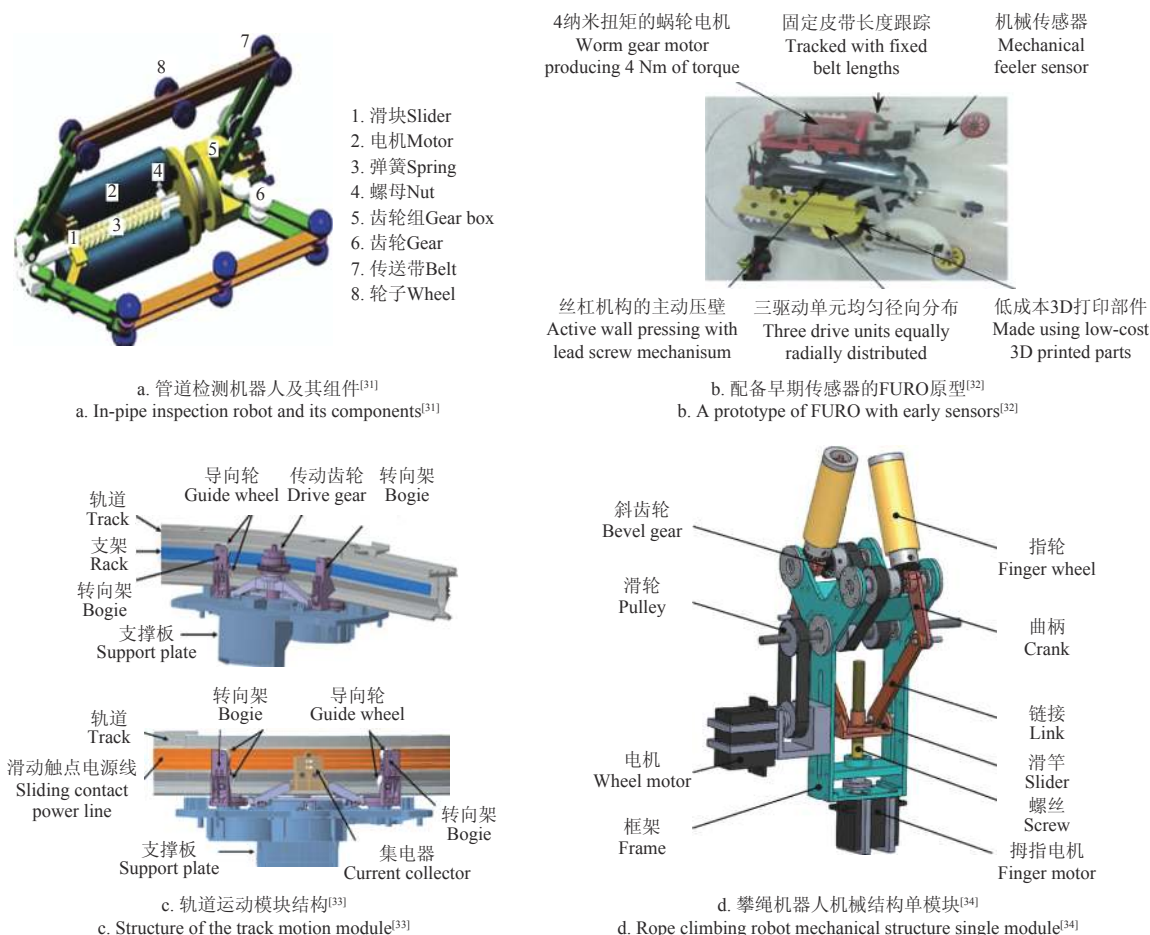


图 4 巡检机器人机械结构案例
Fig.4 Inspection robot mechanical structure case

图 a 模拟了系统在直径为 100–200 mm 的管道和直径为 150–200 mm 的弯头内移动, 保证对复杂几何形状的管道进行彻底的检测^[30]; 图 4b 展示的 FURO 模型采用了 3 个 DU, 每个 DU 能够产生 4 nm 的扭矩, 额外的有效载荷要求为 0.5 kg, 主动压壁找到管道的小半径^[31]; 图 4c 的履带运动模块由履带和水平驱动机构组成, 驱动机构两端安装转向架提供支撑和引导, 齿轮齿条驱动机器人水平运行, 齿轮由直流伺服电机驱动^[32]; 图 4d 为指轮机构模块的机械结构, 手指电机抓住绳子, 轮式电机沿着绳子移动, 适合在没有障碍物的绳索上应用^[33]。

陆地巡检机器人的机械架构设计需要综合考虑多种因素和需求, 随着技术的不断进步和创新发展, 会涌现出更多优秀且具备高度智能化与自主性的巡检机器人设计架构。

2.2.2 陆地巡检机器人的机械运动模式

陆地巡检机器人的机械运动模式是指其在执行任务时, 机械系统所采取的运动方式和策略。运动模式不仅直接影响机器人的移动速度、稳定性和通过性, 还关系到其能耗、维护和使用寿命等多个方面。以下是几种常见的陆地巡检机器人机械运动模式:

轮式运动模式是最常见的一种, 轮子作为移动部件, 通过轮子与地面的摩擦力实现前进、后退、转弯等动作, 结构简单、移动速度快、控制方便, 适用于平坦或相对平缓的地形。但在崎岖不平的地形中, 轮子的通过性会受到限制, 容易出现打滑或卡住的情况, 陈睿韵等总结了农业轮式机器人和农业环境感知技术的发展现状, 分析了主要使用的感知设备及其关键技术^[34]。履带式运动模式是通过履带与地面的接触实现移动, 具有更好的越

野能力和通过性,适应更复杂的地形,如沙地、雪地、碎石等,还能为机器人提供更大的接地面积,增加稳定性,缺点在于结构复杂、质量大、能耗高,且移动速度相对较慢。喻九阳等提出一种能够适应不同管径的履带式油气管道检测机器人,能够适应 400~600 mm 管径的油气管道,并能够在承受自重的情况下爬上 45°、90°的斜坡,具有较强适应能力与爬坡能力^[35-36]。足式运动模式模仿动物的行走方式,通过多足或双足结构实现移动,机器人能够像人或动物一样迈步行走,适应各种复杂地形,如楼梯、山地等,灵活性和通过性强,但控制难度较高,移动速度相对较慢,且在行走过程中需要考虑平衡和稳定性问题,徐宏剑^[36]基于深度强化学习的油气站场四足巡检机器人的运动控制方法,通过将机器人控制系统划分为高、中、低三个控制层级,建立单腿运动学模型,实现机器人基本行走功能和步态转换,同时将深度强化学习算法应用于机器人巡检仿真控制。

2.3 控制技术架构及进展

陆地巡检机器人控制技术中涵盖运动控制、环境感知与导航、路径规划与决策三个方面,构成巡检机器人的“大脑”和“神经系统”,使其能够在各种复杂环境中自主、智能地完成巡检。

