DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241028

基于三维点云分割和配准的堆石坝试坑体积计算方法研究

黎松彬[1],孙 啸[1],祝长江[2],田正宏[1]

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098;2. 中国水利水电第七工程局有限公司,四川 成都 610213)

摘要:堆石坝碾压密实度检测是筑坝过程中保证施工质量的重要工作,但检测试验时无法进行下一步施工。为避免延误工期,提高压实度检测效率至关重要。针对试验获取体积的灌水法步骤繁琐、耗时、精度存疑的问题,提出一种利用三维激光扫描结合深度学习的方法自动获取试坑体积,该方法以压实度检测规程中的圆形环刀作为训练集,利用环刀与试坑的几何位置关系基于投影法提取试坑点云,再以优化的点云配准算法将试坑顶与试坑内壁拼接得到完整三维试坑,最后基于改进的切片法对试坑点云进行计算获得体积。经验证,该方法只需以较少的训练集便能达到试坑体积自动计算,误差在5%内,处理新试坑单个工人在10 min内可完成,极大地提高了检测效率。

关键词:堆石坝;灌水法;三维激光;体积测量

中图分类号:TV522 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)04-0138-05

1 引言

堆石坝筑坝每完成一个碾压层后,需按规范[1]进行检测以确认碾压质量是否满足工程要求。目前检测实践中存在2个问题:①规范中使用灌水法对试坑进行测量时大粒径石块交错使铺设的薄膜脱空产生误差;②试坑测量体积效率低、步骤繁琐、人力要求高且工作量大。目前利用三维激光技术辅助施工为研究热点,但其应用于压实度检测的研究和应用实例较少,廖亚斌等[2]在开挖的试坑中采用激光扫描仪代替灌水法,获取点云计算试坑体积,验证了该法的可行性。但因扫描仪采集特点,获取坑点云过程涉及周遭环境与试坑有效点云分割等问题,若采用人工分割则耗时较长,不利于现场工人操作及施工自动化。PointNet++深度学习为分割点云的常用方法,在许多领域得到了应用[3-5]。但PointNet++分割效果受训练集影响较大,应用场景中目标特征变化较小。而压实度检测试坑为人工挖掘,无统一特征且复杂多变,导致训练模型直接分割试坑准确性差,出现大量噪点和空洞,无法满足体积计算要求。鉴此,本文基于PointNet++,采用间接分割试坑点云策略,自动获取完整试坑点云并计算体积,提高了试坑分割效率并减少了人工操作,从而达到减员增效的目的。

2 试坑体积的自动化计算

2.1 提取流程

灌水法测量压实度过程中,圆形环刀放置于碾压层表面确定试坑开挖位置和范围。试坑点云位于环刀点云范围内,且环刀形状规则易于训练与识别。因此,运用PointNet++深度学习分割出圆形环刀点云,利用环刀点云信息提取出试坑点云,从而降低试坑点云获取难度。具体提取流程如下:首先将基于环刀制作的训练集输入到PointNet++网络中进行训练;其次进行现场采集,试坑开挖前采集试坑顶点云,开挖后采集试坑内壁点云;将采集到的点云输入PointNet++网络中分割出环刀点云,根据点云位置信息创建圆柱形滤波提取试坑顶点云与试坑内壁点云;最后进行以环刀点云为基准的点云配准,将坑顶与坑内壁对齐得到拼接的完整试坑点云并基于优化的

收稿日期:2024-06-03,**修回日期**:2024-06-29

基金项目:国家自然科学基金项目(52279131)

