

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.031

猪舍消杀巡检机器人系统设计与试验

赵文文 王海峰 朱君 李斌
(北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 针对规模化猪舍人工劳动强度大、重复作业多、疫病传播与防控形势严峻等问题,设计了猪舍消杀巡检机器人系统。该系统融合基于2D激光雷达的即时定位与建图(Simultaneous localization and mapping, SLAM)和超宽带(Ultra-wide band, UWB)技术,实现舍内地图构建和系统实时定位;在确定热红外模组安装高度为125 cm和安装倾角水平向下夹角5°的基础上,运用Jetson Xavier NX边缘计算单元进行视觉处理与识别算法的部署,完成在线猪只体温巡检;边缘计算单元依据终端指令对消杀模块中超声波雾化单元、紫外线辐射单元等进行决策控制,实现多模式舍内环境消杀;通过传感器技术对舍内环境参数进行实时监测;并搭建人机交互界面,实现监测信息的显示、报警、存储等。测试结果表明,该系统可完成地图构建、自动导航、猪只体温检测,记录异常猪只热红外图像及圈舍所在位置;依据设定的消杀模式,在目标点开启相应消杀功能的准确率为100%;机器人在巡检状态和静止状态下,舍内CO₂浓度、温度、相对湿度的相对误差分别为0.04%、3.00%、2.10%。本研究可为疫情形势下猪舍巡检消杀少人化/无人化作业提供技术装备参考。

关键词: 规模化猪舍; 自动导航; 舍内消杀; 体温巡检; 环境监测
中图分类号: TP391; S82 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0270-08

Research and Design of Pig House Disinfecting Inspection Robot System

ZHAO Wenwen WANG Haifeng ZHU Jun LI Bin
(Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to solve the problems of large-scale pig house, such as high labor intensity, repeated operations and severe epidemic situation, a pig house disinfection and sterilization inspection and environmental monitoring system was designed. The system integrated the 2D LiDAR based simultaneous localization and mapping (SLAM) and ultra wide band (UWB) technologies to realize the building of in-house map and real-time positioning of the system. On the basis of determining the installation height of the thermal infrared module to be 125 cm and the horizontal downward angle of the installation inclination to be 5°, the Jetson Xavier NX edge computing unit was used to deploy vision processing and recognition algorithms to conduct online inspections of pig body temperature. The edge computing unit was used to intelligently control the atomization module and the ultraviolet module in the disinfection module according to the terminal instructions and the information of the micro-environment in the house, so as to realize the multi-mode disinfection of the indoor environment. The sensor technology was used to monitor the environmental parameters in the house in real time. Human-computer interaction interface was built to realize the display, alarm and storage of monitoring information. The test results showed that the system can complete map construction, automatic navigation, pig body temperature detection, and record abnormal pig thermal infrared pictures and the location of the enclosure. According to the set disinfection and sterilization mode, the accuracy of completing the corresponding disinfection and sterilization function at the target point was 100%. The relative errors of CO₂ concentration, temperature and humidity in the room were 0.04%, 3.00% and 2.10% respectively in the inspection state and static state of the robot.

收稿日期: 2022-06-12 修回日期: 2022-08-03
基金项目: 国家科技创新 2030-“新一代人工智能”重大项目(2021ZD0113804)、北京农业智能装备技术研究中心开放课题(KFZN2020W011)、北京市农林科学院2022年度科研创新平台建设项目(PT2022-34)、北京市农林科学院改革与发展项目、北京市农林科学院2022年度院财政专项和农业农村部设施农业装备与信息化重点实验室开放课题(KFZN2020W011)
作者简介: 赵文文(1996—),女,工程师,主要从事畜牧装备关键技术研究,E-mail: zhaoww@nercita.org.cn
通信作者: 李斌(1983—),男,研究员,博士生导师,主要从事畜牧业智能化装备技术研究,E-mail: lib@nercita.org.cn

The research result can provide technical equipment reference for the less-humanized/unmanned operation of inspection and disinfection of pig houses during the epidemic situation.

Key words: large-scale swine house; automatic navigation; house disinfection and sterilization; body temperature inspection; environmental monitoring

0 引言

目前,国内规模化养猪已占 52.3%,逐渐由农户散养向标准化、集约化、规模化养殖方式发展。传统人工养殖方式已不能满足规模化的养殖需求,加之非洲猪瘟带来了新的挑战,严重制约我国养猪业健康可持续发展^[1]。为防止外部病原体流动至猪舍,根据猪场实际养殖要求,亟需环境监测、体温巡检、防疫消杀多功能一体化装备,实时监测猪舍环境空气参数,代替人工巡检、消杀作业。因此,研发和应用猪舍消杀巡检及环境监测装备,代替或辅助人力作业,对于保障中国养猪场生物安全和高效生产具有重要意义。

