

基于数字孪生的选煤厂厂区人员视频定位方法

熊超员¹, 张 优¹, 胡玉玺²

(1. 国家能源神东煤炭洗选中心 哈拉沟选煤厂, 陕西 榆林 719315; 2. 中煤科工集团信息技术有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要:为提升生产人员安全视频实时定位效果, 针对轮廓边缘清晰度低、安全区域与生产人员轮廓难以分割的问题, 研究基于三维数字孪生的选煤厂厂区生产人员安全视频实时定位方法。数据层通过调用物理层内各类别传感器, 采集选煤厂区实时视频数据, 清洗与增值处理实时视频数据; 虚拟层利用虚实映射方法处理有效数据, 完成物理空间与虚拟空间的虚实交互, 获取实时孪生数据, 建立实时选煤厂厂区三维数字孪生模型; 服务层利用金字塔式场景分析网络语义分割模型, 处理三维数字孪生模型, 获取安全区域与生产人员轮廓边缘, 按照 2 种轮廓边缘交并关系, 完成生产人员安全视频实时定位。结果表明, 该方法可有效构建选煤厂厂区三维数字孪生模型, 有效分割安全区域与生产人员轮廓, 提取轮廓边缘; 有效检测生产人员危险行为, 完成生产人员安全视频实时定位。

关键词:三维数字孪生; 选煤厂厂区; 生产人员; 安全视频; 实时定位; 语义分割模型

中图分类号: TP391.3 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2023)S2-0795-06

Video location method of production personnel in coal preparation plant based on digital twin

XIONG Chaoyuan¹, ZHANG You¹, HU Yuxi²

(1. Halagou Coal Preparation Plant, CHN Energy Shendong Coal Preparation Center, Yulin 719315, China; 2. China Coal Technology & Engineering Group Information Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to improve the real-time positioning effect of safety video for production personnel, aiming at the problems of low definition of contour edge and difficult segmentation between safety area and production personnel contour, a real-time positioning method of safety video for production personnel in coal preparation plant based on three-dimensional digital twins was studied. The data layer collects the real-time video data of the coal preparation plant area by calling various sensors in the physical layer, and processes the real-time video data for cleaning and value-added processing. The virtual layer uses the virtual real mapping method to process the effective data, completes the virtual real interaction between the physical space and the virtual space, obtains the real-time twin data, and establishes the three-dimensional digital twin model of the real-time coal preparation plant. The service layer uses the pyramid scene to analyze the network semantic segmentation model, processes the three-dimensional digital twin model, obtains the contour edge of the safety area and the production personnel, and completes the real-time positioning of the production personnel safety video according to the intersection relationship between the two contour edges. The experimental results show that this method can effectively construct the three-dimensional digital twin model of the coal preparation plant, effectively segment the safety area and the contour of the production personnel, and extract the contour edge. This method can effectively detect the dangerous behaviors of production personnel and complete the real-time positioning of safety video of production personnel.

Key words: three-dimensional digital twinning; coal preparation plant area; production personnel; safety video; real-time positioning; semantic segmentation model

0 引 言

煤炭行业快速发展, 导致人员安全成为首要问

题。由于选煤厂的特殊性^[1-3], 导致其事故发生概率较高, 为提升生产人员安全, 需实时定位生产人员是否位于安全区域, 避免发生安全事故^[4]。莫树培

收稿日期: 2022-11-10; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.22111001

作者简介: 熊超员(1981—), 男, 江西永修人, 工程师。E-mail: 214570663@qq.com

引用格式: 熊超员, 张优, 胡玉玺. 基于数字孪生的选煤厂厂区人员视频定位方法[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 795-800.

XIONG Chaoyuan, ZHANG You, HU Yuxi. Video location method of production personnel in coal preparation Plant based on digital twin[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 795-800.

等^[5]通过无线移动终端采集选煤厂环境信息数据,结合多边形定位,构造线性最小二乘模型,通过分段估计加权值,获取动态加权矩阵,引入最小二乘模型,获取分段加权最小二乘模型,根据选煤厂环境信息数据,输出定位结果,该方法可有效定位人员位置,定位误差均值低于 1.88 m。陈伟^[6]通过防爆摄像机采集选煤厂图像,通过识别算法,完成人员定位,该方法人员定位误差低于 0.4 m,响应时间较快,符合人员定位实时需求。但采集选煤厂数据时,均易受低照度与煤尘等因素影响,无法采集选煤厂死角区域数据,影响人员定位效果。三维数字孪生具备全流程、全要素的数据监测效果,能无死角采集选煤厂数据,低照度与煤尘等因素无影响^[7],数据采集效果较优,有效建立精准的实时选煤厂三维数字孪生模型,实时呈现选煤厂实际状态。基于此,研究了基于三维数字孪生的选煤厂厂区生产人员安全视频实时定位方法,有效安全定位生产人员。