作者简介:黎松彬(1999-),男,硕士研究生,研究方向为水利施工新技术与新材料,E-mail:songbinli@hhu.edu.cn

通讯作者:孙啸(1986-),男,博士、副教授,研究方向为水利施工新技术与新材料,E-mail:xiaos@hhu.edu.cn

中国知网 https://www.cnki.net

切片法计算得到试坑体积。

2.2　PointNet+ + 模型

在利用激光扫描仪获取试坑点云时,不可避免地会包含大量环境点云,因此需要对获取的点云进行点云分割。PointNet++[6]为基于 PointNet 改进的成熟深度学习网络,该网络通过集合抽象模块获取点云局部特征,其中包括采样层、分组层和 PointNet 层;通过特征传播(FP)模块将这些局部特征回传,使得原始点云每个点均包含丰富特征,用于判断每个点是否为环刀点云,从而达到分割的目的。PointNet++网络模型设原始点云数量为 L ,输入原始点云三维坐标 $[L,3]$,最后输出每个点类别 $[L,2]$,即环刀点云与非环刀点云,达到分割环刀点云。

2.3　基于投影法的试坑点云提取

理论上通过环刀点云沿轴线方向创建柱形滤波即可提取试坑点云。因现场工人仪器放置随机,环刀轴向量在坐标系中并非固定值,常与 z 轴偏心及错位,无法直接获取环刀轴提取完整试坑点云。为实现在一定人工误差下自动纠偏并提取,将分割出的环刀点云投影至二维平面并进行拟合圆计算,基于环刀沿轴投影拟合圆误差最小寻找轴方向,最后在轴方向进行柱形滤波提取完整试坑点云。算法步骤为:设一球坐标单位向量 $\boldsymbol{N}$,将从 PointNet++分割出的环刀点集沿 $\boldsymbol{N}$ 投影至平面 A ,得到 n 个点的二维点集并进行最小二乘圆拟合,其误差 K 为:

$$K=\sum_{i=1}^{n}\left(\sqrt{(x_i-a)^2+(y_i-b)^2}-r\right)^2+n(r-r_0)^2 \tag{1}$$

式中,x_i、y_i 分别为点集二维投影后的坐标;(a,b)、r 分别为拟合圆圆心坐标、半径;r_0 为环刀半径。

随后 $\boldsymbol{N}$ 先后以极角、方位角维度 θ_0、φ_0 为步长遍历,比较以 $\boldsymbol{N}_{\pm}$ 为投影的拟合圆误差 $K_{\pm}$ 。输出最小值方向 $\boldsymbol{N}_{\text{axis}}$ ($\boldsymbol{N}_{\text{axis}}$ 即圆形环刀轴方向)。

过程示意如图 1 所示。通过环刀沿轴方向高差、拟合圆圆心及半径确定圆柱形滤波参数,保留圆柱形区域内的点云。应用于原始点集即可提取试坑与环刀点云。

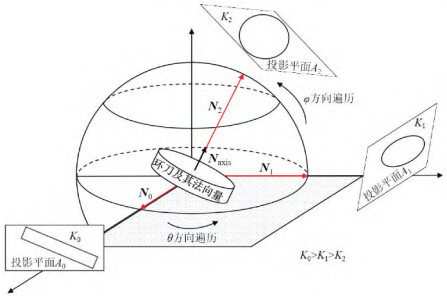


图 1　基于投影法的环刀轴计算过程

Fig. 1　Calculation process of ring cutter shaft based on projection method

2.4　基于优化的点云配准试坑拼接

为实现试坑的自动拼接,引入点云配准算法对齐试坑顶和试坑内壁中的环刀点云 $\boldsymbol{P}_{\text{s}}$、$\boldsymbol{P}_{\text{t}}$,达到试坑拼接的目的。对从网络中分割出的环刀点云 $\boldsymbol{P}_{\text{s}}$ 进行旋转、平移得到统一至环刀点云 $\boldsymbol{P}_{\text{t}}$ 坐标系下的点云 $\boldsymbol{P}_{\text{s}}^{'}$ 并优化之间的距离达到最小。设 $\boldsymbol{R}$ 、$\boldsymbol{t}$ 分别为旋转矩阵、平移矩阵,公式为:

$$\boldsymbol{P}_{\text{s}}^{'}=\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}_{\text{s}}+\boldsymbol{t} \tag{2}$$