2.3.1 陆地巡检机器人的运动控制

运动控制是指对巡检机器人的移动平台和操作机构进行精确、稳定的控制,包括速度控制、位置控制、姿态控制等。

巡检机器人在运动控制方面面临的挑战主要来自于环境的复杂性和不确定性。在崎岖不平的地形中,机器人需要保持稳定的移动速度和姿态,需要全方位讨论其运动姿态变化的原因,给出相应补偿^[37]。在执行任务时需要进行精确的定位和操作,如攀爬、越障、开关阀门等,吴显利用多传感器信息融合定位方法进行环境约束,采用扩展卡尔曼滤波实现里程计和 GNSS 融合定位^[38]。在电力或交通巡检环境中,刘志亮等引入 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 操作系统进行底层任务划分^[39],实现电力巡检机器人的精确控制;重庆交通大学公开了一种基于轨道式巡检机器人的高速公路巡检系统与识别方法的发明专利,通过铺设轨道、安装巡检机器人、定位模块和通信系统,实现对高速公路的实时监控与事故快速识别定位^[40];在安全巡检中需重点突出稳定巡逻,史聪灵等发明一种地下隧道安全巡检机器人,通过主控系统内自平衡控制和图像识别,实现机器人在巡检轨道上稳定移动、精确定位以及对隧道内水渍、裂缝等安全隐患的图像识别^[41]。

2.3.2 陆地巡检机器人的环境感知与位姿测算

环境感知与导航是陆地巡检机器人控制系统的核心组成部分,涉及到巡检机器人如何通过传感器获取并理解周围环境信息,以及如何制定移动策略,从而实现自主导航和目标追踪。

环境感知是指巡检机器人通过搭载的传感器如摄像头、激光雷达、超声波传感器等,捕捉周围环境中的各种信息,包括障碍物的位置、大小、形状,路面状况,

光照条件,通过对传感器的数据进行处理和分析,实现环境的感知和理解。LI 等基于卷积生成对抗网络和去噪的自动编码器,采用对抗性学习机制建立正常数据和异常数据之间的边界,构建了一种工业检测机器人的认知视觉异常检测方法^[42]。杨春雨等指出煤矿机器人自主运行需要环境感知技术获取工作环境信息,完成自身安全状态评估并为机器人决策规划提供基础数据^[43]。除了通过传感器直接检测周围环境,还可以利用摄像头捕捉视觉信息,周小亮研究采用 YOLOV4、Mask R-CNN 等算法在巡检机器人和采摘机器人平台上实现了对番茄果实的识别、检测与定位^[44]。但图像的获取需要保证机器人的绝对稳定运动才能保证获取的图像清晰而连续,SAKAGAMI 等开发了利用负压效应板的水下机器人,通过与水坝表面机械接触进行视觉检查,在推进器上附加负压效应板产生负压,确保机器人在水坝表面上的稳定运动,获取清晰连续的图像^[45]。当暗处或视觉受限时,巡检机器人通过超声波传感器发射超声波并监听回声来检测障碍物,张磊等对巡检机器人的位姿信息进行扩展卡尔曼滤波,结合超声波传感器的量测数据进行导航纠偏^[46]。

巡检机器人基于感知到的环境信息,结合自身的运动模型和目标位置,进行地图构建。巡检机器人通过位姿建图、定位与路径规划三个步骤进行自主导航。国内外在确定机器人自身的位置和姿态方面已提出较为前沿的研究。ALEJO 提出一种基于蒙特卡洛定位系统的全局位姿估计方法,融合车轮和 RGB-D 里程计数据进行预测,利用下水道网络的先验信息(拓扑结构、不同横截面和元素位置等)来排除错误的假设^[47]。同时巡检机器人还需要考虑自身的运动约束,如最大速度、加速度和转向角度等,从而确保规划的路径是可执行,哈张震研究了非完整约束移动机器人在复杂工业环境中的运动规划与跟踪控制技术,针对全局规划设计自主导航系统,并通过试验验证所设计跟踪控制器和局部规划器的优越性^[48]。

2.3.3 陆地巡检机器人的路径规划与决策

路径规划与决策是控制的最后一个步骤,构建地图是路径规划的前提,在导航过程中巡检机器人需要不断更新环境地图,根据实时环境变化调整路径。LIN 等分析了基于相对位置和速度的有源滤波器的避碰失效和轨迹振荡问题,利用 Bug2 的 m 线对轨迹进行优化,避免轨迹围绕障碍物^[49]。构建地图后需要使用各种算法实现路径规划,如基于规则的路径规划算法根据预定义的规则和参数规划机器人的路径;基于搜索的路径规划算法通过搜索寻找最优的路径;基于学习的路径规划算法通过学习优化机器人的路径。接着实现机器人的决策,如基于规则的决策算法根据预定义的规则和参数实现机器人的决策;基于学习的决策算法通过学习优化机器人的决策。BANSAL 等讨论在数字化双胞胎环境中,应用蚁群优化算法使其在包含必须避开的障碍物的环境中避开障碍物,找到在装配任务中拾取和放置物体的路径^[50]。张振乾等提出了一种基于双目视觉的香蕉园巡检路径提

取方法,通过双目相机获取目标前方点云,采用改进 K-means 算法将道路两侧香蕉树分离,提取中间线作为期望导航路径^[51]。李彬彬为避免计算过程陷入局部最小值等问题,在运动估计与优化部分中采用 RANSAC 与 GICP 算法相结合的方法^[52]。在农业机械模型导航技术中,史扬杰等根据其导航追踪控制方法进行分类,解析各类控制方法的优缺点,根据现有解决方案考察农机导航领域的发展现状^[53]。表 1 为当前陆地巡检机器人主流路径规划算法的分类。

陆地巡检机器人的控制技术架构涵盖多个方面,控制技术作为陆地巡检机器人的核心技术,包括运动控制、

环境感知与导航以及路径规划与决策,确保机器人在复杂环境中能够自主、智能的完成巡检任务,通过算法和传感器融合进行运动控制,以适应各种地形和环境条件稳定高效的移动,行动过程中根据实时环境信息进行路径规划,获取并理解周围环境信息,实现自主导航和目标追踪。未来通过优化控制算法、改进硬件设计与开发适合特定应用场景的控制策略,在复杂环境中保持机器人的稳定性和精确性,实现高效精准的运动控制,提高感知精度,处理复杂环境,提高路径规划效率、优化决策算法,实现多机器人协同巡检。

表 1 陆地巡检机器人路径规划算法分类
Table 1 Path planning algorithm classification of land inspection robot

分类 Sort	路径规划算法 Path planning algorithm	应用实例 Application example	优点 Advantage	参考文献 Reference
基于规则的路径规划 Rule-based path planning	A*算法	煤矿救援	改善路径冗余点转折角	[54]
	Dijkstra 算法	水下机器人	解析规划空间环境信息	[55]
基于采样的路径规划 Sample-based path planning	概率路图 (PRM)	狭窄通道机器人	提高节点环境适应性	[56]
	快速扩展随机树 (RRT)	多机器人	加快算法收敛时间	[57]
智能仿生路径规划 Intelligent bionic path planning	蚁群算法	水下	去除规划路径冗余节点	[58]
	遗传算法	电力巡检	删除巡检环境冗余路径	[59]
基于学习的路径规划 Learning based path planning	强化学习	采摘机器人	引导机器人快速到达	[60]
组合优化的路径规划 Combinatorial optimization path planning	Voronoi 图	移动机器人	对离散点分段插补	[61]

