

实验室火灾智能识别报警系统研究

沈家乐 王欣玲

浙江万里学院, 中国·浙江 宁波 315100

摘要: 本研究以 YOLOv8 算法为核心构建识别模块, 可精准识别并分类试剂燃烧、电气起火、固体物料起火等实验室典型火灾类型; 并集成多源感知设备采集现场信息, 通过报警模块实时推送火灾发生时间、具体位置及火灾类型等关键数据。帮助提升实验室火灾预警的及时性、可靠性及消防安全防控等技术支撑。

关键词: 实验室安全; 火灾智能识别; YOLOv8 算法; 火灾分类; 实时报警

Research on Intelligent Fire Detection and Alarm System for Laboratories

Shen Jiale, Wang Xinling

Wanli University of Zhejiang, China Zhejiang Ningbo 315100

Abstract: This study builds a recognition module based on the YOLOv8 algorithm, capable of accurately identifying and classifying typical laboratory fire types such as reagent combustion, electrical fires, and solid material fires. It also integrates multi-source sensing devices to collect on-site information, and through an alarm module, it can push key data in real-time, including the time of fire occurrence, specific location, and fire type. This helps improve the timeliness, reliability, and technical support for fire safety and prevention in laboratories.

Keywords: Laboratory safety; Intelligent fire detection; YOLOv8 algorithm; Fire classification; Real-time alert

0 引言

实验室发生火灾的原因有很多, 根据刘晓霞等《基于对应分析的高校实验室火灾事故成因分析》(2022) 调研可知^[1]: 在实验室火灾事故中, 试剂泄露燃烧、电气故障过热、操作不当引起的固体物料起火这 3 种类型的事占火灾总数的 85% 以上。其特点是突发性强, 发展速度快, 扑救困难大, 会对精密仪器造成损坏, 同时也会造成科研资料损失, 甚至直接威胁到人们的生命安全^[2]。

1 国内外研究现状

深度学习近几年应用于火灾检测有重大突破, 如 Fang 等人在 IEEE Access 上提出 Tinier-YOLO 算法, 用于完成受限空间内目标检测, 为小型场景火灾监测提供了全新思路^[3]。现有研究存在的两个主要问题是: 对于实验室特殊火灾类型的分类识别未开展研究工作; 大多数研究只能做到火灾识别而未与报警系统深度融合无法实现事故发生时的报警信息实时准确推送到现场工作人员手中。

2 实验室火灾数据集构建与预处理

2.1 实验室火灾数据集构建

为了训练精确度较高的火灾识别模型, 搭建了专门面向实验室火灾的数据集, 采集的方法有以下几种: ①实验室模拟实验采集: 利用在实验室条件下制作的三类实验室火灾场景, 利用高清相机拍照得到; ②公开数据集选择:

在火灾检测公开数据集中选取实验室相关场景的图片; ③实验室火灾事故图像: 搜索国内外各类关于实验室火灾事故的公开图片。将数据集按 8:1:1 的比例划分为训练集、验证集和测试集。这样的划分有利于模型可在丰富的数据上开展训练, 并可以有足够的样本来验证和测试模型的性能。

2.2 实验室火灾数据预处理

数据预处理要经过很多项才能保证数据集质量, 所有的图像经过了自动的方向矫正, 并去除了 EXIF 方向信息, 消除了拍摄时角度不同的原因所造成的差别; 最后将所有图片拉伸到 640×640 像素。经过对数据集标注分布图的观察可以发现: 多数标注框集中在图像中间区域, 说明了火焰和烟雾大多是分布在图像中间的位置, 这是数据采集的特点, 所以容易让模型先学习到图片中间部分的目标信息。

3 实验室火灾模型训练与验证

基于之前建设的实验室火灾专用数据集, 训练优化后的 YOLOv8 模型, 严格按照“数据预处理-模型初始化-分阶段训练-参数调优-早停验证”的标准化流程开展训练工作, 确保模型具有良好的收敛性和泛化能力, 并对其进行训练步骤说明, 具体包括以下几个方面:

3.1 训练前对训练集的数据进一步地精细化预处理

将整个数据集分为两部分, 一部分为前面介绍到的训练数据, 其余全部为测试数据。首先采用 Mosaic 数据增强

表1 模型初始化与超参数设置的情况表

参数	batch(迭代样本数量)	imgsz(图像尺寸)	epochs(模型训练的迭代次数)	lr0(控制参数更新步长)	warmup_epochs(提升学习率，避免不收敛)	weight_decay(预防过拟合，对模型参数施加L2正则化)	momentum(加速SGD优化器的收敛速度，减少震荡)	cos_lr(启用余弦退火学习率衰减)
值	8	640	120	0.01	5	0.0005	0.937	True

技术，以训练集里的任意 4 张图片随机拼接、缩放和色域变换方式生成大量的组合图来增强模型对于火灾场景尺度、光线的适应程度；接着运用 Gamma 校正调节图像的对比度，减轻实验室中光照不均衡带来的影响（例如通风橱阴影或者仪器灯的反射）；再次，做归一化处理，把图像像素值归一化至[0, 1] 之间，并用 RGB 通道均值去除图像亮度差异，经过这样的处理后由 DataLoader 大批量读取并加入随机打乱 (shuffle=True) 和多线程读取 (num_workers=4) 的方式加快读入速率，可以更好地提高训练速度。