1 安全视频实时定位架构

利用三维数字孪生,设计选煤厂厂区生产人员安全视频实时定位方法,该方法的技术架构如图 1 所示。

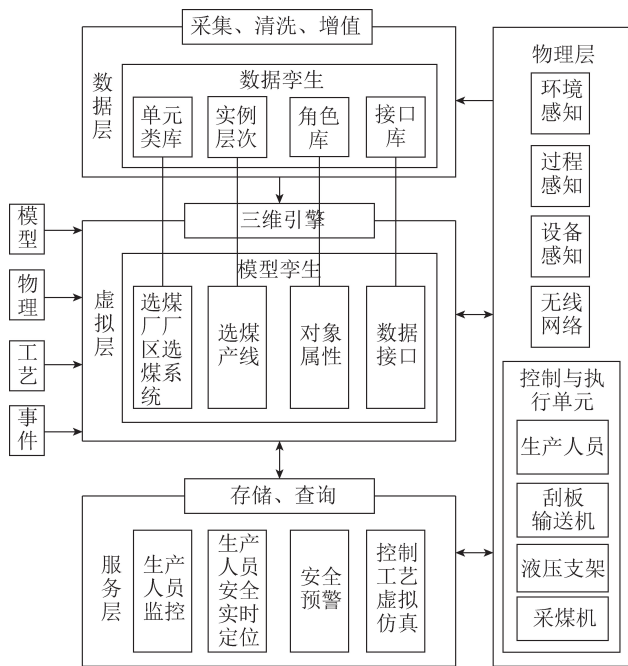


图 1 安全视频实时定位架构

物理层属于选煤厂厂区生产人员安全视频实时定位方法技术架构的基础,按照生产人员安全视频实时定位需求,提供各类别传感器与无线网络等资源;利用控制与执行单元控制选煤厂厂区内各设备的运行情况,指引生产人员进入安全区域。

数据层通过调用物理层内的各类别传感器,采集选煤厂实时视频数据,清洗与增值处理采集的实时视频数据,获取符合选煤厂生产人员安全视频实时定位需求有效数据,为虚拟层的数字化映射提供数据支持。

虚拟层依据数据层处理后数据,利用虚实映射方法,完成物理与虚拟空间虚实交互,获取选煤厂厂区实时孪生数据,建立实时选煤厂厂区三维数字孪生模型;利用三维数字孪生模型与物理属性等描绘虚拟空间的选煤厂厂区环境与生产人员的几何模型与物理模型等。虚拟层利用三维数字孪生模型的动态交互描绘物理层。

服务层是选煤厂厂区生产人员安全视频实时定位方法的最上层,属于为用户服务的层级,物理层负责协调选煤厂厂区设备运行情况,虚拟层负责实现实时虚实映射,在虚实交互时获取选煤厂厂区的实时孪生数据,建立实时选煤厂厂区三维数字孪生模型,利用 PSPNet (Pyramid Scene Parsing Network, 金字塔场景分析网络) 语义分割模型,处理实时的选煤厂厂区三维数字孪生模型,获取选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓^[8-9],按照安全区域与生产人员轮廓的交并关系,完成生产人员安全视频实时定位;当生产人员轮廓完全位于安全区域轮廓内,则该生产人员位于安全区域;当生产人员轮廓超出安全区域轮廓,则该生产人员位于危险区域,需立即发出安全预警,提醒该人员立即回到安全区域。

1.1 选煤厂厂区虚实映射方法

虚拟层利用虚实映射方法,实现选煤厂厂区物理空间与虚拟空间的虚实交互,获取孪生数据,依据数据建立实时选煤厂厂区三维数字孪生模型。

虚拟层的选煤厂厂区几何模型较关键,建立选煤厂厂区三维数字孪生模型的前提为构造精准的几何模型,通过纹理映射技术优化选煤厂厂区三维数字孪生模型表面^[10],通过父子节点关系,构造厂区三维数字孪生模型中设备与生产人员的彼此运动关系,通过距离标准优化选煤厂厂区场景显示效果。