为实现上述作业装备的有效研发,国内外学者开展了相关环境监测、体温采集、环境消杀技术的研究与测试工作。在舍内环境监测方面,早在 20 世纪 70 年代,国外学者已开展了畜禽舍环境监控系统相关研究^[2]。文献[3 - 5]利用无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)分别开发了一套猪舍环境监测系统、猪场综合管理系统、畜禽养殖空气质量参数环境监测系统,该系统能够采集猪舍内的空气温湿度和光照强度,并对舍内环境进行调控,实现养猪环境的最优控制。刁亚萍^[6]利用计算流体力学模拟底层和顶层猪舍环境,通过 WSN 技术监测环境数据进行验证,结果表明模拟结果可用于分析猪舍内环境分布规律。梁天航^[7]和姜业成^[8]分别利用 ZigBee、3G 技术和 ZigBee、4G 技术开发了猪舍环境远程监测系统。龙长江等^[9]和曾志雄等^[10]以 STM32 单片机为核心,分别搭建移动式智能监测平台和猪舍环境无线多点多源远程监测系统,对畜禽舍内环境进行实时监测。谢秋菊等^[11]和杨亮等^[12]分别利用深度学习和 EMD - LSTM (Empirical mode decomposition - long short term memory network)对猪舍内温湿度、氨气预测模型进行了相关研究。在猪只体温采集方面,相关学者利用红外热成像技术开展了非接触式猪只体温获取方法研究^[13 - 16]。MARCIA 等^[17]通过红外热成像仪获取牛只不同身体区域的图像检测体表温度,研究不同区域内的体表温度模型,得到红外热成像仪获取前额温度与直肠温度的相关性最高。KAMMERSGAARD 等^[18]通过红外热成像分别研究新生猪只表面温度

与直肠温度之间的关系。张国锋等^[19]通过将植入式 RFID (Radio frequency identification system) 温度芯片应用于集中式圈舍猪只养殖中,可实现对猪只不同深度体表温度、不同饮水时长和饮水量的协同感知。在环境消杀方面,已有专家和学者开展了畜禽舍防疫消毒机器人研究,并取得了一定进展^[20 - 22]。但已有研究尚存在数据传感单一、数据解析缺乏、功能参数简单等问题,基于环境综合信息感知及智能化决策模型的作业装备有待深入探索与研究。

基于此,结合国内外研究现状及现代猪场的实际需求,本文设计一种猪舍消杀巡检机器人系统,综合运用多源传感器融合技术、激光雷达导航技术、图像识别技术等实现猪舍环境参数(CO₂浓度、温度、相对湿度)的实时监测、猪只体温在线巡检以及舍内环境防疫消杀,进而降低人员接触带来的疫病传播风险,为实现无人/少人值守猪场奠定基础。

1 系统组成结构

在查阅相关文献及实际调研的基础上,确定系统总体设计方案如图 1 所示。以 Jetson Xavier NX 为核心控制器,外接舍内环境监测模块、猪只体温巡检模块、舍内环境消杀模块、舍内自动导航模块以及人机交互模块,利用分布式、模块化的思想对系统进行总体设计。

其中舍内环境监测模块外接 CO₂传感器和温湿度传感器,通过 RS - 485 和 IIC (Inter integrated circuit)通信实现舍内环境参数的传输;舍内环境消杀模块利用超声波雾化单元和紫外线辐射单元、臭氧释放单元实现舍内多模式消杀;自动导航模块利用 SLAM 技术完成地图构建,采用激光定位和 UWB 技术进行定位,实现舍内路径规划和自动避障;猪只体温巡检模块利用热红外模组和摄像头,采用 RGB 图像和热红外成像技术,实现猪只体温的获取,设定体温阈值,对体温异常的猪只进行报警并拍照记录;人机交互模块以 Qt 为开发平台,以 Pycharm 为开发环境,以 python 为开发语言,搭建人机交互界面,实现监测信息的显示、报警、存储,以及依据采集的环境参数信息,对猪舍环境进行消杀,保证猪只在安全、卫生的环境中生长。

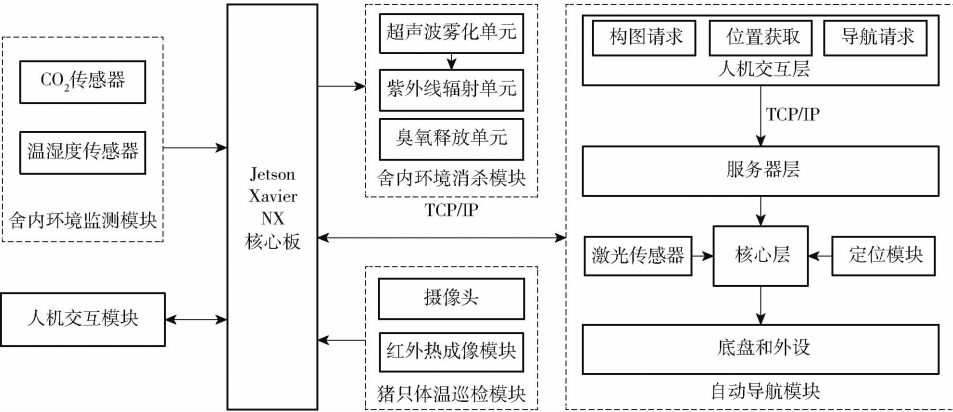


图 1 系统总体设计方案

Fig. 1 General design scheme of system

针对目前猪场作业环境需求,消杀巡检及环境监测装置采用轮式结构,同时为避免传感器等受到舍内复杂环境的影响,对传感器及电路进行封装,使其能长期适应猪舍作业环境,该装置的整体三维结构简图如图 2 所示。

