

第七届（2024）全国大学生嵌入式芯片
与系统设计竞赛芯片应用赛道



基于海思平台的管道缺陷检测系统

团队编号：10875

团队名称：芝士雪豹队

摘要

伴随电子信息技术的高速发展，随着人工智能领域的高速发展以及物联网领域的快速扩张，智能工业的风潮在全球各地兴起且已经在全国各地呈现普及趋势。在化工工业设备检维修中，涉及到设备、罐体和管道环境具有较强腐蚀性，且光照不足，给人工检测带来巨大挑战。随着工业自动化的发展，人们的安全意识同样开始提高，大家开始逐渐重视智能检测系统在工业极端条件下的运用。

故基于上述社会背景，本次比赛提出一款多功能的智能管道检测系统设计，该智能检测系统，其囊括了激光雷达检测子系统、物联网子系统、运动控制子系统三个管道检测子系统，以及设计利用互联网云端平台完成三个子系统的协同运作以组建成完整的管道检测系统。对比其他市场产品，使用者可以通过该管道检测系统在极端条件下的缺陷检测，为工业带来更大的安全保障。

本智能管道缺陷检测所设计的功能对于实际的应用场景是十分重要的，其深入每个化工工厂运输管道的实际应用场景，基于实际的使用情况和实际的使用需求完成本系统的相关设计如：智能激光雷达检测子系统能够将缺陷平面进行点云处理，用缺陷检测算法识别出缺陷的类型和大小；智能物联网子系统将检测的点云文件发送至互联网云端子系统，并在前端进行展示，然后调度运动控制子系统进行现场转换，最终实现管道的全覆盖检测。

关键字：智能工业，物联网，MQTT，点云检测

目录

第一部分 作品概述	4
1.1 功能与特性.....	4
1.2 应用领域.....	4
1.3 主要技术特点.....	4
1.4 主要性能指标.....	4
1.5 主要创新点.....	5
1.5.1 无线组网.....	5
1.5.2 点云数据处理（缺陷检测）	5
1.5.3 应用设计.....	6
第二部分 系统组成及功能说明	6
2.1 整体介绍.....	6
2.1.1 物联网子系统.....	7
2.1.2 激光雷达检测子系统.....	8
2.1.3 运动控制子系统.....	8
2.2 硬件系统介绍.....	8
2.2.1 主控模块微处理器.....	9
2.2.2 微型固态激光雷达模组（dToF 模组）	9
2.2.3 树莓派 4B（dToF 驱动模块）	10
2.2.4 舵机云台模块.....	10
2.3 软件系统介绍.....	11
2.3.1 物联网子系统软件设计.....	11
2.3.2 激光雷达检测子系统软件设计.....	13
2.4 网页 Web 介绍	15
第三部分 完成情况及性能参数	17
3.1 完成情况及性能参数.....	17
3.2 外设性能参数.....	17

3.3 MQTT 连接物联网平台性能测试结果	18
第四部分 总结	18
4.1 可扩展之处.....	18
4.1.1 智能激光雷达检测子系统.....	18
4.1.2 缺陷检测算法.....	18
4.2 心得体会.....	19
第五部分 参考文献	19

第一部分 作品概述

1.1 功能与特性

基于海思平台的管道缺陷检测系统包含互联网云端平台以及激光雷达检测子系统、物联网子系统、运动控制子系统三个子系统组成。其中激光雷达(dToF)作为前端数据采集端,将采集到的距离数据通过 UDP 协议传输到物联网子系统,并且激光雷达检测子系统能够将数据转为点云文件通过 http 协议,发送至互联网云端平台,通过可视化的方式,将缺陷类型和大小标注出来,方便工厂维修人员进行检修。

1.2 应用领域

伴随电子信息技术的高速发展,人工智能和物联网领域的迅猛扩展,智能工业的风潮在全球各地兴起,并在全中国普及。在化工工业设备检维修中,由于设备、罐体和管道环境具有较强腐蚀性且光照不足,人工检测面临巨大挑战。随着工业自动化发展,人们的安全意识不断提高,智能检测系统在工业极端条件下的应用逐渐受到重视。本系统包括激光雷达检测子系统、物联网子系统和运动控制子系统,并设计利用互联网云端平台完成三个子系统的协同运作,从而构建完整的管道检测系统。与市场上的其他产品相比,该系统能够在极端条件下进行缺陷检测,为工业提供更大的安全保障。

1.3 主要技术特点

在开发平台的选择上,因本系统设计需要进行信息的协同传输,在经过方案对比后,选择利用无线射频技术完成信息的协同传输,故选择海思的以 Hi3861V100 芯片为主控的小熊派 BearPi-HM Nano 开发平台,Hi3861V100 芯片集成高性能 32bit 微处理器、硬件安全引擎以及丰富的外设接口以及片内无线射频的优点。在外设的选择上,我们结合当今智能工业领域的背景信息以及深入调研相关产品,进行了功能的设计,最终选择使用基于 PWM 的舵机云台来完成 dToF 的运动功能;利用树莓派 4B+来进行点云数据的处理和云平台发送功能;将利用这些外设实现的功能形成不同的子系统,最后利用 WIFI 的无线高速传输功能完成信息的协同传输。

1.4 主要性能指标

本次比赛项目所选择的方向侧重于智能网关方向，故本系统的关键性能指标从两方面进行入手。第一方面，是各个子系统上的相关外设运行时的性能指标；第二方面是整个系统在利用无线网络进行信息协同传输方面的性能指标。

