

基于 RK3588 的挖掘机前向信息感知计算方法研究

摘要

本作品为作业机器人作业臂落点位置增强显示以及作业臂缺陷损伤检测，使用外部设备获取环境信息，利用 RK3588 主控芯片的算力优势，多线程处理外界信息，精准感知挖掘机所处的三维环境，并在视频画面上以网格形式增强显示作业机器人作业臂落点位置，使操作者能直观感受落点区域的起伏状态，利于远程观察和操控。同时利用 RK3588 主控芯片的 CPU、NPU 等计算单元对作业过程中的作业臂状态进行智能检测和实时监控，确保在操作过程的安全。本作品以挖掘机作业臂为例进行分析及实现。

随着现代工程机械智能化程度持续提高，以往依靠人工经验的作业方式已无法契合复杂施工环境里对作业精度以及效率的严苛要求。挖掘机械身为土方工程与矿山开采的关键设备，其挖斗落点的精准预测对于施工安全以及效率提升有着重要意义，然而复杂的环境、多变的光照以及设备传感器存在的局限性，在操作挖掘机时，操作者并不能直观根据现场采集到的视频画面中感受到挖掘机铲斗的落土位置及落点处的起伏状态。同时单一的视觉或者激光雷达方案难以达成高精度、具有实时的落点预测。鉴于此，本作品围绕挖掘机械施工过程中挖斗落点的实时预测任务，设计并达成了一种融合视觉与激光雷达数据的多模态落点识别系统，以此提升系统的预测精度与鲁棒性，推动智能施工机械的自主作业能力。此外，在实际的工程作业中，挖掘机长时间在复杂恶劣的地质条件下工作，因此斗齿在作业过程中易发生脱落，斗齿脱落不仅严重影响了挖掘效率和经济效益，而且如果未能及时发现脱落的斗齿，脱落的斗齿与物料一起进入破碎机，也极易引起破碎机故障，以至于造成严重的安全事故。针对以上问题，本文基于深度学习理论和图像处理技术研究斗齿健康状态监测算法，且设计了可视化监测软件系统。

第一部分 作品概述

1.1 功能与特性

本作品基于挖掘机这个重型工程机械中应用极为广泛且工作环境较为复杂的设备，主要包括两个主要功能：斗齿健康状态监测和实时挖斗落点地形预测。

实时斗齿健康状态监测是指使用 yolo 模型对挖斗和斗齿进行检测，然后判断挖斗的朝向并计算预期的斗齿位置，将预期位置与检测到的斗齿位置进行匹配来判断脱落情况，为了更加准确的判断，再利用模板匹配来进行二次确认，最后如果判断出某个斗齿脱落，则进行脱落可视化和报警提示。在进行测试后，证明此算法可以实现对斗齿脱落情况的有效判断。如图 1-1 所示。