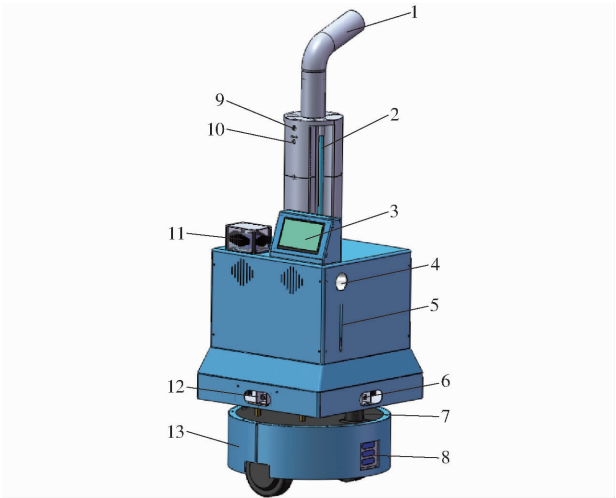


图 2 猪舍消杀巡检机器人三维结构简图

Fig. 2 Schematic of three-dimensional structure
of pig house disinfecting inspection robot

1. 雾化系统 2. 紫外线灯管 3. 控制显示屏 4. 注液口 5. 液
位观察口 6. 彩色摄像头 7. 激光传感器 8. 充电接口 9. 摄
像头 10. 热红外模组 11. 环境监测模块 12. 彩色摄像头
13. 底盘

2 系统软硬件设计

2.1 自动驾驶模块设计

自动驾驶模块采用 Navi 导航系统,利用 SLAM 技术、激光定位和 UWB 等技术,通过在底盘处安装超声波传感器、激光雷达、UWB 定位模块等,实现舍内地图构建、自动避障及路径导航。舍内地图精准构建是自动避障和路径导航的首要条件,将底盘作为服务器,核心板作为客户端,利用 TCP/IP 通信协议发送 JSON 格式、UTF-8 编码消息体实现客户端

与服务器的实时通信。在完成通信的基础上,核心板下发 get_all_file_info 指令,以字节方式接收底盘信息,利用正则表达式获取底盘构建的地图信息,通过 Base64. b64decode 编码实现地图信息字节到字符串的转换,将保存 . jpg 格式的地图图像显示在上位机界面中。舍内场景如图 3 所示。猪舍地图构建如图 4 所示。



图 3 舍内场景

Fig. 3 Scenes in house

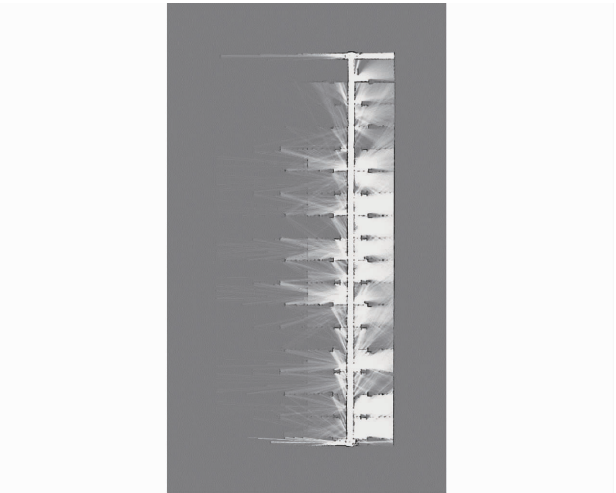


图 4 舍内地图构建

Fig. 4 In-house map construction

为实现异常猪只圈舍精确定位,利用

$$X = 600 + \frac{x}{0.05} \tag{1}$$

$$Y = 478 - \frac{y}{0.05} \tag{2}$$

式中 (x,y) ——设备的实际坐标,m
 (X,Y) ——设备在地图上的像素坐标,像素
实现物理坐标与像素坐标的转换,获取设备在猪舍内的实时位置,显示在地图中。地图像素坐标以地图左上角端点为原点,物理坐标原点为地图中心点,设置获取的地图分辨率为 1 200 像素×956 像素,地图中心点的像素坐标为(600 像素,478 像素),默认构图分辨率为 0.05 m/像素。

2.2 猪只体温巡检模块设计

为实时获取猪只体温数据,检测体温异常猪只,猪只体温巡检模块由星瞳科技 Lepton3.5 热红外模组(分辨率为 160 像素×120 像素,水平视场角为 57°,垂直视场角为 44°)和杰锐微通 800 万像素的 Q8s 摄像头组成。热红外图像用于记录猪只体温信息,彩色图像用于记录该猪只所在圈舍的环境信息,便于管理人员更加清晰观察猪只及圈舍情况。在北京市平谷区新希望六和智能养猪场实际场景下,育肥猪舍尺寸为 550 cm×300 cm×80 cm,过道宽度为 80 cm,热红外模组视场可覆盖整个圈舍,如图 5 所示。热红外模组倾斜角和离地面距离为

$$\beta = \arctan \frac{(L - d_2) \tan(90^\circ - \alpha) - d}{L - d_2 + d \tan(90^\circ - \alpha)} \tag{3}$$

$$L = \frac{d + d_1}{\tan(90^\circ - \beta)} + d_2 \tag{4}$$

式中 α ——热红外模组的垂直视场角,(°)
 β ——热红外模组与水平面的安装倾角,(°)
 d ——热红外模组与猪舍的安装距离,cm
 d_1 ——单个猪舍长度,cm
 d_2 ——单个猪舍高度,cm
 L ——热红外模组安装高度,cm

