

基于 ELF2 的工地巡检机器人的设计与实现

摘要

鉴于工地环境普遍存在高风险、强干扰和人员管理难度大等问题，传统人工巡检方式不仅效率低、覆盖范围有限，而且存在较大安全隐患。因此，本文设计并实现了一种基于 ELF2 开发板的工地智能巡检机器人系统，通过融合 AI 视觉识别、嵌入式控制、Web 通信与物联网平台，构建一套适用于复杂施工场景的全天候、自动化、安全监测与建材识别系统。系统采用 ELF2 边缘计算平台作为主控，结合高性能 NPU 加速能力，部署本地 YOLOv5s 模型，实现钢筋圈(coil)、钢筋捆(rebar)和砌体(brickwork)等建材的精准识别与数量统计。同时，系统支持模型切换，部署安全帽识别模型用于检测是否存在未佩戴安全帽的施工人員，有效提升施工现场的安全监测能力。机器人底盘采用麦克纳姆轮全向移动结构，通过网页控制界面即可实现远程实时控制与状态反馈。摄像头图像通过 USB 接入实现高质量视频流采集，并在本地完成推理分析。系统还集成 DHT11 温湿度传感器、二维云台和图像上传功能，将异常现场图像与环境参数实时上传至 OneNET 云平台，实现远程可视化数据监控。

工地巡检机器人具有部署灵活、检测精度高、响应速度快等优点，可广泛应用于工地、工业园区等环境复杂、要求高频巡检的场景中，具备良好的工程应用价值和二次开发潜力。

关键词：建材识别；安全检测；AI 人工智能视觉；ELF2

目录

第一部分 作品概述	1
1.1 功能与特性	1
1.2 应用领域	1
1.3 主要技术特点	2
1.4 主要性能指标	3
1.5 主要创新点	3
1.6 设计流程	3
第二部分 系统组成及功能说明	4
2.1 整体介绍	4
2.2 硬件系统介绍	6
2.2.1 ELF2 开发板	6
2.2.2 ESP32S3 的移动平台	7
2.2.3 DHT11 温湿度模块	8
2.2.4 USB 摄像头	9
2.2.5 MG90S 舵机与 N20 直流电机	9
2.3 机械设计介绍	10
2.3.1 ELF2 开发板的固定	11
2.3.2 N20 电机的固定以及移动平台与 ELF2 开发板的连接	11
2.3.3 二维云台	12
2.4 软件系统介绍	13
2.4.1 建材识别	14
2.4.3 WEB 服务端	18
2.4.4 OneNet 云平台	19
第三部分 完成情况及性能参数	20
3.1 整体介绍	20
3.2 功能测试	22
3.2.1 机器人硬件机械结构测试	22
3.2.2 建材识别测试	23
3.2.3 安全检测测试	25
3.2.4 环境监测	26
3.2.4 云端传输	27
第四部分 总结	28
4.1 可扩展之处	28
4.2 心得体会	29
第五部分 参考文献	30

第一部分 作品概述

1.1 功能与特性

目前工业巡检主要利用人工巡视的方式进行，人工巡检耗时长，对人员要求高，特别是在复杂高危的工业环境下，还要保障巡检人员的人身安全。同时，人工巡检易受身体、环境等因素影响，难以实现高频次、全覆盖的检查。

针对上述问题，本作品设计并实现了基于 ELF2 的工地巡检机器人，结合 AI 视觉识别、机械运动控制、物联网(IoT)等技术，实现自动化、高精度、全天候的工地巡检与安全监测。该机器人采用麦克拉姆轮结构适应不同方向的运动，搭载传感器、摄像头和二维云台，实现 24 小时全方位覆盖不间断巡检与监测人员安全。结合 ELF2 开发板所具备强大的 NPU 算力，无需依赖云端资源，机器人通过本地部署 YOLOv5 深度学习模型，快速准确地统计建材种类和数量，为施工人员的作业提供保障。工作人员能够通过手机、电脑和平板等设备通过 WEB 网页远程控制工地巡检机器人，能够清晰地观察到工地现场的实时画面，及时响应工地异常情况的发生。此外，WEB 网页能够实时观察工地环境的变化，通过折线图观察其变化趋势，帮助工作人员管理工地环境情况，同时能通过物联网将工地实时环境和现场异常情况上传至 OneNET 云端可视化显示。

1.2 应用领域

面向复杂工业场景的智能巡检，结合 AI 人工智能视觉、机械运动控制、物联网(IoT)等技术，基于 ELF2 的工地巡检机器人解决了传统工业巡检的痛点，在安全性、效率、成本、数据精准度等方面均实现突破，为工业 4.0 背景下的智能工地、智慧工厂提供了新的解决方案。具体应用领域如下：

（1）建筑施工现场智能巡检

适用于房建、市政、桥梁等施工现场的日常巡查任务，通过 AI 视觉识别自动识别建材堆放情况与施工人员安全着装，辅助项目管理人员实现对物资与人员行为的可视化监管，有效降低人力成本与安全风险。

（2）工业园区安全监控

该机器人可部署于大型工业园、制造车间、原材料堆场等区域，实时检测异

常行为、违规操作和环境参数变化（如温湿度超标），对可能存在的安全隐患进行提前预警和干预。

（3）仓储与物流环境监测

在仓库与物流转运中心，可用于巡检堆叠物资、监控进出人员和记录异常情况，辅助管理人员实现物料信息化管理与仓储安全可控。

1.3 主要技术特点

本作品融合嵌入式开发、AI 视觉识别、智能控制与物联网等多项技术，具备如下主要技术特点：

（1）边缘计算与 AI 识别相结合

凭借 ELF2 开发板强大的多核 NPU 算力，不依赖于云端，部署 YOLOv5 的建材识别和安全检测模型高效地实现本地推理，实现实时识别工地建材种类并统计数量，以及监测工人是否正确佩戴安全帽。

（2）智能巡检与全向移动控制

采用麦克纳姆轮全向底盘，结合二维云台，实现全方位、无死角的智能巡检，适应复杂、狭窄或频繁变换路径的工业环境。

（3）Web 网页可视化远程控制

通过 WebSocket 实现网页端远程操控与视频流传输，工作人员可通过手机、平板或电脑跨平台控制工地巡检机器人的运动、观察摄像头实时画面，并动态查看检测结果，提供了便捷、友好的控制方式。

（4）多维度环境感知

搭载 DHT11 传感器获取工地温湿度数据，实时上传并在网页端以图表形式展示变化趋势，为现场管理提供环境依据。

（5）物联网数据同步与云端可视化

通过 HTTP 协议接入 OneNET 云平台，实现工地异常信息与环境数据的远程同步与可视化展示，便于工程监管与信息溯源。

此外，本作品还可以衍生出如建筑数字孪生、AI+边缘巡检系统、云边协同安全平台等系统。

1.4 主要性能指标

- (1) 对摄像头每帧图像的目标检测延迟时间 $\leq 200\text{ms}$ 。
- (2) 系统全天候下稳定运行超过 72 小时无异常，本地 YOLOv5 推理与控制系统运行温度稳定在 60°C 以下。
- (3) 摄像头实时图像传输至网页延迟时间 $\leq 200\text{ms}$ 。
- (4) 目标检测准确率 $\geq 90\%$ 。
- (5) 摄像头图像采集最远可视距离达 3 米，满足普通工地场景中建材与人员安全识别需求，受环境光照影响较小。
- (6) 工地巡检机器人运动控制精度优于 $\pm 5\text{cm}$ ，麦克纳姆轮底盘支持全向移动，适应复杂地形环境。

1.5 主要创新点

在传统工地人工巡检基础上，本作品主要对 AI 人工智能视觉、人机远程协同控制和物联网技术进行融合与系统创新，主要创新点如下：

- (1) 工地巡检与 AI 人工智能视觉相结合，充分发挥 ELF2 嵌入式平台多核 NPU 的强大算力，本地实现工地建材识别、安全检测等任务，解决传统系统依赖云端算力、延迟高、稳定性差和传统人工巡检存在的问题。
- (2) 集成多模态信息感知，构建工地“人-物-环境”综合监测系统，实现对建材、人员安全、环境数据的全流程感知。
- (3) 机器人采用麦克纳姆轮结构，具备复杂场景自适应巡检能力，具备高灵活性和可靠性，适配实际工地高频次巡检需求。
- (4) 基于 WebSocket 构建跨平台远程协作控制界面，实现控制与数据可视化高度统一，便于管理人员远程作业与巡查。

1.6 设计流程

本作品从工地环境中高频巡检、人身安全、物料管理、安全监管等实际需求出发，确立以智能巡检、目标识别、环境监测、远程控制为核心目标的功能，并制定系统技术指标，完成工地巡检机器人的方案设计。根据系统整体方案，搭建基于 ELF2 开发板的软硬件平台。在模拟工地环境下，对机器人的基本运动，对建材种类和数量进行统计，对人员安全进行监测，可视化显示当前环境状态等功

能测试，来评估机器人的性能。具体设计流程如图 1.1 所示。

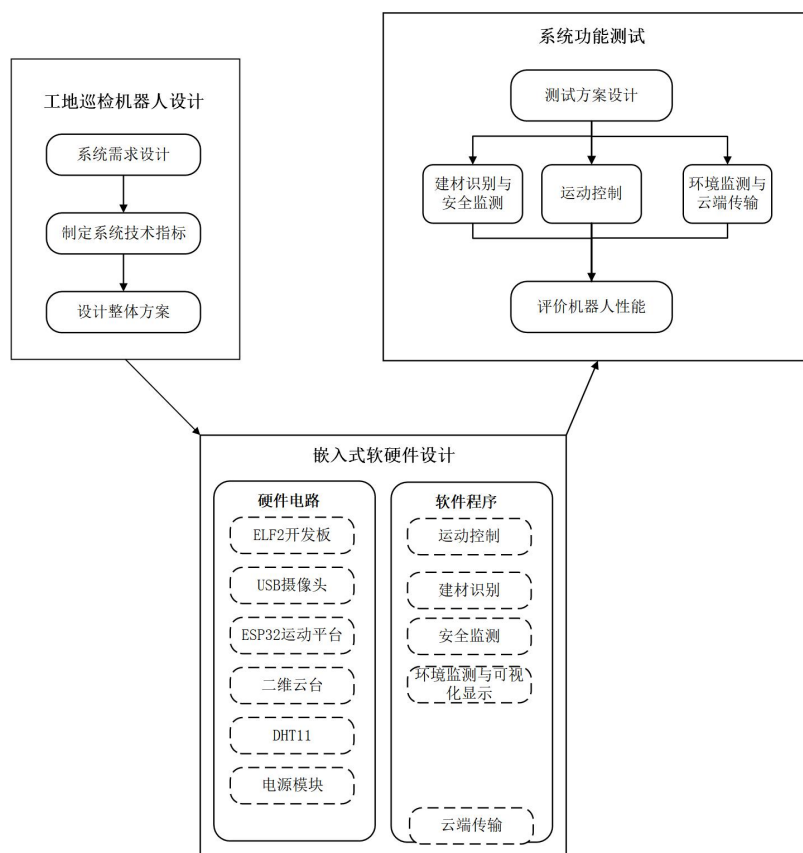


图 1.1 基于 ELF2 的工地巡检机器人设计流程

第二部分 系统组成及功能说明

2.1 整体介绍

本系统是基于 ELF2 嵌入式平台，构建了一个集 AI 视觉识别、智能巡检控制、环境数据采集、远程通信交互与云端数据可视化于一体的工地巡检机器人系统，其整体框图如图 2.1 所示。基于 ELF2 的工地巡检机器人主要分为硬件部分和软件部分，其硬件部分主要由搭载 RK3588 芯片的飞凌嵌入式 ELF2 开发板、立创 EDA 专业版所画板的运动控制平台、DHT11 传感器、USB 摄像头和二维云台等构成，其软件部分包含 WEB 服务端、目标检测、温湿度可视化显示、运动控制和云端数据上传等构成。