3 水产养殖中陆地巡检机器人的特定应用与技术调整

3.1 水产养殖环境对陆地巡检机器人的特殊需求

水产养殖陆地巡检机器人相较于其他环境下的巡检机器人(电力巡检机器人、矿山巡检机器人或交通巡检机器人等)具有明显差异。结构上以履带式为主,使用防水防腐材料,使其能在潮湿环境中稳定运行,在复杂的地形里越障避障。其他环境下的陆地巡检机器人根据实际应用侧重不同方向,如电力线路巡检机器人注重与待测物体紧密链接,矿山陆地巡检机器人注重防爆性能等;检测方面,水产养殖陆地巡检机器人通过水质传感器监测水中的溶解氧、pH 值、氨氮等关键水质、参数,搭配摄像机实时读取鱼类活动状态,行为轨迹等生物指标,其他环境下的巡检机器人则注重使用红外传感器、气体传感器等检测温度和热分布与特定气体,使用摄像头检查设备的物理状态,且因受水纹波动干扰,光照散射干扰,浑浊程度等诸多因素干扰,水产养殖陆地巡检机器人的视觉分析能力的要求相比于其他环境更高。

因此水产养殖陆地巡检机器人必须具备防水防潮性能,防止水分渗透导致内部电路受损,且考虑到环境中可能存在的腐蚀性气体(氨气、硫化氢等)和化学物质(消毒剂、饲料残留物等)^[62],机器人的外壳材料需要具备耐腐蚀性,同时为保障养殖环境的健康与安全,巡检机器人所配备的传感器需具有较高精度。鉴于养殖池塘与养殖工厂的规模较大,巡检机器人还需具备长时间续航能力,支持其进行大范围的巡检工作,同时考虑到环境的特殊性,机器人的设计应便于清洁和维护,防止

杂物附着。

水产养殖陆地巡检机器人还应具备实时通信能力,确保对潜在问题的迅速响应和处理,机器人需要能够实时监测数据,分析各项指标,及时发现可能影响鱼类正常活动的因素,并将分析结果与警报信息迅速传输给养殖管理人员,同时机器人还应能接受远程指令进行及时调整。

3.2 陆地巡检机器人在水产养殖中的技术适配

3.2.1 传感器技术适配

水产养殖环境下的陆地巡检机器人的传感器技术需要精准适配,以满足实际监测和管理的需求,传感器技术直接关系到鱼类是否能够拥有准确、高效地监测养殖环境,以下将从环境、设备故障检测以及视觉传感器三个方面,结合水产养殖的实际情况进行详细讨论:

环境传感器:水质是影响鱼类健康生长的关键因素,水产养殖陆地巡检机器人传感器需要能够实时监测和记录影响鱼类生长的,水温^[63]、pH 值^[64]、溶解氧^[65]、氨氮^[66]、亚硝酸盐^[67]等关键水质指标,除水质因素外,空气中的氧气、二氧化碳及有害气体如硫化氢、氨气的浓度也需要监控,有害气体的浓度直接影响水生生物的呼吸和生长。

设备故障检测传感器:设备运行状态需要进行实时监测,如增氧泵管道堵塞或泄漏会导致水中溶解氧下降,造成氧气供应不足;循环水泵停止工作或流量不足,影响水体的循环和过滤效果;过滤器堵塞或损坏,无法有效去除水中的杂质和有害物质。以上设备,其运行状态直接关系到水生生物的存活,巡检机器人应配备能够实

时监测设备工作状态的传感器,检测设备电流、电压、功率等参数,通过传感器收集的数据,分析并识别出各设备可能出现的异常情况,如过滤器堵塞、压缩机故障等,并及时发出预警,通过与云平台连接,实现远程故障诊断和修复指导。

视觉传感器:巡检机器人所携带的视觉传感器应具有较高的分辨率,保证在水体环境下清晰捕捉鱼类图像,同时摄像头需具有高分辨率和快速拍摄能力,以便短时间内准确的捕捉到鱼运动过程中的具体情况,通过实时分析捕捉到的图像迅速判断出死鱼的存在,并及时发出警报。

3.2.2 机械驱动技术适配

在水产养殖陆地巡检机器人的机械驱动技术适配是确保其有效运行的关键,对于相对平坦且较为干燥的养殖场地,轮式驱动结构简单、效率高、移动速度快。而在泥泞或湿滑的地面上,轮式驱动的抓地力减弱,履带式驱动可以提供更好的稳定性和抓地力,减少机器人在复杂地形中陷入困境的风险,对于需要跨越障碍物或在非结构化环境中巡检的场景,腿式或足式驱动,具有较高的地形适应性。

针对于渔业养殖工厂或渔业养殖池塘,巡检机器人应采用宽大的底盘以增加与地面的接触面面积,底盘应采用防水防滑材料制成,确保在湿滑地面上保持稳定,防止水分和腐蚀性物质对机器人内部组件造成损害,同时需要配备弹簧悬挂或液压悬挂,结合实地渔业养殖环境调节悬挂系统的刚度和阻尼,以达到最佳的减震效果^[68]。在机器人的关节部位(机械臂连接处、电机安装座等)使用橡胶、硅胶等弹性材料作为缓冲垫,减少震动对机器人内部组件的影响^[69]。

根据实际巡检场地选择相应的电力系统,保证巡检机器人大面积巡检场景下足够的能源供应,需要选择高能量密度、长寿命电池组,选择磷酸铁锂可充电电池或镍氢可充电电池作为电源,选择步进电机以提供精确的位置控制和较高的扭矩,选择与电机相匹配的减速器^[70],降低电机的转速,增加扭矩输出,以适应不同地形和负载条件。

3.2.3 控制技术适配

针对渔业养殖工厂和渔业养殖池塘的特定环境,巡检机器人需要进行精准导航以完成巡检工作,SLAM(simultaneous localization and mapping)技术是实现自主导航的基础,机器人可以结合激光雷达实时构建环境地图并定位自身位置,基于构建的地图,需要能够规划出最优的巡检路径,巡检机器人运行过程中要预防碰撞,当前方遇到工作人员或鱼缸时,能够紧急停车重新规划路线,确保养殖环境的安全。

巡检机器人通过无线通信技术与水产养殖前端大平台和后端数据库保持实时连接,将传感器实时监测的水质、水温、氧气浓度等关键指标实时上传,同时数据在手机 APP 端展示以便远程监控和操作,当监测数据超出安全范围时,系统会自动发出报警信息,通过短信、邮