对于相关外设的性能指标，团队对所使用到的部分重要外设进行相关调研以及分析，首先，团队分析了 dToF 外设进行距离检测的精准度；其次团队分析了利用 PWM 波输出控制模拟舵机旋转的精准度。

对于无线传输的性能指标，团队对整个完整系统进行了联合调试，对其反应速率以及信息的传输有效率进行了测试。

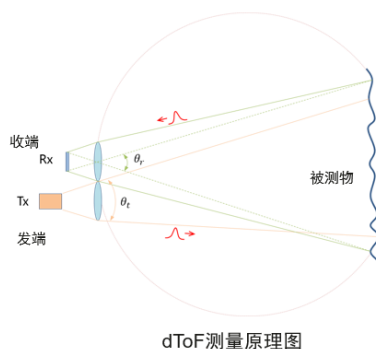
1.5 主要创新点

1.5.1 无线组网

本安防系统的每个子系统在连接至无线网络之后，可以自动完成组网操作。无线组网是利用 WIFI 网络实现，其中 WIFI 的功能实现依靠芯片内部集成的相关功能，未依靠其他模块，其响应速率更高、传输更稳定。每个子系统可以利用云端平台获取信息或者发送信息，比如每个子系统能发送经外设采集处理后的安防信息，能够达到较好的信息的协同传输。

1.5.2 点云数据处理（缺陷检测）

dTOF(Direct Time of Flight)，直译即是直接飞行时间，通过光束发射和接收的时间差来计算光的飞行时间，从而计算距离。dToF 系统的核心组件包括垂直腔面发射激光器(VCSEL)、单光子雪崩二极管(SPAD)和时间数字转换器(TDC)。SPAD 作为具有单光子检测能力的光电探测器雪崩二极管，即使在弱光信号存在时也能产生电流。VCSEL 作为发端向四周发射脉冲波，而 SPAD 作为收端接收并检测从目标物体反射回来的这些脉冲波。



dToF测量原理图

使用 dToF 采集到的 PCD 文件，通过读取和下采样点云数据，利用 KD-Tree 进行快速邻域搜索，对每个点的邻域点进行二次曲面拟合，计算出曲面的高斯曲率和平均曲率。通过这些曲率值对点云数据进行分类标注，不同曲率范围对应不同颜色，用于可视化几何特征和检测表面缺陷。该方法能够有效识别和标注表面缺陷，适用于复杂曲面的详细分析。

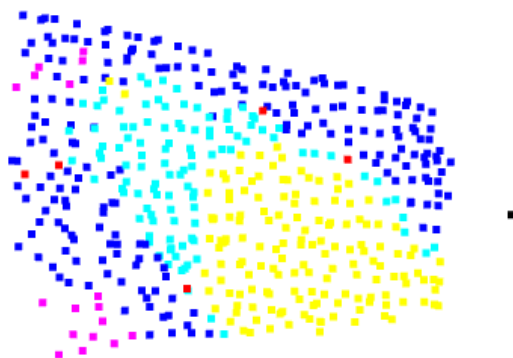


图 1-1 缺陷检测标注后的点云信息（黄色表示缺陷）

1.5.3 应用设计

为更适配本次管道缺陷检测系统的设计以及体现嵌入式开发中软硬件结合的思想，本团队使用 Python 进行后端开发和 Vue 进行前端开发，进行了智能检测系统 Web 的开发。在该应用上，设计了主页面、点云 PCD 可视化页面、缺陷数目界面以及相关外设的操作页面。

第二部分 系统组成及功能说明

2.1 整体介绍

本智能管道缺陷检测系统主要由三个子系统组成，其分别为：互联网云端平台、激光雷达检测子系统、物联网子系统、运动控制子系统。三个子系统之间依靠物联网平台进行相互联系和信息传输，完整系统示意框图如图 2-1 所示，完整系统实物图如下。