点云配准分为粗配准和精配准两个步骤。粗配准的目标是通过初始变换调整 2 片点云之间的位置,为后续精配准提供良好的初始位置,以识别到更多的配对点。若配对点数量不足或初始位置不佳,将影响精配准的成功率。粗配准后进行基于迭代最近点(ICP)点云配准算法[7]进行精配准。

设 N_{match} 为精配准中得到的配对点数,第 i 对配对点为 p_{s}^{i} 和 p_{t}^{i} ,则两片环刀点云的距离 D 可用均方根误差(R_{RMSE})表示:

$$D=\frac{1}{N_{\text{match}}}\sum_{i=1}^{N_{\text{match}}}\left\| p_{\text{s}}^{i}-(\boldsymbol{R}p_{\text{t}}^{i}+\boldsymbol{t})\right\|^2 \tag{3}$$

迭代并去除错误的对应点对以优化 D 求得最优的 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{t}$,当达到设定的迭代次数或达到变化率的阈值即停止,得到最终变换矩阵。过程为:

$$(\boldsymbol{R},\boldsymbol{t})=\operatorname{argmin}\frac{1}{N_{\text{match}}}\sum_{i=1}^{N_{\text{match}}}\left\| p_{\text{s}}^{i}-(\boldsymbol{R}p_{\text{t}}^{i}+\boldsymbol{t})\right\|^2 \tag{4}$$

将变换矩阵应用于试坑点云并去除环刀点云即可得到完整试坑,用于后续的体积计算。

PointNet++网络分割的环刀点云受训练效果影响,其特征如下:为完整环刀点云的子集且包含错误分割的离群噪点,即重叠率低且噪点多,且圆形环刀无棱角等关键特征点,导致精配准结果常不收敛,陷入局部最优解无法找到变换矩阵。需进行可获得更准确初始变换的粗配准,保证环刀配准成功率。

以环刀全局特征构建初始变换矩阵代替粗配准,调整环刀初始位置,增加点配对数。以直角坐标系的环刀轴 $\boldsymbol{N}_{\text{axis}}(n_x,n_y,n_z)$构建旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$,以环刀轴圆心(a,b,c)构建平移矩阵 $\boldsymbol{t}$,得到初始变换矩阵 $\boldsymbol{T}$,将 $\boldsymbol{T}$ 应用于两片点云使其环刀轴重叠并旋转至与 $\boldsymbol{z}(0,0,1)$平行,以优化后的初始位置进行精配准。构建初始变换矩阵先计算旋转的旋转轴 $\boldsymbol{u}(u_x,u_y,u_z)$和旋转角度 ω,并以 $\boldsymbol{u}$ 构建反对称矩阵 $\boldsymbol{U}$。公式为:

中国知网　https://www.cnki.net

$$\boldsymbol{u}=\frac{\boldsymbol{N}_{\text{axis}}\times\boldsymbol{z}}{\|\boldsymbol{N}_{\text{axis}}\times\boldsymbol{z}\|} \tag{5}$$

$$\omega=\arccos(\boldsymbol{N}_{\text{axis}}\cdot\boldsymbol{z}) \tag{6}$$

$$\boldsymbol{U}=\begin{pmatrix}0 & -u_z & u_y\\ u_z & 0 & -u_x\\ -u_y & u_x & 0\end{pmatrix} \tag{7}$$

再构建旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 与平移矩阵 $\boldsymbol{t}$，公式为：