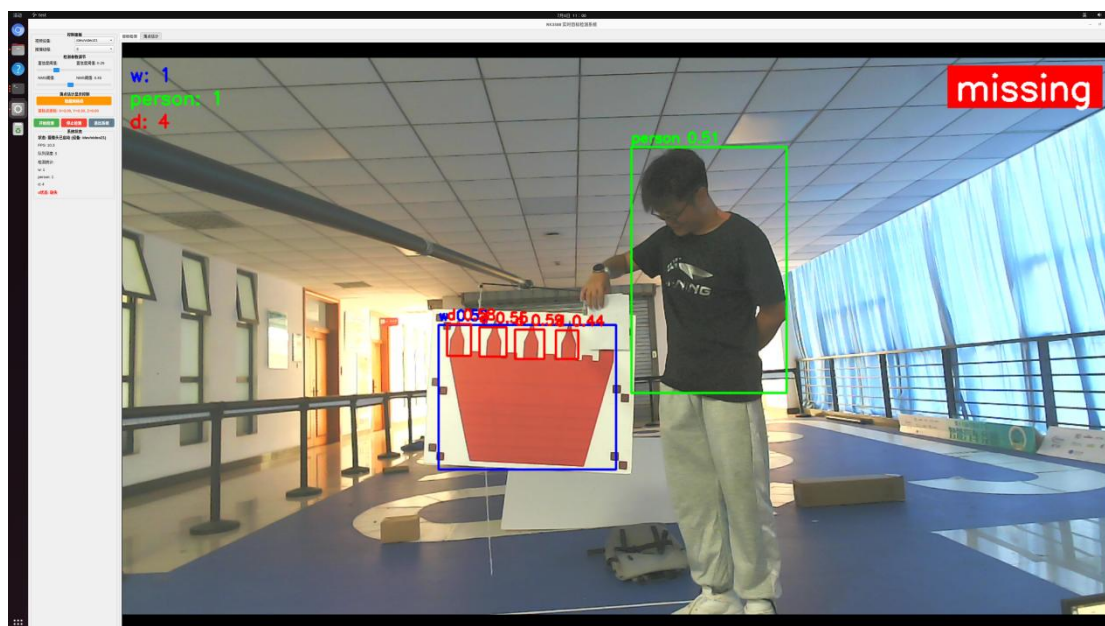


图 1-1 挖斗、行人及斗齿状态检测

实时挖斗落点地形预测是指针对实际挖掘应用场景，基于规则网格以及最近邻点映射的投影可视化方法，该方法借助建立二维栅格与三维点之间的映射关系，并将其投影至图像平面，生成结构化网格层，清晰展示出挖斗落点区域的空间分布情况以及预测效果，精准感知挖掘机所处的三维环境，并在视频画面上以网格形式增强显示落点位置，使操作者能直观感受落点区域的起伏状态有效提升了系统的可操作性以及空间感知能力。如图 1-2 所示。

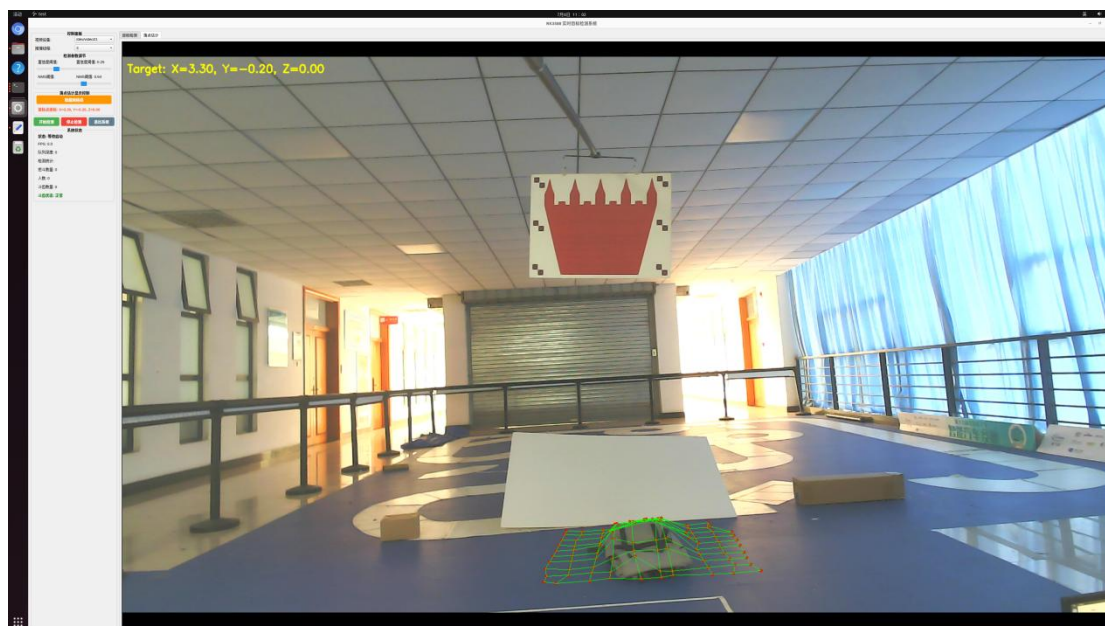


图 1-2 挖斗落点地形估计

1.2 应用领域

我国工程机械行业不断以市场需求为导向，大力研发智能化技术，并在智能化技术的研发应用上有一定突破，尤其是在无人化施工与智能驾驶在工程机械领域的应用日益广泛的情况下，使用此类的建筑工程机械可以使施工进度得到有效保障。

挖掘机械作为土方工程和矿山开采的重要设备，其智能化控制对于提升施工效率、减少能耗和降低人为误操作至关重要。传统挖掘机主要依赖人工操作，施工过程中对挖机落点的判断依靠人工经验，在施工环境复杂、光照不足等情况下，作业精度受人为因素影响较大。如果加入传感技术和数据分析技术，增加工程机械的智能化控制水平，上文所提及的问题能得到一定程度的解决，在测量施工质量和进度方面同样发挥关键作用。本文提出的挖斗落点预测模型和增强可视化方法，运用视觉和雷达数据融合的方法，协助一线施工人员进行更高效安全的生产活动。通过一或两个高像素的相机进行拍摄，获取图像的深度信息，同时结合雷达的点云数据进行矫正，进行多数据融合生成深度图。之后结合挖斗的物理建模，

