中国研究生电子设计竞赛



物联⽹应用类作品技术⽂档

作品编号： 2023015591 作品名称： 基于毫米波雷达的非接触式实时人体姿态检测系统 作 者： 黄家成 版本编号： OpenIoT 2.0

填写日期： 2023/04/06

|  |
| --- |
| 填写说明：  1、 本⽂档适用于物联⽹应用类作品  2、 正⽂⼀律用五号宋体， ⼀级标题为⼆号⿊体， 其他级别标题如有需要， 可根据需要  设置；  3、 本⽂档为简要⽂档，不宜长篇⼤论， 简明扼要为上。 |

第**1**章 作品概述

Ø 作品目标

针对传统人体姿态捕捉系统所存在的视觉障碍、隐私侵犯、实时性差以及识别精度低等缺陷，本团队提出一套**基于毫米波雷达的非接触式实时人体姿态检测系统**。该系统由硬件模块、软件服务和交互系统三大部分组成，主要包括：毫米波雷达评估板、通信电路板、PC上位机、可视化平台等四个核心组件。本项目旨在使用TI的毫米波雷达传感器，通过采集的点云数据训练算法模型，实现高效准确的人体位姿监测。

首先，该系统通过TI毫米波雷达IWR1843Boost实时采集指定场地的点云数据，并通过串口将TLVs格式的原始数据传输给ESP32模块，ESP32通过UDP协议将数据转译给PC上位机，在上位机实现人体位姿的实时判断供工作人员监测。其次，算法模型基于Perception Neuron动捕仪器标定人体骨骼，并通过CNN-LSTM模型提取点云数据特征并判断人体位姿，实时在上位机反馈。最终实现“**毫米波雷达监测—数据无线传输—模型判断位姿—上位机实时反馈**”的人体姿态识别工作流。

Ø 作品创新点

**(1)** 毫米波雷达技术应用，克服传统识别难题

与周期性发射短脉冲的传统雷达组不同，使用TI毫米波雷达作为传感器，可实现调频连续波(FMCW)的特殊毫米波技术。其具有穿透力强、非接触式等特点，能够克服传统人体姿态捕捉系统中的视觉障碍问题。这种技术可以在复杂环境下进行人体位姿检测，如低光照、遮挡等情况，提高系统的鲁棒性和可靠性。

**(2)** 动捕设备检测高效，复杂场景稳定标签

所提出的系统通过诺亦腾Perception Neuron动捕设备为人体骨骼标签，相比传统人体位姿识别项目中所使用的Kinetic深度相机，动捕仪器具有高精度，高帧率和高稳定性的优势。并且，在复杂场景或者遮挡情况下，深度相机存在一定骨骼识别误差，而动捕仪器仍能提供稳定的人体标签信息。

**(3)** 点云数据体素构建，算法模型轻量实现

由于其巨量的数据处理带来的不可避免的延时性，传统人体识别技术仍然处于实验室阶段。为实现所提出的系统以实时、持续性的人体位姿反馈作为目标，我们将点云数据进行体素计算，减少模型输入数据量。在满足基本姿态分类和判断精确性的基础上，本项目精心设计了模型的网络结构，通过减少层数、通道数以及模型的参数量的方式，使模型具有更小的尺寸、更快的推理速度。

**(4)** 关键技术自主构建，解决实时反馈难题

本系统的硬件模块、软件服务、交互系统等三大关键部分由团队成员自主搭建。所提出的系统充分考虑实际需求，基于丰富的文献综述与市场调研。对传统点云数据处理方法和算法模型进行优化，减轻数据处理时间，最终能够解决复杂场景下的人体位姿判断、实时反馈难题。

第**2**章 需求分析

Ø 业界需求

在过去几十年中，机器学习和人工智能领域取得了巨大的研究进展，这为智能医疗保健和医院技术带来了不断涌现的机遇。在这个领域中，人体姿态检测系统成为一个典型而重要的医疗保健问题，并已经通过不同类型的传感设备进行了广泛探索，例如可见光相机、红外传感器和CSI等。

其中，可见光相机在一定条件下更适合人体位姿识别，机器视觉对人体姿态的判断已有了很长时间的探究。然而，可见光相机受限于照明条件良好的环境才能正常工作，并且基于图片的视觉识别可能侵犯使用者的隐私。因此，室内毫米波雷达被认为是具有很大前景的人体活动监测技术，它具备非侵入性、隐私保护性以及对环境的不敏感性等优势。

毫米波雷达技术能够通过发射和接收毫米波信号，测量和分析信号与人体之间的相互作用，以实现人体姿态的判断和活动的监测。相较于可见光相机，毫米波雷达在光照较差或复杂环境下也能正常工作，同时无需获取人体图像数据，从而更好地保护使用者的隐私。这种非侵入性和隐私保护性使得毫米波雷达在医疗保健和医院技术领域具备广泛应用前景。

**安全巡检系统竞品分析表**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 传感器类型 | **穿透性性** |  |  |  |  | **抗干扰性** |
| 毫米波雷达 | P |  |  |  |  | P |
| 激光雷达 | P |  |  |  |  | P |
| 可见光相机 | P |  |  |  |  | P |
| 数字报表 | P |  |  |  |  | P |

第**3**章 文献综述

物联网巡检系统是自动化、机器人与人工智能等多学科融合的前沿方向，近年来在工业 监测、社区巡视、军事侦察等领域起到关键性的作用， 可服务于“十四五智能制造发展规划 ” 和“人工智能+ ”等重大国家战略[1-3] 。下面将针对物联网巡检系统的发展态势进行综述。

