

管道漏点的检测、定位与修复

Pipeline Leak Detection, Localization and Repair

 答辩人：林培涵

 指导老师：范衡教授

 电子与通信工程

广东省数字信号与图像处理技术重点实验室
汕头大学人工智能与机器人实验室

目 录

- ☑ 背景意义
- ☑ 机器人设计与实现
- ☑ 漏点检测与定位
- ☑ 机器人控制框架
- ☑ 运行及测试结果
- ☑ 总结与展望



背景意义

INTRODUCTION

- **管道带压堵漏**是在生产设备不停机同时管道带有一定压力的情况下来对管道进行修复工作。



传统带压堵漏作业现场照片



管道泄漏情况

- 管道运输的介质可能存在高温高压以及腐蚀性的特性，这一项工作具有一定的**危险性**。
- 国家（国发[2016]68号）取消了带温带压堵漏工的资格认证。

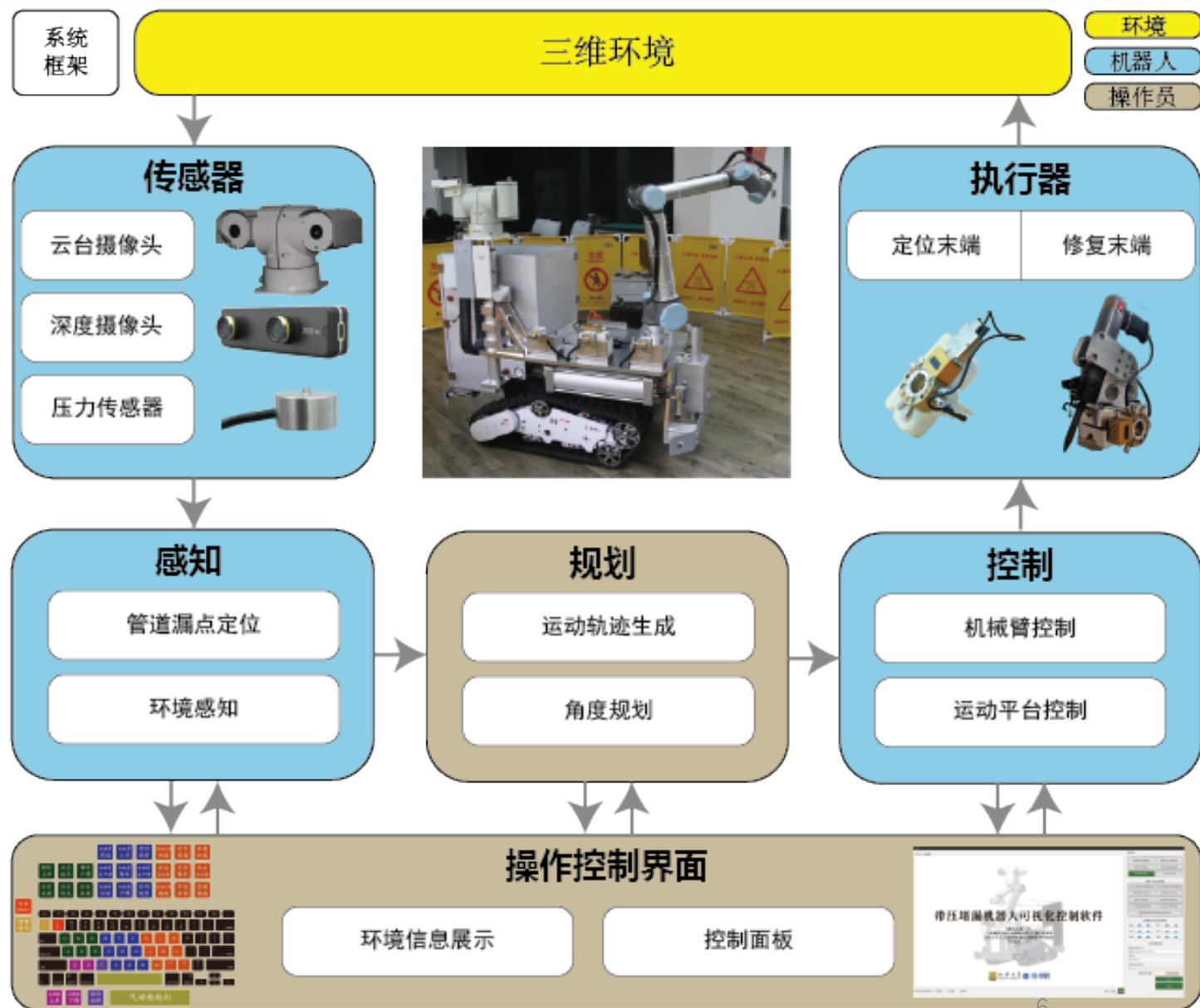


机器人设计与实现

DESIGN AND IMPLEMENT OF THE ROBOT

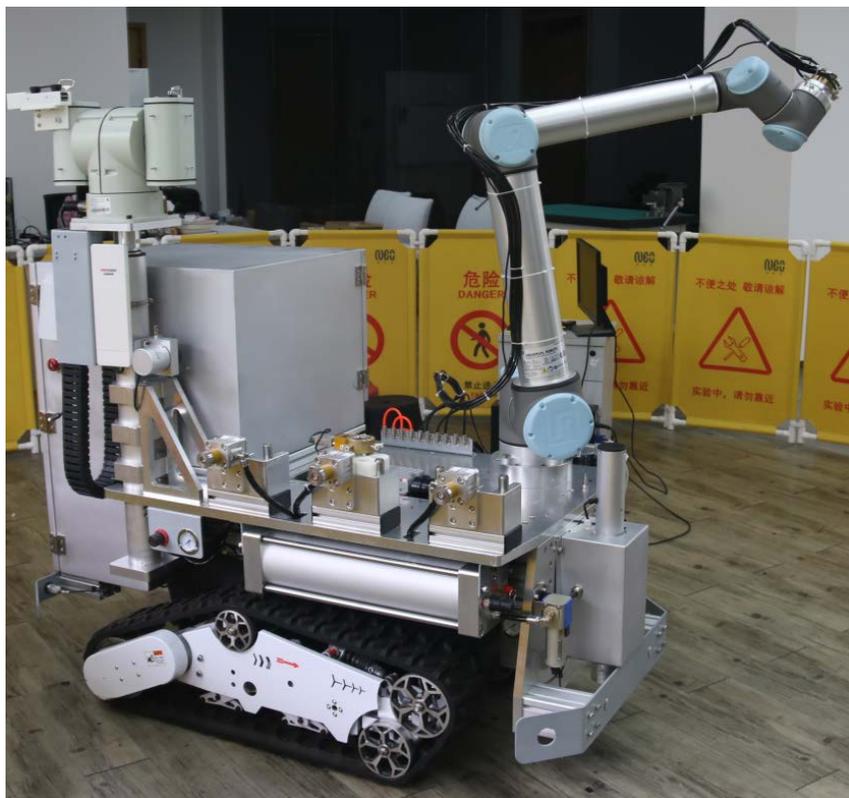
机器人整体框架:

- 机器人由6-DOF机械臂、定位末端和修复末端、双目摄像头等传感器、移动平台、核心计算机、电源和空压机等组成;
- 传感器用于感知环境信息, 配合操作控制界面对机械臂的运动轨迹进行规划, 控制机器人完成相应的动作。



带压堵漏机器人系统方案设计框架图

机器人主体:



带压堵漏机器人

- 操作手采用**六自由度的机械臂--UR10**，主要原因是工业应用成熟，可靠性高，重复定位精度和负载性能基本满足要求。
- 机器人的行走结构采用**履带式结构移动平台**，与地接触面积大，结构运行平稳，负载能力强。
- 核心计算机使用了Intel i7-7700k + RTX 2070S组合，满足**传感器数据处理和发布接收控制指令**需求。
- 配备了**网桥和交换机**，用于将**实时视频流**发送到远程客户端，并从远程客户端接收**控制指令**。
- 搭载了**空气压缩机**作为捻打气锤、气缸、快换模块的动力来源。
- 底层的控制信号由16路继电器和Arduino进行处理，用于控制云台摄像头、伸缩气缸、机器人工作告警灯、履带机构和启动电磁阀等元件。



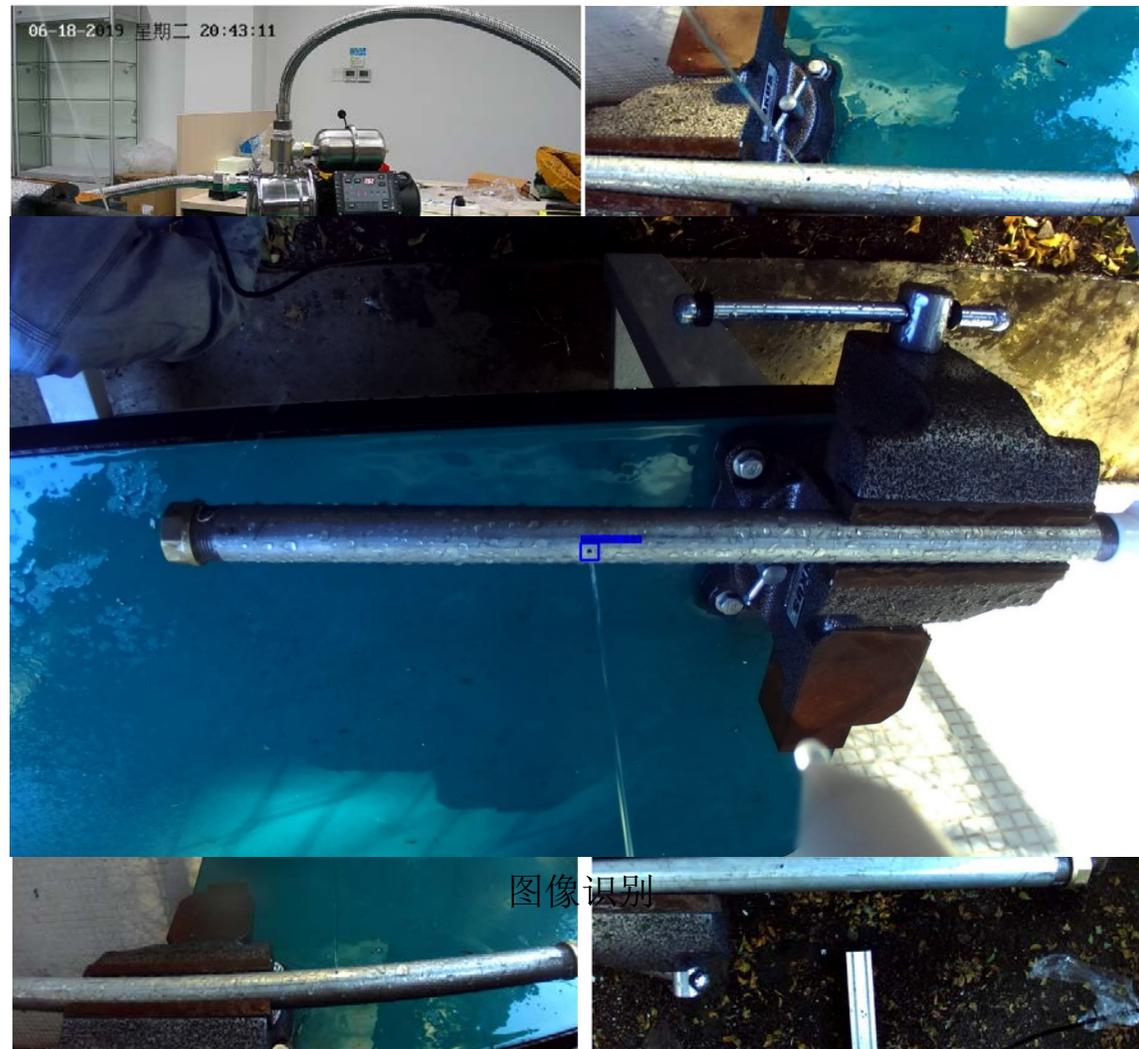


漏点检测与定位

Leak DETECTION AND LOCATION

图像识别:

- 管道漏点的识别属于小物体检测，综合考虑后使用YOLO v3目标检测算法对管道漏点进行检测；
- 采集了800张不同环境、光照、角度的管道泄漏图片作为数据集来训练神经网络；
- 假定管道漏点的检测结果bounding box的中心位置为管道漏点的位置，根据深度信息计算出管道漏点相对于双目摄像机的三维位置，通过tf(TransformFrame)计算变换即可粗略计算得到管道漏点相对于机械臂基座的三维位置。