通过算法计算出实时的挖斗落点三维坐标，在深度图中还原出挖斗的预测落点区域，并将预测结果结合视觉实时图像进行可视化，协助操作员进行操作分析。

挖掘机作为重型工程机械中应用极为广泛的设备，其核心动力主要源于液压传动，应用场景包括土石挖掘、矿产开采以及物料搬运等工作，现代液压挖掘机的核心结构包含动力系统、工作装置、回转机构、行走机构以及控制系统这五大系统，其中工作装置又由多关节机械臂、铲斗以及斗齿组成。挖掘机作为工程建设中的主要施工设备，其性能与效率对工程进度以及成本有直接的影响，而挖掘机挖斗上的斗齿是物料挖掘和装载的关键部件，斗齿的健康状态对于挖掘机的挖掘性能和效率至关重要，所以对斗齿的状态进行监测是很有必要的。

在实际工程中，挖掘机大多数时候会在复杂的地质条件下进行作业，比如硬质岩石、淤泥和软土环境，随着作业时间增加，斗齿作为主要的工作部件，一直承受着巨大的压力，极易出现严重损坏甚至脱落的情况。斗齿的脱落会使挖掘效率降低，还可能引发设备故障，增加维护成本，对操作人员的安全构成威胁。怎样实现挖掘机斗齿健康状态的实时检测，及时对斗齿异常情况发出预警，已然成为工程机械领域的关键课题。传统的斗齿维护主要依靠人工定期检查，然而这种方式存在监测效率低、过度依赖人工经验和监测盲区大等诸多不足。近年来，随着人工智能、传感器技术和物联网技术快速发展，为斗齿健康状态监测提供了诸多新的技术路径与实现手段。

1.3 主要技术特点

本作品使用了视觉-雷达落点预测，以及传感器联合标定。以视觉系统为基础，引入激光雷达，构建多传感器融合的联合识别系统，在此过程中，先完成图像角点与点云角点的特征提取及匹配，接着采用 EPNP 计算方法获取相机与雷达坐标系之间的外参关系，还引入光束法平差法优化标定精度，凭借点云着色的方式检验标定效果，该章介绍了挖斗落点可视化系统的实现方法。

本作品基于 YOLO 模型，模型改进部分首先利用 K-means 聚类算法对先验

框做了优化，获得适合本文数据集的先验框；然后引入了 CA 注意力机制和 SIOU 损失函数来提高对斗齿的检测能力；模型训练与分析部分主要是分析模型的训练过程，再结合模型测试结果的多项指标对模型进行评估，证明了此模型可以有效检测挖斗和斗齿；斗齿脱落判断算法部分主要说明了算法的实现流程，并进行了算法评估，结果表明该算法可以准确判断斗齿的脱落情况。进行了原始图像数据的采集和关键帧的提取，其次针对原始图像存在噪声信息的问题进行图像去噪，使用中值滤波结合双边滤波的方法去除噪声，然后利用 LabelImg 标注数据，实现数据集的构建，最后使用传统数据增强和 Mosaic 数据增强扩充训练集，增加训练样本的多样性。

1.4 主要性能指标

本作品基于对视觉系统的研究成果，引入激光雷达传感器，构建了视觉与雷达相融合的落点预测系统，针对多传感器坐标系转换、联合标定方法以及数据映射可视化等关键技术，展开了实验设计与具体实现工作，依靠构建完整的融合流程以及算法实现路径，验证了雷达与相机在落点识别任务中协同工作有可行性以及精度方面的优势。针对实际挖掘应用场景，提出了基于规则网格以及最近邻点映射的投影可视化方法，该方法借助建立二维栅格与三维点之间的映射关系，并将其投影至图像平面，生成结构化网格层，清晰展示出挖斗落点区域的空间分布情况以及预测效果，有效提升了系统的可操作性以及空间感知能力。

为了对设计的斗齿脱落判断算法的有效性进行准确的评估，需进行算法的验证实验。具体验证实验为在测试集中抽取 10 张图片来测试算法，这些图片包含了斗齿完全露出、斗齿被部分遮挡、斗齿单根脱落以及斗齿双根脱落这四种情况，同时也涵盖了挖掘机的多种作业场景，可以说明斗齿脱落判断算法在不同情况下的判断能力，测试结果如表 1-1。

表 1-1 算法测试结果

编号	斗齿状态	监测结果	是否误判
----	------	------	------

1	完整露出	5 个斗齿均存在	否
2	完整露出	5 个斗齿均存在	否
3	1 号斗齿部分被遮挡	5 个斗齿均存在	否
4	5 号斗齿部分被遮挡	5 号斗齿脱落	是
5	1 号斗齿脱落	1 号斗齿脱落	否
6	2 号斗齿脱落	2 号斗齿脱落	否
7	2 号斗齿脱落	2 号斗齿脱落	否
8	5 号斗齿脱落	5 号斗齿脱落	否
9	1、2 号斗齿脱落	1、2 号斗齿脱落	否
10	4、5 号斗齿脱落	4、5 号斗齿脱落	否