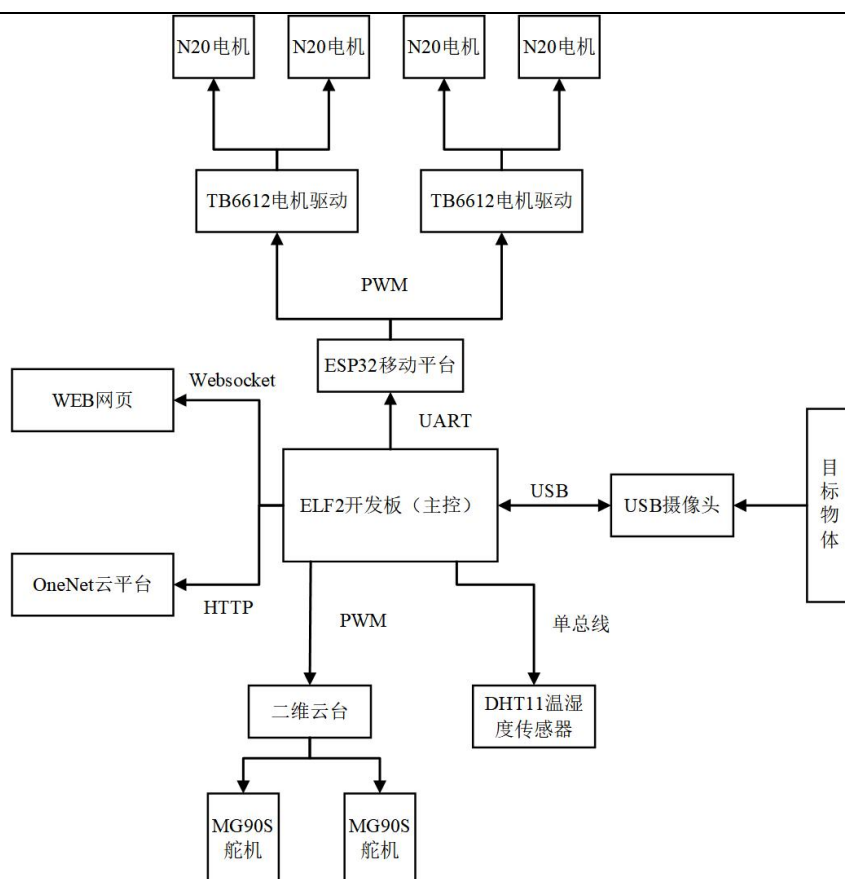


图 2.1 基于 ELF2 的工地巡检机器人整体框图

ELF2 开发板通过 USB 摄像头实时获取图像，当建材识别开启时，对采集到的图像进行实时本地 YOLOv5 推理，砌体、钢筋圈、钢筋捆这三类建材被识别检测到会统计其数量，将得到建材种类与数量上传至 WEB 端。当显示框打开时候，识别物体会在实时图像画面框选出来，方便观察。由于 ELF2 开发板只引出两路 PWM，该开发板通过输出 PWM 控制二维云台实现两个自由度的图像捕捉，通过串口与 ESP32 的移动平台通信，控制麦克拉姆轮实现全方位的移动，获取各个不同角度的摄像头实时画面。WEB 网页与工地巡检机器人通过 Websocket 协议远程通信，通过点击页面的云台控制或者移动控制，实现机器人的运动控制。同时，页面会实时显示机器人摄像头画面，还会显示工地环境温湿度信息和环境变化趋势，以及将传感器信息实时上传至 OneNET 云平台。工作人员通过点击双态开关滑块能够切换建材识别、安全检测和检测框显示功能，点击上传图片按钮能够将当前摄像头画面上传至云端存储。工地巡检机器人的功能概述如图 2.2 所示。

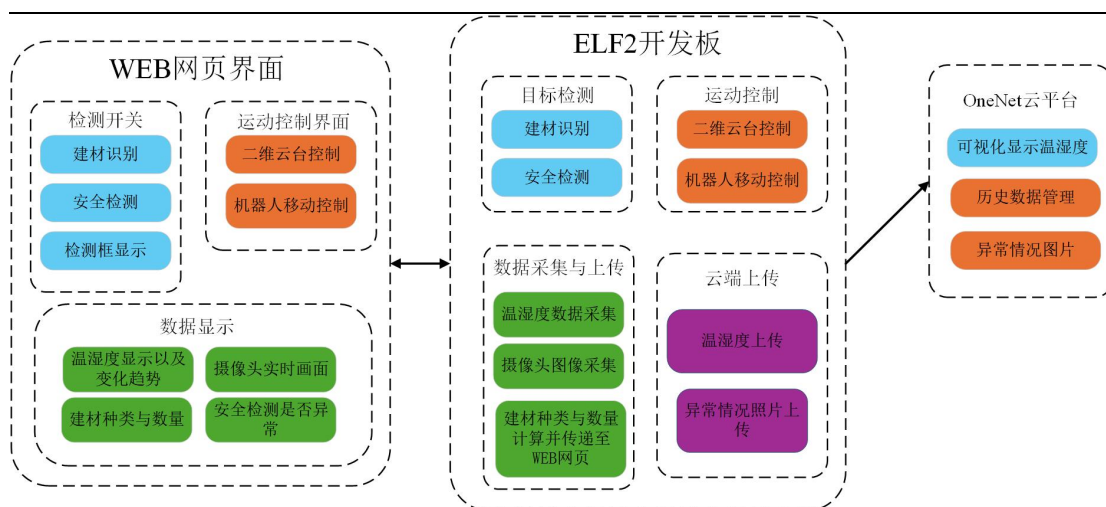


图 2.2 基于 ELF2 的工地巡检机器人功能概述

2.2 硬件系统介绍

2.2.1 ELF2 开发板

ELF2 开发板采用核心板与底板分体结构，通过 BTB 接插件进行连接，便于模块化开发与系统扩展。其核心板搭载的是一颗基于 ARMv8-A 架构的高性能八核处理器，集成了 4 核 Cortex-A76+4 核 Cortex-A55 的异构架构，具备出色的边缘计算与多媒体处理能力。其中，Cortex-A55 最高主频可达 2.4GHz，Cortex-A76 主频可达 1.8GHz，搭配独立的 NEON 向量协处理器及内置神经网络加速引擎（NPU），整体 AI 算力高达 6TOPS，可满足高负载图像识别与边缘推理任务需求。此外，ELF2 开发板支持多种操作系统，如 Android 和 OpenHarmony，具备高度可定制性与良好的生态兼容性。其典型应用领域包括边缘智能终端、工业检测设备、机器人视觉平台等。该开发板还提供丰富的扩展接口，包括 USB、GPIO、UART、SPI、I2C、MIPI-CSI 摄像头接口、以太网接口等，便于开发者灵活接入各类传感器与外设，适合构建 AIoT 复杂应用系统。

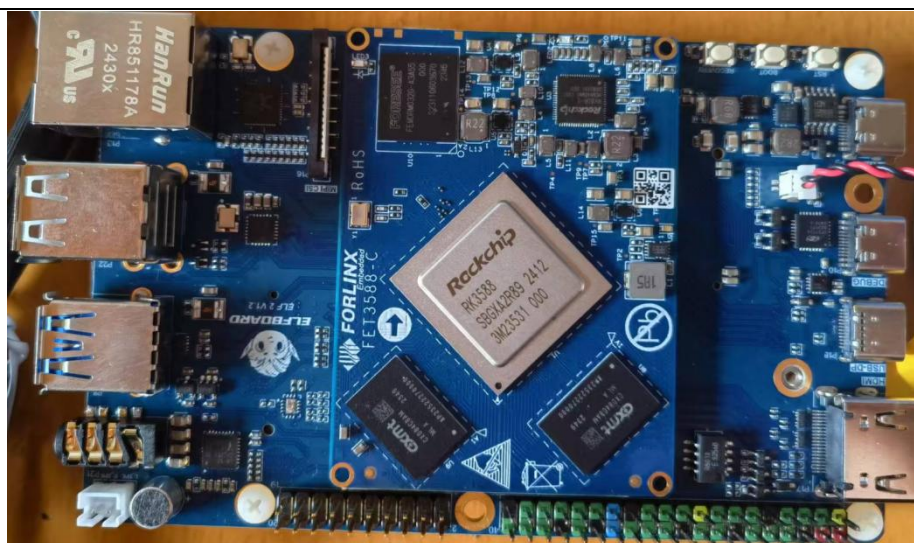


图 2.3 ELF2 开发板实物图

2.2.2 ESP32S3 的移动平台

由于 ELF2 开发板只引出两个 PWM 引脚，两个 PWM 引脚用于控制二维云台的移动。ESP32S3 的移动平台用于机器人的水平方向的全方位移动，主要由乐鑫科技公司的 ESP32S3 芯片、步进电机驱动、电源模块等构成。ESP32-S3 是一款集成 Wi-Fi 和低功耗蓝牙（BLE）的高性能双核处理器芯片，内核为双核 Xtensa®32-bit LX7，最高主频 240MHz，并集成丰富的 GPIO、PWM、ADC、SPI、I2C 等外设资源，其低功耗、高性能以及优秀的外围接口资源，使其成为运动控制与无线通信一体化系统的理想选择。步进驱动采用的是 TB6612 芯片，该芯片是常用于机器人和小型运动控制系统中的双通道直流电机/步进电机驱动芯片，内置短路保护和热关断保护功能，可以实现平滑的电机转速调节与方向控制。电源模块采用 LM78M05 将两节 18650 电池电压降压到 5v，再通过 AMS1117 降压至 3.3v 给 ESP32S3 供电，以及给 TB6612 芯片提供电源。其移动平台的电路图和 PCB 图分别如图 2.4 和图 2.5 所示。