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{I}\cos\omega+(1-\cos\omega)\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u}+\boldsymbol{U}\sin\omega \tag{8}$$

$$\boldsymbol{t}=(a,b,c)^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

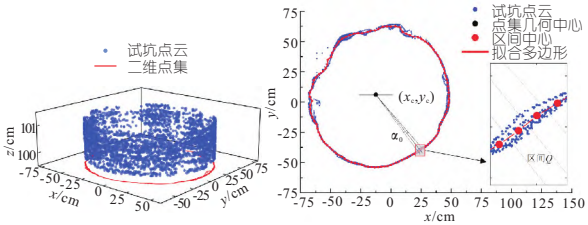
$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R} & \boldsymbol{t}\\ 0 & 1\end{bmatrix} \tag{10}$$

式中，$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

2.5 基于改进切片法的体积计算

因仪器自身误差试坑内壁的点云为高密度和高度杂乱。虽从整体上看，点云能呈现出试坑的形状，但从细部观察，内壁由多层密集点云构成，而非单一连续的表面。对常规构建网格的体积计算方法造成了干扰，难以实现试坑体积的自动化精确计算。本文基于切片法，在处理每层切片体积时提出一种针对圆环分布点云的极坐标法，简化每层点云并计算体积。具体算法步骤如下。

步骤 1 沿试坑 z 轴方向遍历。将试坑分为若干层，每层层高为 σ，层高内的 n 个试坑点云将视为同层等高点云。同层三维点云投影至 xoy 平面形成环形分布的二维点集(图 2(a))。



(a) 三维点云的二维投影 (b) 拟合多边形构成过程

图 2 基于改进切片法的试坑体积计算方法

Fig. 2 Calculation method of test pit volume based on improved slicing method

步骤 2 计算点集几何中心 (x_c,y_c)，以几何中心为基准，将二维平面划分为 M 个大小相同的锥形区间，区间角度为 α_0。遍历每个点与几何中心的相对位置并分配至对应区间。公式为：

$$(x_c,y_c)=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i,\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i\right) \tag{11}$$

$$\begin{cases}\alpha_i=\arctan\left(\dfrac{x_i-x_c}{y_i-y_c}\right)\\ Q=\lfloor\alpha_i/\alpha_0\rfloor\end{cases} \tag{12}$$

式中，α_i 为每个点和中心点的连线与水平轴夹角；Q 为每个点对应的区间；$\lfloor\ \rfloor$ 表示对结果向下取整。

步骤 3 遍历所有区间，对区间点依照式(11)计算，得到每个区间的区间中心 $(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_M,y_M)$，连接所有区间中心构成多边形(图 2(b))。计算多边形面积并乘以层高 σ 得该层体积 V：

$$V=\frac{1}{2}\sigma\left|\sum_{i=1}^{M-1}x_iy_{i+1}+x_My_1-y_ix_{i+1}-y_Mx_1\right| \tag{13}$$

步骤 4 累加所有层体积，得到试坑体积。

3 试验与分析

3.1 仪器设备选择

使用的三维激光扫描仪及搭载固定支架见图 3。试坑开挖时确保在环刀范围内开挖，将支架放置试坑内部中央并固定后，调整位置使石料尽可能显露无遮挡，扫描仪转动采集试坑不同角度的点云数据并统一至同一坐标系，转动一周后完成对试坑扫描，从而减少因扫描仪单向采集而产生遮挡空洞的问题。以四川省某水电站现场收集的碾压层试坑点云数据为例，验证本文提出的试坑获取方法的效率及体积计算的准确性。



图 3 现场仪器架设示意图

Fig. 3 Schematic diagram of on-site instrument installation

运行网络模型的电脑配置 3.60 GHz、16 GB RAM 的 Intel Core i7-10510U CPU 处理器。电脑系统为 windows10 系统，采用了 PyTorch 作为主要的深度学习框架，编程环境为 Python 3.8，利用 NVIDIA 的 CUDA 10.0，高效地进行深度学习训练和测试。