按照 OPC UA 客户端提取选煤厂厂区内各传感器节点数据,为几何模型填充相应的属性值与数据接口,获取几何模型和数据间的关系,几何模型还需呈现其与物理、行为、逻辑间的关系,完成选煤厂厂区物理空间和虚拟空间的初步融合,公式为

$$\begin{aligned} Z &= M_i + P_j + B_k + I_z, \\ M_i &\leftarrow P_j \triangleright \triangleleft B_k \triangleright \triangleleft I_z, \\ S &\leftrightarrow Z, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, Z 为选煤厂厂区虚拟空间; S 为选煤厂厂区物理空间; M_i 为 Z 内第 i 个几何模型; P_j 为 Z 内第 j 个物理模型; B_k 为 Z 内第 k 个生产人员动作行为; I_z 为 Z 内第 z 个逻辑模型; \leftarrow 为 M 内 P 、 B 与 I 的关联集成; $\triangleright \triangleleft$ 为自然连接; $\overset{1:1}{\leftrightarrow}$ 为 Z 与 S 的彼此相应映射关系。

以 Z 与 S 的初步融合结果为基础,通过条件-事件-行为深度融合 Z 与 S ,如果 Z 与 S 初步融合,符合选煤厂厂区虚拟空间实时属性集 $\sum_{i'}^m A_{i'}$,则对第 i' 个实时属性进行物理空间与虚拟空间的事件模式 $E_{i'}$ 匹配,虚拟空间实时属性数量为 m ;若2个空间的事件模式匹配成功,那么执行事件相应的 B ,完成选煤厂厂区三维数字孪生的虚实映射。

1.2 生产人员实时定位

PSPNet语义分割模型依据选煤厂厂区实时三维数字孪生模型数据,检测选煤厂厂区生产人员危险行为,完成生产人员安全视频实时定位,具体步骤为:

1)在PSPNet语义分割模型内,输入选煤厂厂区实时三维数字孪生模型各帧视频数据,对该视频数据展开实时语义分割^[11],获取选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓。

2)形态学处理选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓,提升轮廓形状的连续性与平滑性^[12],通过Canny算子提取轮廓边缘。

3)融合2)获取的2个轮廓边缘,获取交并关系,检测生产人员是否进入危险区域,完成选煤厂厂区生产人员安全视频实时定位。

1.2.1 安全区域与生产人员轮廓分割

利用PSPNet语义分割模型,分割选煤厂厂区实时三维数字孪生模型各帧视频数据内安全区域与生产人员轮廓。在PSPNet语义分割模型的特征提取网络内引入注意力机制,解决模型学习性能退化问题^[13],提升选煤厂厂区安全区域与生产人员特征提取效果。

利用通道注意力映射,池化PSPNet语义分割模型卷积生成的选煤厂厂区安全区域与生产人员特征图 F ,在多层感知机 L 内输入池化结果,对其展开相加处理^[14],利用Sigmoid激活函数 $\sigma(\cdot)$ 获取通道权重 W ,将 W 与 F 相乘,获取修正后的选煤厂厂区安全区域与生产人员特征图 F' ,通道注意力映射过程如下:

$$W(F) = \sigma(\cdot) [\theta L(\text{AvgPool}(F))] + \theta L[\text{MaxPool}(F)] \quad (2)$$

其中, θ 为修正系数; $L(\text{AvgPool}(F))$ 和 $L(\text{MaxPool}(F))$ 为 F 的平均池化、全局最大池化结果; $\text{MaxPool}(F)$ 利用空间注意力映射对 F' 展开 $L(\text{AvgPool}(F))$ 和 $\text{MaxPool}(F)$ 的串行联结,并卷积降维 F' ,通过 $\sigma(\cdot)$ 产生空间权重矩阵 W' ,点乘运算 W' 和 F' ,获取最终选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓空间特征图 F'' ,空间注意力映射过程如下:

$$W'(F') = \sigma \{ f[\mu \text{AvgPool}(F); \mu \text{MaxPool}(F)] \}, \quad (3)$$

式中, f 为卷积层; $;$ 为串行联结; μ 为联结系数。

将上层卷积输出的 F 和 F'' 相加,可得下层卷积的输入。

池化层利用金字塔池化模块提取各尺度选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓特征图的局部特征,将池化结果和相应通道矩阵展开数乘^[15],提取选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓有效特征信息,以累加求和的方式,融合全部有效特征信息,数乘公式为

$$y_{k'} = \sum_{i'=1}^N \alpha W'_{k'} x_{i'}, \quad (4)$$

式中, $x_{i'}$ 为原始选煤厂厂区三维数字孪生模型视频数据第 i' 通道的特征值; $y_{k'}$ 为加权特征图中第 k' 通道的特征值; α 为常数; N 为特征通道数; $W_{k'}$ 为第 k' 通道权重 $W_{k'}$ 。