件等方式通知管理人员,且管理人员可以随时查看历史数据和当前数据,以便分析问题并做出调整,机器人能够准确接收并执行来自控制中心的指令,改变巡检路线、调整传感器参数等。

能源管理与节能控制也是水产养殖巡检机器人所必须考虑的,巡检机器人的控制技术需要实现高效的能源管理策略^[71],以延长机器人的续航时间,实时监测机器人的电池电量,并在电量不足时发出预警,以确保机器人能够顺利完成巡检任务。

4 陆地巡检机器人在水产养殖中的应用前景展望

陆地巡检机器人已经在各个领域得到广泛应用,尤其在渔业中的应用逐渐显现出其巨大的潜力和价值,渔业作为一个传统且重要的行业,正面临着转型升级和智能化改造的需求,陆地巡检机器人有望成为推动这一变革的重要力量。渔业养殖工厂和养殖池塘是两种不同的养殖方式,存在较大区别^[72]。图 5 为渔业养殖工厂与养殖池塘案例。



图 5 渔业养殖工厂与渔业养殖池塘案例

Fig.5 Cases of fish farming plants and fish farming ponds

4.1 陆地巡检机器人技术在水产养殖中的应用挑战

陆地巡检机器人在水产养殖中的应用虽然具有广阔的前景,但在实际发展过程中也面临着诸多技术挑战:

环境适应性:无论是养殖工厂或是渔业养殖池塘,环境湿度高、地形复杂,存在大量水源和生物,对巡检机器人的防水性、耐腐蚀性和越障避障能力要求较高。

图像采集:水面会反射阳光或其他光源,造成图像中出现过亮的光斑或反光区域,降低图像的对比度,遮盖住鱼类的部分特征,水面上的波纹和涟漪会导致图像扭曲、模糊或产生重影。在水下环境中,聚集在一起的鱼群会导致多条鱼重叠或相互遮挡,使得单只鱼类特征被掩盖,同时水下环境的能见度受到水质的影响,如果水质浑浊含有大量泥沙、微生物或其他悬浮物,采集的图像会模糊不清,同时随着水深的增加,光线还会逐渐衰减,光线会在水下发生散射导致图像色彩失真^[73],导致采集图像质量下降,从而无法对鱼类进行准确的识别和计数。

数据采集处理:水产养殖过程中产生的数据量巨大,包括水质数据与生物数据,要求陆地巡检机器人不仅要搭载高精度传感器,还要考虑如何有效地收集、传输、存储和分析数据。

续航能力:水产养殖陆地巡检机器人依赖电池作为

动力源,在水产养殖环境下,高温高湿腐蚀性因素对电池性能有影响,同时渔业养殖工厂或是渔业养殖池塘在夜间需要机器人进行长时间的连续巡检,所需要的续航时间长,电池容量大,但大电池容量反而也会增加机器人的重量和体积,导致电能消耗较大,因此水产养殖陆地巡检机器人的能源续航是一个重要挑战。

4.2 陆地巡检机器人在不同水产养殖环境中的预测

4.2.1 养殖工厂模式应用

渔业养殖工厂通过使用循环水系统、自动化喂食和监控设备等现代技术手段,实现对水质、温度、光照等养殖条件的精确控制,环境可控性高,受外界天气影响较小,能够保持全年生产^[74],采用闭合式的循环水系统,从底部排出的水经过净化处理后再排回鱼池重复利用。但养殖工厂对水质有严格要求,同时工厂数据种类多样,采集困难,管理不便。陆地巡检机器人可采用一系列技术满足这些需求。

首先是环境感知与鱼类行为监测方面,养殖工厂对水质有极高的要求,因此陆地巡检机器人需要配备高标准水质检测传感器,实时监测水中的溶解氧、氨氮、亚硝酸盐、PH 值等关键指标,通过数据收集和分析,迅速识别水质异常,确保水质始终维持在鱼类生长的最佳状态,结合深度学习算法精确分析监测鱼类行为,为养殖者提供即时鱼类健康信息。

其次为数据处理与决策支持方面,陆地巡检机器人可以利用 SLAM 雷达技术实现在工厂内的精准定位^[75],通过融合激光雷达与摄像头实时构建更新环境地图,确保机器人在复杂环境中能够准确感知自身位置。同时机器人需集成强大的数据处理系统,实时采集和分析养殖工厂的各项数据,为养殖人员提供智能决策支持,优化饲料投放计划,预测疾病发生的可能性。

最后在远程监控与管理方面,陆地巡检机器人将与养殖工厂的远程监控系统无缝对接,通过无线网络实时传输数据和视频信息,养殖人员能够随时随地通过手机或电脑查看养殖工厂的运行状况,及时发现并解决问题,显著降低人工巡检成本,提高管理效率和安全性。

4.2.2 渔业养殖池塘模式应用

渔业养殖池塘大多是人工修造的,虽然也可以对水温、水质进行一定程度的调控,但相比工厂化养殖,其环境控制能力较弱,受自然环境影响较大,因此对陆地巡检机器人的要求更高。

与渔业养殖工厂不同,渔业养殖池塘的环境更为开放和多变,陆地巡检机器人需要配备微型气象站以及能够全天候工作的传感器,气象站需要预测将来一段时间内的天气情况^[76],确保在各种天气条件下都能准确监测水质和环境参数,特别要注意防雨防尘性能,因露天工作,会遭受暴雨或风沙等极端天气影响,需要在恶劣的天气下预警躲避。同时由于池塘面积较大且环境开放,需要准确定位确保以便正确导航,如使用 GPS 和北斗定位技术为机器人提供精确的位置信息^[77],或基于 GEE 技术进行遥感定位^[78]。此外池塘周边较为空旷,巡检机器

人需要具备可靠的远距离无线通讯能力,确保与中央控制系统或养殖管理人员的实时数据交换。

4.3 水产养殖陆地巡检机器人的发展建议

基于上述水产养殖陆地巡检机器人技术挑战与应用环境分析,提出以下发展建议:

1) 增强环境适应性设计:针对水产养殖环境的特殊性,加强水产养殖陆地巡检机器人的防水、防腐蚀设计,提高其在复杂地形、高湿度环境中的稳定性和耐久性,优化越障避障算法,确保机器人在各种复杂地形中顺畅巡检。

2) 提升图像采集与处理能力:针对水面反射、水下浑浊等图像采集难题,采用更先进的图像处理技术,如使用偏光镜头、图像增强^[79]算法等提高图像质量,利用深度学习等技术提升鱼类识别和计数的准确性^[80]。

3) 搭建数据处理云平台:强化数据采集与分析系统,将传感器采集的数据上传至云平台,由后端服务器进行数据处理与分析,历史数据存储,构建高效的数据传输、存储和分析系统,为养殖管理提供实时、准确的数据支持,帮助养殖者做出科学决策。

4) 优化续航方案:研发高能量密度、长寿命的电池,降低水产养殖陆地巡检机器人的能源消耗,同时探索自动充电技术,使巡检机器人自检电量,在电量不足时,通过自动充电桩补充电量。