3.2 点云分割效果分析

以现场压实度检测时获取的三维点云进行训练和测试，以扫描仪为中心的固定区域框定范围，通过 cloudcompare 软件对数据分配标签。以 4 组试坑点云的不同角度及高度采集的 120 个样本作为训练集，以另一试坑的 34 个样本作为测试集，输入 PointNet++网络前对数据集进行随机扰动、平移、旋转等数据增强操作，增加训练集样本数量至 2 135。预试验后设置参数如下：模型训练周期 e_{epoch} 为 200，批次大小 $b_{\text{batchsize}}$ 为 8，每个训练集送入网络的点数为 1 024。学习率为 0.001，并采用学习率动态衰减策略及 ADAM 优化算法。

中国知网 https://www.cnki.net

为表征 PointNet＋＋网络对环刀点云分割效果,引入交并比 I_{IoU},公式为:

$$I_{\mathrm{IoU}}=[T_{\mathrm{TP}}/(T_{\mathrm{TP}}+F_{\mathrm{FP}}+F_{\mathrm{FN}})]\times 100\% \tag{14}$$

式中,T_{TP} 为正确预测环刀点云的数量;F_{FP} 为错误预测的环刀数量;F_{FN} 为非环刀点云但被错误预测为环刀点云的数量。

将 PointNet＋＋分割出的环刀点云基于投影法寻找环刀轴,确定柱形滤波并提取坑点云。分割过程及提取效果见图 4(a)、(b)。

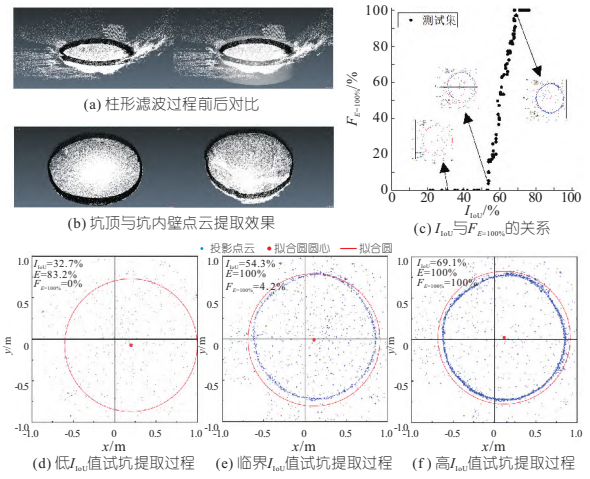


图 4　基于环刀投影的试坑提取过程及结果

Fig. 4　Extraction process and results of test pit based on circular knife projection

为表征基于环刀点云对试坑点云的提取完整程度,设测试集样本数量为 N_{test},定义每个样本的试坑点云提取比例为 E,定义 $F_{E=a}$ 为提取比例为 a 的样本在测试集的占比。公式为:

$$E=(n_{\mathrm{out}}/n_{\mathrm{in}})\times 100\% \tag{15}$$

$$F_{E=a}=(N_{E=a}/N_{\mathrm{test}})\times 100\% \tag{16}$$

式中,n_{in} 为测试样本包含的试坑点云数;n_{out} 为从中提取的试坑点云数;$N_{E=a}$ 为提取比例为 a 的样本数量。

此过程通过统计预先标记的标签数实现。当测试样本中的试坑点云被完全提取时 $E=100\%$,反之则为未完全提取。

重点探讨能够完全提取试坑点云的样本的占比(即 $F_{E=100\%}$)与 I_{IoU} 之间的关系。为了表示当前训练状态,每 5 个 e_{epoch} 记录一次 I_{IoU} 值,并在关键阶段缩短记录间隔。通过统计测试集中能完全提取试坑点云的样本的比例,绘制训练过程中 I_{IoU} 与 $F_{E=100\%}$ 的关系图(图 4(c))。发现当 I_{IoU} 低于 54.3%时,环刀轮廓模糊,无法提取完整试坑点云(图 4(d))。当 I_{IoU} 达到 54.3%时,虽然干扰点较多,但环刀点云在轴向投影后较为集中,部分测试样本能够提取出完整试坑点云(图 4(e))。当 I_{IoU} 提升至 69.1%时,所有测试样本均能成功提取试坑点云(图 4(f))。将相同的训练集用于直接分割试坑时,I_{IoU} 的最高记录为 61.2%,得到的试坑不完整且空洞、噪点多,未能达到试坑体积计算的最优效果。由此可知,本文方法效率高,无需达到极高的训练效果即可有效提取试坑,能够在较少的训练资源下完成试坑提取,展示出强大的实用性。