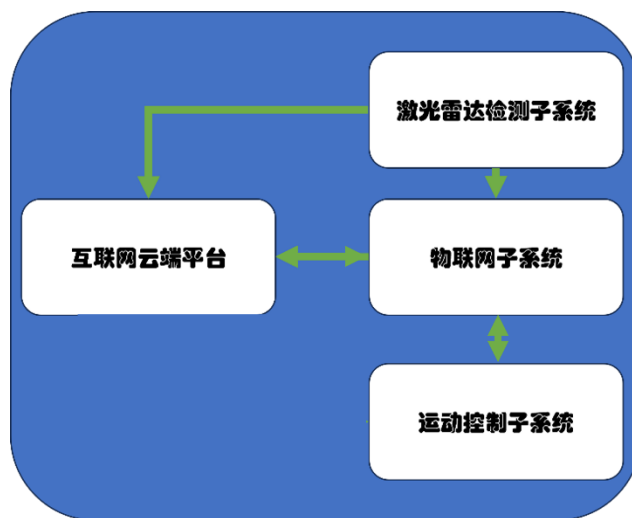


图 2-1 完整系统框图



图 2-2 物联网子系统

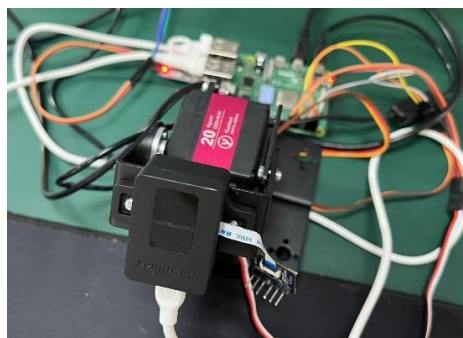


图 2-3 激光雷达检测子系统

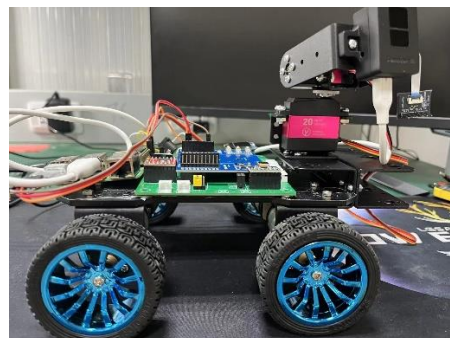


图 2-4 运动控制子系统

2.1.1 物联网子系统

物联网子系统实现的功能有：串口接收激光雷达子系统的数据、进行数据处理，判断是否有缺陷。其子系统的框图如图 2-5 所示。

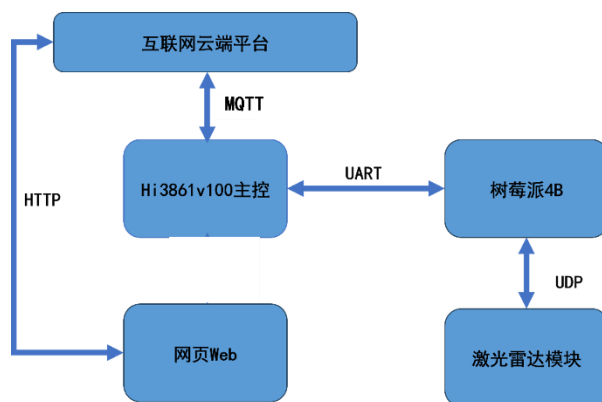


图 2-5 物联网子系统框图

(1) 无线功能

物联网子系统的第一部分就是无线功能。首先，主控 Hi3861v100 连接至无线网完成组网；接着，开发板创建 Socket 完成与云端平台的连接，根据本地外设的状态上传数据流完成与云端平台的连接，根据本地外设的状态上传数据流且获取云端的数据流完成本地相关外设的控制，如可利用自主研发的 Web 控制舵机旋转的方向。

（2）控制运动子系统

第二部分是向运动子系统发送命令，让小车和舵机能够根据物联网发送的命令进行前进和旋转，保证 dToF 能够 360°无死角扫描管道，确保检测完所有的缺陷。

2.1.2 激光雷达检测子系统

激光雷达检测子系统实现的功能有：距离数据采集、UDP 协议传输、HTTP 协议传输、点云数据处理。

激光雷达检测子系统由树莓派 4B 和 dToF 组成，dToF 模组硬件上使用 USB 网口连接至树莓派 4B，通过 UDP 协议将点云数据发送至树莓派 4B，树莓派 4B 使用 ROS2 结点，将数据处理成为点云 PCD 文件，使用 HTTP 协议通过物联网子系统中转，最终在互联网云端平台展示出来。

2.1.3 运动控制子系统

运动控制子系统由小熊派 BearPi-HM Nano 作为主控实现的功能有：接收互联网云端平台的下发的命令控制小车和舵机的旋转。

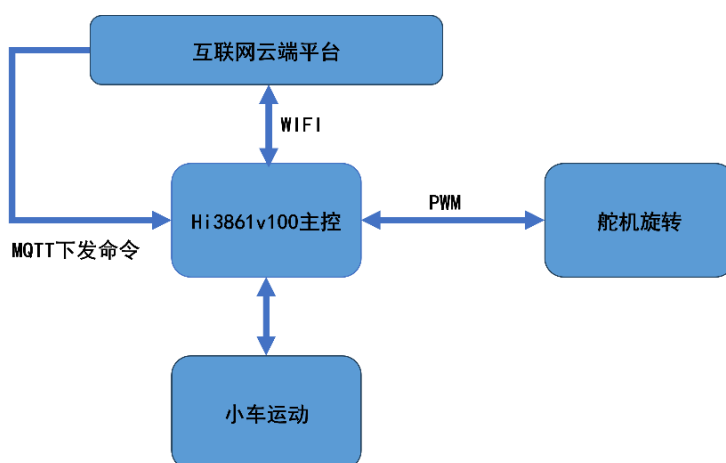


图 2-6 运动控制子系统框图

2.2 硬件系统介绍

2.2.1 主控模块微处理器

主控制芯片是整个硬件结构的一个主要核心元器件，其主要工作是获取各功能模块采集的数据信息，并且要对其进行解析，然后传送数据至显示屏，这也是决定系统各项功能最终能否实现的关键所在，因此对主控制芯片的选型十分重要。在考虑成本及要求编程相对简单的需求下，同时也要适合本硬件设计系统的 MCU,应当考虑的因素有：体积小，低功耗，低成本；因为本系统需兼顾后期的硬件调试，所以需要的串口数量相应较多，MCU 至少要有两个串口；用于数据采集的处理效率要高；集成度要高，性能稳定可靠。综上所述，结合各方面需要考虑的因素，本系统的核心处理器采用海思 Hi3861 系列小熊派 BearPi-HM Nano 开发板。其如图 2-7 所示。该主控模块微控制器用于物联网子系统和运动控制子系统。