1.5 主要创新点

- (1) 系统平台构建：搭建了把高分辨率工业相机、Livox 激光雷达以及模块化支架整合在一起的联合实验平台，达成了视觉与雷达同步采集以及联合标定的能力。
- (2) 雷达与视觉融合设计：提出了基于 EPnP 的标定方法，完成了点云与图像坐标系之间的外参标定，借助点云着色技术实现了视觉辅助下的落点空间可视化，
- (3) 实际应用拓展：依靠对挖掘机作业视频中的挖斗距离进行预测，同时开发预测落点可视化方案，展示了本系统在真实场景下的落点估计能力以及工程实用性。
- (4) 图像预处理并建立数据集：针对采集的原始数据进行关键帧的采集，并对关键帧图像进行图像去噪和数据增强，然后针对挖斗和斗齿这两类进行数据集的标注。
- (5) 斗齿监测模型的建立：本文对 YOLOv5 进行改进和优化来实现对挖斗和斗齿的有效检测。首先利用 K-means 聚类算法来生成更适合斗齿的先验框，其次添加 CA 注意力机制并引入 SIOU 损失函数来弥补原本损失函数的不足，加强对小目标的检测能力。
- (6) 斗齿脱落判断算法的设计：本文设计了一个后处理算法来实现对斗齿脱落的判断。首先使用模型对挖斗和斗齿进行检测，然后判断挖斗的朝向并计算预期的

斗齿位置，将预期位置与检测到的斗齿位置进行匹配来判断脱落情况，为了更加准确的判断，再利用模板匹配来进行二次确认，最后如果判断出某个斗齿脱落，则进行脱落可视化。

(7) 监测系统界面的搭建：为了更加方便地进行观测，本文设计了使用 PYQT5 设计了一个界面，该界面包括斗齿检测和挖斗落点地形估计两个功能，同时设置了参数调节功能。

1.6 设计流程

Lidar 与相机的联合标定，实质上是获取 Lidar 坐标系和相机坐标系的转换关系。雷达视觉联合标定实验首先对雷达和相机分别进行单独标定，然后可以基于特征匹配的方法来进行坐标系转换关系求取。具体的如流程图 1-3 所示。

训练好的模型实现了较为准确地检测挖斗和斗齿，为了判断是否有斗齿发生了脱落以及具体哪个位置的斗齿发生了脱落，还需要在后处理阶段加入一个斗齿脱落判断算法。由于斗齿相对挖斗的位置是固定的，因此基于斗齿和挖斗的相对位置不变的这个特点来设计斗齿脱落判断算法。本作品设计的斗齿脱落判断算法的流程图如图 1-4 所示。