Ø 物联网巡检系统及其关键技术的发展态势

智能巡检系统最早起源于 20 世纪 80 年代，美国、加拿大率先在电力电网行业中部署了 巡线机器人，能够实现自主进行线路故障的检测与排查[4] 。到 21 世纪初期，基于计算机技 术的蓬勃发展， 美英等发达国家的工业现场开始部署管道、线缆、化工等具体化的巡检机器 人系统，能够达成障碍检测、仪表识别等基本功能， 同时达到实时数据通信的效果[5, 6] 。近 年来，业内最受关注的是由美国 Boston Dynamics 公司所设计的 Spot 四足机器人与 Atlas 仿 生机器人，其智能程度能够在诸如货物搬运、物件检测等特定领域远超人工执行的工作效率， 显著提升了工业生产过程的高效性与安全性[7]。

国内的智能巡检系统应用最早开始于本世纪初，魏振中等（2004）[8]提出了超高压输电 线路巡检系统，可以在输电线路上实现监控状态下的自主行走与视觉监视，跨越杆塔等作业， 大大减轻了输电维护人员的劳动强度与难度， 提高巡检效率与质量。次年，中国科学院沈阳 自动化研究所的王洪光等（2005）[9]首创性地提出了一种国际先进的超高压输电线巡检机器 人机构， 该机构由移动车体与机械臂组成， 可以稳定在输电线路上自主行走并检测电路部件 的损伤情况，是我国在物联网巡检系统领域早期研究的重要发展成果。

最近十年来，巡检机器人真正进入国内大众的视野，机器视觉、目标检测与在线作业等 技术都得到了长足发展。随着市场需求的不断增大，巡检机器人的应用场景也变得越发多样 化。诸如激光雷达与 SLAM 建图技术被应用于矿用智能巡检机器人， 从而在沙尘、潮湿、阴 暗的环境下实现自主定位导航，显著提高了矿区作业的安全性（2022）[10] 。同时，针对石化 储运等企业输油站罐区的安全巡检问题， 孙凌宇等（2023）[11]设计了一款集视频监控、监测 气体泄露、图像识别与报警等多功能于一体的小型智能巡检机器人，该机器人可以越过 77.5mm 的凸台障碍物， 爬上最大角度为 30 度的斜坡以及越过宽度为 250mm 的负障碍。

综上， 物联网安全巡检系统的应用， 极大地保障了工业现场巡检的安全与质量， 减轻人 工劳动强度， 实现替代人工对地下矿区、重化工厂、输油站罐区等高危环境的异常排查与自 动巡检作业。下面针对物联网巡检系统中所涉及的关键技术展开综述

Ø 机器视觉及目标识别技术

近年来，机器人系统的目标检测技术在深度卷积神经网络和 GPU 的高计算力下得到了 快速的发展[12], Ren 等[13] 提出高速区域卷积神经网络（faster region-convolutional neural networks, faster R-CNN）模型，通过区域建议网络对任意大小的图像进行有效检测，但对于 连续检测存在计算冗余的问题。Redmon 等[14]提出 YOLO （you only look once）网络模型， 能够以极快的速度检测目标对象， 但是对于小型物体和拥挤场景的识别率不高。进而，张堃 等（2020）[15]提出了在深度学习网络中引入具有空间感知的自注意力机制，提高网络学习全 局信息能力， 使用焦点损失函数代替交叉熵，从而改善深度学习网络的欠拟合问题。与此同 时，针对工业现场设备外观相似且部署密集的识别难点，徐哲壮等（2023）[16]提出了融合机 器视觉与邻近度估计的相似工业设备识别策略，相比于传统机器视觉的识别方法， 该策略能 够在不同设备密度的场景下，提升 2% ~ 49%的相似工业设备识别精度，有效地解决巡检机 器人对工业现场相似设备的识别问题。

Ø 在线检测与作业技术

智能巡检机器人在巡检过程中， 对于设备部件一般采用离线检测方式， 这就意味着，若 搭载的摄像头等传感设备发生故障，机器人将无法完成既定检测任务。根据实际工厂的检测 需求， 需要一种较为可靠的设备部件损伤、工作故障在线监测方式， 使得操作者可以实时掌 握机器人工作状态， 提高工作效率。基于上述需求， 杨廷方等（2008）[17]对于变压器故障诊 断的方法进行了研究和分析，设计了一套用于变压器油中溶解气体的在线监测系统， 能够实 现在线检测、分析和诊断一体化， 为管理者提供及时、准确、连续的决策依据。 此外，黄静 等（2023）[18]开发了一种在线检测系统来检测水冷模块， 该系统可对被测样机和试验平台进 行实时的协同测试和控制，可实现样机检测的在线判断决策和在线切换执行。上述研究均通 过在线检测控制台介入实际的检测评估过程， 从而确保系统能够完成既定工作， 为在线巡检 系统的软件设计提供了较好的研究思路。

Ø 物联网安全攻击的检测技术

网络安全攻击的检测与防范是当下物联网领域研究中最关键的挑战之一，虽然工业物联 网的概念较新，但其依托的却是现代成熟的工业自动化技术与通信技术， 因此传统的网络攻 击方法对工业物联网系统是适用的[19]。黑客通过系统漏洞对工业物联网应用发起攻击，达到 破坏系统服务或者窃取重要数据的目的。可以预见，随着工业物联网的快速发展， 其面临的 安全形势也将更加严峻。