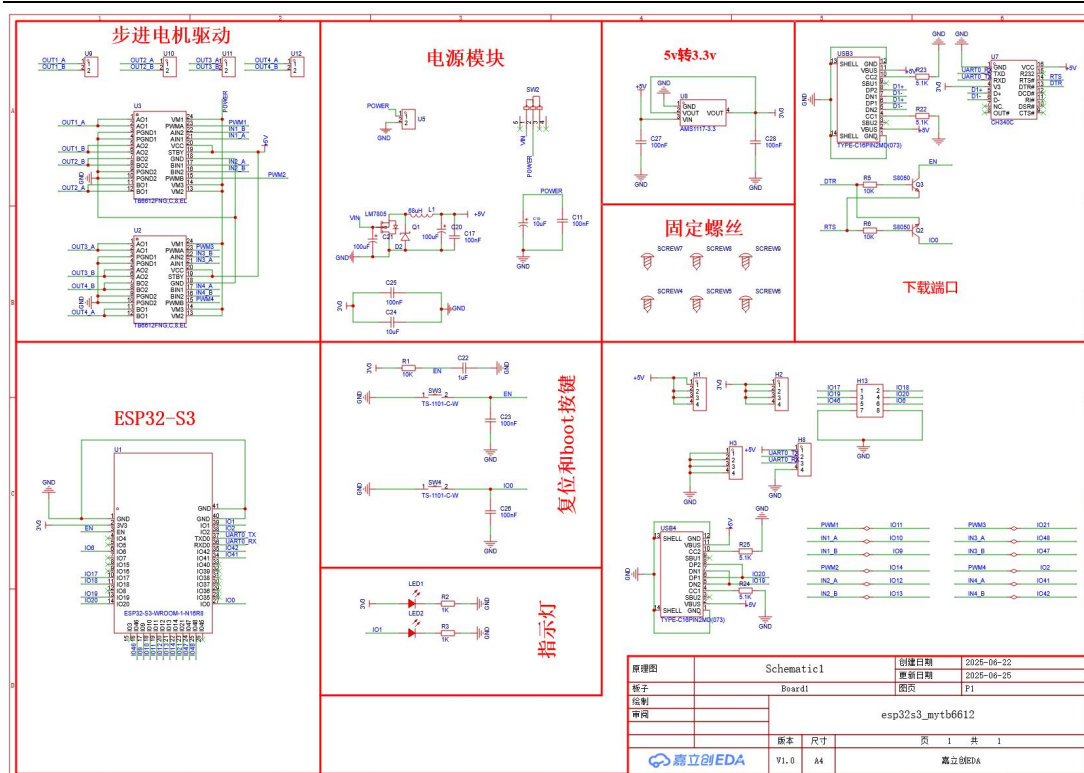
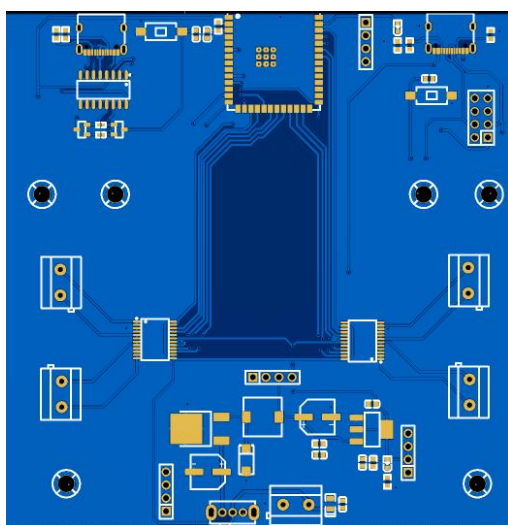
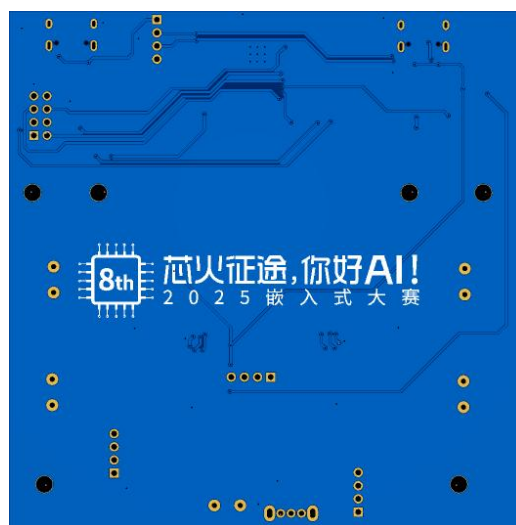


图 2.4 ESP32S3 的移动平台电路图



(a)移动平台 PCB 顶层



(b)移动平台 PCB 底层

图 2.5 ESP32S3 的移动平台 PCB 图

2.2.3 DHT11 温湿度模块

机器人采用 DHT11 模块采集现场建筑工地的温湿度数据，DHT11 是一种数字式温湿度传感器，可以测量环境的温度和湿度。它采用单总线通信协议，具有体积小、价格低、精度适中等特点，广泛应用于温湿度测量领域。DHT11 的实

物图如图 2.6 所示。

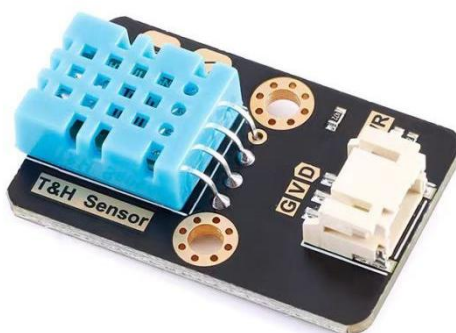


图 2.6 DHT11 温湿度模块实物图

2.2.4 USB 摄像头

机器人的图像采集选用罗技（Logitech）USB 接口摄像头，该摄像头具有良好的成像质量与系统兼容性，可直接通过 UVC 协议（USB Video Class）与 ELF2 开发板连接，实现即插即用，驱动稳定，无需额外配置。该摄像头分辨率最高可达 1920×1080 ，在目标检测中摄像头分辨率设置为 640×480 分辨率，以平衡图像清晰度与处理效率，满足 YOLOv5 模型在边缘设备上实时推理的性能需求。其实物图如图 2.7 所示。



图 2.7 USB 摄像头实物图

2.2.5 MG90S 舵机与 N20 直流电机

MG90S 是一款体积小但扭力较大的 9g 微型数字舵机，采用金属齿轮结构，具备较高的耐磨性和稳定性，通过标准 PWM 控制信号控制，PWM 控制信号不同的脉宽对应不同角度，脉宽对应角度图如图 2.8 所示。本系统中舵机用于控制摄像头二维云台，实现实时视角调整。其安装于摄像头云台，实现俯仰与水平方

向的角度控制，通过 ELF2 开发板输出的 PWM 信号驱动，使摄像头具备主动巡视能力，增强工地画面的覆盖范围与巡检灵活性，舵机实物图如图 2.9 中图(a)所示。

N20 直流电机是一类广泛用于嵌入式智能车、小型机器人等平台的金属齿轮减速直流电机，具备结构紧凑、力矩输出大、控制简易等特点，其实物图如图 2.9 中图(b)所示。在工地巡检机器人中，每个麦克纳姆轮配备一个 N20 电机，电机通过 TB6612 驱动芯片进行正反转与 PWM 控制，用于实现机器人的全向移动。

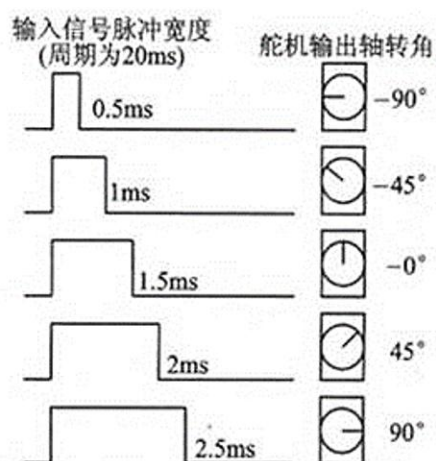


图 2.8 PWM 信号不同脉宽对应角度图



(a)MG90S 舵机实物图



(b)N20 直流电机实物图

图 2.9 MG90S 舵机和 N20 直流电机实物图

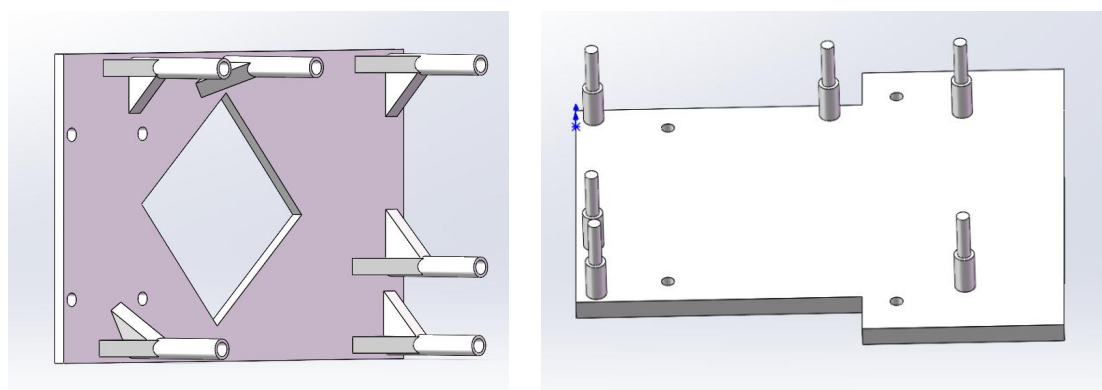
2.3 机械设计介绍

本作品利用 Solidworks 设置固定件来连接工地巡检机器人各个零件，例如 ELF2 开发板的固定、N20 电机的固定以及移动平台与 ELF2 开发板的连接、二维云台的连接等，下面将对工地巡检机器人的核心机械设计进行介绍。