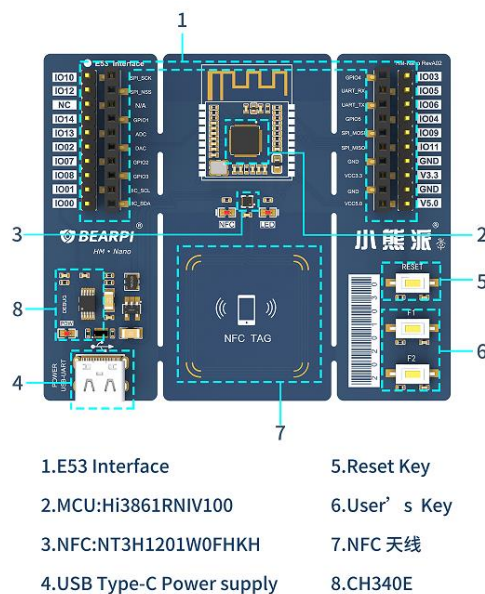


图 2-7 主控模块微控制器实物图

主控模块微控制器通过输出 PWM 来控制舵机的旋转，通过 WIFI 与互联网云端连接，接收通过 MQTT 下发的命令来控制小车的运行方向和调整位置。

2.2.2 微型固态激光雷达模组（dToF 模组）

由海思战略合作伙伴提供基于海思 GS1860 芯片的微型固态激光雷达模组（简称“dToF 模组”），其内置回波飞行时间戳计算功能，可用于测距、物体识别等功能。性能指标为分辨率 30×40；FOV60°×46°；测距距离 0.1~10m；标定<1m

时测距精度<13mm，标定 $\geq 1\text{m}$ 时测距精度 20~30mm;IIC 传输速率 400KHz; MIPI 最大传输速率 1.5Gbps; 环境光 100klux; 功耗<100mW。



图 2-8 dToF 模组实物图

激光雷达检测子系统使用 dToF 的 USB 和串口两种接口，在通信协议上，实现串口通信协议（hisignalling）、USB 转虚拟网口协议（rndis），通过算法对数据进行处理，从而解算出 30×40 distance 距离值。并且通过 Ubuntu 系统中的 ROS2 实现点云数据的可视化，方便进行缺陷识别和展示。

2.2.3 树莓派 4B（dToF 驱动模块）

为了能够通过 UDP 协议接收 dToF 传输的 1200 个点云数据以及实现点云数据的可视化，我们使用具有 Ubuntu22.04 版本的树莓派 4B 驱动 dToF,并且将处理好的点云 PCD 文件通过 HTTP 协议发送至互联网云端平台，最终在网页 Web 上进行可视化展示。

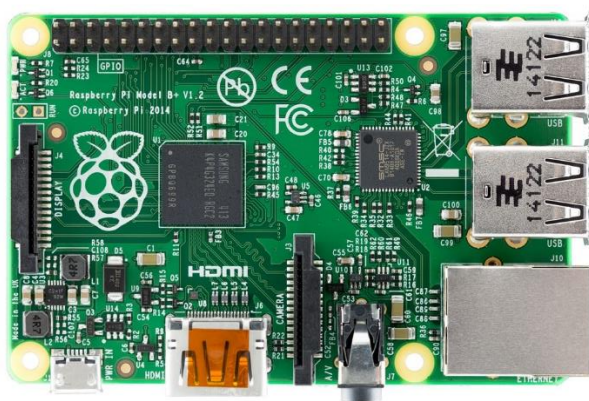


图 2-9 激光雷达驱动模块

2.2.4 舵机云台模块

项目使用双轴舵机云台来旋转 dToF 的检测角度，将 dToF 固定在舵机上方的转臂上，主控模块微控制器控制双轴舵机云台旋转 X 轴和 Y 轴来转换检测方

向。

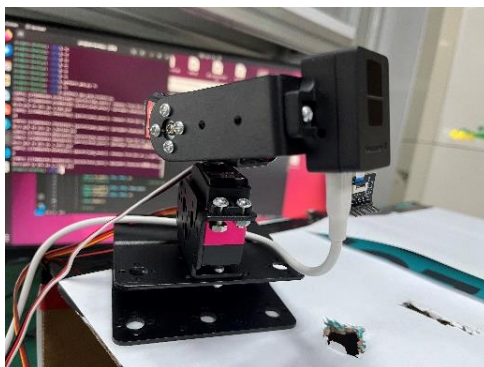


图 2-10 舵机云台模块

2.3 软件系统介绍

2.3.1 物联网子系统软件设计

物联网子系统采用的小熊派 BearPi-HM Nano 作为本系统中的微控制处理器单元，先进行板载资源初始化、舵机初始化、FreeRTOS 实时操作系统初始化并创建需要使用到的任务，然后开启 FreeRTOS 任务调度。本子系统的整体软件流程示意图如图 2-11 所示。



图 2-11 物联网子系统整体流程示意图

因其中使用了 FreeRTOS 实时操作系统，则物联网子系统创建的 FreeRTOS 任务有：WIFI 通讯任务、MQTT 云端通信任务、PWM 输出任务、串口接收任务。