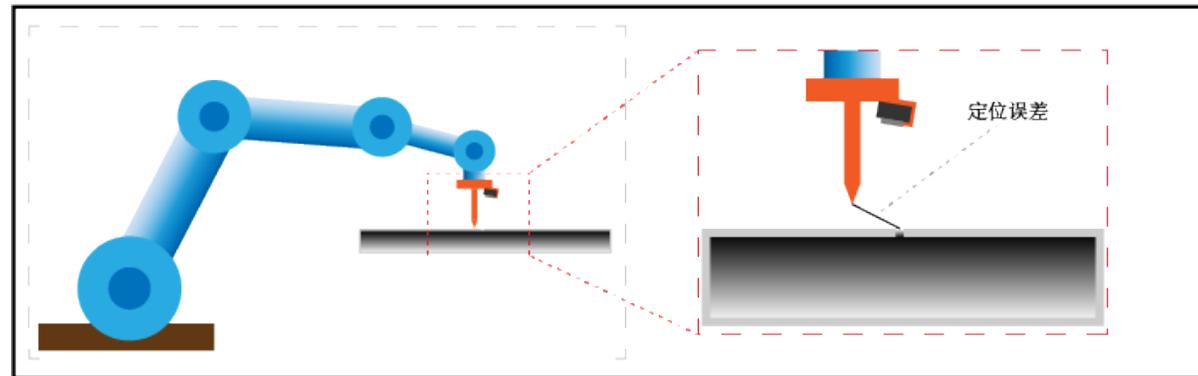
角度位置差异

角度位置差异

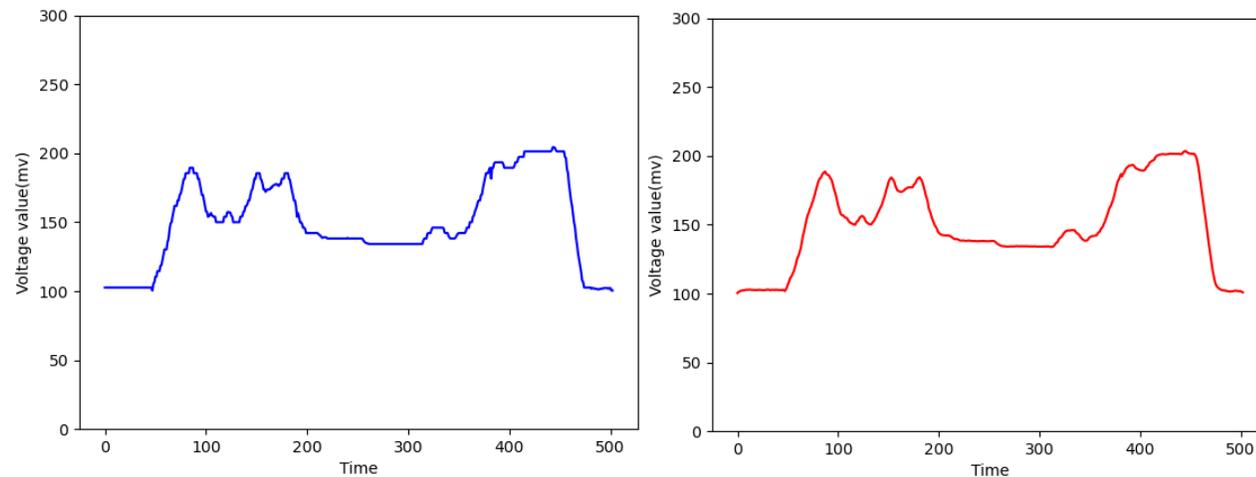
管道泄漏数据集

手眼协同:

- 本工作提出了一种基于手眼协同的管道漏点三维定位方法，利用双目摄像头的视觉和压力传感器的触觉，来精确定位管道漏点的三维位置；
- 压力传感器能够将压力转换为电信号，经过卡尔曼滤波后，分析电平波形，能够预测压力传感器接触的物体；



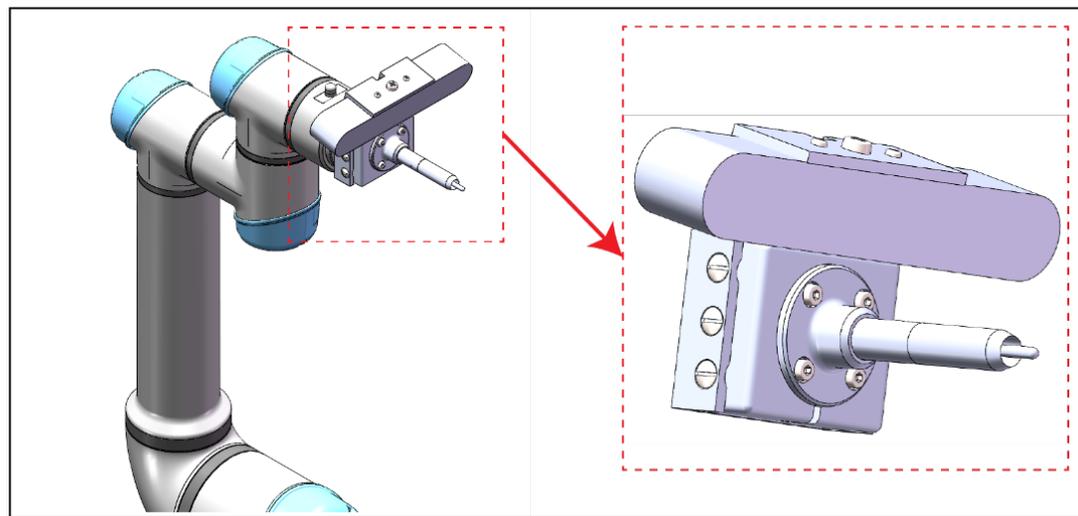
管道定位实验定位误差



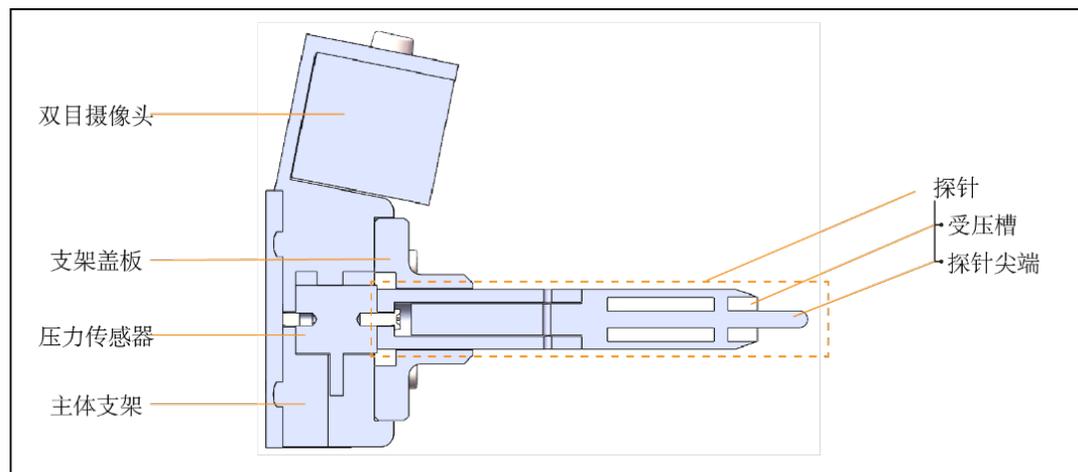
卡尔曼滤波处理

定位末端:

- 定位末端是一种**用于管道漏点检测与定位**的机械臂末端执行器，如图2-2所示，由探针、双目摄像头、压力传感器和快换模块等组成。
- 双目摄像头能够获取管道漏点与定位末端的相对位置差，但定位过程中由于水雾和喷溅的水柱，会导致不稳定的视觉定位误差。压力传感器和探针能够接收探针的压力信号，判断探针顶部是否接触到管道漏点位置。**结合双目摄像头的图像数据和压力传感器的压力数据，以获得准确的管道漏点位置信息。**