利用轮廓掩码预测模块扩大处理融合的选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓特征图,使选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓掩码特征图和原始图像大小一致。

利用Softmax分类器分类预测选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓掩码特征图,获取选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓,完成轮廓分割。

以交叉熵损失函数为Softmax分类器的损失函数,实现选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓的像素级分类。令一个像素输出长度为类别数目的预测向量 $X' = [x'_1, x'_2, \dots, x'_{G-1}]$,通过Softmax函数归一化 X' ,获取 $H = [h_1, h_2, \dots, h_{G-1}]$,以 H 描述概率,公式为

$$H = \frac{\exp(x')}{\eta \sum_{i=0}^{G-1} \exp(x'_i)} \quad (5)$$

式中, x'_i 为第 i 类别的预测向量; η 为归一化系数; $H = [h_1, h_2, \dots, h_{G-1}]$ 为预测概率分布; G 为像素类别数。

获取 H 后,求解 H 的交叉熵损失,交叉熵损失函数为

$$\text{loss} = - \sum_{\tilde{i}=0}^{G-1} y'_i \lg h_i = - \lg h_g, \quad (6)$$

式中, $h_{\tilde{i}}$ 为选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓像素位于第 \tilde{i} 类别的概率; h_g 为选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓像素标签, c 的 one-hot 编码为 $y' = [y'_0, y'_1, \dots, y'_{G-1}]$; 在 $y'_i = 1$ 情况下,说明选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓像素属于第 \tilde{i} 类别,在 $y'_i = 0$ 情况下,说明选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓像素不属于第 \tilde{i} 类别。

1.2.2 安全区域与生产人员轮廓预处理

利用形态学处理法,对 1.2.1 节分割的选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓进行预处理,解决轮廓断裂与缺失问题,提升轮廓的连续性与平滑性。形态学处理方法包含腐蚀与膨胀:

$$A \oplus B = \{t | (\hat{B})_t \cap A \neq \phi\}, \quad (7)$$

式中, $A \oplus B$ 表示 A 被 B 膨胀; A 为选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓图像; B 为 A 的结构元素; $A \oplus B \phi$ 为空集 ϕ ; t 为选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓图像像素; $(\hat{B})_t$ 为 t 的结构元素。

膨胀运算能使选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓图像边界向外扩展,填充缺失部分,连接断裂的轮廓图像。

腐蚀为细化选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓二值化图像, A 被 B 腐蚀的公式为

$$A \ominus B = \{t | (\hat{B})_t \cap A \neq \phi\}. \quad (8)$$

A 被 B 腐蚀后,平移的 B 和 A 无交集,选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓图像法经过腐蚀后,令轮廓图像边界细化,剔除孤立噪声点。

利用 Canny 边缘检测算法,提取形态学处理后的选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓边缘,利用二维高斯函数平滑选煤厂厂区安全区域与生产人员轮廓图像,公式为

$$U(\hat{x}, \hat{y}) = \frac{\exp\left(-\frac{\hat{x}^2 + \hat{y}^2}{2\delta^2}\right)}{2\pi\delta^2}, \quad (9)$$

式中, U 为二维高斯函数; (\hat{x}, \hat{y}) 为选形态学处理后煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓图像坐标; δ 为 U 的标准差。

选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓图像的一阶偏导数为 $U_{\hat{x}}(\beta, o)$ 、 $U_{\hat{y}}(\beta, o)$, 分别代表 \hat{x} 与 \hat{y} 方向的一阶偏导数,选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓图像像素 (β, o) 梯度幅值与方向为

$$\kappa(\beta, o) = \nabla \kappa' \sqrt{U_{\hat{x}}(\beta, o)^2 + U_{\hat{y}}(\beta, o)^2}$$

$$\xi(\beta, o) = \arctan \frac{U_{\hat{y}}(\beta, o)}{U_{\hat{x}}(\beta, o)}, \quad (10)$$

式中, $\kappa(\beta, o)$ 、 $\xi(\beta, o)$ 分别为梯度幅值和方向; $\nabla \kappa'$ 为梯度矢量。

通过非极大值抑制 $\kappa(\beta, o)$, 获取选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓图像梯度内的局部极大值点,令其余点的值为 0, 获取细化的选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓边缘。