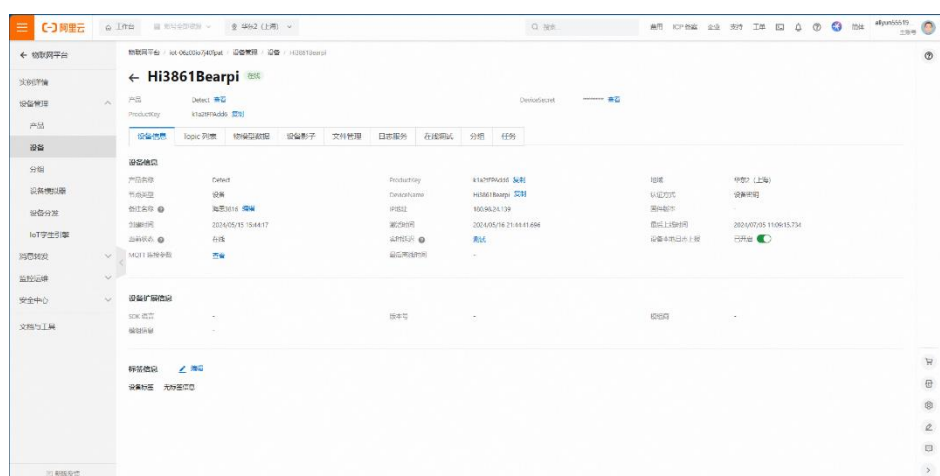


图 2-12 小熊派连接至物联网云平台

2.3.1.1 WIFI 通信任务程序设计

本子系统对已经确定好的 WIFI 网络的账号密码开始进行 WIFI 的连接，此时通过 Hi3861v100 芯片内置 WIFI 模块完成 WIFI 的相关通讯操作。并在其余任务中，开发板连接无线网络接入节点后，与云端平台服务器建立 MQTT 连接，对控制命令从云平台进行解析与接受，并使用 MQTT 协议上传数据包。

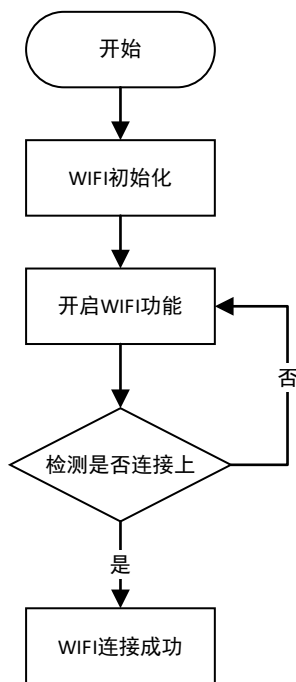


图 2-13 WIFI 通讯任务程序流程图

2.3.1.2 云端传输任务程序设计

本子系统中，开发板连接无线网络接入节点后，与云端平台服务器建立 MQTT 连接，对控制命令从云平台进行解析与接受，并使用 MQTT 协议上传数据包。获取云端的数据流控制本地外设的状态以及根据自己外设的状态上传数据流。

2.3.1.3 PWM 输出任务程序设计

本子系统中，利用全局变量控制 PWM 的输出，进一步完成舵机云台外设的控制。

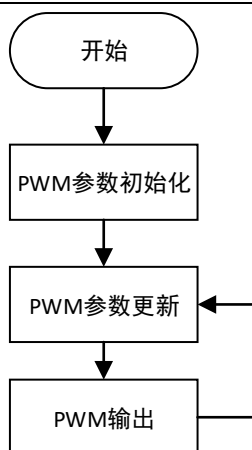


图 2-14 PWM 输出任务程序流程图

2.3.2 激光雷达检测子系统软件设计

2.3.2.1 深度信息展示

由于本项目使用的激光雷达具有两种通信模式：串口、网口，若采用串口通信模式，小熊派只能接收 64 个深度信息点，无法充分发挥激光雷达的全部功能。因此，我们决定通过 UDP 协议让树莓派接收激光雷达采集的全部点云数据（1200 个点），再通过串口将 64 个点云数据（大范围 8×8 数据点）发送给小熊派，从而实现对其某一区域深度信息的精确掌握，充分利用了激光雷达的性能。

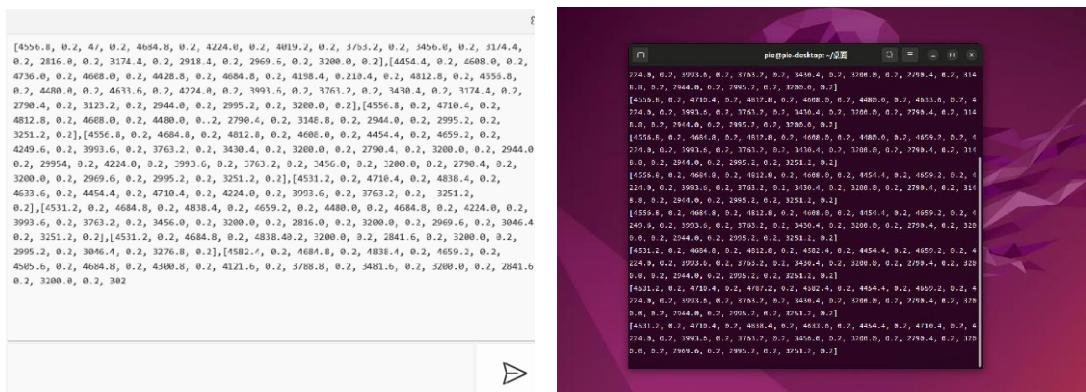


图 2-15 深度信息串口传输

2.3.2.2 点云数据保存

为了实现网页端可视化展示，需将激光雷达采集的点云数据保存、读取。本项目通过在树莓派上运行 DToF 例程中 ubuntu-pc 目录下的 dtof_ros_demo_udp，监听 ROS2 的话题/dtof/depth1/point，自主编写 Python 代码，将点云数据手动解析后保存为 PCD 格式，以满足云端展示的目的。