5) 上位机可视化界面:设计并优化水巡检机器人的用户界面,使养殖者可以直观观察到检测区域内的各项指标以及鱼类活动情况,充分利用巡检机器人提高养殖效率和管理水平。

5 结 语

陆地巡检机器人技术在传感器技术、机械驱动技术以及控制技术等领域展现显著的优势,这些技术的发展为陆地巡检机器人在渔业领域的应用提供了坚实的基础,展现出巨大的应用潜力和价值。陆地巡检机器人在水产养殖工厂内具有广泛的应用前景,能够发挥无人巡检的重要作用,提高水产养殖的效率和安全性。

渔业养殖的规模化、集约化发展势必会导致水产养殖工厂内的环境监控、设备巡检等任务日益繁重。陆地巡检机器人作为一种新型的智能巡检工具,搭载各种传感器,实现环境参数的实时采集和传输,为养殖人员提供准确、及时的数据支持。同时陆地巡检机器人代替人工进行设备巡检,提高巡检效率和质量,及时发现并处理设备故障,确保设备的正常运行,排查工厂内的安全隐患,实现工厂的安全监控和预警,实现这些目标需要在传感器技术、机械设计与控制系统方面进行更多的研究和探索。

未来陆地巡检机器人在渔业中的应用前景广阔且充满机遇,虽然目前还面临许多挑战,但其在提高生产效率、降低劳动成本以及增强渔业安全管理等方面所展现出的巨大潜力,使得这一技术将在未来的渔业发展中发挥越来越重要的作用,通过克服现有挑战并持续推动技

术创新与发展, 相信陆地巡检机器人将为水产养殖带来更加智能化、高效化的变革。

【参 考 文 献】

- [1] 李道亮, 包建华. 水产养殖水下作业机器人关键技术研究进展[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(16): 1-9.
LI Daoliang, BAO Jianhua. Research progress on key technologies of underwater operation robot for aquaculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(16): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [2] 毛建旭, 贺振宇, 王耀南, 等. 电力巡检机器人路径规划技术及应用综述[J]. *控制与决策*, 2023, 38(11): 3009-3024.
MAO Jianxu, HE Zhenyu, WANG Yaonan, et al. Review of research and applications on path planning technology for power inspection robots[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(11): 3009-3024. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李军, 周航, 陈昌邦, 等. 一种城市轨道交通工务综合巡检机器人的设计及应用[J]. *城市轨道交通研究*, 2023, 26(6): 220-224.
LI Jun, ZHOU Hang, CHEN Changbang, et al. Design and application of comprehensive inspection robot for urban rail transit track work[J]. *Urban Mass Transit*, 2023, 26(6): 220-224. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李金良, 芦伟, 宗成国, 等. 管廊消防巡检机器人设计与分析[J]. *机床与液压*, 2021, 49(11): 7-11
LI Jinliang, LU Wei, ZONG Chengguo, et al. Design and analysis of fire inspection robot for pipe gallery[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021, 49(11): 7-11(in Chinese with English abstract)
- [5] 莽琦, 徐钢春, 朱健, 等. 中国水产养殖发展现状与前景展望[J]. *渔业现代化*, 2022, 49(2): 1-9.
MANG Qi, XU Gangchun, ZHU Jian, et al. Developmental status and prospective vision for China's aquaculture[J]. *Fishery Modernization*, 2022, 49(2): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [6] YOU Z, ZHU H, LI G, et al. Tracking system of Mine Patrol Robot for Low Illumination Environment[J]. *ArXiv*. 2019. 1907.01806.
- [7] 王殿君, 朱亚东, 陈亚, 等. 物流 AGV 机器人悬架系统优化设计与平顺性研究[J]. *制造业自动化*, 2023, 45(9): 139-143.
- [8] 何光层, 常景, 杨竣皓, 等. 室内智能消防机器人设计与路径规划研究[J]. *消防科学与技术*, 2022, 41(2): 237-241
HE Guangceng, CHANG Jing, YANG Junhao, et al. Research on design and path planning of indoor intelligent fire-fighting robot[J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(2): 237-241 (in Chinese with English abstract)
- [9] QIN Y, WU P, JIN L, et al. A novel method of autonomous inspection for transmission line based on cable inspection robot liDAR data[J]. *Sensors*, 2018, 18(2.0): 596.
- [10] ALHASSAN A B, ZHANG X, SHEN H, et al. Power transmission line inspection robots: A review, trends and challenges for future research[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 118C: 11-19.
- [11] SZREK J, WODECJI J, BAEJ R, et al. An inspection robot for belt conveyor maintenance in underground mine-infrared thermography for overheated idlers Detection[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(14): 4984.
- [12] YU L, YANG E, REN P, et al. Inspection robots in oil and gas industry: A review of current solutions and future trends[C]. 2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC), Lancaster, UK, 2019: 1-6.
- [13] 曹现刚, 许罡, 吴旭东, 等. 柔性轨道式环境巡检机器人设计原理与试验[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(6): 303-312.
CAO Xiangang, XU Gang, WU Xudong, et al. Design principles and experiments of flexible track-type environmental inspection robot[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 303-312. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张书亮, 谭向全, 吴清文. 基于多传感器融合技术的室内移动机器人定位研究[J]. *传感器与微系统*, 2021, 40(8): 53-56.
ZHANG Shuliang, TAN Xiangquan, WU Qingwen. Indoor mobile robot localization based on multi-sensor fusion technology[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2021, 40(8): 53-56. (in Chinese with English abstract)
- [15] 梁莉娟, 赵庆, 张琰. 激光近场探测传感器在机器人动态避障中的应用[J]. *激光杂志*, 2023, 44(6): 204-208.
LIANG Lijuan, ZHAO Qing, ZHANG Yan. Application of laser near-field detection sensor in robot dynamic obstacle avoidance[J]. *Laser Journal*, 2023, 44(6): 204-208. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李琳, 林炳强, 邹焱飏. 基于条纹式激光传感器的机器人焊缝跟踪系统研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 34-41.
LI Lin, LIN Bingqiang, ZOU Yanbiao. Study on seam tracking system based on stripe type laser sensor and welding robot[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 34-41. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王正家, 曾雨晴, 徐欣犀, 等. 基于多传感器的机器人夹取系统研究[J]. *机床与液压*, 2023, 51(11): 27-33.
WANG Zhengjia, ZENG Yuqing, XU Xinxi, et al. Research on robot gripping system based on multi-sensor[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2023, 51(11): 27-33. (in Chinese with English abstract)
- [18] 林甄, 李睿伟, 谢金冶, 等. 视觉神经网络林场巡检机器人的设计与开发[J]. *东北林业大学学报*, 2023, 51(8): 127-135, 139.
LIN Zhen, LI Ruiwei, XIE Jinye, et al. Design and development of forest farm inspection robot using visual neural network[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, 51(8): 127-135, 139. (in Chinese with English abstract)
- [19] 沈跃, 肖鑫桦, 刘慧, 等. 果园机器人 LiDAR/IMU 紧耦合实时定位与建图方法[J]. *农业机械学报*, 2023, 54 (11): 20-28, 48.
SHEN Yue, XIAO Xinhua, LIU Hui, et al. Real-time