3.3　环刀配准效果分析

以能够完全提取试坑点云的样本进行试验。由于两片环刀点云 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}$ 和 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{t}}$ 之间缺乏明确的配准变换矩阵,因此先采用人工标记多个对应点,再使用 ICP 配准算法进行进一步的配准调整,人工实现对齐。设此过程生成的为标准配准变换矩阵 $\boldsymbol{T}_1$。采用优化后的配准方法,计算得到另一个变换矩阵 $\boldsymbol{T}_2$。为衡量两个变换矩阵之间的差异,引入指数误差指标 e^{R} 和 e^{t},具体公式为:

$$\begin{cases} e^{\mathrm{R}}=\max(|\Delta\theta_x|,|\Delta\theta_y|,|\Delta\theta_z|) \\ e^{\mathrm{t}}=|\Delta t| \end{cases} \tag{17}$$

式中,$|\Delta\theta_x|$、$|\Delta\theta_y|$、$|\Delta\theta_z|$ 分别为绕轴的旋转角度差;$|\Delta t|$ 为位移差。

采用重叠率 μ 来表征环刀在不同训练状态下的分割结果。重叠率通过人工配准后计算得到,具体公式为:

$$\mu=(n_{\mathrm{s}}\cap n_{\mathrm{t}})/(n_{\mathrm{s}}\cup n_{\mathrm{t}}) \tag{18}$$

式中,n_{s}、n_{t} 分别为两片环刀点云的点数量;$n_{\mathrm{s}}\cap n_{\mathrm{t}}$ 为对应点数量;$n_{\mathrm{s}}\cup n_{\mathrm{t}}$ 为点云总数数量之和减去对应点数量。

共进行了 10 次基于环刀的坑顶与坑内壁配准试验,涵盖不同重叠率和不同初始位置,配准结果见表 1。由表 1 可知,通过调整初始位置提高了配准成功率,且旋转误差控制在 5°以内,位移误差控制在 16 mm 以内,配准时间在 4 min 以内,保障了后续的体积计算。

3.4　体积精度验证

灌砂法可有效填满试坑的空隙,且不易发生渗漏,因影响回填无法应用于工程中,更适合于室内精确测定试坑体积。使用水泥与不同粒径的石块制作室内试坑,以模拟现场试坑的不平整内壁。同时,使用刚性材料作为外壁,确保在灌砂过程中试坑不会发生形变,从而保证测量结果的准确性。

对制作的室内试坑采用灌砂法测量体积,将灌砂法的测量结果视为精确体积,用以验证本文算法的准确性。对现场 4 个试坑采用灌水法测量数据作为辅助验证。在进行坑点云的预处理后,设定层间高度为 1 cm 计算体积,计算结果见表 2。

中国知网　https://www.cnki.net

表 1 环刀点云重叠率、初始位置差异及配准结果

Tab. 1 Overlapping rate, initial pose difference and registration results of circular cutter point cloud