2.3.1 ELF2 开发板的固定

为确保 ELF2 开发板在机器人运行过程中的稳定性与抗震性，本系统设计并如图 2.10 的固定支撑结构。该结构通过 Solidworks 软件设计，通过拓竹 Bambu Studio 进行切片后，使用 PLA 材料进行打印。结合螺丝孔位与限位柱设计，可将 ELF2 开发板稳固安装在机器人主体底盘上。支撑板中部设有菱形镂空区域，用于减轻结构整体重量并预留 ELF2 开发板风扇散热空间。支架边缘设有四组对称分布的加强筋与限位柱套筒，用于将 ELF2 核心板牢固固定，防止振动位移。同时顶层板上还预留四组通孔，用于安装二维云台。

此结构不仅提高了系统结构的一体化程度和维护便捷性，也为后续扩展（如电池模块、通信模块）预留了空间，为机器人整体设计的模块化和稳固性提供了支撑



(a)顶层 3D 设计图

(b)底层 3D 设计图

图 2.10 ELF2 开发板固定支撑 3D 设计图

2.3.2 N20 电机的固定以及移动平台与 ELF2 开发板的连接

为确保移动平台运行过程中的稳定性与抗震性，本作品的移动平台采用上下紧凑机构，底部打印厚度为 5mm 的底盘支撑，顶部打印 3mm 的顶部支撑，顶部与底部将 N20 电机紧紧扣住，防止出现振动位移，其中底部设计的 M2 通孔位置根据图 2.11 的 N20 尺寸图所设计，其余 M3 的通孔用于固定连接 ESP32S3 的移动平台 PCB。连接部分的 3D 设计图如图 2.12 所示。



图 2.11 N20 电池座的尺寸图

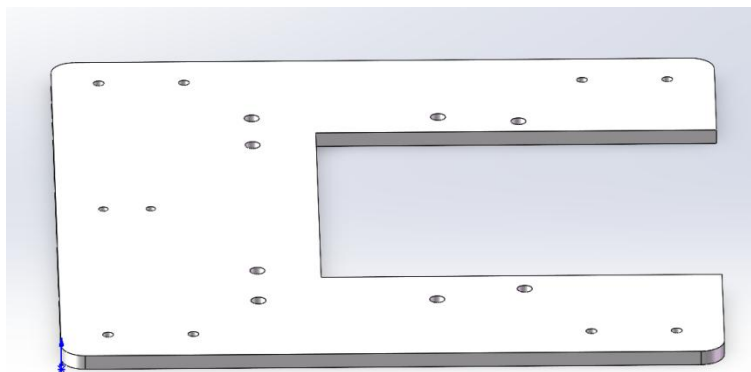


图 2.12 N20 电机的固定以及移动平台与 ELF2 开发板的连接 3D 设计图

2.3.3 二维云台

为了实现对摄像头视角的动态调节与多方向覆盖，本系统设计并 3D 打印制作了二维云台结构件，用于安装并控制 USB 摄像头实现水平与垂直方向的转动，满足在工地复杂环境中灵活调整监控角度的需求。二维云台主要由底部固定座、连接支架和摄像头安装板构成，打印件采用 PLA 材料进行打印，具有足够的结构强度与刚性，既能稳定承载摄像头重量，又能保持运动灵敏性和低摩擦。二维云台 3D 打印设计图如图 2.13 所示。

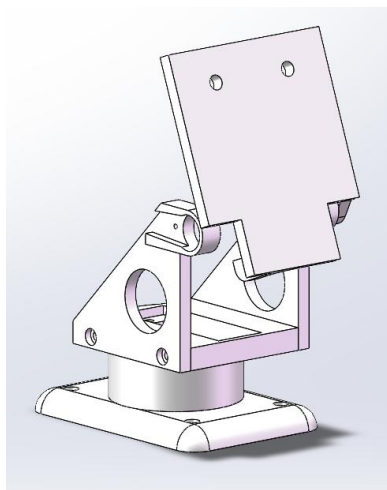


图 2.13 二维云台的 3D 设计图

2.4 软件系统介绍

工地巡检机器人的软件系统主要分为机器人客户端和 WEB 网页端两大部分，其中机器人客户端包括二维云台的控制、ESP32S3 移动平台的控制、建材识别与安全检测深度学习算法本地推理、工地环境温湿度获取以及摄像头实时图像传输等。WEB 网页端主要包括二维云台与移动平台的控制界面、摄像头实时画面、建材识别种类与数量信息、安全检测状态、温湿度可视化显示以及功能开关控制等。机器人客户端和 WEB 网页端是通过 Websocket 协议进行通信，该协议能够保证机器人控制与检测目标过程中低延迟高效率，单个 Websocket 连接即可双向通信，比传统 Ajax 轮询更节省带宽和 CPU 资源，对服务器压力较小，尤其适合边缘计算设备或嵌入式系统中使用。软件系统整体流程图如图 2.14 所示。

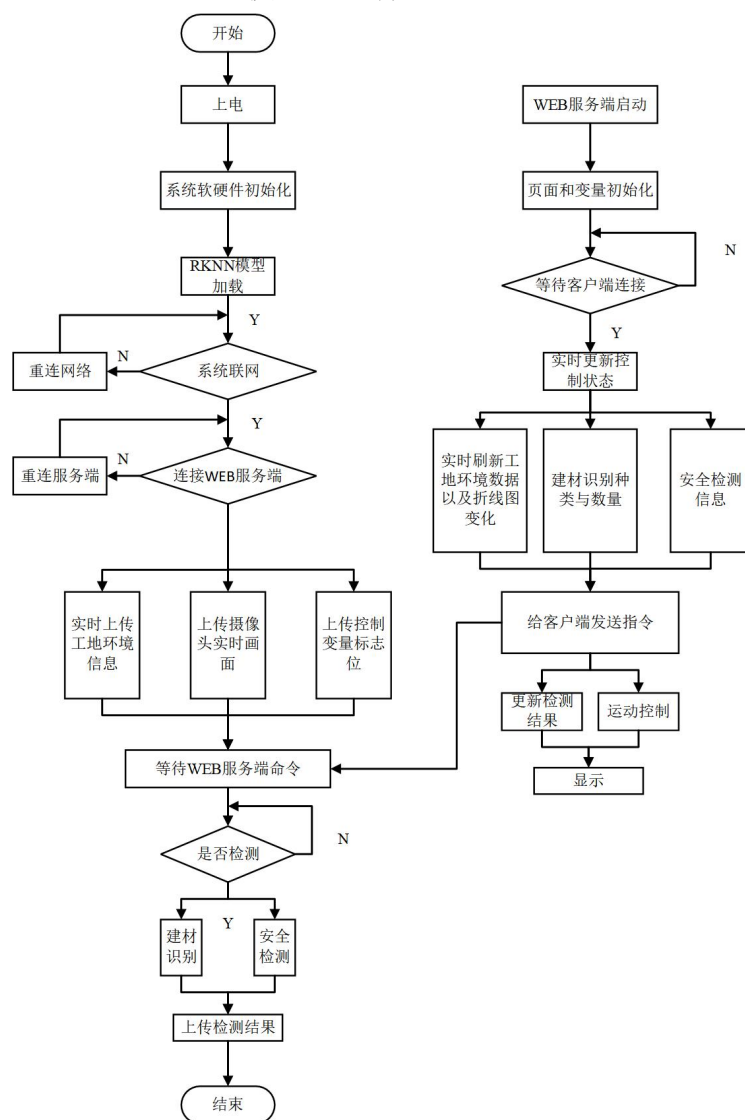


图 2.14 软件系统整体流程图

2.4.1 建材识别

建材识别主要是对工地巡检机器人的周围建筑器材，即钢筋圈(coil)、钢筋捆(rebar)和砌体(brickwork)进行三种对象的分类与目标识别。机器人采用YOLOv5 算法进行本地推理，建材识别模型训练流程主要分为数据采集、模型训练、量化部署、实时推理、结果回传五个步骤，具体流程如图 2.15 所示。

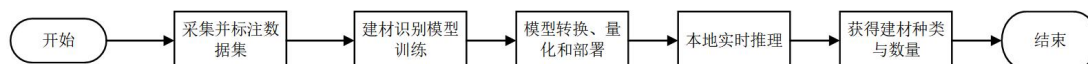


图 2.15 模型训练流程

(1) 数据采集与标注

为了训练具备良好识别性能的建材检测模型，本系统首先在真实工地场景中使用手机和摄像头拍摄了共计 1091 张图像，图像内容涵盖三类常见建筑材料：砌体(brickwork)、钢筋捆(rebar)和钢筋圈(coil)。图像采集尽量覆盖不同的视角、光照和背景复杂度，以增强模型在实际环境中的鲁棒性。图像采集完成后，使用开源图像标注工具 LabelImg 对图像进行目标检测标注。LabelImg 提供了图形化界面，通过使用鼠标框选目标框，并输入目标类别(brickwork 标注 0, rebar 标注 1, coil 标注 2)。三种建材标注分别如图 2.16、2.17 和 2.18 所示。所有标注结果将被保存为 YOLO 格式的.txt 文件，每张图像对应一个同名文本文件，其中每一行代表一个目标的类别和位置坐标，例如钢筋圈的标注如图 2.19 所示。