- localization and mapping method for agricultural robot in orchards based on LiDAR/IMU tight-coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 20-28, 48. (in Chinese with English abstract)
- [20] 祝瑞祥, 裴轩, 侯涛刚. 轨道交通机器人应用研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(10): 43-61.
- ZHU Ruixiang, PEI Xuan, HOU Taogang. Advances in the application research of rail transit robots[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(10): 43-61. (in Chinese with English abstract)
- [21] 包加桐, 丁豪, 王国田, 等. 危化品仓库安全巡检机器人系统设计与实验研究[J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2021, 13(3): 311-319.
- BAO Jiatong, DING Hao, WANG Guotian, et al. Design of a patrol robot system for safety inspection in hazardous chemical warehouse[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2021, 13(3): 311-319. (in Chinese with English abstract)
- [22] 田国会, 陈浩然, 张梦洋, 等. 面向环境适应性的机器人服务策略生成方法[J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2023, 51(2): 102-108.
- TIAN Guohui, CHEN Haoran, ZHANG Mengyang, et al. Environment-adaptive service strategy generation method for robot[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2023, 51(2): 102-108. (in Chinese with English abstract)
- [23] 郭爱军, 赵明辉. 多传感器融合的巡检机器人系统研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(12): 233-235.
- GUO Aijun, ZHAO Minghui. Research on multi-sensor fusion inspection robot system[J]. Coal Technology, 2023, 42(12): 233-235. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李道亮, 王帅星, 王聪. 柔性可穿戴传感技术在智慧渔业中的应用进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(13): 1-13
- LI Daoliang, WANG Shuaxing, WANG Cong. Application of flexible wearable sensing technology in smart fishery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(13): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王文君, 郑丽敏, 程泓宇, 等. 机器学习在可穿戴智能传感系统中的应用与进展[J]. 科学通报, 2023, 68(34): 4630-4641.
- WANG Wenjun, ZHENG Limin, CHENG Hongyu, et al. Applications and progress of machine learning in wearable intelligent sensing systems[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(34): 4630-4641. (in Chinese with English abstract)
- [26] 江朝军, 倪江生, 张军, 等. 基于 IMU 及 UWB 的微型弹跳机器人传感器节点位姿检测研究[J]. 传感技术学报, 2021, 34(8): 1123-1130
- JIANG Chaojun, NI Jiangsheng, ZHANG Jun, et al. Research on pose detection of miniature jumping robot sensor nodes based on IMU and UWB[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(8): 1123-1130. (in Chinese with English abstract)
- [27] CHABLAT D, SWAMINATH V, BOYER F. Mechanical design optimization of a piping inspection robot[J]. Procedia CIRP, 2018, 70: 307-312.
- [28] 高明建. 面向巡检应用的全向轮式机器人的运动控制系统设计与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016
- GAO Mingjian. Motion Control System Design and Dimplementation of Omni-Directional Wheeled Robot for Inspection on Application[D]. Beijing: College of Engineering Sciences University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [29] 钟福祥, 吕鑒栋, 黄肖君, 等. 交通隧道巡检机器人运动形态及检测技术综述[J]. 中阿科技论坛 (中英文), 2023(12): 97-101.
- ZHONG Fuxiang, LV Liudong, HUANG Xiaojun, et al. Research on motion morphology and detection technology of tunnel inspection robot[J]. China-Arab States Science and Technology, 2023(12): 97-101. (in Chinese with English abstract)
- [30] MOHD R, YAKUB M, SALIM S, et al. Modeling of the in-pipe inspection robot: A comprehensive review[J]. Ocean Engineering, 2020, 203: 107206.
- [31] BROWN L, CARRASCO J, WATSON S, et al. Elbow detection in pipes for autonomous navigation of inspection robots[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2018, 95(2): 527-541.
- [32] CHENG M, XIANG D. The design and application of a track-type autonomous inspection robot for electrical distribution room[J]. Robotica, 2020, 38(2): 185.0-206.0.
- [33] YU S, YE C, TAO G, et al. Design and analysis of a modular rope-climbing robot with the finger-wheeled mechanism[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(5): 2197-2207.
- [34] 陈睿韵, 田文斌, 鲍海波, 等. 农业轮式机器人三维环境感知技术研究进展[J]. 智慧农业 (中英文), 2023, 5(4): 16-32.
- CHEN Ruiyun, TIAN Wenbin, BAO Haibo, et al. Three-dimensional environment perception technology for agricultural wheeled robots: A review[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(4): 16-32. (in Chinese with English abstract)
- [35] 喻九阳, 张德安, 戴耀南, 等. 履带式油气管道巡检机器人爬坡特性分析[J]. 机床与液压, 2023, 51(15): 57-61.
- YU Jiuyang, ZHANG De'an, DAI Yaonan, et al. Climbing Characteristic Analysis of Crawler Oil and Gas Pipeline Inspection Robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(15): 57-61.
- [36] 徐宏剑. 基于深度强化学习的油气站场四足巡检机器人运动控制[D]. 北京: 中国石油大学, 2022
- XU Hongjian. Motion Control of Quadruped Inspection Robot in Oil and Gas Pipeline Station Based on Deep Reinforcement Learning[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2022.
- [37] 赵言正, 门广亮, 冯海, 等. 全方位壁面移动机器人姿态控制的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(6): 116-188, 122.
- ZHAO Yanzheng, MEN Guangliang, FENG Hai, et al. A study on posture control of wall climbing robots with all-directional wheels[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1997,