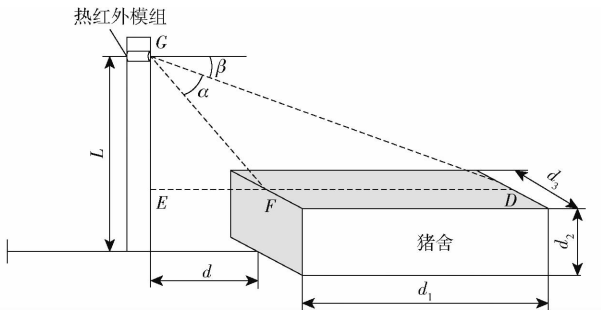


图 5 红外热成像范围示意图

Fig. 5 Schematic of infrared thermal imaging range

其中 $\alpha = 44^\circ$ 、 $d = 40$ cm、 $d_1 = 550$ cm、 $d_2 = 80$ cm、 $d_3 = 300$ cm、 $L = 40$ cm,通过式(3)、(4)可计算 β 约为 5° , L 约为 125 cm。即热红外模组安装高度为 125 cm,安装倾角为 5° 。

在获取热红外图像的基础上设置检测猪只最低温度为 20℃,最高温度为 40℃,以及颜色跟踪阈值为(200,255),利用 `img.find_blobs(threshold_list, pixels_threshold = 100, area_threshold = 100, merge = True)`函数进行区域处理。在像素数大于像素阈值和面积大于面积阈值的情况下,获取目标框位置内的猪只体温分布,设置所有像素点的最高温度值作为检测猪只的体温信息。利用 `cap.read()`指令读取摄像头和热红外模组实时记录的每帧视频,通过 `cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2RGB)`实现 BGR 模式转换彩色图像 RGB 模式,将获取的视频数据通过 `QImage()`函数转换至 `QImage` 格式,显示在上位机界面中。

2.3 舍内消杀模块设计

舍内环境消杀模块采用超声波雾化单元、紫外线辐射单元、臭氧释放单元对圈舍进行多模式消杀,其硬件参数如表 1 所示。将超声波雾化单元、紫外线辐射单元、臭氧释放单元通过继电器分别与边缘计算单元的 GPIO15、GPIO12 以及 GPIO13 引脚通道连接,选用 GPIO.BOARD 引脚模式,设置 GPIO 引脚通道作为输出,初始化为高电平。边缘计算单元下发高低电平指令至继电器,通过继电器通断实现不同消杀方式的启停,如图 6 所示。

表 1 舍内环境消杀模块硬件参数

Tab.1 Hardware parameters of indoor environment disinfection and sterilization module

名称	型号	品牌	功能
超声波雾化单元	J481007-001S	威锐尔	超声波加湿出雾
紫外线辐射单元	10W 紫外线消毒灯管	Cnlight	紫外线杀菌消毒
臭氧释放单元	10W 臭氧消毒灯管	Cnlight	臭氧杀菌消毒

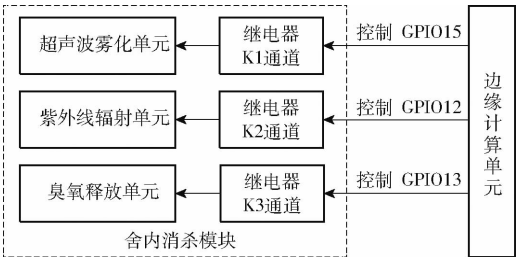


图 6 舍内消杀模块流程图

Fig. 6 Flowchart of disinfection and sterilization module in pig house

2.4 舍内环境监测模块设计

依据国家标准^[23],按照猪舍空气卫生指标,设

定舍内 CO₂ 气体浓度临界值为 1 300 mg/m³, 猪舍空气温度范围为 13 ~ 27℃, 相对湿度范围为 50% ~ 85%, 对超出范围的气体进行预警。监测气体传感器参数如表 2 所示。

表 2 猪舍环境气体监测传感器参数
Tab. 2 Sensor parameters of ambient gas monitoring in pig houses

环境参数	传感器型号	量程	分辨率	精度	输出信号
二氧化碳浓度	JX-CO2-102-3W	0 ~ 0.03	1 × 10 ⁻⁶	5 × 10 ⁻⁵ ± 5% F.S	TTL
温度	IOT-TH02 SHT30	-40 ~ 80℃		± 0.2℃	IIC
相对湿度	IOT-TH02 SHT30	0 ~ 100%		± 2%	IIC