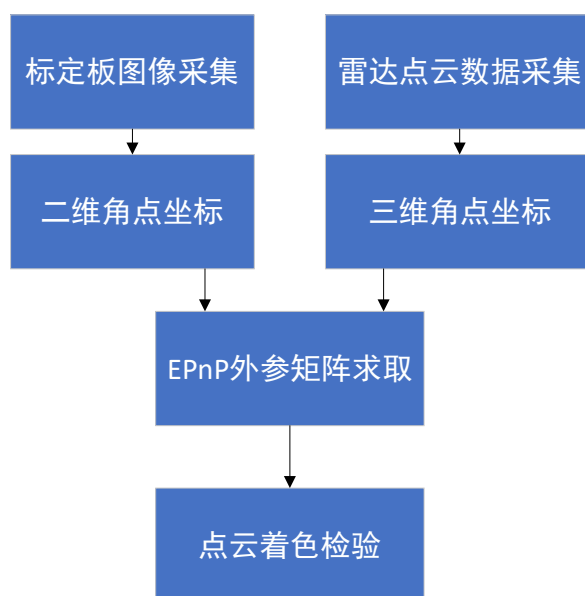


图 1-3 雷达-视觉联合识别流程图

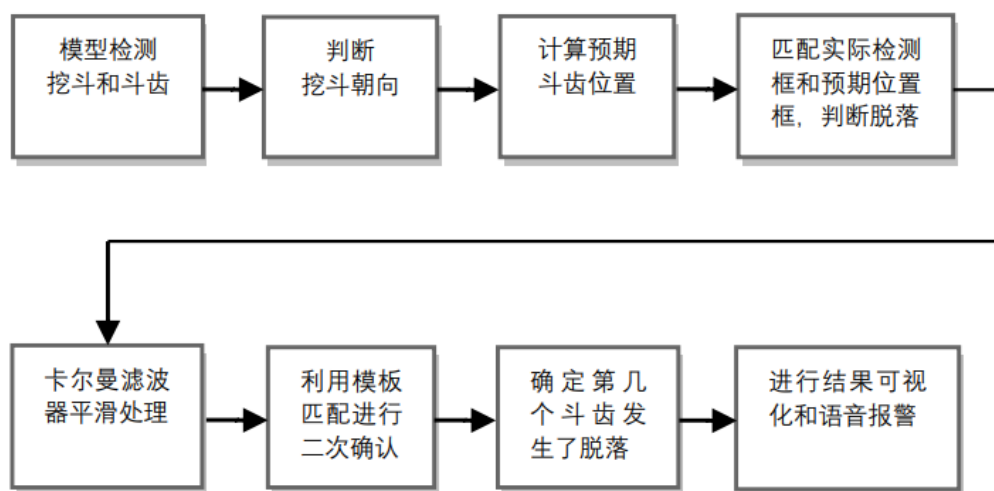


图 1-4 斗齿脱落判断算法流程图

第二部分 系统组成及功能说明

2.1 整体介绍

本作品主要实现挖掘机的斗齿检测及缺失预警功能和挖斗落点及地形估计，利用已标定的相机内参与外参，将这些选中的点从三维空间投影到图像坐标系中。及由世界坐标系的点投影到平面二维的图像坐标系中，让操作者可以在视觉图中直观的感受三维点投影在二维空间中的落点情况，达到预测挖斗落点可视化开发的预期效果。同时借助摄像头采集到的视频信息，使用 yolo 对斗齿的健康状况进行检测以及行人进行定位，从而保证挖掘机在操作规程中的安全。

2.2 硬件系统介绍

根据实验方案的选择，尽量选择相同的相机，增加系统的性能，本实验的相机选则了杰锐微通的 USB 工业相机，提供多种焦距和视场角的镜头选择，满足不同应用场景的需求，如近距离检测、远距离观察、广角视野等。即插即用，开发简单，且符合 UVC 标准，支持 Windows、Linux、Android 等操作系统，用户无需安装额外驱动程序，简化了系统集成和应用部署。图 2-1 是所选择的杰锐微通 USB 工业相机。

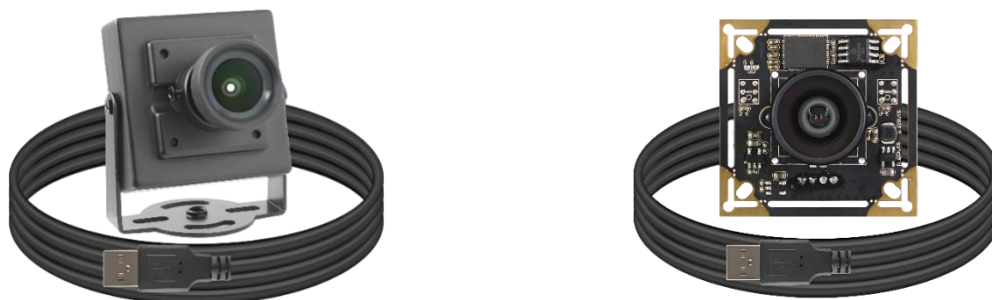


图 2-1 杰锐微通 USB 工业相机

雷达我们选择了 Livox Mid-70 相较于传统机械式激光雷达，Mid-70 提供更广的视场角和更小的盲区，探测距离从最小的 5 厘米到最大 260 米，视场角达 70.4° ，圆形的视场覆盖了水平和垂直方向。20 米时，距离误差 ≤ 2 厘米；0.2 至 1 米范围内，误差 ≤ 3 厘米。除此以外，Mid-70 采用 Livox 自主研发的非重复扫描技术，提供高密度点云数据，提升环境感知能力。



图 2-2 Livox Mid70 雷达

Livox 的产品雷达广泛应用于低速自动驾驶、移动机器人、室内外服务机器人、特种机器人等领域，如 AGV、AMR、自动叉车、医疗后勤机器人、清洁机器人、末端配送机器人、智能安防机器人等。图 2-2 是我们所选择使用的 Livox Mid70 雷达。

第三部分 完成情况及性能参数

3.1 整体介绍



图 3-1 系统实物画面

挖掘机前向信息感知系统使用 MID70 激光雷达和 usb 摄像头作为传感器，主控芯片使用 RK3588，对正在工作的挖掘机进行挖斗健康监测（主要进行对挖掘机斗齿进行监测），同时对挖掘机挖斗落土位置进行估计，并在视频画面以网格的形式对落点位置进行增强显示。让远程操作挖掘机的人员可以直观的感受到落点区域的起伏状态，更加便于操作。

