

# 基于深度学习的盾构隧道衬砌管片环缝自动识别技术研究

卢建军 黄江华 柯焱

浙江华东测绘与工程安全技术有限公司

**摘要:** 地铁隧道在运维期间必将出现各种病害,而现有检测手段落后极易漏检,而准确获取隧道变形、病害发生的位置的前提是需要准确识别盾构隧道管片环缝的位置。在移动三维激光技术获取高精度点云之后,本文基于k-means聚类算法和卷积神经网络YOLO V3的方法能够自动识别衬砌管片环缝,为隧道病害的快速定位提供了基础保障。

**关键词:** 盾构隧道; 管片环缝; 自动识别; 深度学习

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2021.23.050

## 一、前言

地铁隧道在运维期必将经历列车振动、地下水位升降、新建地铁隧道的加载与卸载等多种作用,随着时间的推移,使得地铁隧道出现各种病害。这些病害在地铁隧道运营过程中呈现多发性、复发性等特征,伴随地铁隧道的全生命周期,而在地铁运营过程中,在地铁保护区范围内进行各类施工活动时,也不可避免地对地铁隧道产生影响,严重时会对隧道结构造成破坏。目前隧道空间结构检测仍主要依赖全站仪和人工检测等手段,费时费力费工、效率低极易出现漏检,无法全面检测隧道情况<sup>[1, 2]</sup>。

移动三维激光技术的出现极大地提高了隧道检测效率,最早出现的是瑞士Amberg公司的GRP5000。

现有的盾构隧道管片环缝快速识别方法<sup>[3]</sup>主要是将采集的原始盾构隧道管片灰度图,通过直方图均衡化的方法对其进行对比度增强处理,并统计每列的灰度累加值,统计完成后将其缩放至某一范围内,根据缩放后的列灰度累加值确定盾构隧道管片环缝判定阈值,最后遍历其有效列与此阈值对比,最终获取到管片的环缝。该方法主要是基于对原始图像处理和阈值分割的方式实现,因而处理图像时就必须保证原始图像的清晰度和灰度值的范围,泛化能力较差,在复杂环境下识别较差,精准率大打折扣。

为克服上述技术的缺陷,本文提出一种基于深度学习的隧道环缝识别标记技术。

## 二、基于深度学习的环缝自动识别

### (一) 总体方案设计

本研究首先通过移动三维激光扫描技术获取隧道内衬表面的全景正射影像图作为样本数据,并根据需求对每张图片中所要识别的特征进行标注,通过框选的方式,确定环缝在原图的坐标。然后使用无监督的k-means聚类算法,将标记文件中环缝的长宽比进行聚

类,从而获取到数据集的先验框大小,提高训练模型的最终准确度。通过对输入的影像进行角度、饱和度、曝光度、色调的调整,增加训练的样本集,从而实现对训练效果的增强。使用卷积神经网络YOLO V3对训练集训练,获取权重文件,并对待测影像进行检测。最后对环缝识别的平均精度(AP)进行计算。

### (二) 训练模型

(1) 通过移动式三维激光扫描技术获取隧道内衬表面的全景正射影像图作为样本数据。GRP5000 集成手推式轨检小车和高速激光扫描测量技术。当小车在轨道上行走时,高速旋转的激光扫描仪发射的激光以螺旋线的形式对隧道表面进行全断面扫描,通过分析发射和接收到激光信号(强度和相位差),可以获得隧道衬砌的内表面影像图以及隧道衬砌表面各点距轨道中心线的距离。在对杭州地铁隧道的运营监测中积累了大量的扫描数据,经过人工处理后构成了深度学习的数据集。

使用LabelImg工具完成图像标注,并根据需求对每张图片中所要识别的特征进行标注,通过框选的方式,确定环缝在原图的坐标,并将其分类为gap。

(2) 采用K-means聚类算法,基于环缝的长宽比数据库进行聚类分析,以聚类结果为基础对模型中的先验框比例值进行修正。

K-means算法属于硬聚类算法,它是根据数据类别中心的目标函数进行聚类,其中,目标函数是数据点到类别中心广义距离和的优化函数。

对于给定的一个包含n个d维数据点的数据集 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ ,其中 $x_i \in R^d$ ,假定聚类数目为K,需将所有数据对象划分为K个独立子集 $C=\{c_k\}$ , $k=1, 2, \dots, K$ 。每个子集 $c_k$ 有一个类别中心 $\mu_k$ 。通常情况下,选取欧氏距离作为相似性和距离判断准则,计算类内各点到 $\mu_k$ 的距离平方和 $J(c_k)$ :

$$J(c_k) = \sum_{x_i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (1)$$

聚类目标是各类总的距离平方和 $J(C)$ 最小。

$$J(C) = \sum_{k=1}^K J(C_k) = \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (2)$$

环缝高宽比的聚类分析中,关注环缝的高、宽两个维度,聚类结果与框的大小无关,而与预测框和真实标注框的交集同预测框和真实标注框并集的比值(Intersection-over-Union, IoU)有关,不能简单采用欧氏距离作为聚类分析相似性和距离判断准则。