双阈值处理非极大值抑制后的轮廓边缘,删去虚假边缘,连接断裂边缘。令轮廓边缘像素数量为 V , 灰度区间为 $[0, D-1]$, 第 d 灰度级的像素数量为 v_d ; 几率为 $q_d = \frac{v_d}{V}$; 利用阈值 T 分割轮廓边缘, 获取 2 类轮廓边缘 $\bar{\omega}_0$ 与 $\bar{\omega}_1$, 通过灰度值在 $[0, T]$ 的像素建立 $\bar{\omega}_0$, 灰度值在 $[T+1, D-1]$ 间的像素建立 $\bar{\omega}_1$ 。 $\bar{\omega}_0$ 的均值为

$$\bar{\omega}_0 = \frac{\sum_{d=0}^T d q_d}{\sum_{d=0}^T q_d}, \quad (11)$$

$\bar{\omega}_1$ 的均值为

$$\bar{\omega}_1 = \frac{\sum_{d=T+1}^{D-1} d q_d}{\sum_{d=T+1}^{D-1} q_d}. \quad (12)$$

选煤厂厂区安全区域或生产人员轮廓边缘图像均值为

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}_0 \sum_{d=0}^T q_d + \bar{\omega}_1 \sum_{d=T+1}^{D-1} q_d, \quad (13)$$

类间方差为

$$\tau^2 = (\bar{\omega}_0 - \bar{\omega})^2 \sum_{d=0}^T q_d + (\bar{\omega}_1 - \bar{\omega})^2 \sum_{d=T+1}^{D-1} q_d. \quad (14)$$

以令 τ^2 最大的 T 值为最佳阈值,将其作为上限阈值 T_h , 以 T_l 为下限阈值。

1.2.3 人员危险行为检测

融合安全区域与生产人员轮廓边缘,获取交并关系,检测生产人员是否进入危险区域,完成选煤厂厂区生产人员安全视频实时定位,如果生产人员轮廓边缘完全位于安全区域轮廓边缘内,则该生产人员未进入危险区域,如果生产人员轮廓边缘超出安全区域轮廓边缘,则该生产人员已离开安全区域,需发生安全预警,提醒该生产人员进入安全区域。

2 试验分析

以某地区选煤厂厂区为试验对象,该选煤厂每

天工作时间为16 h,分2班生产。利用本文方法实时安全定位该选煤厂厂区生产人员,验证本文方法实时定位的有效性。

利用本文方法采集某时刻选煤厂厂区视频数据,建立该选煤厂厂区三维数字孪生模型,以连续两帧视频数据建立的选煤厂厂区三维数字孪生模型为例,三维数字孪生模型构建结果如图2所示。

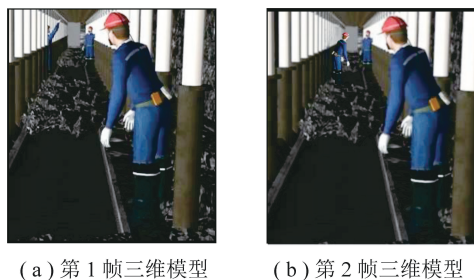


图2 连续两帧选煤厂厂区三维数字孪生模型

由图2可知,本方法可有效采集选煤厂厂区视频数据,并按照视频数据构建三维数字孪生模型,构建的三维数字孪生模型可清晰呈现选煤厂厂区内生产人员的工作状况,图2中由远至近依次记作生产人员1、2、3。

利用本文方法对构建的三维数字孪生模型视频图像进行安全区域与生产人员粗轮廓提取以及形态学处理,粗轮廓提取结果如图3所示,形态学处理结果如图4所示。



图3 生产人员与安全区域粗轮廓提取结果

由图3、4可知,本文方法可有效提取生产人员与安全区域的粗轮廓,提取的粗轮廓仅能大致分割生产人员与安全区域轮廓,存在断裂问题;经过形态学处理后,可有效解决轮廓断裂问题,获取更平滑的生产人员与安全区域轮廓。