表 **3** 物联网安全攻击及其对应策略的综述表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 攻击类型 | 防御措施 | 检测算法 | 性能描述 |
| Spoofing | Authentication  Authentication  Authentication  Authentication | Q-learning  SVM  DNN  dFW | Average loss rate  Classification accuracy  False alarm rate  Misdetection rate |
| DoS | Secure offloading Access control | NN  MCA | Detection accuracy  Root mean error |
| Intrusion | Access control | Q-learning | Root mean error |
| Access control | Naive Bayes | False alarm rate |
| Access control | SVM | Classification accuracy |
| Malware | Malware detection Authentication | Dyna-Q/PDS Random Forest | Classification accuracy Energy consumption |
| Jamming | Secure offloading | Q-learning | Detection accuracy |

根据《中国工业互联网安全态势报告（2020 年）》和中国国家信息安全漏洞共享平台数 据统计，当前我国工业物联网系统存在的网络安全问题主要可以归结为：（1）系统破坏型网 络攻击；（2）数据窃取型网络攻击；（3）控制僵尸型网络攻击；（4）钓鱼伪装型网络攻击， 等一系列攻击行为[20]。本项目针对 Spoofing 欺骗攻击，DoS 拒绝访问攻击，Intrusion 入侵检 测攻击等主流攻击手段进行研究，重点参考了 Xiao 等[21] 以及 Ahmad 等[22] 的综述工作， 总 结了 5 类安全攻击及其对应的 12 种机器学习检测方法， 如上表 **3** 所示。

虽然针对不同的安全攻击，现有的机器学习模型已经逐步成熟，但是对于多来源、多类 型的复合攻击手段，现有的机器学习方法仍存在挑战。由于不同的安全攻击产生的网络流量 变化复杂多样，因此传统的机器学习分类算法难以检测复合安全攻击所产生的流量特征，导 致无法有效防范攻击，使得黑客达到破坏系统服务或窃取重要数据的目的。 因此，在搭建物 联网巡检系统的同时，不仅需要考虑巡检系统的快速部署问题， 还需要在部署过程中针对系 统安全性和鲁棒性进行细致周到的测试和验证，从而保障工业巡检的物理安全和信息安全。

第**4**章 技术方案

Ø 设计思路

基于上文所述， 本项目以自主构建物联网安全巡检系统为核心， 逐步搭建硬件模块、软 件服务和交互系统三个组成部分。通过贯彻“一条主线， 三者互联 ”的设计理念，旨在实现 “传感模块监测—机器人预巡检—人工在线评估—仪器问题诊断 ”的智慧工厂巡检工作流。 具体的实现与制作流程如下图 **2** 所示，下面将具体展开描述：

本团队根据实际情况，将项目的实现分为四个阶段：（1）调研阶段；（2）设计阶段；（3） 开发阶段；（4）呈现阶段。首先，在调研阶段，本团队将进行详细的文献调研、数据采集与 政策归纳，进而提出本项目所需的技术基础和具体方案。其次， 在设计阶段，本团队将搭建 系统的基础框架，并进行第一轮测试与优化。进一步，在开发阶段，本团队将逐步完成硬件 模块搭建、软件服务部署与系统交互配置，并执行第二轮实验与验证。最后，在呈现阶段， 本团队将研究成果转化为书面报告，最终完成科普创新项目训练。

具体而言，所提出的物联网安全巡检系统包括： 传感器模块、四足机器人、云端数据库、 前端可视化平台、后端支持系统等五个核心组件；本项目将采用敏捷开发的编程模式，遵循 DevOps 开发流程逐步完成硬件部署、软件服务与交互设计等三个主要步骤。其中，硬件部 署的传感器模块将基于 Arduino 开发板完全自主构建， 四足机器人将基于杭州云深处科技有 限公司所设计的“绝影 Lite ”四足机器人进行适配改装及二次开发。

与此同时，软件服务的前后端系统将基于 Golang, Kitex 以及 JavaScript 等技术实现， 云 数据库将基于阿里云平台， 使用 MySQL 与 PolarDB 等类型搭建；最后， 系统交互部分将通 过可视化 Web 端和机器人遥操作， 运用 WebSocket 通信协议与 YOLOv5 机器视觉算法等技 术达成在线检测与作业功能。在实现物联网安全巡检系统的基础开发后， 本项目团队将进行 真实工业场景的完整模拟和测试，根据实际情况进一步对系统软硬件进行修正与优化， 并撰 写相关技术文档与用户手册。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 文献调研 | | |  | | --- | | 数据采集 | | |  | | --- | | 政策归纳 | |
| 调研阶段 | 技术基础与项目计划 | | |

|  |
| --- |
| 确定硬件方案 稳定性测试  配置云服务器 开发软件服务  设计软硬件接口 制定交互方案    第一轮测试与优化  设计阶段 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  | | --- | | 交互系统部分 |   硬件构成部分  实时物联仪表盘  智慧物联模块  动态巡检模块  节点卫星地图  动态调度机制  开发阶段   |  | | --- | | 软件服务部分 |   分布式服务器   |  | | --- | |  | |  |   云服务数据库    图形化服务端  移动端APP开发   |  | | --- | | 第二轮实验与验证 | |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 撰写报告 | |  | 答辩展示 |  | 论文专利 |
| 呈现阶段 | | 完成计算机设计大赛作品 | | | | |