- 29(6): 116-188, 122.
- [38] 吴显. 基于多传感器信息融合的移动机器人定位方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- WU Xian. Research on Localization Method of Mobile Robots Based on Multi-Sensor Data Fusion[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [39] 刘志亮, 赵锋, 张彦斌. 地面电力巡检机器人控制系统设计与实现[J]. *电网与清洁能源*, 2018, 34(4): 10-14.
- LIU Zhiliang, ZHAO Feng, ZHANG Yanbin. Design and Implementation of Control System for Ground Electric Inspection Robot[J]. *Power System and Clean Energy*, 2018, 34(4): 10-14. (in Chinese with English abstract)
- [40] 重庆交通大学. 基于轨道式巡检机器人的高速公路巡检系统与方法: CN201910473162. X[P]. 2020-08-04.
- [41] 史聪灵, 车洪磊, 胡鹄, 等. 一种地下隧道安全巡检机器人: CN201811158110.5[P]. 2024-06-25.
- [42] LI J, XU X, GAO L, et al. Cognitive visual anomaly detection with constrained latent representations for industrial inspection robot[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 95: 106539.
- [43] 杨春雨, 张鑫. 煤矿机器人环境感知与路径规划关键技术[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2844-2872.
- YANG Chunyu, ZHANG Xin. Key technologies of coal mine robots for environment perception and path planning[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2844-2872. (in Chinese with English abstract)
- [44] 周小亮. 基于机器视觉的温室番茄果实巡检识别和特征检测方法研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2023.
- ZHOU Xiaoliang. Research on Recognition and Feature Detection of Greenhouse Tomato Fruit Inspection Based on Machine Vision[D]. Suzhou: Suzhou University, 2023.
- [45] SAKAGAMI N, YUMOTO Y, TAKEBAYASHI T, et al. Development of dam inspection robot with negative pressure effect plate[J]. *Journal of field robotics*, 2019, 36(8): 1422-1435.
- [46] 张磊, 刘义亭, 陈光明, 等. 基于超声波传感器的巡检机器人导航纠偏研究[J]. *智能化农业装备学报 (中英文)*, 2022, 3(2): 64-70.
- ZHANG Lei, LIU Yiting, CHEN Guangming, et al. Research on navigation and rectification of inspection robot based on ultrasonic sensor[J]. *Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English)*, 2022, 3(2): 64-70. (in Chinese with English abstract)
- [47] ALEJO D, CABALLERO F, MERINO L. A Robust Localization System for Inspection Robots in Sewer Networks[J]. *Sensors*, 2019, 19(22): 4946.
- [48] 张震. 非完整约束移动机器人的运动规划与跟踪控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- ZHANG Zhen. Research on Motion Planning and Tracking Control Technology of Nonholonomic Constrained Mobile Robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [49] LIN X, YU Y J, CHEN S Z, et al. An improved APF method for complex and dynamic obstacles' avoidance[J]. *Unmanned Systems*, 2023, 11(2): 175-189.
- [50] BANSAL R, KHANESAR M A, BRANSON D. Ant Colony Optimization Algorithm for Industrial Robot Programming in a Digital Twin[C]. *International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Lancaster, 2019.
- [51] 张振乾, 李世超, 李晨阳, 等. 基于双目视觉的香蕉园巡检机器人导航路径提取方法[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(21): 9-15.
- ZHANG Zhenqian, LI Shichao, LI Chenyang, et al. Navigation path detection method for a banana orchard inspection robot based on binocular vision[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(21): 9-15. (in Chinese with English abstract)
- [52] 李彬彬. 基于视觉电力巡检机器人导航系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- LI Binbin. Design and Implementation of Vision-Based Power Inspection Robot Navigation System[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2018.
- [53] 史扬杰, 程馨慧, 奚小波, 等. 农业机械导航路径跟踪控制方法研究进展[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(15): 1-14.
- SHI Yangjie, CHENG Xinhui, XI Xiaobo, et al. Research progress on the path tracking control methods for agricultural machinery navigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(15): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [54] 张伟民, 张月, 张辉. 基于改进 A* 算法的煤矿救援机器人路径规划[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(12): 185-193.
- ZHANG Weimin, ZHANG Yue, ZHANG Hui. Path planning of coal mine rescue robot based on improved A* algorithm[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 185-193. (in Chinese with English abstract)
- [55] 车建涛, 高方玉, 解玉文, 等. 基于 Dijkstra 算法的水下机器人路径规划[J]. *机械设计与研究*, 2020, 36(1): 44-49.
- CHE Jiantao, GAO Fangyu, XIE Yuwen, et al. Path planning of underwater robot based on Dijkstra algorithm[J]. *Machine Design & Research*, 2020, 36(1): 44-49. (in Chinese with English abstract)
- [56] 陈志勇, 吴精华. 基于目标导向采样的机器人改进概率路图法研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(6): 410-418, 426.
- CHEN Zhiyong, WU Jinghua. Improved probability path graph method for robots based on goal-oriented sampling[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(6): 410-418, 426. (in Chinese with English abstract)
- [57] 王乐乐, 睦泽智, 蒲志强, 等. 一种改进 RRT 的多机器人编队路径规划算法[J]. *电子学报*, 2020, 48(11): 2138-2145.
- WANG Lele, SUI Zezhi, PU Zhiqiang, et al. An improved RRT algorithm for multi-robot formation path planning[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2020, 48(11): 2138-2145. (in Chinese with English abstract)
- [58] 刘兴盛, 王俊雄. 基于改进蚁群算法的水下机器人路径规划算法[J]. *舰船科学技术*, 2022, 44(21): 80-87.
- LIU Xingsheng, WANG Junxiong. Research on path planning algorithm for underwater robots based on improved ant colony