IoU为两个图像的交集和并集之间的比例，即  $IoU=A \cap B / A \cup B$

为选取具有高IoU得分的目标框，采用如下距离度量：

$$D_{box,centroid} = 1 - IOU_{box,centroid} \quad (3)$$

(3) 由于输入转换器件和周围环境的影响，如光照条件的波动、图像采集系统的相对运动、周围大气中的杂质烟雾和运动、衬砌表面的深色污染物等，都会给获得的图像带来大量噪声污染，使图像模糊不清。因此，对输入的图片进行角度、饱和度、曝光度、色调的调整，其本质是增加了训练的样本集，从而实现了训练效果的增强。

(4) 使用卷积神经网络YOLO V3对训练集开始训练，获取权重文件。训练的损失函数为：

$$Loss = \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B I_{ij}^{obj} [(x_i - \hat{x}_j)] + \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B I_{ij}^{obj} [(\sqrt{w_i} - \sqrt{\hat{w}_i})^2 + (\sqrt{h_i} - \sqrt{\hat{h}_i})^2] + \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B I_{ij}^{obj} (C_i - \hat{C}_j)^2 + \lambda_{noobj} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B I_{ij}^{obj} [(x_i - \hat{x}_j)] + \sum_{i=0}^{S^2} I_i^{obj} \sum_{class} (P_i(c) - \hat{P}_i(c))^2 \quad (4)$$

(5) 根据步骤4训练后得到的权重文件，对待测图片进行检测。

(6) 对环缝识别的平均精度（AP）进行计算。具体计算步骤如下：

① 对IOU的计算，也就是对预测框和实际框的交并比的计算。IOU越接近1，代表预测的越准确，通常意义下，如果IOU的值大于0.5，我们就将其归类为预测正确，具体的公式如下：

$$IOU = \frac{GT \cap P}{GT \cup P - GT \cap P} \quad (5)$$

GT代表的是真实的预测框的面积，P代表的是预测框的面积。

② 计算Precision，就是对某张图上某类精度的计算。计算公式如下：

$$Precision = \frac{TP}{P} \quad (6)$$

TP代表的是某张图中某类被正确预测的数量。

T代表的是某张图中某类真实的数量。

③ 计算AP，用来衡量学习出的模型在每个类别上的好坏。计算公式如下：

$$AP = \frac{\sum Precision}{T} \quad (7)$$

$\sum Precision$ 代表着所有测集中某类的精度之和。

T代表测试集中某类图像的总数。

根据计算出的平均精度来判断得到模型是否理想，如果不理想，通过对参数进行调整、增加训练集等方式，在上次训练的基础上再次训练，直到得到理想的模型为止。

### (三) 测试模型

在模型训练精度满足要求后即可对模型进行测试，包括以下主要步骤：

- 1) 采集具有目标对象的图片，将其输入YOLO模型中。
- 2) 将训练好的权重值作为参数，启动程序，对图像开始识别。
- 3) 根据识别结果，为目标图像绘制出边界框，进行标记。

### 三、实例分析

选取杭州地铁某区间内的一段三维激光扫描数据进行实验。所选实验数据隧道内部光照不匀，衬砌纹理繁杂。经过本文所述方法处理后，准确识别出每条环缝位置。

通过大量的测试评估，基于深度学习的环缝自动识别技术识别精度达到98%。

### 四、结论

深度学习的方法离不开大数据集的支撑，建立专业完备的隧道环缝图像数据集及相应的图像处理方法是实现环缝自动识别的关键。本文通过标准数据集的建立、分类模型的设计与实现，训练与测试、分割模型的设计与实现，训练与测试以及算法级联与优化，可建立完备的病害识别技术。在训练阶段，分类模型与分割模型是可以并行实现的，测试阶段，训练好的模型进行离线应用，先进行分类，再对环缝图像再进行分割，得到最终结果。

本文研究能为自动识别管片环缝位置提供快速定位功能，输入指定环号，可快速定位到该位置，并且识别精度高，该技术将有广阔的推广应用前景。

### 参考文献

[1] 孙可, 张魏, 朱守兵, 等. 盾构隧道健康监测数据的模糊层次分析综合评价方法[J]. 防灾减灾工程学报. 2015, 35 (06): 769-776.

[2] 王勇, 王柄强, 唐超. 基于移动三维激光扫描的地铁盾构环片提取与分析[J]. 测绘通报. 2020 (09): 46-49+65.

[3] 吴勇, 桑泽磊, 卢建军, 郑佳佳, 王焯晟. 基于图像识别的地铁隧道管片环缝识别方法研究.

基金项目: 浙江省交通运输厅科研计划项目 (2021015)。

作者简介: 卢建军(1975-), 男, 浙江杭州人, 本科, 高级工程师, 主要从事精密工程测量与变形监测研究。