2.3.2.3 云端互联网平台

本项目云端互联网平台采用阿里云。通过树莓派上实时生成点云的 PCD 数据，需要将该数据上传网页进行展示。阿里云平台可以进行文件的上传，同时不限制文件的格式，十分满足本项目的需求。采用阿里云对象存储 OSS。其作为强大的云存储服务，能存储海量数据，轻松应对 PB 级别的存储需求，涵盖各种类型的文件，如图片、视频、音频和文档等。数据安全可靠，具备多种备份和恢复机制，支持访问控制与权限管理。其具有高可用性，能在全球范围内实现快速的数据访问和下载。采用按量付费模式，成本较低。还支持数据处理，如图片处理和视频转码等。结合 CDN 服务，可加速数据访问和分发。

预使用文件上传功能，首先需要开通 OSS 服务，同时在管理控制台创建存储空间(Bucket)用于存储文件对象(Object)。本项目创建一个名称为“my-pcd11”的 Bucket 用于存储实时产生的 PCD 数据文件，创建内容如下图所示：



图 2-16 存储空间创建图

为方便展示，故只上传 4 个 PCD 格式数据，同时将其编号为：1_bottom.pcd、1_left.pcd、1_right.pcd、1_top.pcd，用于观测舵机停靠位置处激光雷达采集的 4 个数据。结合官网给出的上传和删除文件的例程，在树莓派上修改采集 PCD 代码，从而完成 PCD 格式的数据上传及更新操作。Bucket 内文件内容如下所示：



图 2-17 PCD 文件内容图

结合文件上传例程，在树莓派上编写 Python 代码，实现 PCD 格式的转换与上传操作，运行过程如下图所示。

```

pie@pie-desktop: ~/桌面
pie@pie-desktop:~/桌面$ python3 get_pcd_instant.py
[INFO] [1720088813.630447941] [pointcloud_saver]: Uploaded /home/pie/桌面/bag_pcds/0.pcd to OSS as 1_top.pcd
[INFO] [1720088813.728086367] [pointcloud_saver]: Uploaded /home/pie/桌面/bag_pcds/1.pcd to OSS as 1_bottom.pcd
[INFO] [1720088813.801953747] [pointcloud_saver]: Uploaded /home/pie/桌面/bag_pcds/2.pcd to OSS as 1_left.pcd
[INFO] [1720088813.888144008] [pointcloud_saver]: Uploaded /home/pie/桌面/bag_pcds/3.pcd to OSS as 1_right.pcd
    
```

图 2-18 点云数据保存与上传程序运行图

2.4 网页 Web 介绍

为了直观地将管道情况可视化，团队设计了 web 应用，可以更方便地管理和查看点云数据。该 Web 应用采用 Python 的 Flask 框架作为后端，给前端应用传送图片或者点云文件（PCD），前端使用 Vue 框架，可以实现动态渲染。Web 应用的服务器端从互联网云平台共享文件夹中下载扫描后的 PCD 文件，然后做预处理，将 PCD 转为一张 PNG 格式的图片，最后将点云文件和图片一起保存在本地服务器。

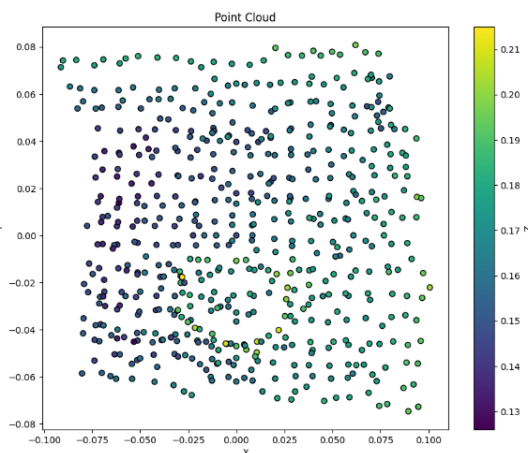


图 2-19 PCD_to_PNG 图片

Web 应用界面主要用来管理和查看 PCD，以表格的形式按照检测距离将检测结果分为不同的条目，每一个条目包括上、下、左、右四个方向，将一段距离内的各个方位都包括在内。