图 2.16 砌体标注

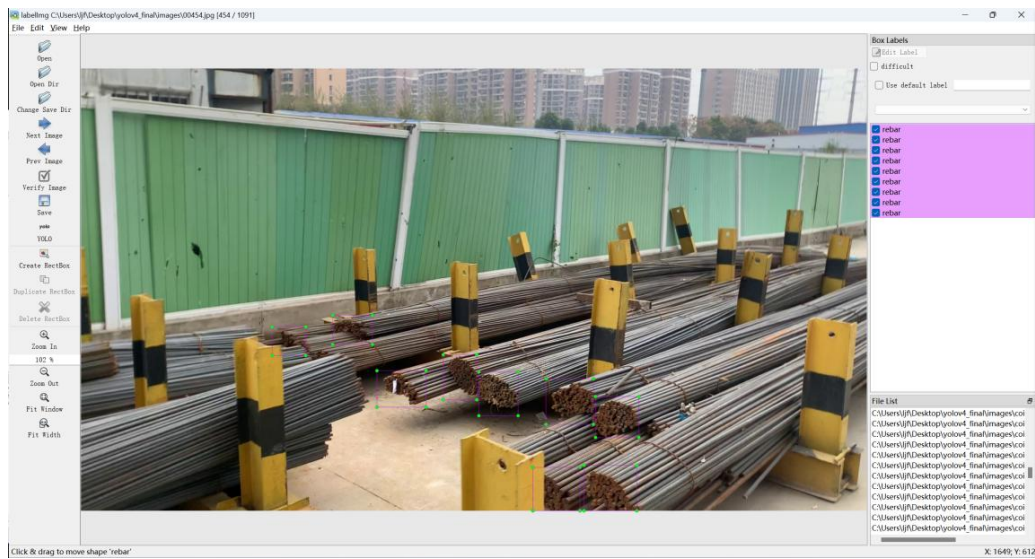


图 2.17 钢筋捆标注

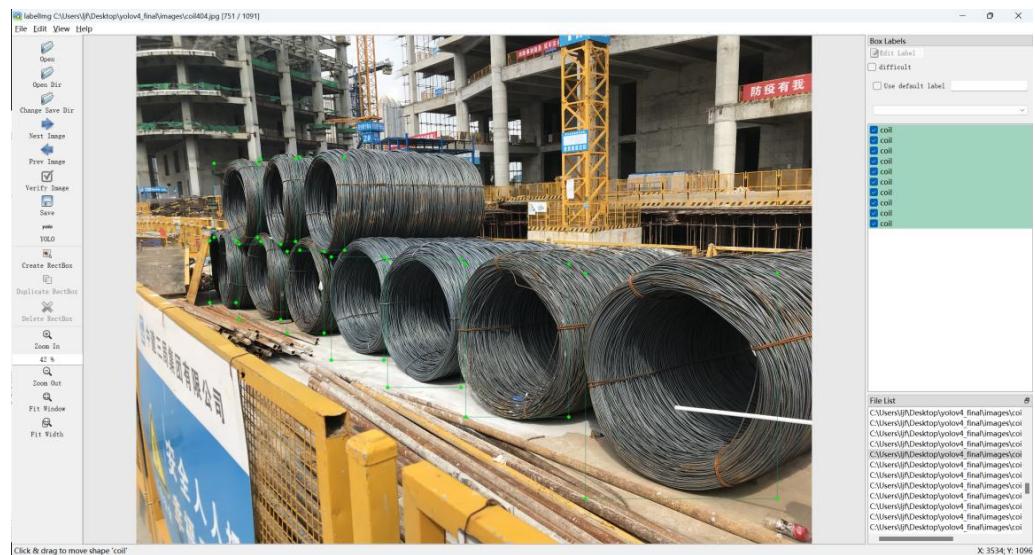


图 2.18 钢筋圈标注

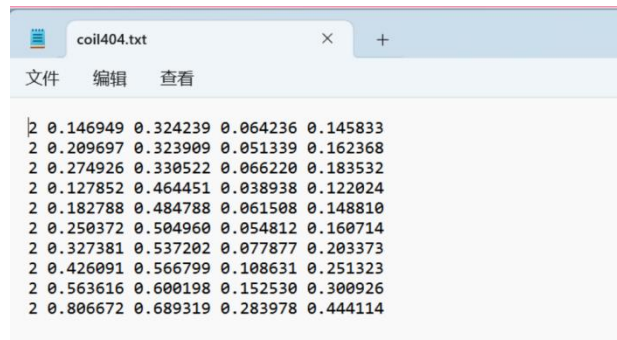


图 2.19 钢筋圈的 YOLO 格式文件

(2) 模型训练

基于 YOLOv5 的深度学习目标检测算法对建材数据集进行训练，借助 NVIDIA RTX 4060 GPU 对数据集进行 80 次 epoch 的加速训练。训练平台框架为 PyTorch 深度学习框架，采用的是适合边缘部署的轻量化 YOLOv5s 模型，使用的是瑞芯微官网提供的 YOLOv5 修改版代码，该版本针对 RKNN 部署进行了部分优化（如 anchor 格式、输出结构、后处理逻辑等），便于模型在 ELF2 开发板上顺利部署和加速推理。建材识别模型训练后的模型训练结果如图 2.20 所示。

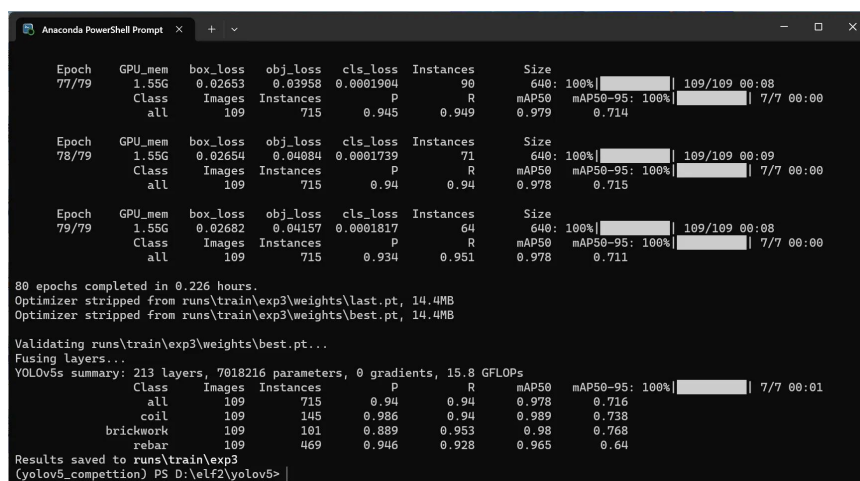


图 2.20 模型训练结果

为进一步评估模型在各类别上的分类准确性，采用混淆矩阵对建材识别 YOLOv5s 模型在验证集上的分类效果进行可视化分析。混淆矩阵是一种以矩阵形式展示分类结果的工具，其行表示真实类别，列表示模型预测类别。矩阵中的每个元素代表对应真实标签与预测标签组合下的样本数量。混淆矩阵如图 2.21 所示，从图中可以看出钢筋圈(coil)、钢筋捆(rebar)和砌体(brickwork)在类别上的精度分别可以达到 0.99、0.96、0.98。总体来看，模型在三类建材上的识别精度均处于较高水平(>95%)，说明模型已具备良好的泛化能力与工程适应性，能够满足实际工地巡检中对建材种类识别的准确性要求。

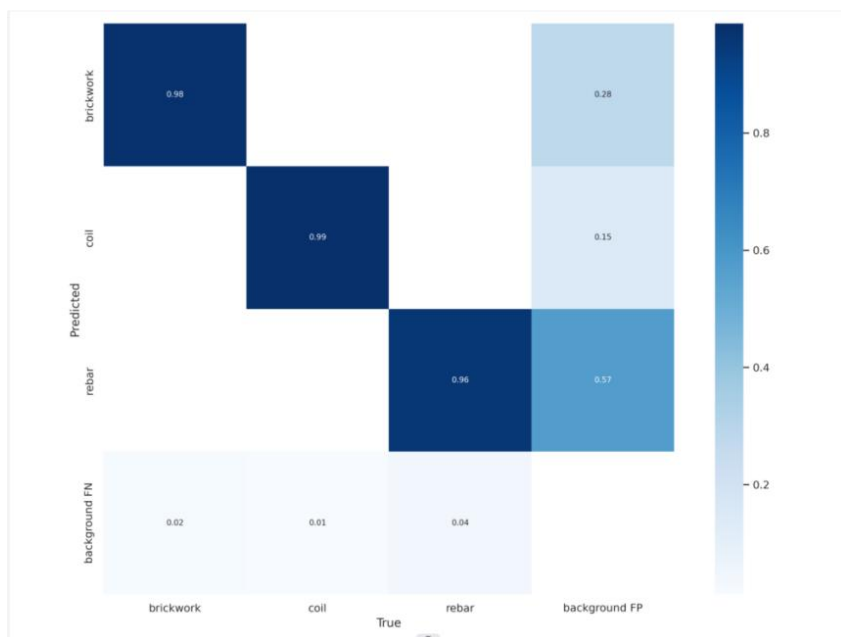


图 2.21 建材识别模型混淆矩阵

(3) 模型量化与部署

为了将训练好的建材 YOLOv5s 模型部署到 ELF2 开发板上运行，模型的量化部署过程中使用瑞芯微官方提供的 RKNN Toolkit2 工具链，将训练所得 YOLOv5s.pt 模型转化为 onnx 格式模型，再利用工具链将其转化为 RKNN 格式模型，并进行模型优化与量化。RKNN 模型的转化利用 WSL 创建好的 Docker 容器中进行。模型转化流程如图 2.22 所示。在 WSL 下的 Docker 容器中将准备的建材量化数据集、标签文件和模型文件放置瑞芯微规定的 YOLOv5 文件夹，执行瑞芯微模型转化脚本将 onnx 格式模型转换为优化后的 rknn 模型，模型转化完毕示意图如图 2.23 所示。

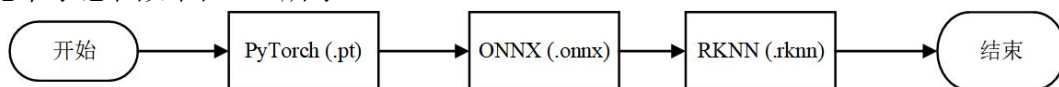


图 2.22 模型转化流程

```

root@sc542f109d4c:/mnt/rknn_model_zoo-2.1.0# cd examples/
root@sc542f109d4c:/mnt/rknn_model_zoo-2.1.0/examples# cd yolov5
root@sc542f109d4c:/mnt/rknn_model_zoo-2.1.0/examples/yolov5# cd python/
root@sc542f109d4c:/mnt/rknn_model_zoo-2.1.0/examples/yolov5/python# ls
convert.py yolov5_hat.py yolov5_jiancai.py
root@sc542f109d4c:/mnt/rknn_model_zoo-2.1.0/examples/yolov5/python# python3 convert.py ../model/hat.onnx rk3588
I rknn toolkit2 version: 2.1.0.788889d1
--> Config model
done
--> Loading model
I Loading: 100% | 121/121 [00:00:00, 3387.00it/s]
done
--> Building model
I OpFusing 0: 100% | 100/100 [00:00:00, 1417.68it/s]
I OpFusing 1: 100% | 100/100 [00:00:00, 533.16it/s]
I OpFusing 2: 100% | 100/100 [00:00:00, 484.61it/s]
I GraphPreparing: 100% | 149/149 [00:00:00, 1590.57it/s]
I Quantizing 1/3: 100% | 149/149 [01:33:00, 1.50it/s]
I Quantizing 2/3: 100% | 149/149 [00:17:00, 8.54it/s]
I Quantizing 3/3: 100% | 149/149 [00:07:00, 18.49it/s]
W build: The default input dtype of 'images' is changed from 'float32' to 'int8' in rknn model for performance!
Please take care of this change when deploy rknn model with Runtime API!
W build: The default output dtype of 'output0' is changed from 'float32' to 'int8' in rknn model for performance!
Please take care of this change when deploy rknn model with Runtime API!
W build: The default output dtype of 'res0' is changed from 'float32' to 'int8' in rknn model for performance!
Please take care of this change when deploy rknn model with Runtime API!
W build: The default output dtype of 'res8' is changed from 'float32' to 'int8' in rknn model for performance!
Please take care of this change when deploy rknn model with Runtime API!
I rknn building ...
I rknn building done.
done
  