- algorithm[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(21): 80-87. (in Chinese with English abstract)
- [59] 柯清派, 史训涛, 袁智勇, 等. 基于改进遗传算法的变电站巡检机器人路径规划[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(8): 144-149, 156. KE Qingpai, SHI Xuntao, YUAN Zhiyong, et al. Route planning for substation patrol robot based on improved genetic algorithm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(8): 144-149, 156. (in Chinese with English abstract)
- [60] 熊俊涛, 李中行, 陈淑绵, 等. 基于深度强化学习的虚拟机器人采摘路径避障规划[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S2): 1-10. XIONG Juntao, LI Zhongxing, CHEN Shujin, et al. Obstacle Avoidance Planning of Virtual Robot Picking Path Based on Deep Reinforcement Learning[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S2): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [61] 黄莲花, 李光明. 基于 Voronoi 图和快速行进的移动机器人导航路径规划[J]. *机械设计与制造*, 2023(11): 87-92. HUANG Lianhua, LI Guangming. Navigation path planning of fast moving mobile robot based on voronoi diagram[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2023(11): 87-92. (in Chinese with English abstract)
- [62] TANG Q, BIAN H, TIAN X, et al. A sampling robot for high dust and strong corrosion environment[C]. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Tianjin, China: 2010.
- [63] 黄宁宇, 程起群, 高露娇, 等. 流速、温度对西伯利亚鲟幼鱼生长的影响[J]. *水产学报*, 2007, 31(1): 31-37. HUANG Ningyu, CHENG Qiqun, GAO Lujiao, et al. Effect of water current and temperature on growth of juvenile *Acipenser baeri*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2007, 31(1): 31-37.
- [64] 张甫英, 李辛夫. 低 pH 对鱼类胚胎发育, 鱼苗生长及鳃组织损伤影响的研究[J]. *水生生物学报*, 1992, 16(2): 175-182. ZHANG Fuying, LI Xinfu. Studies on the effects of low pH on embryonic development, growth of the fry and the damage of gills of fishes[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1992, 16(2): 175-182.
- [65] WANG M, ZHAO S, WANG J, et al. Multi - omics analysis provides insight into liver metabolism in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) under hypoxic stress[J]. *Aquaculture*, 2024: 583.
- [66] XIZO L, CHEN C, LIANG Y, et al. Ammonia - nitrogen stress affects immune regulation via TNF α in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. *Aquaculture*, 2024: 583.
- [67] 叶俊. 亚硝酸盐急性胁迫对草鱼血液生理生化指标和非特异性免疫性能的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024. YE Jun. The Acute Effect of Nitrite on Blood Physiological and Biochemicaparameters and Non-Specific Immunity in Grass Carp *Ctenopharyngodon idellus*[D]. Huazhong Agricultural University, 2024.
- [68] YABUKI A, OHISHI K, MIYAZAKI T, et al. Vibration suppression control using resonance frequency damping disturbance observer for robot servo system[J]. *IEEJ Journal of Industry Applications*, 2020, 10(1): 36-44.
- [69] NARANPANAWA L, SAHA T, EKANAYAKE C. Finite element analysis to understand the mechanical defects in power transformer winding clamping structure[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2017.
- [70] WANG Y, XU Q. Design of a New Wrist Rehabilitation Robot Based on Soft Fluidic Muscle[C]//2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2019.
- [71] LV X Q, WU Y, LIAN J, et al. Energy management and optimization of PEMFC/battery mobile robot based on hybrid rule strategy and AMPSO[J]. *Renewable Energy*, 2021, 171: 233779602.
- [72] 许裕良, 杜江辉, 雷泽宇, 等. 水下机器人在渔业中的应用现状与关键技术综述[J]. *机器人*, 2023, 45(1): 110-128. XU Yuliang, DU Jianghui, LEI Zeyu, et al. Applications status and key technologies of underwater robots in fishery[J]. *Robot*, 2023, 45(1): 110-128. (in Chinese with English abstract)
- [73] 王德兴, 黄梓阳, 袁红春. 基于轻量级神经网络的水下生物图像增强[J]. *渔业现代化*, 2023, 50(6): 60-73. WANG Dexing, HUANG Ziyang, YUAN Hongchun. Underwater biological image enhancement based on lightweight neural networks[J]. *Fishery Modernization*, 2023, 50(6): 60-73. (in Chinese with English abstract)
- [74] 张宇雷, 张瑜霏, 单建军, 等. 鱼类工厂化循环水人工繁育设施装备应用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(19): 212-218. ZHANG Yulei, ZHANG Yufei, SHAN Jianjun, et al. Review of progress on fish breeding and seed production using Recirculating Aquaculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(19): 212-218. (in Chinese with English abstract)
- [75] 李晨阳, 彭程, 张振乾, 等. 融合里程计信息的农业机器人定位与地图构建方法[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(21): 16-23. LI Chenyang, PENG Cheng, ZHANG Zhenqian, et al. Positioning and map construction for agricultural robots integrating odometer information[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(21): 16-23. (in Chinese with English abstract)
- [76] VINCENT V, CHIU E, TAE K S, et al. Automatic wireless mobile weather station[J]. *Journal of Electrical And Electronics Engineering*, 2020, 2(2): 54.
- [77] XIONG B, ZHANG J, QU F, et al. Navigation control system for orchard spraying machine based on beidou navigation satellite system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 45-50.
- [78] 文可, 姚焕玫, 黄以, 等. 基于 GEE 的广西北部湾海水产养殖池塘遥感提取[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12): 280-288.

- WEN Ke, YAO Huanmei, HUANG Yi, et al. Remote sensing image extraction for coastal aquaculture ponds in the Guangxi Beibu Gulf[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(12): 280-288. (in Chinese with English abstract)
- [79] 张军国, 程浙安, 胡春鹤, 等. 野生动物监测光照自适应 Retinex 图像增强算法[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 183-189.
- ZHANG Junguo, CHENG Zhean, HU Chunhe, et al. Adaptive image enhancement algorithm for wild animal monitoring based on Retinex theory[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(15): 183-189. (in Chinese with English abstract)
- [80] 谭鹤群, 李玉祥, 朱明, 等. 通过图像增强与改进 Faster-RCNN 网络的重叠鱼群尾数检测[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(13): 167-176.
- TAN Hequn, LI Yuxiang, ZHU Ming, et al. Detecting overlapping fish population using image enhancement and improved Faster-RCNN networks[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(13): 167-176. (in Chinese with English abstract)

Key technologies of land inspection robots and potential in aquaculture

LI Daoliang^{1,2,3}, WANG Enpei^{1,2,3}, WANG Bingxiong^{1,2,3}, WANG Shuaixing^{1,2,3}, SUO Xuesong⁴

(1. National Innovation Center for Digital Fishery, Beijing 100083, China; 2. College of Information and Electronics Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Smart Farming Technologies for Aquatic Animal and Livestock, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China; 4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract: Land inspection robots, endowed with autonomous navigation, obstacle avoidance, and mobility capabilities, are increasingly showcasing their unique advantages and practical utility across various sectors, particularly in fisheries and aquaculture. This paper delves into the critical technologies underpinning land inspection robots and explores their potential application in modernizing and adding intelligence to the aquaculture industry. The paper comprehensively analyzes the trifecta of land inspection robots: sensor technology, mechanical design, and control systems. Sensors play a pivotal role in capturing an array of environmental parameters, including temperature, humidity, light, pressure, sound, and imagery, providing a comprehensive dataset for decision-making. The mechanical structure serves as the backbone, enabling the robots to traverse challenging terrains, negotiate obstacles, and perform a diverse range of inspection tasks. The control technology, meanwhile, governs autonomous movement, task execution, and decision-making, encompassing motion control, path planning, and task scheduling. In the context of aquaculture, land inspection robots hold immense promise. They facilitate real-time monitoring of critical water quality parameters such as dissolved oxygen, pH, and ammonia, ensuring optimal conditions for fish health and enhancing production efficiency and product quality. The robots' ability to detect fish abnormalities early on enables proactive management, reducing risks and improving disease control. Furthermore, their remote observation and control capabilities streamline intelligent management of fish breeding facilities, lowering labor costs and enhancing operational efficiency. However, the application of land inspection robots in aquaculture faces unique challenges stemming from the complex and variable nature of the environment. The robots must exhibit a high degree of adaptability, interference resistance, and self-learning capabilities to accommodate diverse fishery scenarios and species. Additionally, the stringent requirements for information accuracy and real-time data necessitate robust stability and reliability in data gathering and transmission processes. Technical bottlenecks, such as limitations in environmental perception, image quality degradation due to water reflections and turbidity, and energy management in wet and corrosive environments, hinder widespread adoption. To overcome these challenges and unlock the full potential of land inspection robots in aquaculture, several development suggestions are proposed. Firstly, enhancing environmental adaptability designs, including waterproofing and corrosion resistance, is crucial for stable operation in harsh conditions. Secondly, advancing image processing technologies can improve image quality and fish recognition accuracy. Thirdly, establishing a comprehensive data processing platform, integrating cloud computing and big data analytics, will streamline data collection, storage, and analysis, enabling smarter decision-making. Lastly, optimizing energy management systems, including high-capacity battery technologies and autonomous charging capabilities, will prolong operational durations and reduce downtime. In conclusion, while the application of land inspection robots in aquaculture faces technical hurdles, their potential to revolutionize the industry remains substantial. With continued technological advancements and strategic development efforts, these robots are poised to play a pivotal role in driving the modernization and intelligent transformation of fisheries and aquaculture.

Keywords: sensor; robot; smart fisheries; land inspection; aquaculture