利用本文方法提取生产人员与安全区域轮廓边

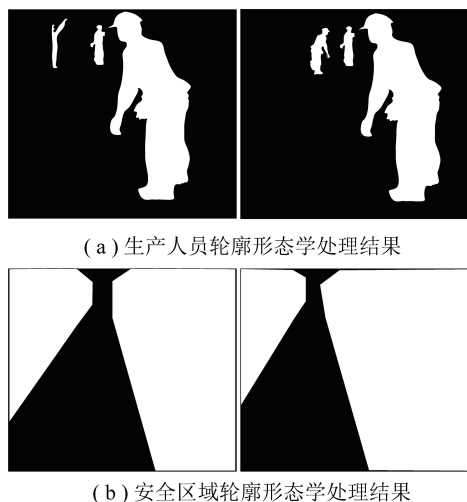


图4 生产人员与安全区域形态学处理结果

缘,并进行融合处理,检测生产人员危险行为,完成生产人员安全视频实时定位,轮廓边缘提取及定位结果如图5所示。

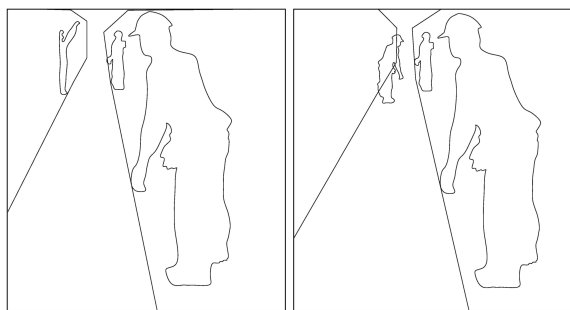


图5 轮廓边缘提取及定位结果

由图5可知,第1帧图像内3名生产人员均在安全区域内;第2帧图像内生产人员2超出安全区域,说明该生产人员已进入危险区域,需立即发出警报。说明本文方法可有效提取选煤厂厂区生产人员与安全区域轮廓边缘,实现生产人员安全实时定位。

3 结 语

选煤厂厂区发生安全事故的概率较高,为提升厂区内生产人员安全,研究基于三维数字孪生的选煤厂厂区生产人员安全视频实时定位方法,通过三维数字孪生实时采集选煤厂厂区视频数据,建立实时的选煤厂厂区三维数字孪生模型,精准掌握生产人员动态,完成生产人员安全视频实时定位,保障其生命安全。

参考文献:

- [1] 张鹏,陈运启,靳妮倩君.煤矿安全生产综合监察监管平台设计与实现[J].矿业安全与环保,2019,46(6):53-56.

- [2] 刘世森.基于 AOA 的矿井人员精确定位技术[J].煤矿安全,2019,50(7):140-142,146.
- [3] 徐军祥,罗立群,武圆梦.工矿企业人员安全与智能跟踪技术探讨[J].中国矿业,2021,30(9):88-96.
- [4] 岳巧珍,牛磊,秦文光,等.智能化采煤工作面人员感知定位控制系统策略研究[J].煤炭工程,2020,52(8):127-132.
- [5] 莫树培,李国良.采用分段加权最小二乘法的井下人员实时定位系统设计[J].矿业安全与环保,2019,46(3):32-36.
- [6] 陈伟.基于可见光与成像通信技术的煤矿人员精确定位方法[J].煤矿安全,2019,50(12):114-117.
- [7] 周成,孙恺庭,李江,等.基于数字孪生的车间三维可视化监控系统[J].计算机集成制造系统,2022,28(3):758-768.
- [8] 迟焕磊,袁智,曹琰,等.基于数字孪生的智能化工作面三维监测技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(10):153-161.
- [9] 贺方圆,刘婷,王文清,等.基于能量衰减矩阵的矿井目标定位方法[J].计算机仿真,2021,38(9):470-475.
- [10] 柴钰,许继科.基于机器视觉的目标识别与定位系统[J].计算机工程与设计,2019,40(12):3557-3562.
- [11] 季章生,肖本贤.正则化递增支撑集子空间追踪算法的目标定位[J].电子测量与仪器学报,2019,33(6):24-30.
- [12] 叶靓玲,李伟达,郑力新,等.结合目标检测与特征匹配的多目标跟踪算法[J].华侨大学学报(自然科学版),2021,42(5):661-669.
- [13] 张新.基于 LoRa 和 RFID 技术的矿井人员定位系统设计[J].化工矿物与加工,2020,49(4):34-38.
- [14] 任建新,齐鸣,于训全,等.地下空间人员定位自适应 RSSI 多信标点算法研究[J].矿业研究与开发,2020,40(10):169-173.
- [15] 胡宏泽,杜志刚,储楠,等.基于智慧矿山平台的人员定位系统关键技术[J].煤矿安全,2021,52(11):134-138.