```

图 2.23 模型量化转化为 RKNN 模型

(4) 模型本地推理

为实现工地巡检机器人的实时目标识别功能，工地巡检机器人通过本地部署 YOLOv5s 模型，对图像进行预处理转换图像格式与分辨率大小，利用 NPU 进行模型推理，再进行后处理后，得到建材识别的种类与数量，该系统具备低延迟、高帧率、全天候运行能力。针对建材的识别，借助的推理工具依赖为 RKNN Toolkit Lite，支持在 Python 环境下调用 RKNN 格式模型，并通过 NPU 高效执行。

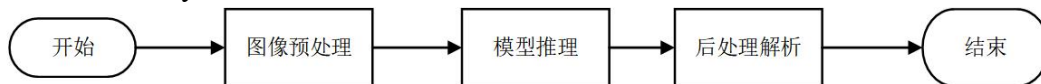


图 2.24 模型本地推理流程示意图

2.4.3 WEB 服务端

WEB 服务端通过 Pycharm 软件编写 Python 程序，开发软件如图 2.25 所示，基于 Flask+Flask-SocketIO 框架构建，负责系统的人机交互逻辑与多源信息的接入与转发。它在客户端与前端之间起到桥梁作用，实现了实时控制、数据同步、图像传输、目标检测结果推送等功能。用户操作 WEB 前端（如移动控制、舵机控制）通过 SocketIO 实时发送指令，服务端接收后转发至客户端执行，并同步当前状态。服务端接收来自客户端图像帧（编码为 base64）发送至服务端，服务端立即转发至 WEB 页面，实现实时视频画面展示。客户端定期采集环境传感器数据（温度与湿度），服务端将其转发给前端进行实时显示与趋势图更新。WEB 网页的整体界面如图 2.26 所示。

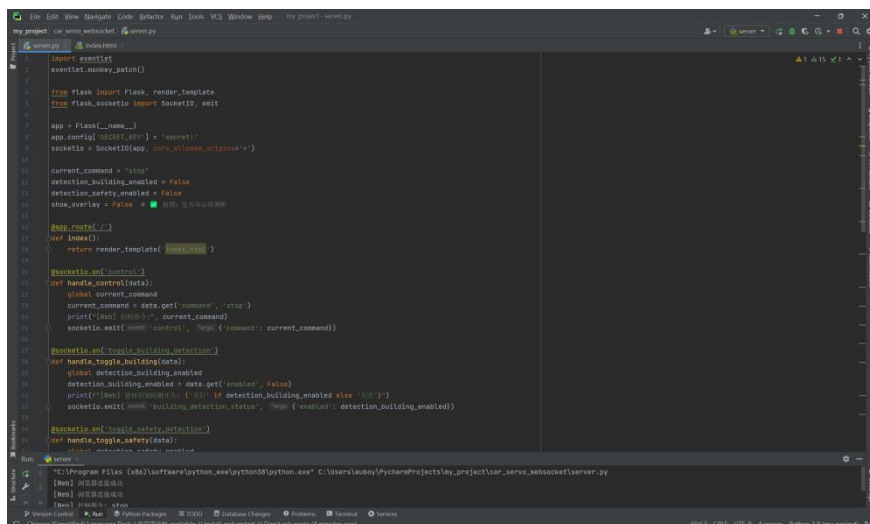


图 2.25 WEB 服务端的开发软件



图 2.26 WEB 网页整体界面图

2.4.4 OneNet 云平台

为实现工地现场环境数据与安全状态的远程可视化监控，本系统将工地环境数据和异常情况现场图片上传至物联网平台 OneNET。OneNET 提供了稳定的数据接入能力、强大的可视化图表组件和 API 支持，可用于多终端数据同步和云端预警通知，方便工作人员实时查看和监测巡检情况。工地巡检机器人通过 HTTP 方式将读取到的温湿度信息上传至 OneNET 云平台，然后能够通过 WEB 网页点击上传图像，能够将异常现场情况图像上传至 OneNET 进文件留存。此外，在 OneNET 上能够可视化实现工程环境，方便管理和统计历史情况数据。OneNET 温湿度、异常情况上传和可视化显示分别如图 2.27、2.28 和 2.29 所示。



图 2.27 OneNET 温湿度数据流



图 2.28 异常情况现场图片上传云端

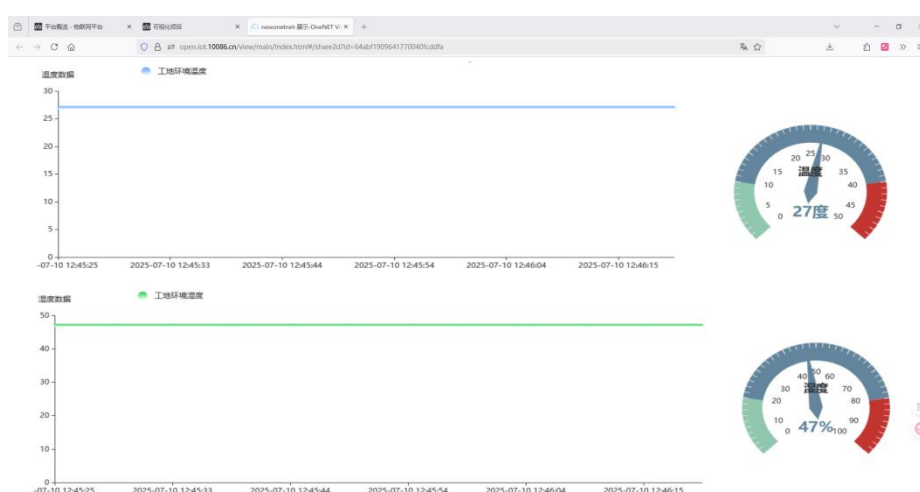


图 2.29 OneNET 温湿度数据流可视化显示

第三部分 完成情况及性能参数

3.1 整体介绍

目前，基于 ELF2 开发板的工地巡检机器人已经完全满足设计要求，系统结构合理、运行稳定，能够代替人工巡检，满足实际工地环境下对安全巡检的多方面需求。

目前，工地巡检机器人能够实现的功能：

- 1、自动目标识别：本地部署 YOLOv5s 模型，自动识别钢筋圈(coil)、钢筋捆(rebar)和砌体(brickwork)三种常见建材，精准统计数量，所有 AI 推理在本地完成，无需依赖云端，具备低延迟、低功耗优势。
- 2、安全行为监测：支持切换至安全帽识别模型，检测施工人员是否佩戴安

全装备，实现智能化安全监督。

3、多自由度机械运动：机器人底盘采用麦克纳姆轮实现全方位移动，搭配二维云台实现 360°巡检视角。

4、WEB 页面远程控制：支持手机/PC 网页控制机器人运动、AI 人工智能检测启动、切换模型、云端上传图像等操作。

5、图像实时传输：摄像头画面通过 WebSocket 实时传输至网页端，工作人员可实时查看机器人的巡检视角。

6、环境监测：周期采集温湿度信息，可视化显示于 WEB 页面，并上传至 OneNET 云平台管理，实现数据物联网化。

作品整体实物图如图 3.1 所示，其正视图和 45° 侧视图分别如图 3.2 的图(a)和图(b)所示。

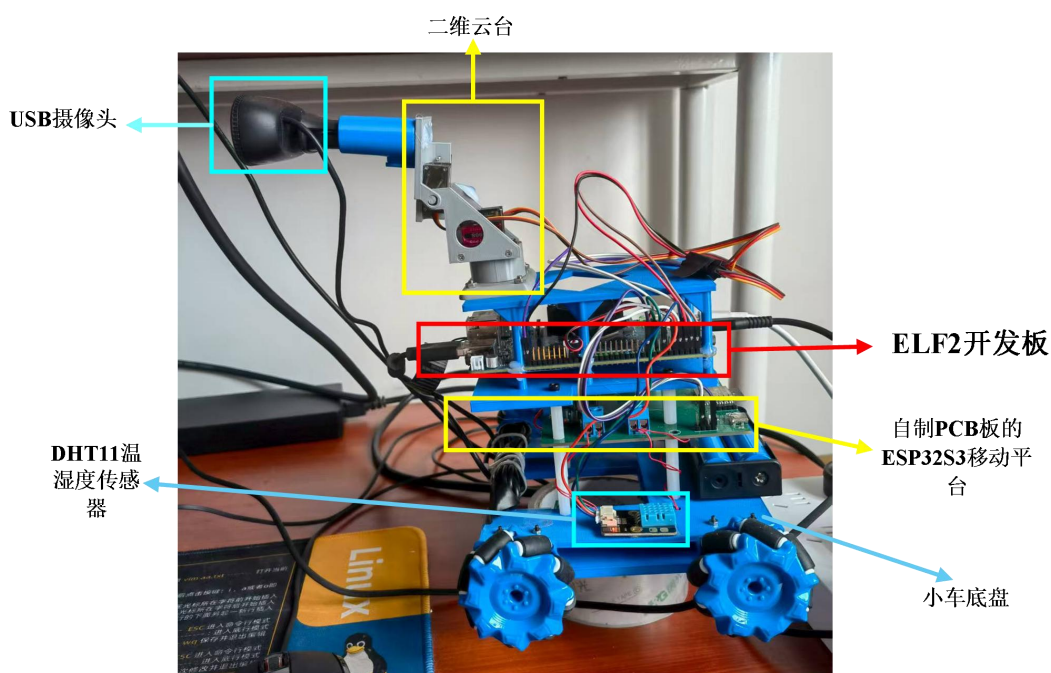
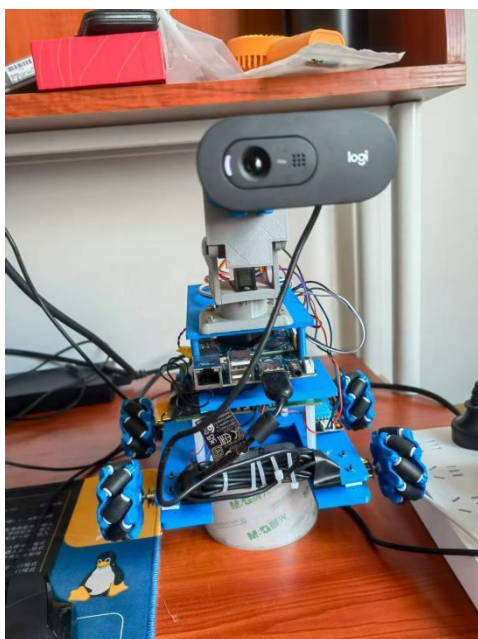
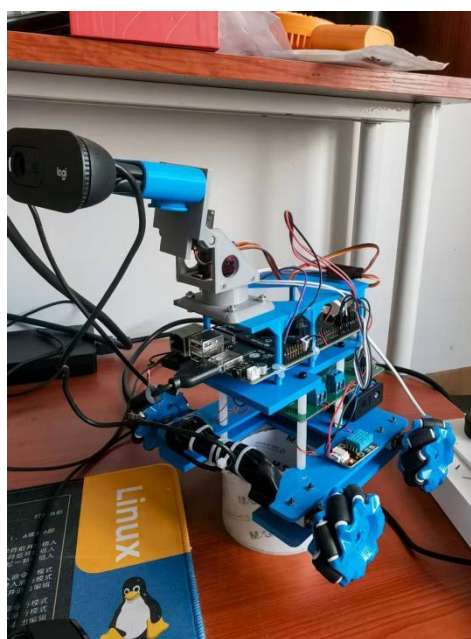