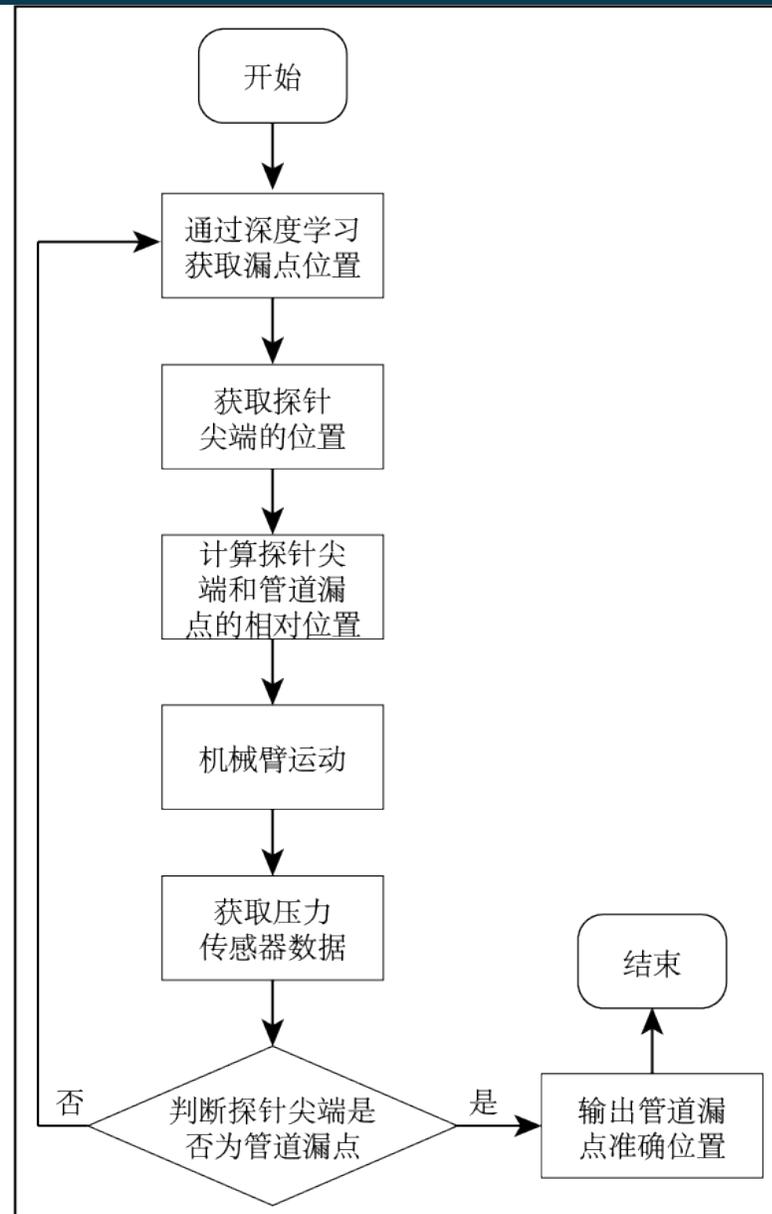
定位末端三维图



定位末端剖面图

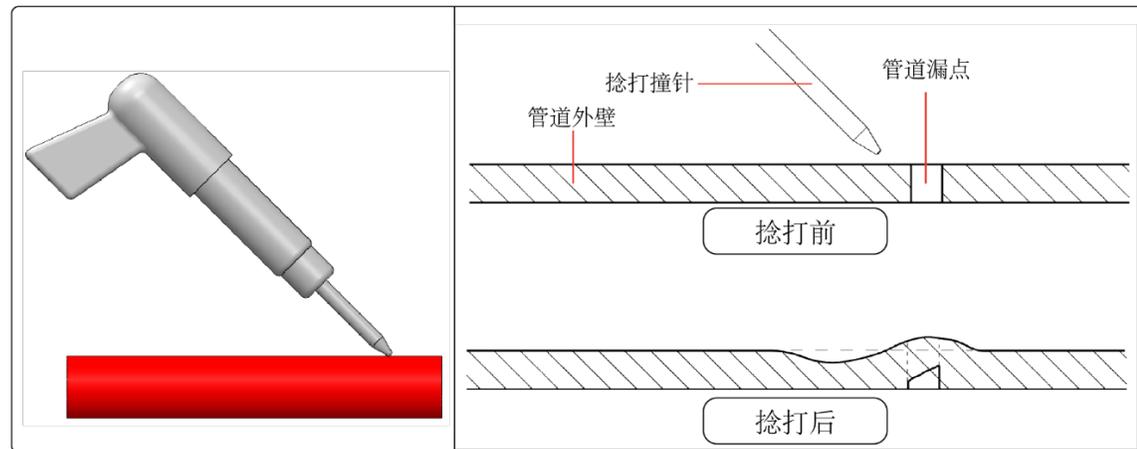
手眼协同:

- 通过YOLO图像检测算法获取管道漏点在二维图片上的位置，在三维点云图中获取该位置的深度信息，以此粗略得到管道漏点基于双目摄像头的三维位置；
- 通过tf转换计算得到管道漏点基于机械臂基座的三维位置，并推算出定位末端顶端距离管道漏点的相对位置；
- 控制机械臂运动，使得定位末端顶端趋于靠近管道漏点；
- 分析压力信息数据，结合图像信息预测定位末端和管道漏点的接触情况；
- 再重复以上运动，直至定位末端顶端直接接触管道漏点后，记录该位置坐标信息，即管道漏点基于机械臂基座的精确三维位置，该坐标信息用于后续对管道进行修复工作。

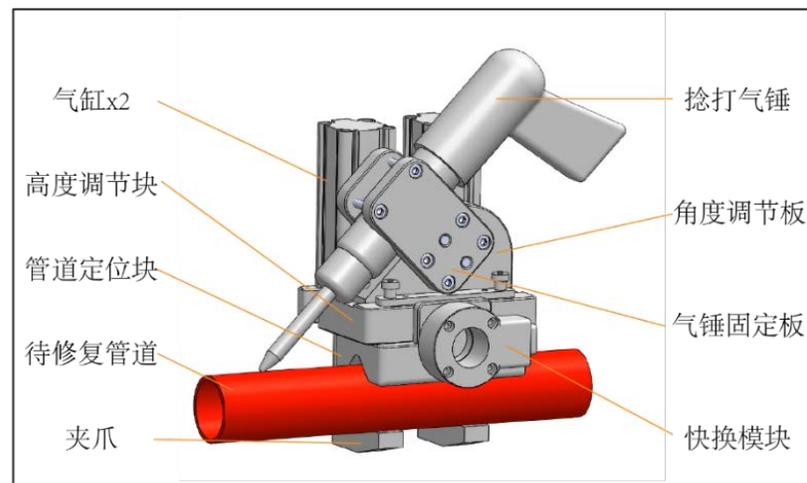


修复末端:

- 修复末端是一种用于对管道漏点进行修复的机械臂末端执行器，采用了**捻打工艺**的方法来实现对管道漏点的修复，其原理是利用管道金属材料的塑性，通过外力对管道漏点周围的金属材料施加一定的外力，**推移管道周围的材料覆盖到漏点上**，如图2-3所示，这种工艺能够用于修复3mm内的管道漏点。
- 修复末端由气缸、捻打气锤、夹爪、角度调节板、快换模块和高度定位块等组成。
- 在设计上，利用高度调节快，可以令修复末端在修复不同直径大小的管道时，都能具备相近的修复质量；在进行管道修复任务的时候，通常会将捻打气锤与管道的相对位置保持 60° 左右的角度。