3.2 模型初始化与超参数设置

模型初始化采用迁移学习策略，加载 YOLOv8 在 COCO 数据集上预训练的权重参数，基于实验室火灾数据集进行微调，缩短训练周期并提升模型收敛质量。核心超参数设置及对应代码如表 1。

3.3 分阶段训练实施

训练分为基础训练阶段 (第 1 ~ 60 个 epoch) 和精细调整阶段 (第 61 ~ 120 个 epoch)。

①基础训练阶段 (1 ~ 60epochs)，采取大一点的学习率，在该阶段集中训练模型对火灾基础特征 (火焰轮廓、烟雾纹理等) 提取的能力；关闭模型的部分正则化措施 (例如 Dropout)，让模型快速拟合训练集的主要特征。

②精细调整阶段 (61 ~ 120epochs)，将学习率调整为初始值的 1 / 10，并打开 Dropout (dropout=0. 1) 及随机裁剪增强，着重提高模型对于小型火灾以及隐蔽火灾 (初起电气火灾) 识别准确性的同时增强模型的抗干扰能力，减少模型将实验室复杂背景错误分类的情况发生。

3.4 损失函数设计与优化

针对实验室火灾识别中“边界框定位精度要求高、类别不平衡 (部分火灾样本占比低)” 的特点，采用 “CIoU 损失 +Focal Loss+DIOU-NMS” 的复合损失函数组合，具体构成如下：

(1) 边界框回归损失：采用 Complete IoU (CIoU) 损失函数，其表达式及对应公式 1 CIoU 损失函数公式如下：

$$L_{CIoU} = 1 - IoU + \frac{\rho^2(b, b^{gt})}{c^2} + \alpha v$$

公式 1

CIoU 损失函数公式中直接给出 IoU 交并比区域、预测框 b 与真实框 b^{gt} 之间的中心距离 p 以及最小外接矩形对角线 c 这几个最重要的参数，且每一项损失都有具体的几何意义。IoU 表示预测框和真实框的交并比， $\rho^2(b, b^{gt})$ 即预测框中心到真实框中心的距离平方和 C 表示包围两个框的最小外接矩形对角线的长度，a 是一个表示平衡系数，U 表征预测框和真实框宽高比相差程度的一个参数。相对于传统的 IoU 损失而言，CIoU 损失还加入了预测框的中心距离以及长宽比信息，对于火灾区域边界框定位更加准确，特别适用于对初期火灾小目标定位。 $\rho^2(b, b^{gt})CaU$

(2) 分类损失：运用改进型 Focal Loss 函数解决实验室火灾数据集中不同火灾类型样本分布不均衡问题，其对应的表达式和公式 2Focal Loss 函数所示。

Focal Loss 函数公式 2 可以区分开类平衡系数 a_t 、难度权重系数 γ 以及预测概率 p_t 的所在位置，并且可以标示不同的类别的 a_t 取值。其中分别 p_t 是模型对类别 t 的预测概率， a_t 是类别平衡系数 (试剂燃烧设置为 0.3，电气起火设置为 0.35，固体物料起火设置为 0.35)， γ 是难度权重系数 (设置为 2)。此处需要加入 a_t 平衡各类样本的比例的表达式，同时将用 $(1-p_t)^\gamma$ 对难以辨别的对象样本 (比如隐蔽性的电气起火) 这样的难样本给予更高的权重，在减少容易辨别样本对损失函数影响的同时，提高了模型对较少见火灾种类的辨别能力。

$$L_{Focal} = -\alpha_t(1 - p_t)^\gamma \log(p_t)$$

公式 2

(3) 置信度损失选用 BCEWithLogitsLoss 函数，用来优化预测框的置信度，也就是该预测框中存在火灾目标的概率；该损失项和边界框回归损失以及分类损失按照一定的权重相加得到总的损失函数，总损失函数的公式 3 所示。

总损失函数公式的推导中表示了 3 个损失之间加权融合的关系，并且给出了 3 个损失项的权重系数 $\lambda_1=1.0$ 、 $\lambda_2=1.2$ 和 $\lambda_3=0.8$ ，以直观的方式说明了总损失是怎样构成的。这里三次损失项权值 $\lambda_1=1.0$ ， $\lambda_2=1.2$ ， $\lambda_3=0.8$ ，是经过多次调试得出的最优结果，使三类损失都能参与模型的优化。

$$L_{total} = \lambda_1 \times L_{CIoU} + \lambda_2 \times L_{Focal} + \lambda_3 \times L_{BCE} \quad \text{公式 3}$$