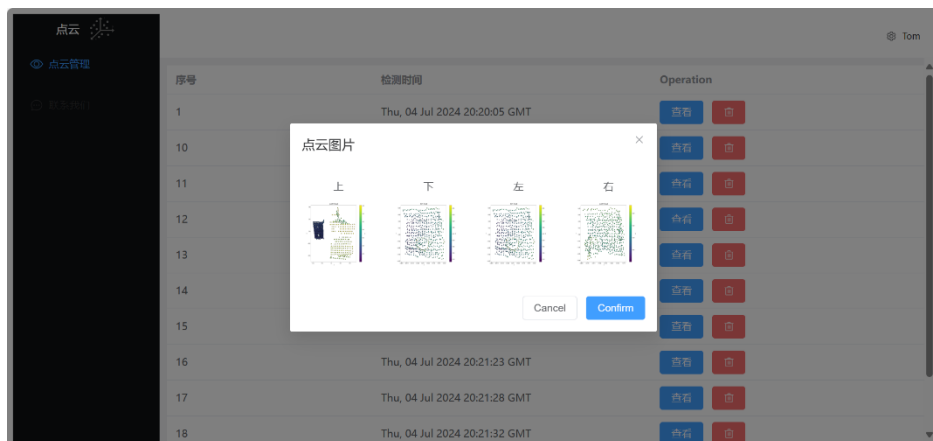


图 2-20 Web 下的前后左右的点云图片

点击某个方向的图片，就会跳转到点云加载器界面，用鼠标拖动旋转，放大查看细节，还可在左上角的控制面板修改点云颜色和点云大小，实现不同的视觉效果。

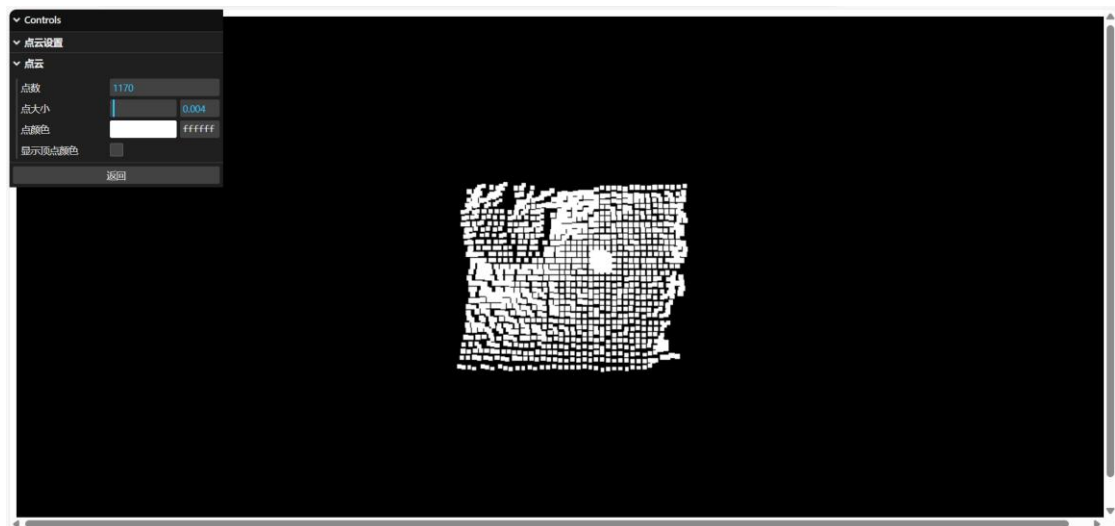


图 2-21 左面的点云 3D 文件

2.5 结果展示

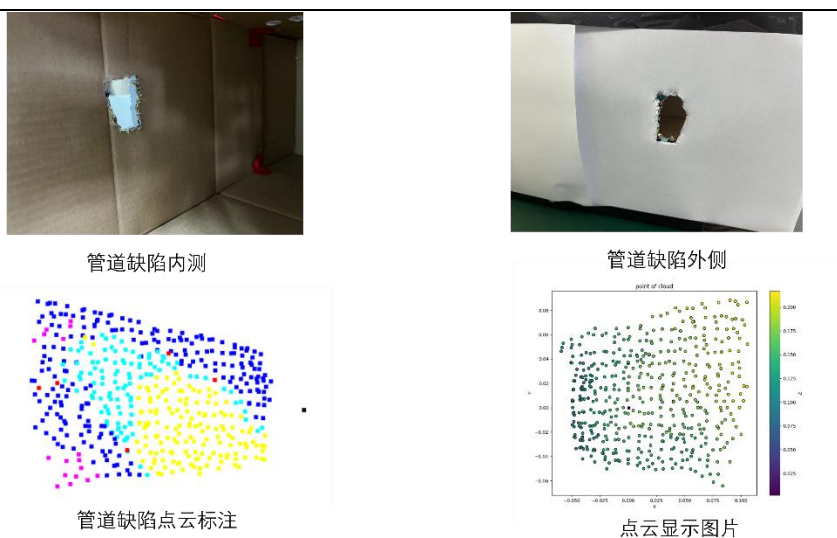


图 2-22 点云缺陷展示图

第三部分 完成情况及性能参数

3.1 完成情况及性能参数

在本次设计过程中，我们团队完成了基于海思平台的管道缺陷检测系统设计。该管道缺陷检测系统、激光雷达检测子系统、物联网子系统、运动控制子系统三个子系统组成。每个子系统上设计的相关功能均得到了实现，下面将从不同的方面进行性能参数的分析。

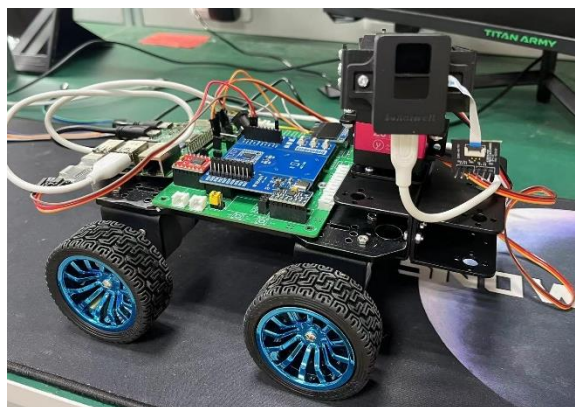


图 3-1 系统整体实物图

3.2 外设性能参数

舵机模块旋转角度稳定，误差约为 0.5%左右，能够准确转动到设定的角度。激光雷达模块的误差测距距离 0.1~10m；标定<1m 时测距精度<13mm，标定≥1m 时测距精度 20~30mm。