3.2 工程成果

3.2.1 机械成果：

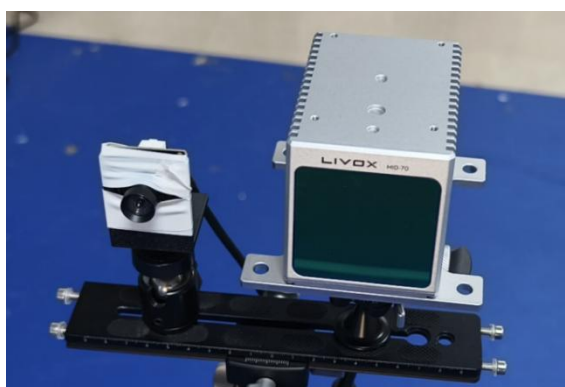


图 3-2 相机及激光雷达

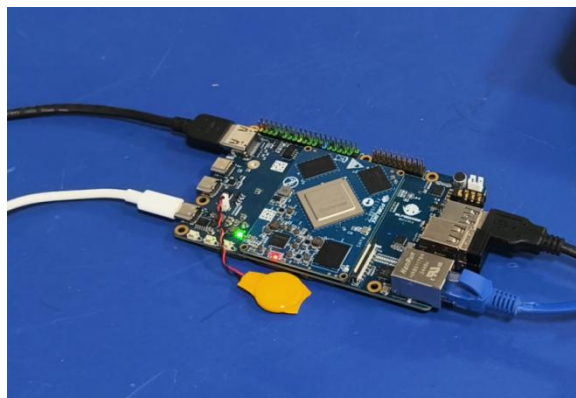


图 3-3 Elf2 嵌入式开发板

3.2.2 软件成果；

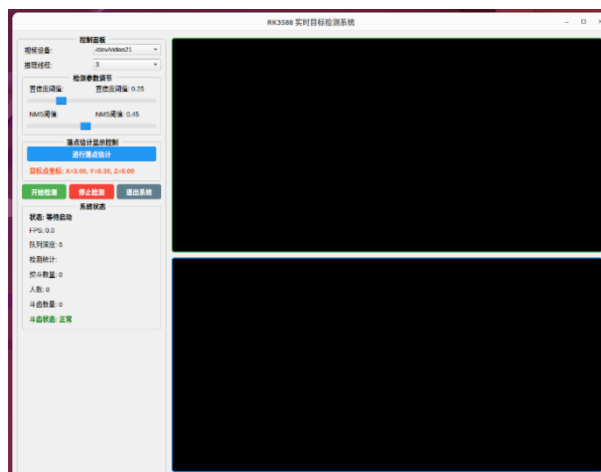


图 3-4 软件界面

3.3 特性成果

本软件用于远程操作挖掘机过程中，对挖斗中的斗齿的健康状态进行实时监测，并对操作过程中挖斗的落图位置进行估计并通过网格的形式表现地面的起伏状态，其 QT 界面如下，在 QT 界面中，左侧的控制面板里包含了检测过程中的参数设置，右侧则显示。