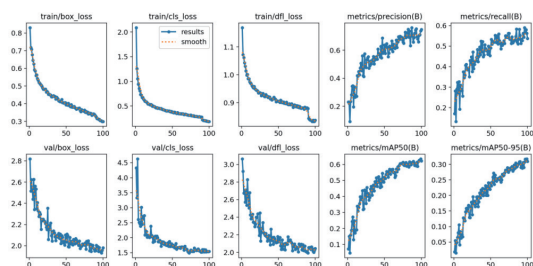


图1 训练验证损失图

3.5 训练过程中会时时监控训练情况并采取早停策略

训练过程通过 TensorBoard 进行可视化监督,在测试集上总的识别准确率为 92.7%,其中试剂燃烧火灾的识别准确率为 94.3%,电气起火火灾的识别准确率为 91.5%,固体物料起火火灾的识别准确率为 90.8%,且误报率为 3.2%,推理时间为 0.3 秒,完全可以满足实验室火灾实时识别的应用要求。

4 实验室火灾智能报警系统设计

本系统主要实现以下目标:①精准识别实验室三类典型火灾,识别准确率不低于 90%;②实时采集火灾发生时间、具体地点、火灾类型等信息;③报警响应时间小于 2 秒,支持向实验室管理中心、安保部门及相关责任人实时推送报警信息;④具备良好的抗干扰能力,降低实验室正常实验操作引发的误报率;⑤系统架构模块化,便于后期维护与功能扩展。

4.1 系统架构设计

系统采用“感知层-处理层-应用层”三层架构设计,各层功能相互衔接,实现火灾识别、信息处理、报警推送的全流程智能化。

感知层:主要完成采集实验室现场图像信息、环境参数和位置信息工作,供后续的分析使用,主要包括:①高清网络摄像头部署在实验室的重要区域处,用于采集现场的图像;②温度传感器和烟雾传感器用于辅助采集环境参数,并且用于验证火灾识别的结果,降低漏报概率和误报率;③定位模块基于实验室分区编码,完成火灾位置精确定位。

处理层:它是该系统的中心所在,负责完成图像数据预处理、火灾智能识别分类以及信息融合分析,主要包括:①图像预处理模块:主要是去除摄像头采集来的图像中的噪声点,将图像尺寸调整统一,使图像的色彩符合标准值等来提高后续识别的精度;②火灾识别与分类模块:利用改进 YOLOv8 算法,对待测图像进行实时分析,并判

断火情是否存在及火情类型;③信息融合模块:综合图像识别结果和传感器信息,并结合自身的位置信息对火灾事件进行判定,最后以时间、地点、火灾类型、置信度等形式作为火灾事件报告的内容。

应用层:负责火灾事件的报警推送、信息展示和历史数据管理,能够与用户实现交互。具体功能点包括:①实时报警模块,采用实验室现场部署报警装置的方式或者采用短信、APP、E-mail 等方式进行远程推送;②信息展示模块,在实验室管理中心的大屏上可以显示火灾现场图像、事件信息、事件处理的进展;③数据管理模块,存储火灾事件的历史数据以及系统的运行日志。

4.2 系统核心功能模块

(1)火灾智能识别与分类模块是以 YOLOv8 算法为基础,结合实验室火灾场景进行优化,YOLOv8 以 CSP 为骨干网,利用 SPP(空间金字塔池化)和 C2F(由粗到细)结构增强多尺度特征的提取;颈部采用 PANet 和 BiFPN 结构实现特征融合;头部采用自适应标签分配方式提高检测精度。

(2)实时报警推送模块:使用“本地声光报警+远程多渠道推送”方式,在现场一旦发生火情事件时,能够立刻触发实验室现场的声光报警器,并且启动实验室现场的视频摄像机云台智能识别跟踪拍摄,以此来提醒现场工作人员紧急逃生。

5 结语

本文基于实际某长三角应用型高效实验室火灾数据,分析了三种典型实验室火灾,构建了一组相应的专用数据集,在 YOLOv8 算法基础上对火灾识别与分类模型进行了优化设计,能够针对实验室试剂燃烧、电气起火、固体物料起火等进行准确地识别。系统以三层架构为基础,火灾触发后的及时响应,以满足实验室消防安全防控需要,减小火灾造成的损失,完善火灾类型识别,实验结果表明,该系统具备较强的应用性和稳定性。

参考文献:

- [1] 刘晓霞. 基于对应分析的高校实验室火灾事故成因分析[J]. 安全与健康, 2022(07): 68-71.
- [2] 魏伟, 陈志峰, 马云等. 伊斯马伊力·艾依提·塞娜瓦尔·阿布拉. 高校实验室火灾事故分析及安全疏散措施探讨[J]. 消防界, 2023(09):90-92.
- [3] Fang W, Wang L, Ren P. Tinier-YOLO: A real-time object detection method for constrained environments[J]. IEEE Access, 2019, 8: 1935-1944.

基金项目：省级大学生创新创业训练计划项目
“实验室火灾智能识别报警系统研究与实现”（编号：
S202210876029）“基于大数据的智能实验室综合服务研究

与构建”（编号：S202210876020）。

作者简介：沈家乐（2002.04-），男，汉族，江苏徐州人，本科，浙江万里学院，研究方向：大数据。