图 **2** 系统整体设计流程图

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 本项目执行甘特图 | | 第一阶段 | | | | | | | | | 第二阶段： | | | | |
| 1.01 | 1.10 | 1.20 | 2.01 | 2.10 | 2.20 | 3.01 | 3.10 | 3.20 | 4.01 | 4.05 | 4.10 | 4.15 | 4.20 |
| 项目内容 | 前期调研，政策归纳 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 硬件搭建，平台开发 |  |  |  |  |
| 第一轮测试，接口调用 |  |  |  |  |  |  |  |
| 中期反馈总结 |  |  |  |  |  |
| 第二轮测试，通信改良 |  |  |  |  |  |
| 安全检测实验与分析  撰写材料，参加竞赛 |  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |

图 **3** 项目时间安排甘特图

最后， 为确保开发工作顺利推进，本项目将相关成员划分为：硬件组、软件组、交互组； 三个小组相互配合、分工协作，争取通过 4C 设计大赛项目贴近真实的工业场景， 达到科研

训练的目的，并在最终解决实际的生产生活问题。本项目具体的开发时间安排如图 **3** 所示。

8 / 18

Ø 软硬件方案

基于上述设计思路与制作计划，本项目所提出的“智慧工厂安全巡检系统 ”主要包括基 础硬件、软件服务和交互系统三个部分。其中， 根据功能类型将硬件部分区分为“智慧物联 传感器”和“动态巡检机器人”两大模块， 图 **4** 展示了智慧物联传感器模块的硬件布线规范 图，主要包括 Arduino 开发板、ESP32 通信模块、 DHT11 温湿度传感器和 HC-SR04 超声波 传感器等硬件内容。此外，除了图 **4** 中的模块化布局方式， 本系统基于实际需求设计了分体 式布局方案（图 **6**），能够直接安装在工业现场的罐体或箱体仪器内，进一步提升了硬件模 块的适应性。最后，表 **4** 详细地列出了系统软硬件所依赖的具体材料以及技术工具。

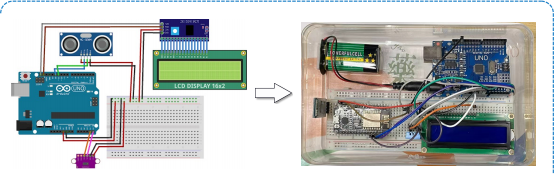


图 **4** 传感器模块的硬件布线规范图

表 **4** 安全巡检系统的软硬件方案

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 系统 | 材料类型 | 具体型号 | 功能要求 |
| 硬件模块 | 温湿度传感器 | DHT11 | 采集现场温湿度指标 |
| 软件服务 | 超声波传感器 气体监测传感器 声音强度传感器  硬件开发板  Wi-Fi 模块  GSM 模块  无线摄像头  四足机器人  云服务器  物联网平台  视频流系统  SMS 短信  后端框架 | HC-SR04  MH-Z19B  MAX4466  Arduino  ESP8266  SIM800L  海康威视 DS-2  绝影 Lite2 机型  阿里云 ECS 服务器  阿里云物联网服务器  萤石云  阿里云 SMS  Kitex | 采集仪器内容物高度指标 采集二氧化碳浓度指标 采集现场声音强度指标  程序的烧录与编译 物联网系统数据通信 发送短信和定位信息 视频传输与语音对讲 工业现场动态巡检  项目线上部署  硬件端数据交互  视频传输与语音对讲  短信通知服务  代码逻辑与框架接口 |
| 交互系统 | 分布式系统  本地数据库  可视化界面  Web 组件  网络请求框架 | Etcd  Room  Jetpack Compose ECharts  Retrofit | 共享配置和服务发现  移动端本地数据库  UI 构建框架  Web 可视化 UI  接口封装与异步调用 |

注：篇幅所限，上表仅列出了关键软硬件材料，具体的方案实现过程将在下文详细展开。

第**5**章 方案实现

基于上述技术方案，本项目以自主构建物联网安全巡检系统为核心，逐步搭建硬件模块、 软件服务和交互系统三个组成部分。具体而言，方案实现过程分为四个步骤：前期调研、硬 件搭建、软件开发和交互设计。下面将针对本系统的具体实现过程进行描述。

Ø 前期调研：文献综述和政策归纳

在项目设计之初，本团队针对物联网技术与安全巡检系统应用等关键词，进行了详尽的 文献调研与政策归纳。如图 5 所示，我们主要针对 26 篇学术文献、 7 套行业参考数据，以 及 3 份权威政府报告进行了细致周到的调研分析，具体的前期调研内容包括：

|  |
| --- |
| 26篇学术文献 7套行业数据集 3份权威报告  政策归纳  文献调研  数据采集    技术基础与项目计划  调研阶段 |

图 **5** 前期调研工作流程图

**(1)** 相关文献综述： 主要针对物联网巡检系统及其关键技术的发展动态进行了整理与分 析，包括国内外智能巡检系统的发展起源与最新工作进展，考察了诸如 Boston Dynamics 和 DEEPRobotics 等先进机器人制作企业的产品动态，并针对机器视觉、目标识别和在线作业 等关键技术进行了文献综述，详见本文第 **3** 章节。