表 3-1 舵机性能测试结果

外设名称	理论情况	实际情况	误差情况分析
舵机模块	90°	89.5°	舵机模块旋转度数 三次测量误差均在 1°以内, 可认为舵机 模块处于正常状态
	45°	45.2°	
	0°	0.3°	
激光雷达模块	10cm	9.7cm	测距距离 0.1~10m; 标定<1m 时测距精 度<13mm, 标定≥1m 时 测 距 精 度 20~30mm
	20cm	20.4cm	
	30cm	30.9cm	

3.3 MQTT 连接物联网平台性能测试结果

表 3-2 MQTT 连接物联网平台性能测试

测试次数	成功次数	失败次数	成功率
30	29	1	96.7%

第四部分 总结

本项目制作了一个智能管道检测系统, 通过智能激光雷达检测子系统实时读取点云数据, 使用缺陷检测算法识别出缺陷的类型和大小后, 通过智能物联网子系统将检测的点云文件发送至互联网云端子系统, 从而在网页端进行可视化展示, 最终经由调度运动控制子系统实现场景转换, 做到管道的全覆盖检测。

4.1 可扩展之处

本项目虽已达成预期目标, 但在功能丰富性、识别准确性方面仍存在些许改进的地方, 需要在下述几个地方进行改进。

4.1.1 智能激光雷达检测子系统

激光雷达检测子系统在树莓派上一次接收 1200 个点云数据, 并转为 PCD 文件, 在此过程中, 激光雷达难免会产生一些误差点和空值, 影响点云数据的准确性, 增大实验误差。在后续的优化过程中, 可以先对点云进行滤波操作, 尽力减小误差点对整个点云数据的影响, 提高点云数据的精确度与 PCD 文件的可靠性。

4.1.2 缺陷检测算法

本项目所使用的缺陷检测算法通过读取和下采样点云数据, 利用 KD-Tree 进

行快速邻域搜索，对每个点的邻域点进行二次曲面拟合，计算出曲面的高斯曲率和平均曲率。通过这些曲率值对点云数据进行分类标注，不同曲率范围对应不同颜色，用于可视化几何特征和检测表面缺陷。

4.2 心得体会

尽管在当前技术环境下，设计一款管道缺陷检测系统已经较为普遍，但如何在本次系统设计过程中，使功能更加完善，确保系统在使用过程中更加人性化，并真正提升管道检测的准确性和效率，依然是一项复杂的挑战。系统设计过程需要深入市场进行实际应用的调研，考虑设计系统的初衷，促使智能检测系统的功能最大化，从而帮助工业领域最大限度地消除安全隐患。

在本项目中，团队成员各司其职，通过对管道检测发展状况的调研和市场需求的分析，制定了项目的功能并逐步加以实现。在此过程中，我们遇到了软硬件层面的众多问题，但都通过互联网平台加以解决。这不仅锻炼了团队成员发现问题和解决问题的能力，也提升了我们对嵌入式系统开发的理解和技能。

团队成员在实验阶段成功开发了多个子系统，涵盖激光雷达检测子系统、物联网子系统以及运动控制子系统。这不仅锤炼了团队在陌生领域的学习能力，也彰显了当今软件与硬件开发相互结合的成果，达成了良好的学科融合目标。

通过这次项目，我们对嵌入式芯片和系统的理解更加深入。嵌入式系统是软硬件结合的产物，对代码和硬件知识的掌握提出了双重要求。在实验过程中，我们面对诸多挑战，但通过不断调试和优化，逐一克服了这些困难，磨炼了自己的意志与永不言弃的精神。

在处理管道缺陷检测项目时，我们意识到每一个细节都需要反复推敲和改进。从每一行代码到每一根连线，都需认真思考、不断优化，才能在嵌入式系统设计开发中获得深刻的洞见。通过本次项目，我们积累了丰富的经验和知识，为未来的创新和发展奠定了坚实的基础。

最后，我们深刻认识到国产 MCU 平台在芯片领域的重要性。以海思公司为例，感谢海思开发者社区为我们提供的帮助，以及竞赛群里老师们的积极、耐心回复。我们也衷心祝愿嵌入式大赛海思赛道能够越办越好！

第五部分 参考文献

-
- [1] 杜莎,曹熙.解析自动驾驶的三大传感器[J].汽车与配件,2018,0(23):38-43.
 - [2] 杨义彬.激光雷达技术的发展及其在大气环境监测中的应用[J].成都信息工程学院学报,2005,20(6):725-727.
 - [3] 常宁,于正林.激光雷达在数字城市三维建筑物建模中的应用[J].科技创新与应用,2016,6(23):28-29.
 - [4] 贾鹏军,蒋承君,刘琰,等.在役长输管道环焊缝 TOFD 与 RT 检测结果对比分析内蒙古石油化工,2020,46(7):42-46.
 - [5] 寿乐勇.天然气长输管道内腐蚀原因分析及控制措施[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(16):31-32.