捻缝工艺修复管道原理



修复末端

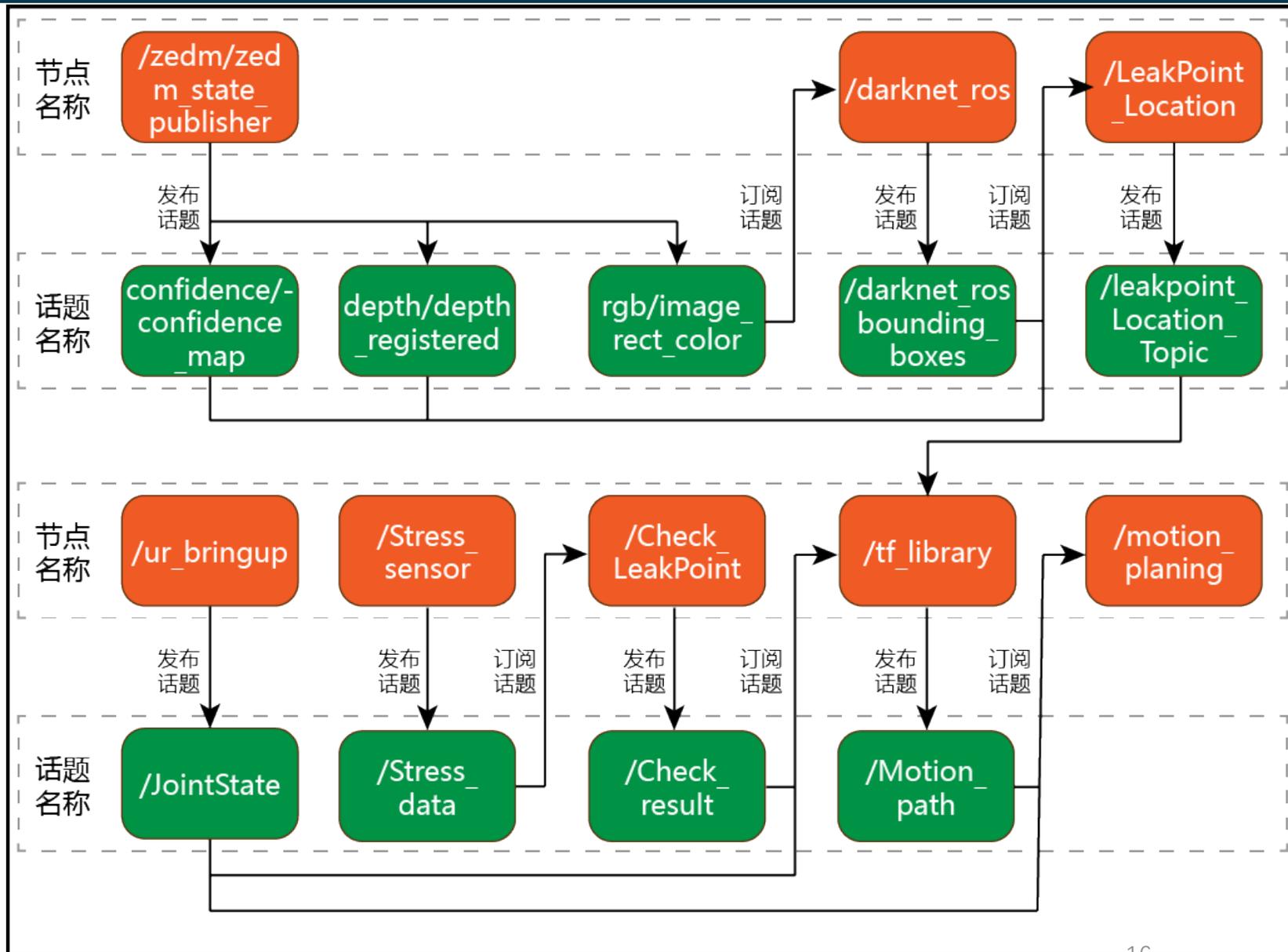


机器人控制框架

ROBOT CONTROL FRAMEWORK

控制框架:

- 基于 ROS (Robot Operating System) 搭建了**机器人控制框架**, 能够对传感器的数据 (包括压力信息、机械臂关节角信息和双目图像信息等) 进行处理, 进行 tf 坐标转换等计算, 发布机械臂控制指令, 完成管道漏点定位等操作。

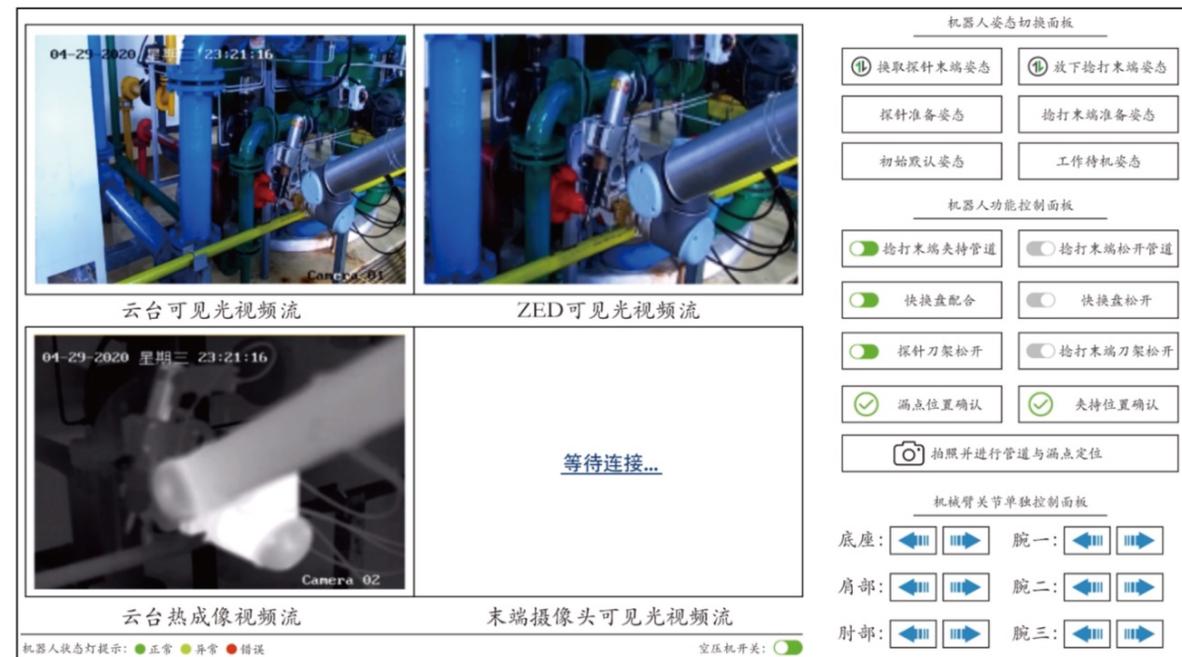


控制交互:

- 键盘按键控制**主要面向机器人本体的控制**，其中包括履带移动底盘的控制，机械臂的控制，云台摄像头的控制等。
- 软件的人机交互界面将由左右两部分组成，**左边为显示面板，右边为控制面板**。