图 3.1 基于 ELF2 的工地巡检机器人实物图



(a)实物正视图



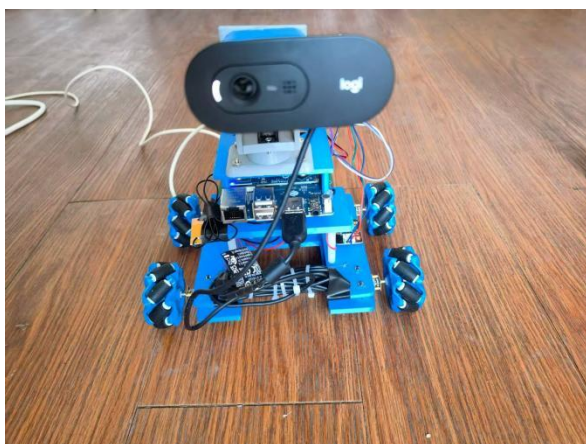
(b)实物 45°侧视图

图 3.2 机器人实物正视图和 45°侧视图

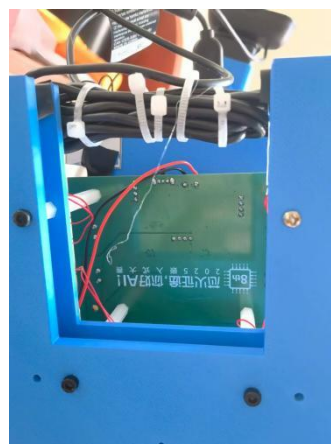
3.2 功能测试

3.2.1 机器人硬件机械结构测试

在实验室环境下，WEB 网页控制机器人进行全方位运动，麦克拉姆轮驱动流畅，控制二维云台，水平和垂直方向响应及时，运动平稳。USB 摄像头固定在云台上，图像采集视角跟随舵机转动，实际测试中图像视野无明显遮挡。



(a)机器人位于实验室地面



(b)自制 PCB 底面图

图 3.3 机器人在地面稳定运动

3.2.2 建材识别测试

为验证工地巡检机器人在工地场景下对建材识别的准确性与稳定性，从两个方面开展测试：一是基于本地图片输入的静态测试，二是基于摄像头采集画面的实时识别测试，以评估模型在不同输入源下的适应性和检测效果。识别对象包括三类典型建筑材料：钢筋圈(coil)、钢筋捆(rebar)和砌体(brickwork)，识别模型使用经过训练并已转换为 RKNN 格式的 YOLOv5s 模型，在 ELF2 开发板本地推理执行。

(1) 本地图片输入的静态测试。



图 3.4 砌体的检测结果



图 3.5 钢筋圈的检测结果

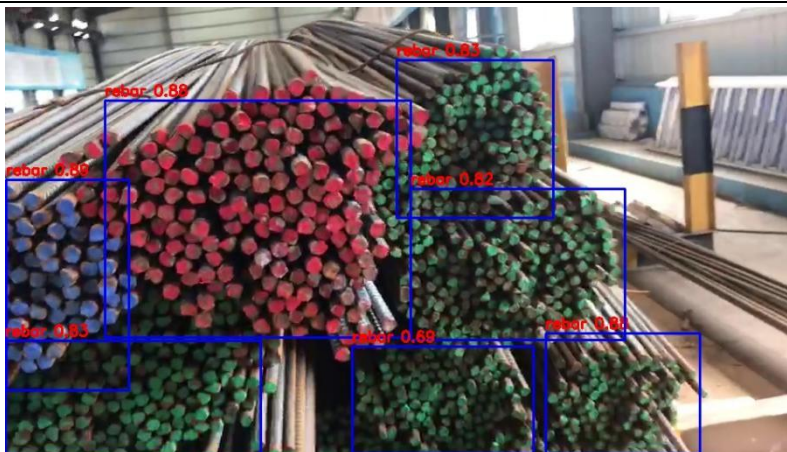


图 3.6 钢筋捆的检测结果

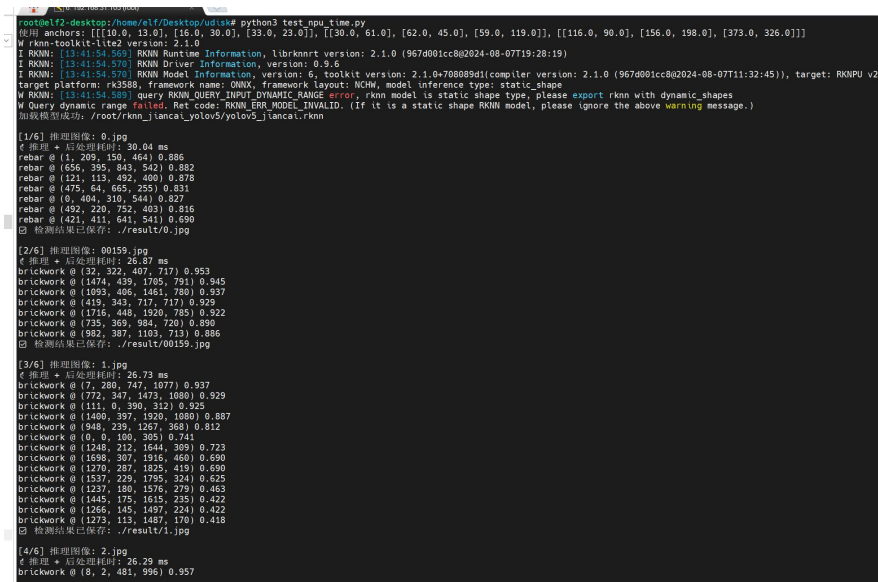


图 3.7 本地推理所需时间

(2) 基于摄像头采集画面的实时识别。

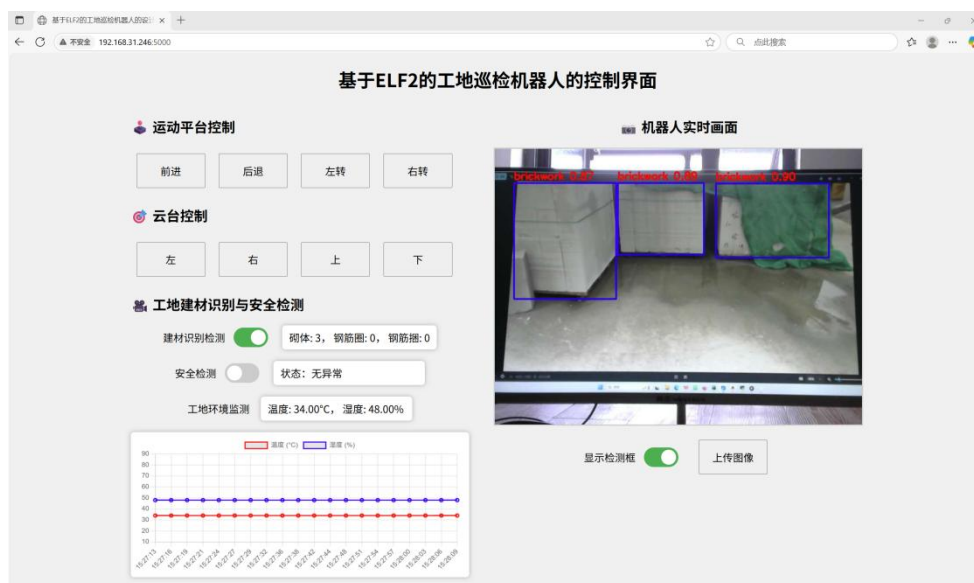


图 3.8 砌体的检测结果



图 3.9 钢筋圈的检测结果



图 3.10 钢筋捆的检测结果

3.2.3 安全检测测试

与建材识别测试相同，安全检测模型同样采用本地 RKNN 格式部署，利用 ELF2 开发板强大的 NPU 算力完成本地推理操作，识别结果通过控制页面实时反馈，便于远程监控和及时预警识别对象。