由表 2 可知, 红外二氧化碳传感器的输出信号为 TTL 电平, 为优化电路、简化程序, 利用 TTL 转 485 模块对红外二氧化碳传感器的输出信号进行转换, 对输出信号进行管理。CO₂ 浓度传感器采用 RS485 通信, 使用 Modbus-RTU 协议进行舍内气体参数采集, 设置 CO₂ 浓度传感器地址为 0x01, 程序流程图如图 7 所示; 温湿度传感器采用 IIC 协议进行舍内温湿度参数采集, 设置通信地址为 0x44, 程序流程图如图 8 所示。

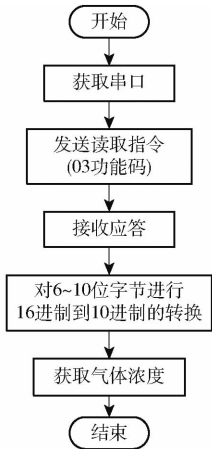


图 7 CO₂ 气体浓度采集工作流程图

Fig. 7 CO₂ gas collection work flow chart

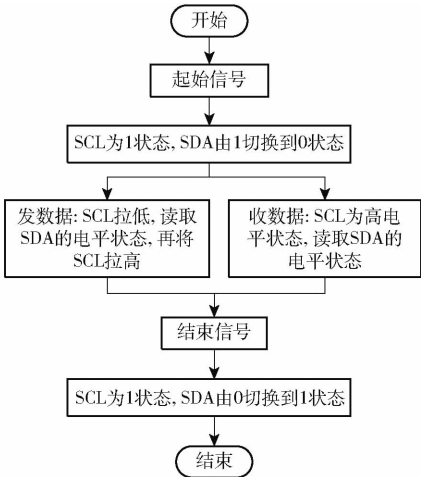


图 8 温湿度采集工作流程图

Fig. 8 Workflow diagram of temperature and humidity collection

2.5 人机交互模块设计

该系统以 Qt 为开发平台, Python 为编程语言, 搭建人机交互界面。为保障系统程序高效运行, 采用界面和逻辑程序分离式设计思路, 实现彩色图像、热红外图像、圈舍地图及环境信息的实时显示与参数设置等功能。

界面设置分为两部分, 第 1 部分为系统主界面, 如图 9 所示。该界面主要对猪舍环境参数、消杀模块、猪只体温进行管理, 可实现 CO₂ 浓度、温度、相对湿度以及设备电量、水量、猪只体温的实时显示。同时, 为简化操作, 方便用户使用, 设置自动模式和手动模式对设备进行控制, 手动模式下, 可通过点击“打开喷雾”、“打开紫外线”按钮进行舍内环境消杀; 自动模式下, 通过自动选择需要消杀的目标点, 并设置相应的消杀模式进行舍内环境循环消杀。

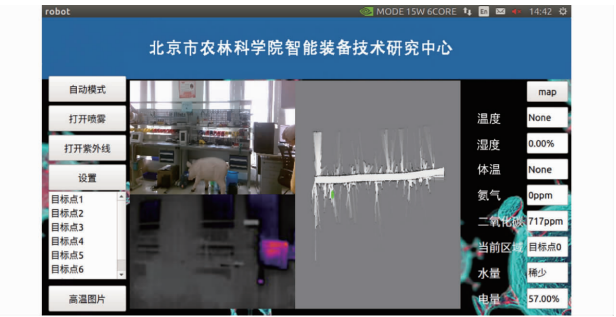


图 9 系统主界面

Fig. 9 System main interface

第 2 部分为高温图像存储界面, 如图 10 所示, 该界面显示温度异常的图像, 包括拍摄图像、热红外成像图像、地图及位置图像。用户可通过查询本地存储的高温图像, 按照设备在地图上标记的位置及时找到猪舍内体温异常的猪只。

3 性能测试

3.1 试验条件

为验证系统的稳定性, 于 2021 年 8 月 3—12 日在北京平谷区新希望六和智能养猪场 1 号楼 1 层 1 号育肥猪舍(长白猪, 约 700 头, 100 ~ 120 日龄)进行性能测试, 猪舍长度为 5 200 cm、宽度为 2 360 cm,

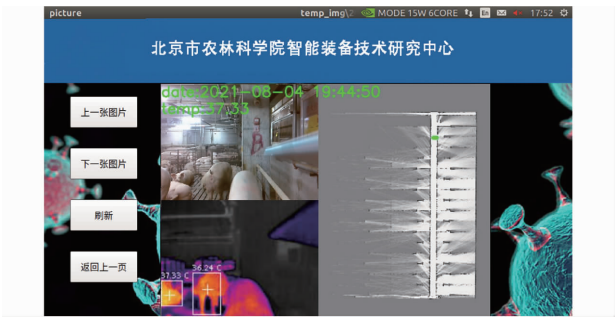


图 10 高温图像存储界面

Fig. 10 High temperature image storage interface

单个猪圈长度为 550 cm、宽度为 300 cm。

3.2 试验方法与结果

在舍内进行转场、自动避障及系统稳定性测试，在自动模式下，选定 6 个目标点，分别设置目标点 1 为喷雾消杀模式、目标点 2 为紫外线消杀模式、目标点 3 为臭氧释放消杀模式、目标点 4 为喷雾消杀模式和紫外线消杀模式、目标点 5 为喷雾消杀模式和臭氧释放消杀模式、目标点 6 为紫外线消杀模式和臭氧释放消杀模式，路径规划、目标点选择以及障碍物放置如图 11 所示。为验证消杀功能的准确性和自动避障功能，按照上述的消杀模式和路径规划进行 6 个周期的消杀巡检，记录机器人是否完成避障、到达指定目标点是否开启相应的消杀模式，测试结果如表 3 所示。