键盘控制设计分布图



远程操作界面

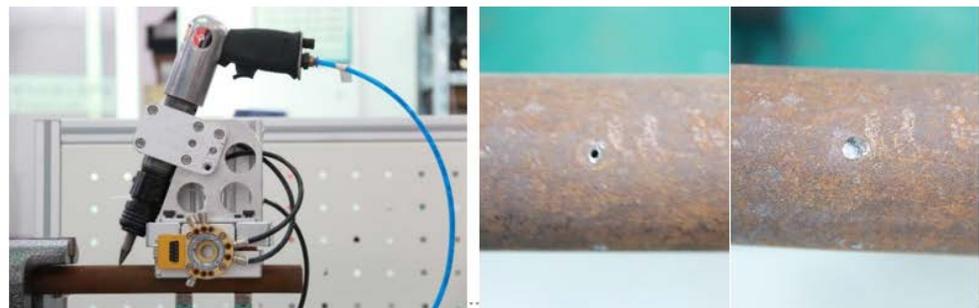


运行及测试结果

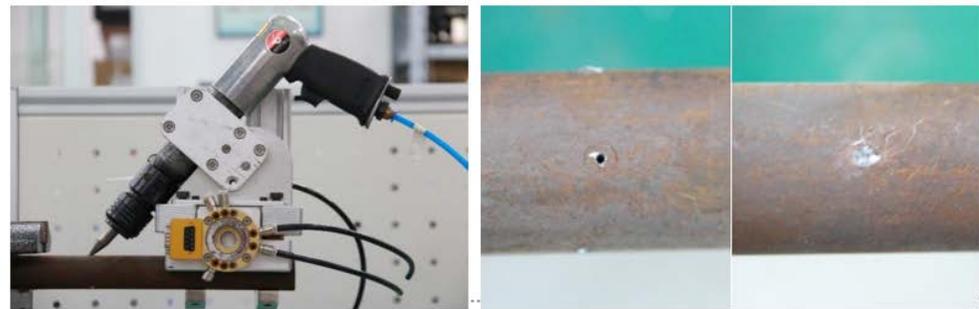
ANALYSIS AND RESULT OF EXPERIMENT

修复末端捻打倾角实验:

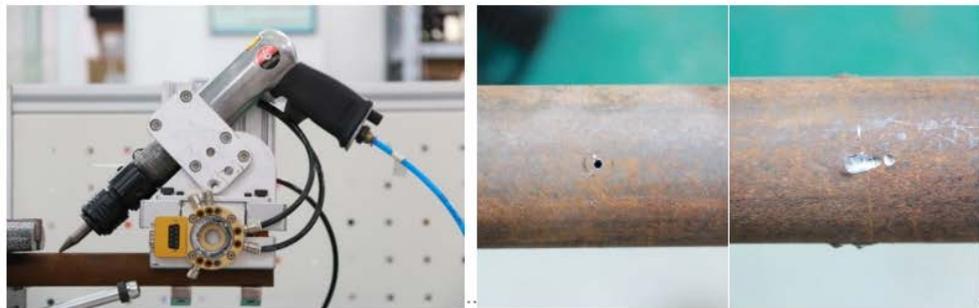
- 在管道漏点实际修复过程中，捻打气锤的角度会影响最终的管道漏点修复效果，为了确定不同参数对于堵漏质量的影响，我们针对修复末端设计了**不同角度的角度调节板**，通过更换角度调节板就能够调整捻打气锤相对于管道的角度；
- 实验中选择了目前管道运输中较为常见的25#碳素钢，直径为50mm，壁厚为5mm，并在表面上钻有2.5mm的通孔；
- 实验结果:**
 - 当捻打角度为 50° 时，捻打的深度较浅且推移材料的距离较远；当捻打角度为 70° 时，捻打的深度较深且推移材料的距离变短。而当捻打角度为 60° 时，捻打的深度和推移材料的距离适中。**在 50° 至 70° 的捻打角度区间内，随着捻打角度加大，砂眼捻打深度逐渐变深并且材料的管道轴线推移距离减小。**



.....(a) 70° 捻打角度.....(b)管道漏点与 70° 管道修复效果



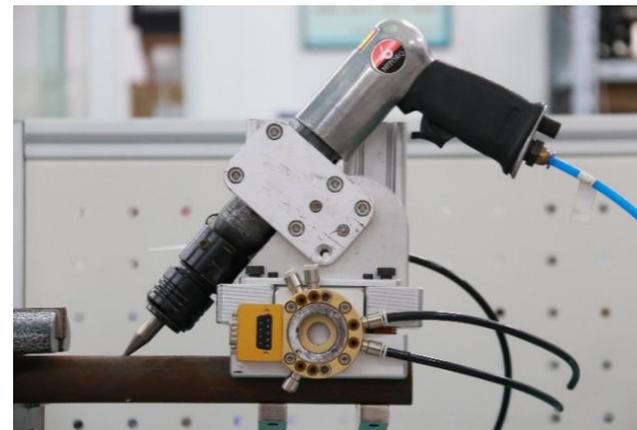
.....(c) 60° 捻打角度.....(d)管道漏点与 60° 管道修复效果



.....(e) 50° 捻打角度.....(f)管道漏点与 50° 管道修复效果

管道修复实验:

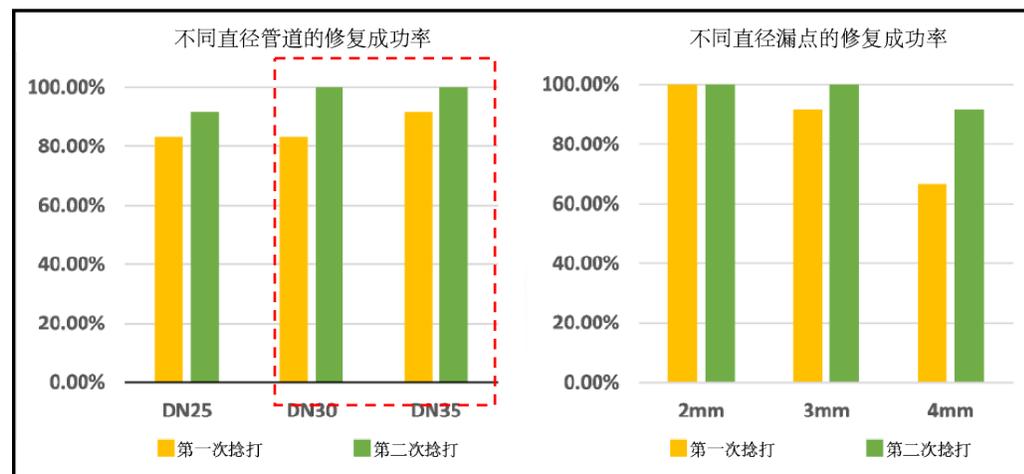
- 为了验证修复末端的稳定性、可靠性以及兼容性，我们设计了一系列管道修复实验来验证所设计的修复末端的性能；
- 使用了多达36条DN25~DN35直径的管道进行实验，这些管道上分别钻有2mm至4mm的通孔，实验中每次捻打5秒，至多捻打2次，随后将管道注入压力为0.2 Mpa的水来验证管道是否仍旧存在泄漏情况；



管道修复实验

实验结果:

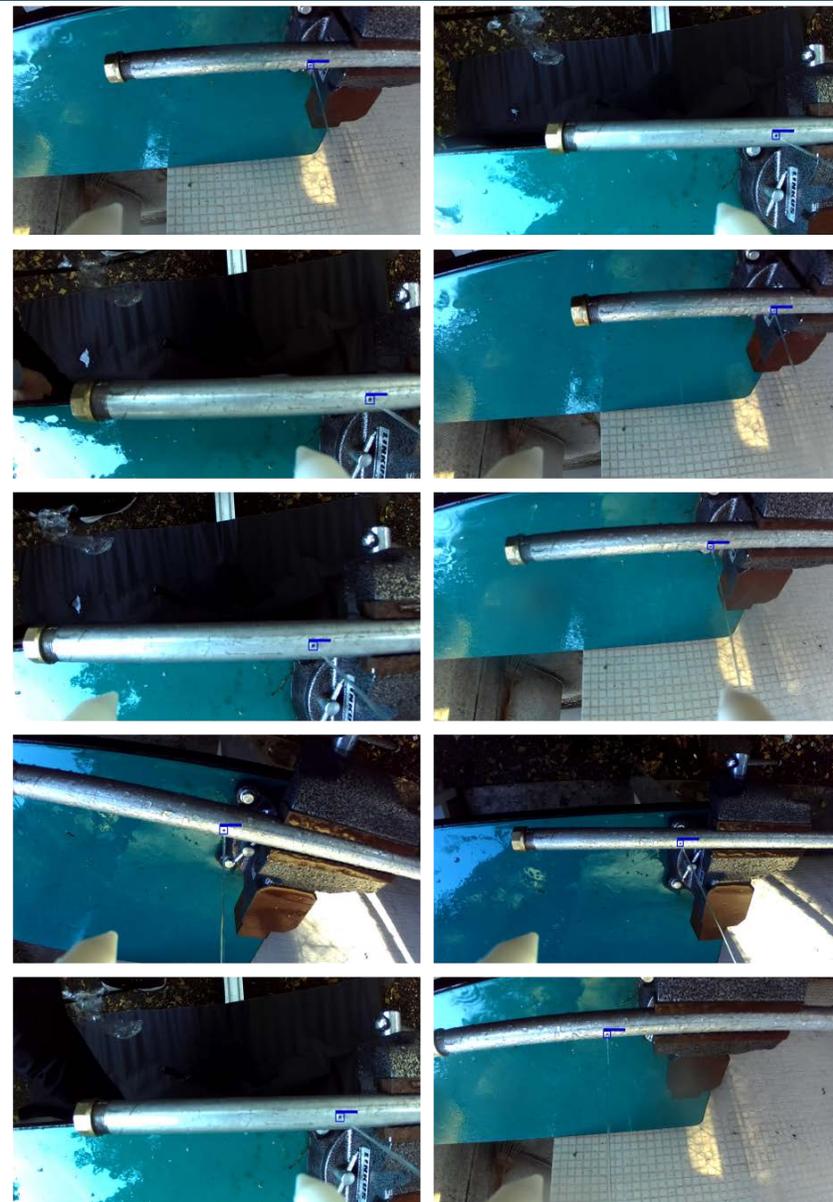
- 在满足修复末端设计要求的管道直径范围内，管道的直径越大，修复末端夹紧管道的稳定性更高，修复质量更好，成功率越高；
- 管道泄漏点直径越小，则更容易被推移的材料覆盖堵住，因此修复的难度更低，成功率越高。



修复质量效果实验

漏点检测定位实验:

- 使用了YOLO v3的Darknet-53版本，利用自己采集的数据集进行训练，使用的网络参数为第900代的参数。所采用的设备包括机械臂UR5、定位末端、搭载i7-7700k+NVIDIA-2070S的计算平台，其中定位末端上的图像视频采集设备为ZED mini;
- 控制机械臂在发生泄漏的管道周围进行移动，在机械臂运动的过程中尽可能保证摄像头的拍摄方向大致朝向管道的漏点;
- **实验结果:**
 - NVIDIA-2070S平台上可输出10fps 720P视频，管道泄漏点检测精度达到85%以上;
 - 在绝大多数情况下，尽管管道的漏点这一目标在图片中的显得十分小，环境中地光照和反光等因素也会对预测结果带来一定干扰，并且在实验环境中背景十分杂乱，但管道上的漏点仍旧被准确地检测出来，并且置信度也保持在较高的水平。

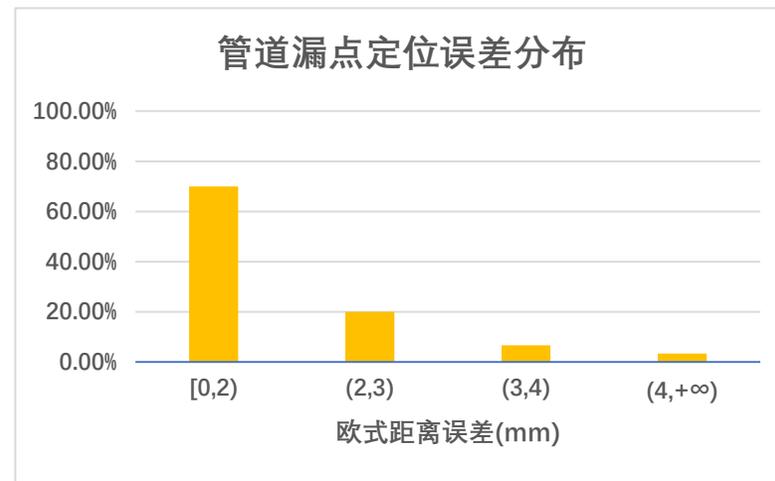


漏点检测定位实验:

- 将连接定位末端的机械臂的初始姿态固定在管道漏点上方300mm至400mm的位置，随后机械臂会根据计算得到的漏点坐标，将定位末端的探针尖端移动到该坐标上。我们在通过手动控制机械臂，将定位末端的探针尖端移动到真实的管道漏点上，并记录该点的位置。比对这两次的坐标差异，我们可以计算得到这两点之间的欧式距离，即计算得到管道漏点位置的坐标值与真实管道漏点位置的坐标值的误差。
- 实验结果:
 - 在大部分情况下，管道漏点定位误差小于3mm，基本满足管道修复任务要求。



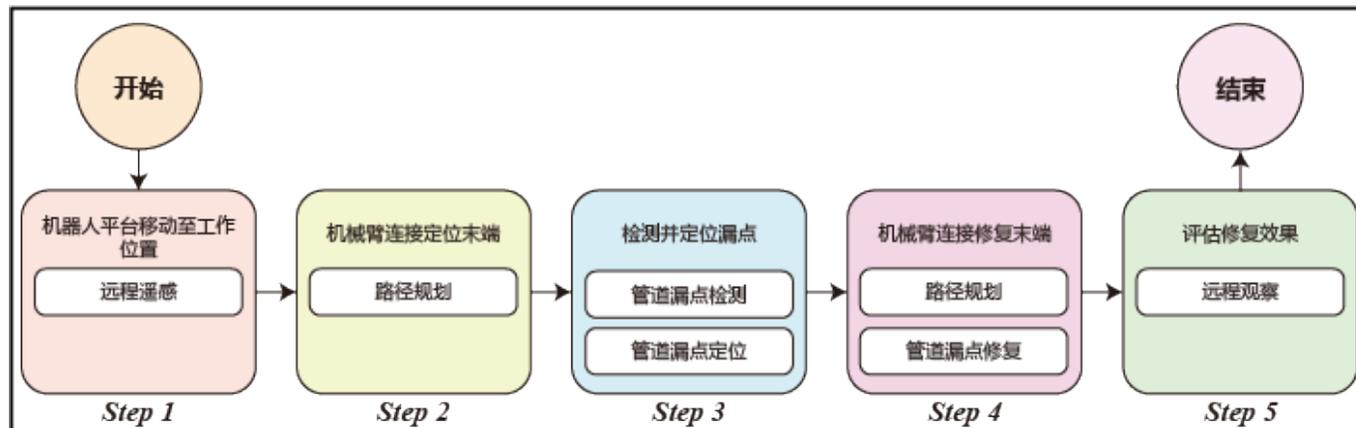
管道漏点定位实验



管道漏点定位实验结果

真实环境下执行任务:

- 将机器人运送至电厂进行真实的管道修复实验。实验的环境在电厂内部的普通厂房中，泄漏的管道为输送带有一定温度的自然供水的高压管道，管道直径为38mm，泄漏点直径约为2.8mm。
- 首先机器人正常启动之后，云台摄像头会正常启用，远程操作人员可以通过摄像头观察机器人周围环境的情况，操作人员通过远程遥感控制机器人规划路径上进行巡检，当发现有疑似泄漏的管道时，控制机器人到达管道附近；
- 机械臂连接上定位末端，通过目标检测来判断管道是否发生了泄漏，并通过手眼协同定位方法精确地定位管道漏点地三维位置；
- 机械臂连接上修复末端，机械臂通过路径规划移动到前面计算得到的管道漏点位置，并在操作人员的监督下执行管道修复任务



机器人工作过程



实际现场环境



总结与展望

CONCLUSION AND FUTURE

工作总结

- 针对华能海门电厂内部分高温输水管道泄漏管道修复的任务，提取核心需求点。制定出一个整体的机器人系统方案，**设计并实现了国内外首台带压堵漏领域的特种机器人**。
- 创新型的设计了专用于管道修复任务的**定位末端和修复末端**。
- 提出了一种**基于手眼协同的管道漏点三维定位方法**，并结合所设计的基于ROS的机器人控制框架，能够极大地提高机器人的智能化和自动化程度。最终实现的效果为机器人能够基于目标检测算法对管道漏点的检测结果，精确地获取管道漏点的三维位置，并对机械臂的运动路径进行规划来修复管道漏点。

工作展望

- 该项目中对于机器人执行任务的控制流程出于安全性考虑仍旧未实现完全的自动化，在机器人执行的过程中需要专业的操作人员对各个控制节点进行启动，并且修复管道漏点时开放了对机械臂的位姿进行微调控制。
- 考虑到管道修复工艺的复杂度，本项目中只选用了捻打修复工艺，而在实际的使用中根据不同管道的不同泄漏情况选择不同的修复工艺，但机器人上要搭载不同的修复工具无疑会提升机器人的设计难度和机器人的性能要求。

已获得奖项:

《热力管道在线智能修复机器人》入选2020年广东高校高新成果库（广东省仅6项）

《热力管道堵漏机器人》2021年获广东省挑战杯省级二等奖

《热力管道在线智能修复机器人》获得2020年广东省路演大赛电子组三等奖

已录用论文:

[1] Lin P, Li X, Long Z, et al. Pipeline Leak Detection, Location and Repair; proceedings of the 2021 IEEE 11th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), F, 2021 [C]. IEEE.

已授权软著:

[2] 带压堵漏机器人可视化控制软件(NEObotGUI). 汕头大学 2019R1176920

已授权专利:

[3] 范衡,龙周彬,林培涵,李晓明,马培立,陈文钊,叶志豪,黄铭威,李建立. 一种集成视觉与压力反馈的带压堵漏末端执行器[P]. 广东省: CN214745029U,2021-11-16.

[4] 范衡,朱贵杰,林培涵,叶志豪,何伟源,李建立,黄铭威,姜志成,钟铸威,李晓明,马培立. 一种捻打堵漏的机械臂末端执行器[P]. 广东省: CN214560994U,2021-11-02.

[5]范衡,朱贵杰,马培立,何伟源,叶志豪,黄铭威,李建立,李晓明,林培涵,姜志成,钟铸威. 一种齿轮式机械臂末端执行器[P]. 广东省: CN214744153U,2021-11-16.

已申请专利:

[6] 范衡,林培涵,陈梓泓,王诏君,李晓明,龙周彬,董朝晖,马培立. 一种无中心机器人集群包围任务控制方法及系统[P]. 广东省: CN112527012A,2021-03-19.

[7] 范衡,林培涵,马培立,王琛,宁为博,李晓明,王诏君,李文姬. 一种群体机器人的多目标搜索与围捕控制方法及系统[P]. 广东省: CN112684700A,2021-04-20.

[8] 范衡,马培立,林培涵,李晓明,朱贵杰,王诏君. 一种带压堵漏机器人的漏点定位自主控制方法及系统[P]. 广东省: CN112571425A,2021-03-30.

[9] 韦家弘,范衡,林培涵,朱贵杰,马培立,黄文宁,李晓明,龙周彬. 基于进化神经架构搜索的眼底图像视网膜血管分割方法[P]. 广东省: CN112258486A,2021-01-22.

[10] 范衡,李晓明,龙周彬,林培涵,马培立,韦家弘,姜志成,何伟源,钟铸威. 一种带压堵漏机器人自主漏点定位方法[P]. 广东省: CN113001559A,2021-06-22.

[11] 朱贵杰,马培立,范衡,李晓明,林培涵,韦家弘,黄文宁,叶志豪,李建立,黄铭威. 一种基于U型编码解码器神经网络的道路裂缝检测方法[P]. 广东省: CN112785578A,2021-05-11.

[12] 马培立,范衡,李晓明,林培涵,朱贵杰. 一种基于人群密度估计的指引机器人方法及系统[P]. 广东省: CN112731919A,2021-04-30.

[13] 范衡,马培立,朱贵杰,林培涵,李晓明. 一种行人轨迹预测和跟随的机器人方法及系统[P]. 广东省: CN111708042A,2020-09-25.

已申请专利:

- [14] 王宏民,朱贵杰,范衡,林培涵,李晓明,马培立,陈文钊,游煜根. 管道漏点定位装置、带压堵漏装置及管道漏点定位方法[P]. 广东省: CN111022936A,2020-04-17.
- [15] 马培立,朱贵杰,范衡,李晓明,林培涵. 一种混合注意力机制的眼底图像视网膜血管分割方法[P]. 广东省: CN112132817A,2020-12-25.
- [16] 范衡,李晓明,王诏君,王柳,黄华兴,林培涵,马培立,龙周彬. 基于基因调控网络的群体机器人动态围捕控制方法及系统[P]. 广东省: CN112462779A,2021-03-09.
- [17] 范衡,马培立,王诏君,石泽,蔡培伟,李晓明,林培涵,李文姬. 一种基于群体机器人的目标围捕控制方法及系统[P]. 广东省: CN112527020A,2021-03-19.
- [18] 朱贵杰,韦家弘,范衡,马培立,黄文宁,李晓明,林培涵,叶志豪. 基于遗传算法和U型神经网络的道路裂缝分割的方法[P]. 广东省: CN112257622A,2021-01-22.



请老师批评指正