图 3.11 人群都佩戴有安全帽的检测结果



图 3.12 人群部分佩戴有安全帽的检测结果

3.2.4 环境监测

机器人将读取的 DHT11 温湿度上传至 WEB 网页端，显示界面如下：

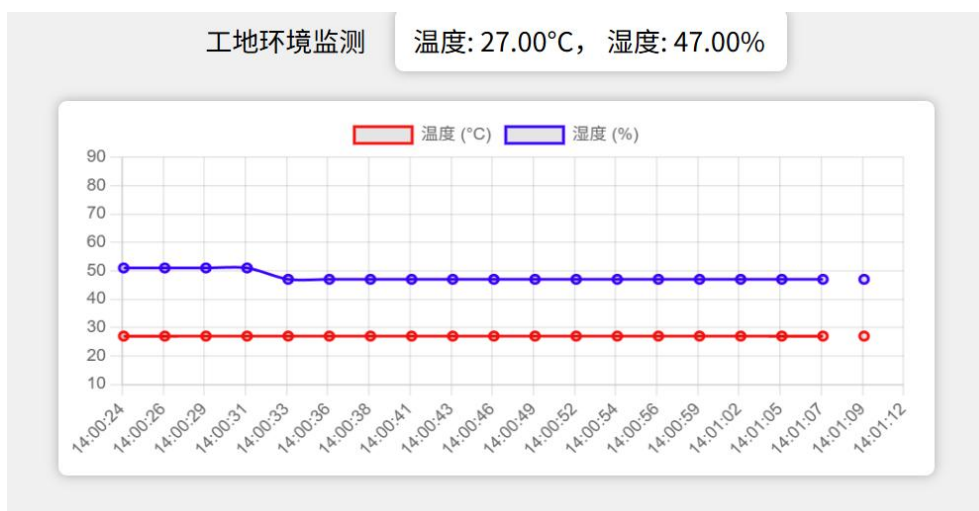


图 3.13 WEB 网页显示工地温湿度数据以及变化趋势

3.2.4 云端传输

机器人通过 HTTP 协议上传温湿度信息同步到 OneNET 云平台,以及异常情况图像上传如下:

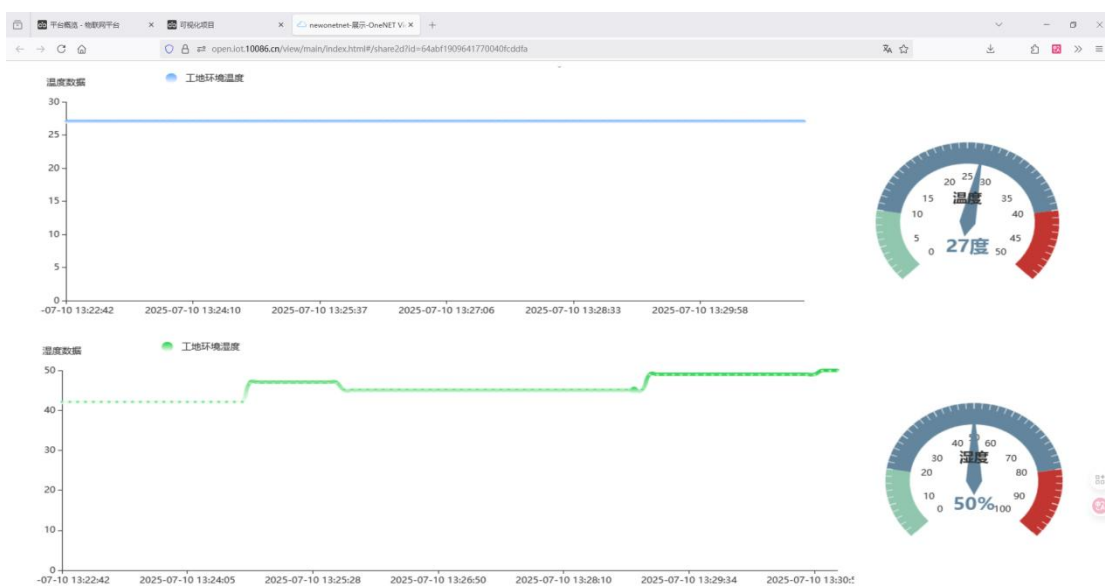


图 3.14 OneNET 可视化显示

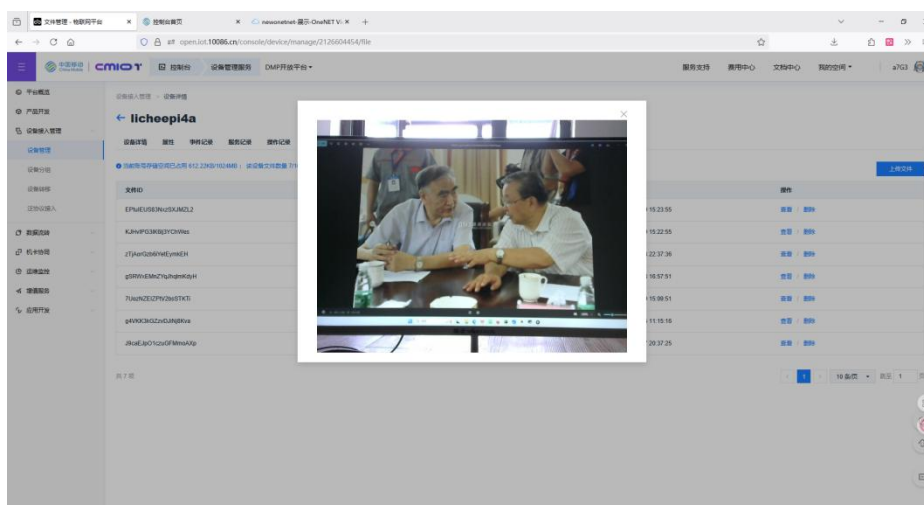


图 3.15 上传至 OneNET 的异常情况

第四部分 总结

4.1 可扩展之处

目前，本系统已基本实现最初设定的设计功能与技术指标，完成了工地巡检机器人的图像识别、安全检测、移动控制与远程交互等核心模块。系统具备良好的运行稳定性与功能完整性，已可满足部分真实工地的初步巡检应用需求。在此基础上，为进一步增强系统实用性、智能化与自动化水平，后续工作将围绕以下几个方向进行功能优化与扩展：

（1）集成SLAM实现自动导航巡检，实现地图构建与路径自主导航，使巡检机器人具备完整的环境感知与自主路径规划能力，提升系统智能化水平。

（2）扩展多类识别任务，实现更复杂的场景监测，检测吸烟、打电话、违规施工等危险行为，检测工地警示标志、火源、电箱异常等安全隐患。

（3）结合GPS与5G模块支持跨区域远程部署，实现远距离、多节点的巡检任务部署，适配大体量、多区域的智慧工地系统需求。

（4）优化系统UI与操作交互体验，可视化地图导航，工地环境数据图表分析面板（温湿度/噪音等）。

4.2 心得体会

在制作基于ELF2的工地巡检机器人中，我们收获了很多。在年前时候，作为学生来测评ELF2开发板，我分享了如何本地量化部署自定义YOLOv5s模型到ELF2上，这个为我参加这次打下了基础，在确定好选题为瑞芯微的AI赛题后，我已经构思好如何将AI人工智能视觉与ELF2开发板相结合。对于人机交互的方式，我考虑过自制PCB遥控器，写PC上位机，但是网页端的控制对于工作人员来说，是最为方便的，该方式能够跨平台操作工地巡检机器人。由于我们并非机械专业出身，打印云台结构和ELF2的开发板的固定结构碰到不少问题，例如连接的公母头直接要留出0.2mm，不然打出来是无法衔接上的。还有Solidworks画3D打印件有的需要加上筋支撑，不然容易断掉。在焊接自制PCB过程中，TYPEC的焊接非常难，焊接好久才焊上去，以及有一个电机不转动，排查软件和硬件问题，通过万用表测得其中一个TB6612的一个通道有问题，ESP32S3输出是正常的，风枪更换芯片后就正常了。整个制作作品的过程中，虽然人很累，但是过得非常充实有意义。

通过这次项目实践，我们不仅锻炼了动手能力与解决问题的能力，也更加深刻地认识到，一个完整系统的背后，离不开跨学科的知识融合、团队协作与持续调优。在今后的学习和科研过程中，我们也将继续保持这份热情与耐心，不怕困难，敢于探索，争取在技术之路上不断突破自我，创造更多真正有价值的作品。

第五部分 参考文献

- [1] 杨伟婷, 李保育, 左文斌. 基于机器视觉的图像处理[J]. 信息技术与信息化. 2021 年 07 期.
- [2] 郑仁成, 范朝阳, 刘立发, 黄良炆, 闫飞, 陶卫军, 郑凯, 刘佳宁, 边防, 侯宝, 菅磊, 李晓莹, 刘琦, 孙景富, 武国旺, 梅东升. 基于四轮独立驱动/转向的危险气体探测自主巡检机器人设计[A]. 2020 中国自动化大会 (CAC2020) 论文集[C]. 2020 年.
- [3] 邱伟杰, 徐智坚. 5G 智能巡检机器人研究及应用[A]. 福建省电机工程学会 2020 年学术年会获奖论文集 (上册) [C]. 2021 年.
- [4] 龚爱平. 基于嵌入式机器视觉的信息采集与处理技术研究[D]. 浙江大学. 2013 年.
- [5] 肖帆. 变电站巡检机器人的图像处理关键技术研究[D]. 广西大学. 2019 年.
- [6] 成建宏. 机器视觉在输电线路巡检机器人中的应用综述[J]. 自动化技术与应用. 2019 年 04 期.
- [7] 刘会军, 刘金花, 尹石岭. 基于无线网络技术的机器人巡检远程监控系统[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(05): 57-61. DOI:10.19557/j.cnki.1001-9944.2023.05.013.
- [8] Faisal Mehmood. 基于图像处理与控制技术的微滴检测、计数与控制[D]. 中国科学技术大学. 2019 年.
- [9] 张永强, 张红良, 郭轶, 崔进. 一种长隧洞输水工程巡检机器人的高精度导航定位方法[A]. 中国水利学会 2019 学术年会论文集第四分册[C]. 2019 年.
- [10] 焦靖华. 基于机器视觉的汽车组合仪表读数识别技术研究[D]. 哈尔滨工业大学. 2010 年.
- [11] 巩宇, 曾广移, 王文辉. 长距离、大深度水电站水下多控制模式巡检机器人的研究与应用 [A]. 抽水蓄能电站工程建设文集 2020[C]. 2020 年.
- [12] 王焱丁. 巡检机器人目标缺陷识别模块设计与实现[D]. 西华大学. 2020 年.
- [13] 邵慧超, 郭向欣, 张文俊, 姚功民, 涂振, 刘建. 一种适用于巡检机器人的室内外多源融合导航定位算法[A]. 第十二届中国卫星导航年会论文集——S06 时间基准与精密授时 [C]. 2021 年.
- [14] 梁宇. 基于机器视觉的室内服务机器人定位技术研究[D]. 桂林理工大学. 2018 年.
- [15] 陈玖霖, 周运森. 基于 YOLO 目标检测的指针式仪表读数方法[A]. 2021 中国自动化大会论文集[C]. 2021 年.
- [16] 记者 纪元元. 国内首台自主研发煤矿危险气体巡检机器人正式“上岗” [N]. 大同日报. 2021 年.