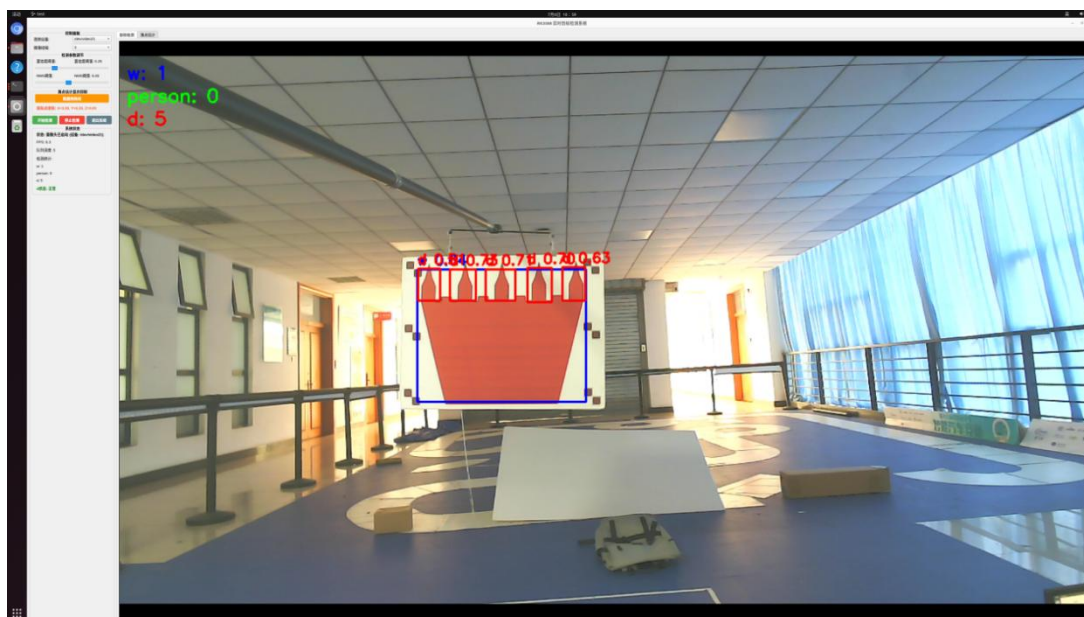


图 3-5 挖掘机斗齿检测（斗齿未脱落）

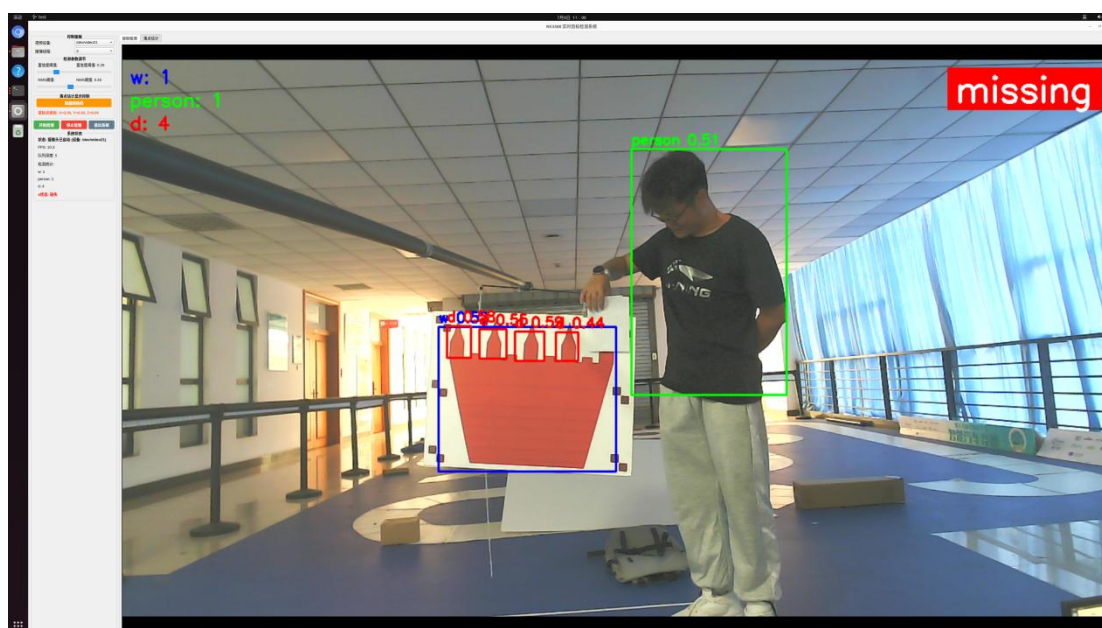


图 3-6 挖掘机斗齿及行人检测（斗齿脱落）

挖斗健康状态检测模块实现实时监测挖斗跟斗齿数量，当斗齿缺失时进行预警并及时提醒挖掘机操作员，在监测过程中可以通过左上方按键调整置信度阈值跟 NMS 阈值。

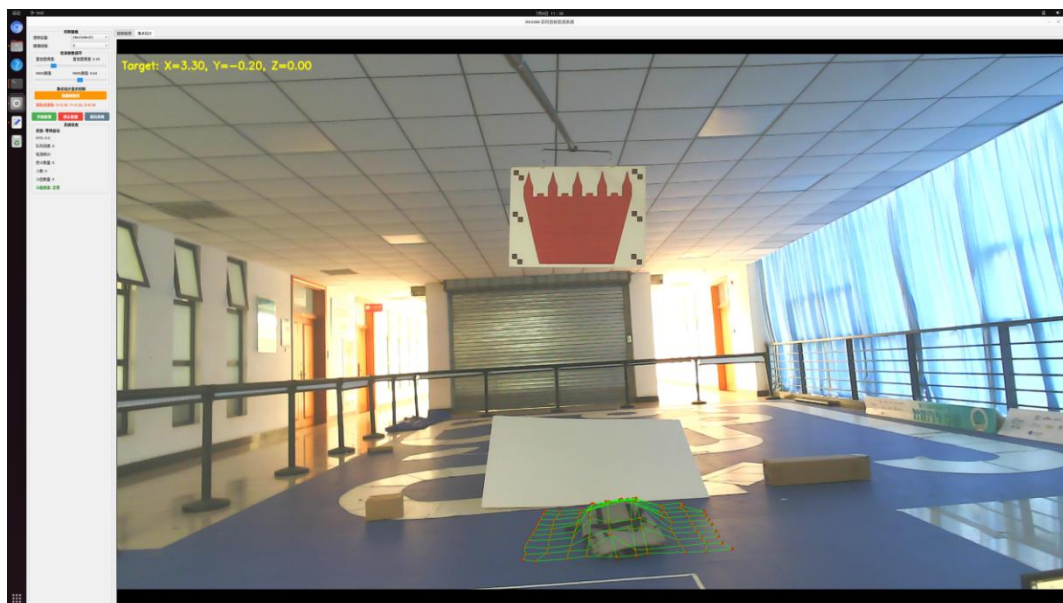


图 3-7 挖掘机挖斗落点地形估计

挖斗落点估计模块实现实时获取挖斗的位置并通过网格的形式描绘落点地面的起伏状态，让远程操作挖掘机的驾驶员更加直观的感受出落点的位置跟起伏状态，更好的辅助驾驶员进行远程驾驶。



图 3-8 控制面板

在控制面板上可以控制挖斗检测模块和落点估计模块的启动和停止，选择摄像头设备。对于挖斗检测模块可以选择进行推理的内核数、调整置信度阈值和 NMS 阈值。在系统状态栏显示了系统的状态、帧率、挖斗数量、斗齿数量、人数及斗齿状态。对于挖斗落点估计模块可以实时显示预测到的挖斗具体位置。

第四部分 总结

4.1 可扩展之处

本系统用于辅助挖掘机驾驶员进行远程操作挖掘机，实时的对挖掘机的挖斗进行健康状态监测，监测其斗齿是否健全。并具有一个较高的检测精度。同时可以对挖斗具体落土位置进行预测，并通过网格的形式在实时视频画面中显示，表现出落点区域的起伏状态。但是对于挖斗健康检测其鲁棒属性有待提升，可以增加训练的数据集提升模型的鲁棒性。对于挖斗落点估计方面其挖斗位置检测模块通过在挖斗可能存在的区域使用 DBSCAN 聚类的方式获取挖斗位置，其检测实时性有待提升，同时当雷达相对于地面的位置姿态有所调整后相应的外参需要进行调整。可以增加姿态传感器或者惯性测量单元实时获取雷达相对与地面的位置姿态提升对环境的适用性能。

4.2 心得体会