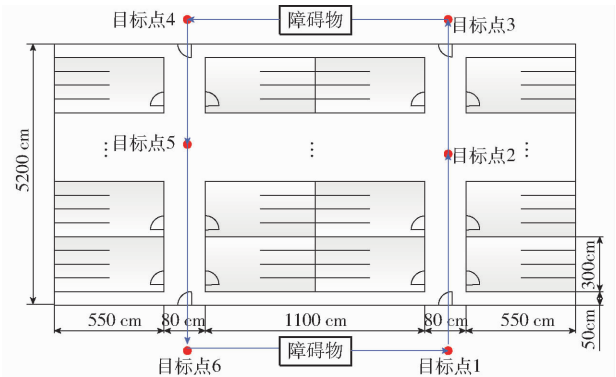


图 11 消杀巡检机器人路径规划

Fig. 11 Path planning of disinfecting inspection robot

表 3 不同消杀模式测试结果

Tab. 3 Test results of different disinfection and sterilization modes

目标点	消杀模式选择	1	2	3	4	5	6
1	A	Y	Y	Y	Y	Y	Y
2	B	Y	Y	Y	Y	Y	Y
3	C	Y	Y	Y	Y	Y	Y
4	A + B	Y	Y	Y	Y	Y	Y
5	A + C	Y	Y	Y	Y	Y	Y
6	B + C	Y	Y	Y	Y	Y	Y

注：A 为喷雾消杀模式，B 为紫外线消杀模式，C 为臭氧释放消杀模式，Y 为开启相应的消杀模式。

测试结果表明，机器人接收数据稳定，按照规定路径从目标点 3 前往目标点 4 和从目标点 6 前往目标点 1 的过程中，均可自动完成避障，继续前行进行消杀巡检。并依据终端指令和规定路径依次完成不同目标点设置的消杀作业，机器人到达目标点自动开启相应的消杀模式，在达到下一目标点之前维持相应的消杀模式，6 次测试中，对应目标点开启消杀模式误触发率为 0，现场作业如图 12 所示。并在测试过程中，完成猪只体温巡检和舍内环境监测作业，对异常体温的猪只所在圈舍进行记录，如图 13、14 所示。为验证消杀模式开启的准确率，在实验室环境下（回字型走廊，长 50 m，宽 30 m），对消杀功能进行了 55 次测试，测试过程中目标点、消杀模式和猪舍设置保持一致，测试结果显示，机器人系统到达不同的目标点，均可正确开启相应的消杀模式。

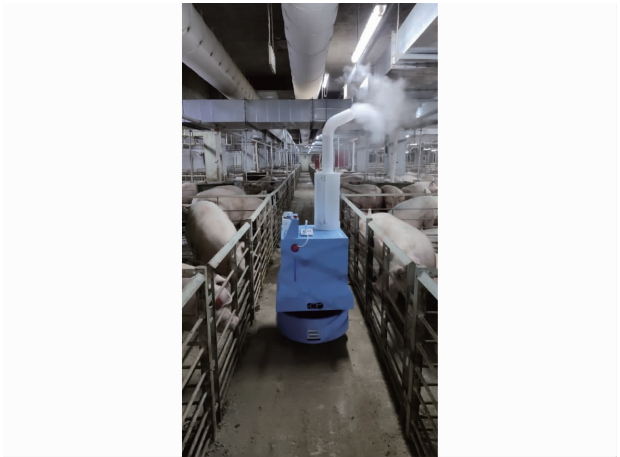


图 12 现场作业图像

Fig. 12 Field work pictures



图 13 异常猪只体温记录

Fig. 13 Record of abnormal body temperature of pigs

舍内环境监测模块实时采集舍内环境信息，在测试过程中，设置消杀巡检机器人行进速度 0.4 m/s、采集频率 1 Hz，每组测试时长 18 min，共计 1 080 组数据，如图 15 所示。

在巡检状态下，舍内 CO₂ 浓度、温度、相对湿度

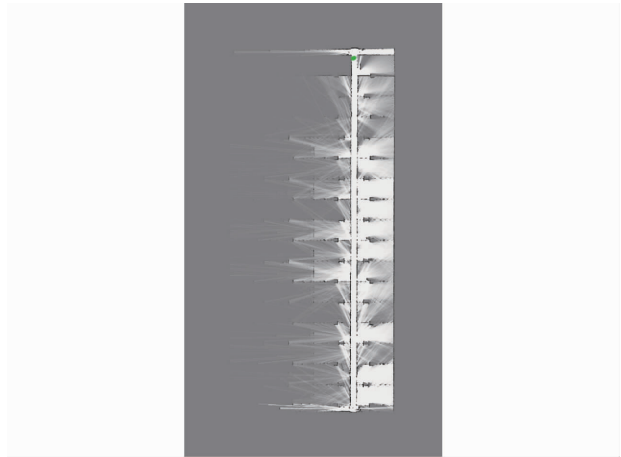


图 14 异常猪只圈舍地址记录

Fig. 14 Abnormal pig house address record

平均值分别为 1.50071×10^{-3} 、 24.82°C 、 5.183% ；在固定点静止状态下，舍内 CO_2 浓度、温度、相对湿度平均值分别为 1.50738×10^{-3} 、 25.59°C 、 52.94% 。巡检状态下舍内 CO_2 浓度、温度、相对湿度与静止状态下舍内 CO_2 浓度、温度、相对湿度的相对误差分别为 0.04% 、 3.00% 、 2.10% 。机器人在巡检状态和静止状态下环境监测参数一致性良好。