**(2)** 国家政策归纳：本团队考察了政府近三年发布的智慧工厂建设相关政策，主要提取 了以下三份政府报告的精华内容，对本项目进行构思与搭建，具体的政府报告包括：《关于 推动工业互联网加快发展的通知》、《工业和信息化部关于加快发展物联网的指导意见》、《“十 三五”信息化规划纲要》。并基于权威政府报告对所提出的系统进行针对性的优化。

**(3)** 数据采集与用户分析：为了精确分析用户需求， 本项目广泛收集相关人员的意见， 包括工厂经理、企业员工和相关技术人员。通过实地走访、问卷调查、用户反馈等形式对工 业巡检中出现的问题进行分析和归纳。其中，我们发现巡检效率和巡检安全性是企业用户最 关注的问题。此外，我们还对已有的工业巡检系统进行考察、对比和评估。基于上述前期调 研结果，团队最终明确了巡检系统的具体设计思路与实验测试方案。

Ø 硬件搭建： 智慧物联模块与动态巡检模块

本系统根据具体执行功能，将硬件部分区分为智慧物联和动态巡检两大应用模块。其中， 图 **6** 展示了智慧物联传感器的工作流程与应用案例，图 **7** 展示了动态巡检机器人的整体构 型，图 **8** 则展示了四足机器人所搭载的硬件外设。

**(1)** 针对智慧物联模块： 本系统搭载多类型的传感设备以实现工厂环境与相关仪器监测。 利用 DHT22 温湿度传感器实时监测地下管廊、水道水泵等仪器的环境温湿度数据；通过 HC- SR04 超声波传感器测量相关罐体或箱体仪器的工业内容物指标；同时，装配 MH-Z19B 气 体传感器实现工厂内部的空气环境综合评估， 并搭载 MAX4466 噪声传感器对周边环境所存 在的噪声污染源进行监测与提醒，最终实现多类型传感器的协同作业。

如图 **6** 所示，智慧物联模块的多类型传感器采集到相关数据指标后，利用 ESP8266 通 信芯片，基于 MQTT 协议进行信息通讯，将环境指标与设备工作状况反馈给系统服务端。 此外，通过 ESPAsyncWebServer 库创建异步 Web 服务， 所采集到的数据通过阿里云物联网 云平台， 将相关数据持久化转存入云数据库中，供软件后台进行处理与调用。

数据存储至

云端数据库

通过MQTT协议

数据传输到云端

箱体案例

移动端APP

智慧物联模块

数据经过整理后

呈现到软件平台

可视化Web端

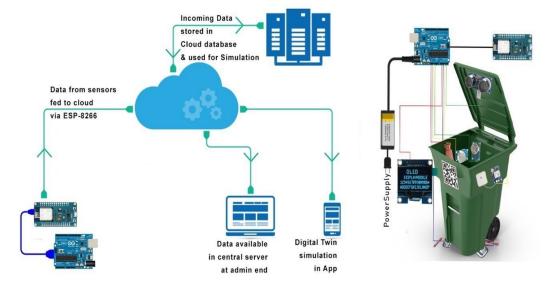


图 **6** 智慧物联模块的工作流程与箱体应用案例

**(2)** 针对动态巡检模块： 本系统基于杭州云深处科技公司的“绝影 Lite ”四足机器人实 现工业现场的动态巡检，结合相关技术文档对四足机器人的软硬件进行二次开发与运动控制 设计，采用 Ethernet 协议进行烧录编译。充分考虑工厂的实际环境情况，针对巡检过程中可 能涉及的路径规划，动态避障，SLAM 建图等功能开展具体的开发与部署工作。

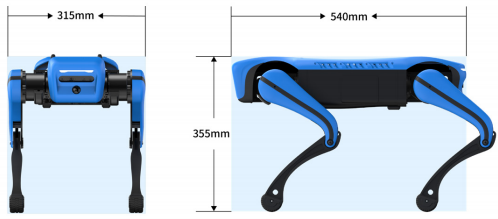
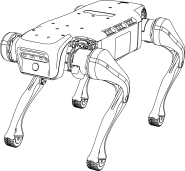


图 **7** 四足机器人构型示意图

如上图 **7** 所示，本系统所采用的“绝影 Lite”四足机器人本体由运动四肢和身体主干构 成， 每条运动肢干由 3 个关节组成，机器人整体共有 12 个自由度， 站立尺寸约为 540mm × 315mm × 355mm ，整机重量约为10kg 。如下图 **8** 所示，该机器人所搭载的设备 模块包括： 外接接口、深度相机、 广角相机、 超声波模组、 扬声器、 散热孔和可更换电池等 等。根据实际巡检需求， 本团队进一步对该机器人进行了模块优化和二次改装，添加了激光 雷达模组，并进行了防水涂层覆盖，提高四足机器人对于复杂环境的适应能力（如图 **16-2**）。 在完成硬件模块的基本搭建后，本团队进一步对巡检系统的软件服务进行开发部署。