试验编号	重叠率 μ/%	旋转角度/(°)			位置差异/mm			点配对数/对		e^R/(°)		e^t/mm		时间/s	
		x	y	z	x	y	z	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
1	1.92	32.40	61.99	34.78	95.80	−42.54	106.45	11 321	45 432	6.17	5.54	7.50	6.45	43.73	126.05
2	6.59	8.76	12.26	13.35	−138.21	101.19	25.30	10 310	51 789	23.25	4.68	9.39	4.26	52.50	141.97
3	7.23	76.79	8.48	65.72	245.30	−375.34	−51.93	5 103	46 782		2.86		7.72		105.54
4	8.58	63.74	84.35	48.87	−459.90	22.62	193.38	4 206	52 104		0.84		15.28		118.54
5	12.76	82.47	24.54	74.51	30.95	−25.82	113.39	21 053	48 659	6.39	4.60	8.68	1.78	47.32	112.39
6	13.89	32.28	83.90	63.19	428.83	−76.52	54.04	8 327	56 213	30.74	4.52	17.64	9.60	53.61	181.80
7	16.15	21.88	83.33	11.24	238.77	406.16	89.54	6 631	49 876		2.72		9.09		166.40
8	19.04	71.76	80.92	6.58	−152.22	208.75	−81.33	4 806	55 547	10.47	2.24	11.96	7.87	22.03	169.22
9	22.21	2.43	18.13	14.83	325.05	−212.45	159.84	8 754	57 032	11.18	0.88	14.08	3.58	76.26	161.35
10	25.22	3.14	41.16	6.34	−36.98	436.32	171.53	5 467	50 218		4.77		5.69		172.82

注:空白处为目标函数不收敛配准失败。

表 2 体积结果对比

Tab. 2 Comparison of volume results

计算方法	室内试坑体积(人工测量为灌砂法)/dm³				现场试坑体积(人工测量为灌水法)/dm³					
	试坑 1	试坑 2	相对误差/%	平均时间/s	试坑 1	试坑 2	试坑 3	试坑 4	相对误差/%	平均时间/s
人工测量	27.12	29.18			1 727	2 183	1 532	2 756		
凹包法	29.89	30.45	7.31	62	1 906	2 452	1 662	3 127	10.23	1 163
凸包法	32.06	35.78	20.43	18	2 167	2 867	1 892	3 345	25.29	108
极坐标法	28.63	30.03	4.26	14	1 944	2 297	1 721	2 943	8.27	211

与常用的轮廓计算方法(包括凹包和凸包算法)作对比,并展示了计算效果(图 5)。

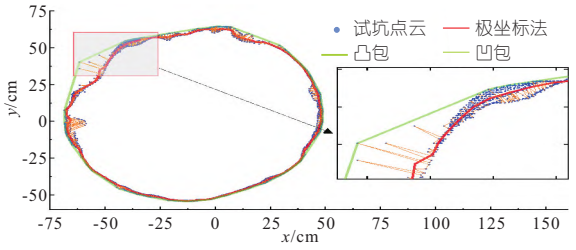


图 5 计算单层点云体积的方法对比

Fig. 5 Comparison of methods for calculating single-layer point cloud volume

由图 5 可知,在计算准确性方面,凸包算法由于受到离散点的影响且凹陷无法识别,测得的体积偏大很多。而凹包算法虽能更精细地显示轮廓,但其计算过程过于复杂,导致计算时间显著增加。相比之下,极坐标法受离散点的影响较小,能更有效地拟合出真实的轮廓。

在人工试坑中采用极坐标法的计算误差相对于灌砂法测量的准确体积略有增大,但误差控制在 5%以内;在现场试坑中,灌水法因薄膜脱空相对精确体积偏小,因此极坐标法计算与灌水法相比,误差会增加,印证了极坐标法的准确性;在计算效率方面,由于极坐标法具有较强的针对性,能显著减少计算点数,因此效率较高。

4 结论

a. 相较于以试坑为训练集直接分割试坑,圆形环刀作为训练集并后处理的间接分割方法以较少的训练数据集即可实现试坑分割,极大地简化了提取试坑的步骤,这对现场自动化施工的实现有益。

b. 以改进的切片法计算试坑体积相对误差控制在 5%以内,处理新试坑的时间可由单个工人在 10 min 内完成,有效实现了减员增效的目标。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 碾压式土石坝施工规范:DL/T5129-2001[S]. 北京:中国电力出版社, 2001.