挖斗落点估计显示模块：使用 MID70 激光雷达和杰锐微通 USB 工业相机作为传感器，并对相机和雷达进行标定，获取相机内参及雷达与相机的位置关系。在检测过程中在 ros2 中使用 NTP（网络时间协议）对雷达和相机进行时间同步。在实时监测过程中，先根据雷达相对与地面的位置关系将雷达得到的点云数据转换到世界坐标系中。对点云进行滤波操作后对挖斗可能出现的区域使用 DBSCAN 聚类的方式获取挖斗并计算其中心位置得到挖斗位置。得到挖斗位置后在挖斗落点位置处生成挖斗大小的网格，并提取该区域的点云数据，使用 kdtree 的方式获取每个网格点坐标并将每个网格点投影到图像画面中，最后将同行同列的网格点进行连接。该模块对挖斗落点进行精确预测并以网格的形式准确的表现出挖斗区域的起伏，可以有效并直观的让操作者看到程序预测的挖斗落

点区域，协助操作员更高效精准的完成工作。

由于人工监测挖掘机斗齿状态的诸多不便和安全生产的要求，针对挖掘机斗齿状态的有效监测和缺失预警已经成为行业重点，本文基于深度学习原理和图像处理技术进行了斗齿健康状态监测的研究，设计了斗齿健康状态监测系统，能对斗齿状态进行监测并及时报警。为了形成一个更加成熟的斗齿健康状态监测系统，还可以从以下两个方面进行更加深入的研究与改进（1）本文只针对斗齿的脱落情况进行了研究，还可以进一步研究斗齿的磨损情况。（2）挖掘机挖斗上除斗齿外还有其他的容易在作业过程中脱落的部件，随着硬件设备和技术的不断进步，可对挖斗上所有存在脱落风险的部件进行监测。

在本次嵌入式比赛中，团队各成员不管是团队协作能力，还是专业知识都获得了非常大的提升。我们了解了硬件性能需与算法轻量化协同设计，边缘计算场景中“够用即最优”。在实际工业场景中，单一模型不可靠，“检测+传统 CV”的混合策略更实用。脱离用户场景的设计毫无意义，工程师应深入一线理解需求。本次项目不仅是技术能力的淬炼，更重塑了对工程本质的理解——用确定性技术应对不确定性场景，在约束中寻找最优解。当操作员透过我们设计的网格看清大地起伏时，那份“技术赋能人”的价值感，远胜于任何算法指标。