外接接口



|  |
| --- |
| 实时物联仪表盘管理页面 |

|  |
| --- |
| 智慧物联传感器模块 |

系统管理平台

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | 动态巡检机器狗模块 | |

|  |
| --- |
| 标准规范体系 |

|  |
| --- |
| 云服务器 |

客户端

|  |
| --- |
| 数据可视化 **API** |

|  |
| --- |
| 机器人交互 **API** |

|  |
| --- |
| 卫星地图 **API** |

|  |
| --- |
| 系统服务健康 **API** |

业务层

|  |
| --- |
| **HTTP/DNS** |

|  |
| --- |
| **Hertz**路由转发 |

|  |
| --- |
| 服务发现**/**负载均衡 |

运行支持层

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  | | --- | | 鉴权服务 |  |  | | --- | | **Websocket** 连接 | | |  | | --- | | 核心业务 |  |  | | --- | | 数据采集 | | |  | | --- | | 定时任务 |  |  | | --- | | 平台系统管理 | |

|  |
| --- |
| 日 志记录 |

|  |
| --- |
| 监控服务 |

|  |
| --- |
| 配置服务 |

服务层

|  |
| --- |
| 数据缓存 |

|  |
| --- |
| 代码生成 |

|  |
| --- |
| 数据迁移 |

|  |
| --- |
| 结构体映射 |

|  |
| --- |
| 预加载 |

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | 事务处理 | |

数据层

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Clound** | **Mysql** | **Redis** |

数据库

|  |
| --- |
| 运行在**Docker** 中的主机系统、存储系统、网络系统、安全系统等基础运行环境 |

基础设施层

深度相机

广角相机

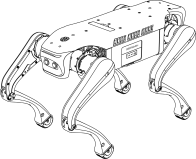
大腿

䣵㚜器

飃㚜嫧嘗篯

小腿

防滑足底



丆懷㯿

⺎催䩦榾娢

图 **8** 四足机器人外设示意图

Ø 软件服务： 高性能分布式服务系统

在软件部分中，本系统服务基于开源框架 Kitex 的分布式架构，遵循 DevOps 开发流程， 以达到敏捷式开发的效果，提升开发效率和系统安全性。具体而言，软件服务主要包括以下 七个构件： 客户端、业务层、运行支持层、服务层、数据层、数据库和基础设施层。

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |

图 **9** 软件服务整体架构图

图 **9** 展示了软件服务的整体架构图，其中主要的开发内容与服务功能如下：

**(1)** 对接智能物联模块： 将采集到的各项数据以 JSON 的形式传递给云服务端， 对于设 备中的异常数据， 服务端进行验证分类，将异常信息进行汇总持久化存储， 以便提供给工作 人员查看以及向四足机器人发出行动指令。

**(2)** 对接动态巡检模块： 四足机器人收集视频流数据后， 通过 Ethernet 协议将相关数据 传输给云服务器， 云服务主机集成对于四足机器人的数据处理模块， 将采集数据进行持久化 保存入云数据库。同时服务端根据智能物联部分的数据将具体的指令传递给四足机器人， 以 便进行针对性巡检。

**(3)** 设计实时物联仪平台： 考虑到工厂设备维护人员需要一个用户友好的图形化界面对 数据进行实时监控，本项目开发了一个设计完善、符合自然交互逻辑的可视化控制面板，帮 助管理员理解其可见域内的数据情况，具体面板如图 **10** 所示。

Ø 交互系统： 实时数据可视化与交互仪表盘

在交互部分中， 为构建用户友好的系统交互模式，本项目基于 Echarts 框架定义了物联 网硬件的图形化仪表盘， 向企业用户提供实时的数据可视化结果，通过一系列的图表样式将 数据以更直观的方式呈现给相关工作人员，力图打造便捷高效的用户体验，图 **10** 展示了本 系统的实时可视化平台以及系统交互仪表盘。具体开发功能的细节如下：

数据可视化平台

交互仪表盘

图 **10** 数据可视化平台与交互仪表盘

**(1)** 实时数据更新：本系统通过客户端与服务端建立 WebSocket 长链接，服务端下发消 息的方式进行客户端管理面板上信息的更新，不需要进行刷新等多余操作的同时实现了低延 迟高并发的数据展示功能。在不使用传统轮询方法进行数据更新的情况下，这样的设计思路 能为服务性能带来进一步的提升。

**(2)** 卫星地图展示：本系统通过使用卫星地图的展示方式， 提供物联网模块节点的精确 位置信息，能够清晰地呈现各个物联节点和四足机器人的位置状态， 便于工厂管理者制定机 器人的巡逻策略、实现最短时间内完成指定节点检查的需求。

**(3)** 动态巡检调度机制：本项目考虑将物联仪表盘与四足机器人相关信息进行链接，实 现机器人工作数据的远程监控，实时对机器人的工作健康状态进行评估， 从而实现提前安排 低电量机器人抵达充电点，以更换能源； 该系统也能辅助实现对四足机器人在相应时间内的 路径规划，从而帮助巡检管理员进行任务调度，具有多项实用功能。

第**6**章 测试报告

在完成巡检系统的基本构建后，本项目将对提出的巡检系统进行实地部署与定点测试。 通过单元测试、集成测试与系统测试三个步骤，层层递进地针对系统进行测试与优化，最终 提高系统的鲁棒性与适应性。下面将针对具体的测试优化过程进行描述：

Ø 单元测试与集成测试

首先执行单元测试，针对硬件模块进行功能性的检测工作， 确保系统硬件正常工作， 并 针对软硬件之间的数据通信进行检验，保证数据在传输过程中不会发生错位或丢失。其次， 执行集成测试，分别针对智慧物联传感器和动态巡检机器人两个模块， 进行集成性的实地场 景测试，确保各模块功能运行正常。图 **11-1** 展示了智慧物联传感器在工业园区中的箱体采 集测试，图 **11-2** 则展示了四足机器人针对工业现场 PLC 仪器设备的巡检测试。