4 结论

(1)通过现场测试,该系统可实现地图构建,依据路径规划完成自动导航、避障;巡检过程中,在热红外模组安装高度为 125 cm、安装倾角为 5° 的基础上,机器人系统可完成猪只体温的实时检测,记录异

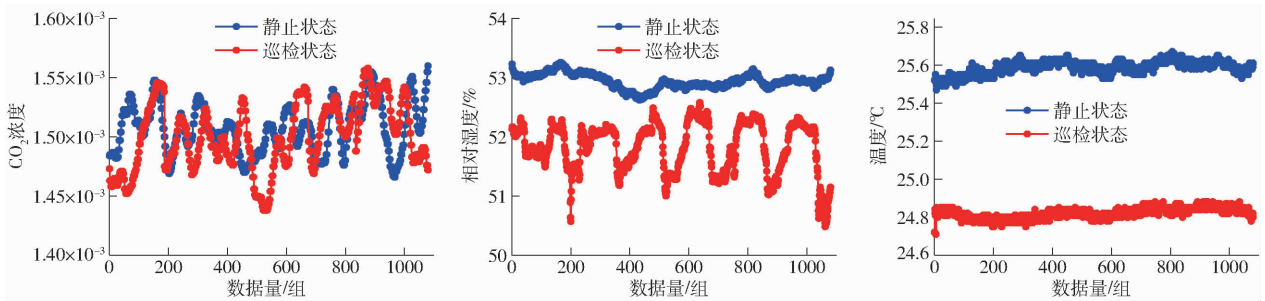


图 15 不同状态下舍内环境监测情况

Fig. 15 Environmental monitoring in house under different conditions

常猪只热红外图像及猪舍所在位置。

(2)先后在实验室和猪舍实际场景下,将目标点和消杀模式设置一致,分别开展了 55 次和 6 次消杀功能的测试,测试过程中机器人到达不同目标点,均可正确开启相应的消杀模式,其正确开启相应消杀模式的准确率为 100%。

(3)在正常巡检状态下,舍内 CO_2 浓度、温度、

相对湿度平均值分别为 1.50071×10^{-3} 、 24.82°C 、 5.183% ；在固定点静止状态下，舍内 CO_2 浓度、温度、相对湿度平均值分别为 1.50738×10^{-3} 、 25.59°C 、 52.94% 。不同状态下舍内 CO_2 浓度、温度、相对湿度的相对误差分别为 0.04% 、 3.00% 、 2.10% 。机器人在巡检状态和静止状态下环境监测参数一致性良好。

参 考 文 献

[1] 张任之. 规模化生猪生态养殖模式的研究及对经济效益的影响[J]. 饲料研究, 2021(2):152 – 155.
ZHANG Renzhi. Research on large scale ecological pig breeding mode and its impact on economic benefits[J]. Feed Research, 2021(2):152 – 155. (in Chinese)

[2] 房佳佳,李海军. 规模化生猪养殖环境监控系统研究现状与发展趋势[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017(5):115 – 119.
FANG Jiajia, LI Haijun. Research status and development trend of environment monitoring system for large-scaled pig farming [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2017(5):115 – 119. (in Chinese)

[3] HWANG J, YOE H. Study of the ubiquitous hog farm system using wireless sensor networks for environmental monitoring and facilities control[J]. Sensors, 2010, 10(12):10752 – 10777.

[4] HWANG J, LEE J, LEE H, et al. Implementation of wireless sensor networks based pig farm integrated management system in ubiquitous agricultural environments[J]. Security-enriched Urban Computing and Smart Grid, 2010, 78: 581 – 590.

[5] CHEN Chong, LIU Xingqiao. An intelligent monitoring system for a pig breeding environment based on a wireless sensor network [J]. International Journal of Sensor Networks (IJSNET), 2019, 29(4):275 – 283.

[6] 刁亚萍. 基于 WSN 的集约化猪舍多环境因子监测及 CFD 模拟的研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2018.
DIAO Yaping. Research on multi-environmental factors monitoring of intensive pig houses based on WSN and CFD simulation [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[7] 梁天航. 基于 ZigBee 和 3G 技术的猪舍环境监控系统研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2017.
LIANG Tianhang. Study of environment monitoring system for swine house based on ZigBee and 3G technology[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[8] 姜业成. 基于 ZigBee 技术和 4G 技术的猪舍环境远程监控系统研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2019.
JIANG Yecheng. Research on environment monitoring system for swine house based on ZigBee and 4G technology [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[9] 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 mobile intelligent monitoring platform for livestock and poultry house[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7): 68–75. (in Chinese)
- [10] 曾志雄, 董冰, 吕恩利, 等. 猪舍环境无线多点多源远程监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 332–340, 349.
- ZENG Zhixiong, DONG Bing, LÜ Enli, et al. Design and experiment of wireless multi-point and multi-source remote monitoring system for pig house environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 332–340, 349. (in Chinese)
- [11] 谢秋菊, 郑萍, 包军, 等. 基于深度学习的密闭式猪舍内温湿度预测模型[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 353–361.
- XIE Qiuju, ZHENG Ping, BAO Jun, et al. Thermal environment prediction and validation based on deep learning algorithm in closed pig house[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 353–361. (in Chinese)
- [12] 杨亮, 刘春红, 郭昱辰, 等. 基于 EMD-LSTM 的猪舍氨气浓度预测研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 353–360.
- YANG Liang, LIU Chunhong, GUO Yuchen, et al. Prediction of ammonia concentration in fattening pigery based on EMD-LSTM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 353–360. (in Chinese)
- [13] 张在芹. 基于红外图像的种猪体温检测方法研究[D]. 天津: 天津农学院, 2019.
- ZHANG Zaiqin. Pig body temperature detection method based on infrared image[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [14] 赵海涛. 基于红外热成像技术的猪体温检测与关键测温部位识别[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- ZHAO Haitao. Pig body temperature detection and key temperature measurement part recognition[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [15] 杨柳, 陈肯, 罗金生, 等. 基于物联网的山猪体温测量系统设计[J]. 信息系统工程, 2021(8): 86–88.
- [16] 肖德琴, 刘勤, 陈丽, 等. 设施猪场生猪体温红外巡检系统设计及试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 194–200.
- XIAO Deqin, LIU Qin, CHEN Li, et al. Design and experiment of infrared inspection system for pig body temperature in facility farm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 194–200. (in Chinese)
- [17] MARCIA S V S, SUELEN C D S, FERNANDO A S, et al. Mapping the body surface temperature of cattle by infrared thermography[J]. Journal of Thermal Biology, 2016, 62: 63–69.
- [18] KAMMERSCAARD T S, MALMKVIST J, PEDERSEN L J. Infrared thermography—a non-invasive tool to evaluate thermal status of neonatal pigs based on surface temperature[J]. Animal and International Journal of Animal Bioscience, 2013, 7(12): 2026–2034.
- [19] 张国锋, 陶莎, 于丽娜, 等. 基于植入式 RFID 感温芯片的猪体温与饮水监测系统[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 297–304.
- ZHANG Guofeng, TAO Sha, YU Li'na, et al. Pig body temperature and drinking water monitoring system based on implantable RFID temperature chip[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 297–304. (in Chinese)
- [20] 冯青春, 王秀, 邱权, 等. 畜禽舍防疫消毒机器人设计与试验[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(4): 79–88.
- FENG Qingchun, WANG Xiu, QIU Quan, et al. Design and test of disinfection robot for livestock and poultry house[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 79–88. (in Chinese)
- [21] 吴新. 畜禽舍环境控制及防疫系统试验[J]. 农业工程, 2019, 9(1): 38–40.
- WU Xin. Test of livestock and poultry house environment control and epidemic prevention system[J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(1): 38–40. (in Chinese)
- [22] 丁伟, 张文爱, 冯青春, 等. 畜禽舍防疫消毒机器人控制系统设计[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(10): 175–181.
- DING Wei, ZHANG Wenai, FENG Qingchun, et al. Design of body control system for disinfection of livestock breeding[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(10): 175–181. (in Chinese)
- [23] 北京市农林科学院畜牧兽医研究所. 规模猪场环境参数及环境管理: GB/T 17824.3—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

(上接第 225 页)

- [24] 宋协法, 程亚伟, 邢道, 等. 温度、体重对斑石鲷耗氧率、排氨率的影响及昼夜节律变化[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(9): 21–29.
- [25] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 7132–7141.
- [26] WOO S, PARK J, LEE J, et al. CBAM: convolutional block attention module[M]. Springer International Publishing: Cham, 2018.
- [27] HOU Q, ZHOU D, FENG J, et al. Coordinate attention for efficient mobile network design[C]//2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2021: 13708–13717.
- [28] IOFFE S, SZEGEDY C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift[C]//International Conference on Machine Learning, 2015: 448–456.
- [29] GLOROT X, BORDES A, BENGIO Y. Deep sparse rectifier neural networks[J]. Journal of Machine Learning Research, 2011, 15: 315–323.
- [30] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J]. Association for Computing Machinery, 2017, 60(6): 84–89.
- [31] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[C]//Computer Science, 2014: 1–14.
- [32] SANDLER M, HOWARD A, ZHU M, et al. MobileNetV2: inverted residuals and linear bottlenecks[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
- [33] SZEGEDY C, LIU W, JIA Y, et al. Going deeper with convolutions[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2015.
- [34] SELVARAJU R, COGSWELL M, DAS A, et al. Grad-CAM: visual explanations from deep networks via gradient-based localization[J]. International Journal of Computer Vision, 2020, 128(2): 336–359.