图11-1 智慧物联模块的测试场景



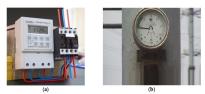
图11-2 动态巡检机器人的测试场景

图 **11** 智慧物联传感器模块的测试场景

Ø 系统测试与代码评审

完成单元测试和集成测试后， 进一步执行完整的系统测试，将硬件模块、软件服务、交 互系统的相关功能全面部署，并按照流程逐一验证。图 12 展示了所提出的“智慧工厂安全 巡检系统”的工作流程图。智慧工厂所搭载的安全巡检系统在执行巡检工作流时，首先由传 感器模块采集工业现场的数据指标， 并可视化到 Web 端仪表盘， 供工作人员监测， 如相关数 据出现异常，则出动四足机器人进行现场巡检。其次， 四足机器人通过机器视觉算法读取视 频流中的仪器仪表数据， 并反馈给人工在线评估， 如现场仪器安全无虞，则机器人自主调度 返回充电区； 如现场仪器出现安全隐患， 则迅速针对问题进行检修。从而实现工业现场的自

主高效巡检，解决智慧工厂的生产安全问题。



工业指标可视化 四足机器人巡检

仪器仪表数据提取



机器人自主调度 遥操控与数据反馈

图 **12** 安全巡检系统的工作流程图

此外，在结束每一个周期的项目开发后，依照敏捷开发的工作理念，我们将对这个周期 的项目功能进行完整的功能测试与代码评审。针对每一个工具类函数进行单元测试，部分有 高性能要求的函数将会使用 Benchmark 进行压力测试。如果函数的性能没有达到预期的标 准，开发团队将会再次对该函数进行针对性的优化， 保证整个服务平台的高可用。图 **13** 展

示了本团队在功能测试过程中所使用 Go 语言单元测试代码，用以确保程序质量和可靠性。

|  |
| --- |
| 1. func Test\_tokenProcess(t \*testing.T) {  2. type args struct {  3. userId int64  4. }  5. tests := []struct {  6. name string  7. args args  8. want bool  9. }{  10. {name: "test-1", args: args{userId: 114514}, want: true},  11. }  12. for \_, tt := range tests {  13. t.Run(tt.name, func(t \*testing.T) {  14. if got := tokenProcess(tt.args.userId); got != tt.want {  15. t.Errorf("tokenProcess() = %v, want %v", got, tt.want)  16. }  17. }  18. }  19. } |

图 **13** 软件服务的单元测试用例代码

Ø 实验测试总结

最后， 如图 14 所示，本系统通过硬件模块、软件服务和交互系统的三者互联设计，主 要实现了：仪器仪表监测、 工厂环境评估、高危场景巡检、人工在线作业、数据可视化呈 现和系统交互仪表盘等六大功能组件。并且，经过细致全面的实地测试，我们最终验证了 所提出的安全巡检系统在多个工业场景下的高效性与安全性。最终能够解决实际的生产生 活需求，完成学术训练的目的，很大程度上提高了项目成员的团队协作和动手实践能力。

OpenIoT

动态巡检

硬件模块



数据可视化

智慧物联

分布式系统

遥操作

人机交互

交互系统

软件服务

远程监测

图 **14** 智慧工厂安全巡检系统的整体设计架构图

第**7**章 应用前景

Ø 成果展示

通过上述实现方案，本团队完成了“智慧工厂安全巡检系统”的 4C 大赛项目设计，该 系统由硬件模块、软件服务和交互系统三大部分构成， 通过运用机器视觉、在线作业、路径 规划、可视化与分布式等技术， 最终实现“传感模块监测—机器人预巡检—人工在线评估— 仪器问题诊断”的智慧工厂巡检工作流， 图 15 展示了该工作流的自主运行实例。

图 16 展示了本项目所设计的智慧物联传感器模块，以及经过二次改装的四足机器人模 块。其中，传感器模块可以根据实际的情况进行布局调整，除了图 16-1 中的模块化布局设 计，还可以调整为图 6 中的箱体分散布局方式， 不仅能够使用蓄电池直接供电，还提供了太 阳能板接口，从而实现环保供电机制。此外，基于图 8 所展示的四足机器人基本外设，我们 还根据实际需要， 增加了激光雷达模块， 并进行了防水涂装覆盖，有效地提高了四足机器人 在诸如地下水道、密闭管廊等复杂工业环境下的适应性与行动能力，从而解决实际巡检难题。



图 **15** 安全巡检系统的工作流案例[23]

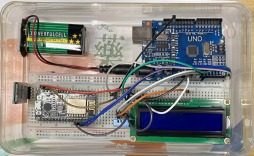


图16-1 智慧物联传感器模块



图16-2 动态巡检机器人模块

图 **16** 传感器和机器人模块的设备外观

Ø 应用前景

随着物联网和机器人技术的进一步发展，安全巡检系统将会有广泛的市场应用前景。所 提出的安全巡检系统可以广泛应用于各个行业和领域，例如工业现场、智慧社区、物流仓储、 环境保护、抗震救灾以及科研教育等等，图 **17** 展示了安全巡检系统的部分应用场景。

首先， 在智慧工业园区，安全巡检系统可以将机器人与其他自动化设备相结合，实现整 个生产流程的自动化。机器人可以在不间断工作的情况下对生产线进行巡检， 从而减少停机 时间、提高生产效率。此外，机器人还可以检查生产线上的缺陷和隐患， 防止生产线因质量 问题而造成安全事故，提高生产线的稳定性和可靠性，保障了工业生产的效率和安全。

其次， 在智能城市建设，安全巡检系统可以应用于城市设施和环境的安全监测。通过机 器人巡检城市的各个区域和设施，如道路、桥梁、水道、电缆等，保证城市的设施设备安全 运行。机器人还可以协助城市管理部门进行城市环境监测， 从而提高城市的环境质量和可持 续发展能力。 这将有效地保障城市居民的生活质量，提高人民群众的幸福感与归属感。

另外，在物流仓储领域，安全巡检系统也可以起到重要作用。机器人可以针对仓储中心 和货物运输车辆进行巡检，确保货物运输过程中的安全和顺畅，从而提高物流效率。此外， 机器人还可以协助物流企业进行库存管理和资产监测，从而降低运营成本、提高资产利用率。 这将为物流行业提供更加高效、安全的服务， 帮助相关企业提高市场竞争力。

最后， 在教育科研领域，该系统也有广泛的应用场景。学生可以通过实践和实验，了解 安全巡检系统的工作原理，加深对机器人技术的理解和认识，培养学生的工程思维和科学素 养。并且，特别针对高校科研，安全巡检系统也可以作为研究载体，用于开展人工智能、机 器人技术、 控制工程等领域的前沿技术研究，从而进一步提高巡检系统的科学性。

总而言之，随着相关技术的不断发展和应用场景的不断延拓，安全巡检系统将成为工业 园区、和智慧社区等实际场景的重要组成部分， 带来更高效、更智能、更安全的生产和生活 方式。在未来，安全巡检系统还将更加注重数据处理的高效性和安全性，充分利用大数据和 人工智能技术，以实现更智能化的巡检流程与更准确的风险预测，最终更好地惠及社会民生。



工业园区



电力巡视



高危现场



抗震救灾



地下管廊



教育科研

图 **17** 物联网安全巡检系统的应用场景

参考文献

[1] 李孟良, 马盈政. 我国物联网产业发展现状和建议 [J]. 成组技术与生产现代化, 2021,

38(03): 42-46.

[2] 关新平, 吕玲, 等. 智能工厂的感知, 通信与控制 [J]. ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2017:

65.

[3] 蔡自兴. 中国人工智能 40 年 [J]. 科技导报, 2016, 34(15): 12-32.

[4] Thomas AD H, Rodd M G, et al. Real-time Industrial Visual Inspection: A Review [J]. Real-Time Imaging, 1995, 1(2): 139- 158.

[5] Alhassan A B, Zhang X, et al. Power transmission line inspection robots: A review, trends and challenges for future research [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118: 105862.

[6] Roslin N S, Anuar A, et al. A Review: Hybrid Locomotion of In-pipe Inspection Robot [J].

Procedia Engineering, 2012, 41: 1456- 1462.

[7] Ackerman E. A Robot for the Worst Job in the Warehouse: Boston Dynamics' Stretch can move 800 heavy boxes per hour [J]. IEEE Spectrum, 2022, 59(1): 50-51.

[8] 魏振中. 超高压输电线路智能巡检机器人的视觉监控系统研究 [D]; 沈阳工业大学, 2004.

[9] 王洪光. 一种超高压输电线路巡检机器人机构 [M].

[10] 潘祥生, 陈晓晶. 矿用智能巡检机器人关键技术研究 [J]. 工矿自动化, 2020, 46(10): 43-48. [11] 孙凌宇, 李鑫宝, 等. 石化巡检机器人设计与应用 [J]. 制造业自动化, 2023, 45(02): 145- 148. [12] 赵永强, 饶元, 等. 深度学习目标检测方法综述 [J]. 中国图象图形学报, 2020, 25(04): 629-

654.

[13] Ren S, He K, et al. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks

[J]. Advances in neural information processing systems, 2015, 28.

[14] Redmon J, Divvala S, et al. You only look once: Unified, real-time object detection; proceedings

of the Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, F, 2016 [C].

[15] 张堃, 姜朋朋, 等. 大视场大规模目标精确检测算法应用研究\* [J]. 仪器仪表学报, 41(4):

191- 199.

[16] 徐哲壮, 黄平, 等. 融合机器视觉与邻近度估计的相似工业设备识别策略研究 [J]. 仪器仪 表学报, 2023, Vol. 44(No. 1).

[17] 杨廷方. 变压器在线监测与故障诊断新技术的研究 [D]; 华中科技大学, 2008.

[18] 黄静, 张成, 等. 水冷模块样机自动在线检测系统研究与应用 [J]. 制造业自动化, 2023,

45(02): 106- 110.

[19] 张猛. 工业物联网安全风险分析及对策研究 [J]. 中国工业评论, 2017, (4): 42-50.

[20] 刘霞, 王运付, 等. 工业物联网终端安全解决方案研究与设计 [J]. 物联网技术, 2023,

13(02): 102- 104+107.

[21] Xiao L, Wan X, et al. IoT Security Techniques Based on Machine Learning: How Do IoT Devices

Use AI to Enhance Security? [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2018, 35(5): 41-49.

[22] Ahmad R, Alsmadi I. Machine learning approaches to IoT security: A systematic literature review

[J]. Internet of Things, 2021, 14.

[23] 杭州云深处科技有限公司, 绝影 X20 行业应用, URL: <https://www.deeprobotics.cn/> [Z]. 2023