[2] 廖亚斌,纪鹏,袁坤,等. 一种基于手持式三维激光扫描的堆石坝试坑体积检测方法[J/OL]. 中国农村水利水电. http://link.cnki.net/urlid/42.1419.TV.20240712.1758.054.

[3] 崔峥,王增才,张杰, 等. 基于三维点云分割的煤堆体积计算方法研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(4): 96-101.

[4] 乐英, 杨冰雁. 基于 PointNet++的煤场点云分割与识别方法[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(3): 199-203.

[5] 黄应华, 董振川, 李昊, 等. 城市竣工测绘典型要素语义分割 PointNet++深度学习模型适用性分析[J]. 测绘通报, 2024(2): 85-89.

[6] QI C R, YI L, SU H, et al. PointNet++: deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, 2017, 30:5105-5114.

[7] 汤慧,周明全,耿国华. 基于区域分割的低覆盖点云配准算法[J]. 计算机应用,2019,39(11):3355-3360.

(下转第 132 页)

中国知网 https://www.cnki.net

的掺量为 20%时，砂浆的毛细吸水量和毛细吸水系数均为最小，说明废弃砖粉可以优化砂浆的孔结构。

参考文献：

[1] LI B, MAO J, NAWA T, et al. Mesoscopic damage model of concrete subjected to freeze-thaw cycles using mercury intrusion porosimetry and differential scanning calorimetry (MIP-DSC)[J]. Construction and building materials, 2017, 147: 79-90.

[2] GUO H, SHI C, GUAN X, et al. Durability of recycled aggregate concrete-A review[J]. Cement and concrete composites. 2018, 89: 251-259.

[3] 姚泽良，祁亚伦，令狐恬晶，等. 含砖废弃混凝土细观损伤机理数值模拟研究[J]. 水电能源科学，2023，41(3)：149-153.

[4] 苏丽，牛荻涛，黄大观，等. 增强珊瑚骨料混凝土毛细吸水性能与预测模型[J]. 材料导报，2023，37(15)：104-111.

[5] 朱超，赵文韬，余伟航，等. 再生砖混骨料混凝土基本力学性能与本构模型[J]. 复合材料学报，2023，41(2)：898-910.

[6] 元成方，李好飞，王娣，等. 水胶比对再生砖粉 ECC 工作性能和力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报，2021，40(11)：3723-3729.

[7] 中国建筑材料联合会. 水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)：GB/T 17671-2021[S]. 北京：中国标准出版社，2021.

[8] 美国材料与试验协会. 测量水硬水泥混凝土吸水率的标准试验方法：ASTMC1585-13[S]. US-ASTM，2013.

[9] GONEN T, YAZICIOGLU S. The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete [J]. Construction and building materials, 2007, 21(5): 1040-1045.

[10] RAHHAL V F, TREZZA M A, TIRONI A, et al. Complex characterization and behavior of waste fired brick powder-portland cement system[J]. Materials, 2019, 12(10): 1650.

The Effect of Adding Waste Brick Powder with Different Particle Sizes and Dosages on the Durability Performance of Mortar

ZHANG Yue-yue[1], ZHU Cong-xiang[2]

(1. Zhengzhou Railway Vocation and Technical College, Zhengzhou 451460, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: To investigate the effects of adding waste brick powder on the mechanical properties, capillary water absorption, and porosity of cement-based composite materials, this paper conducted compressive and flexural tests, capillary water absorption tests, and porosity determination tests, and explored the effects of different waste brick powder dosages and median particle sizes on the workability of mortar. The experimental results show that the compressive and flexural strength of mortar specimens decrease with the increase of waste brick powder substitution rate or median particle size; The addition or refinement of waste brick powder can reduce the capillary water absorption of the specimen; When the amount of waste brick powder is 20%, the capillary water absorption and porosity of the specimen are the smallest, indicating that an appropriate amount of waste brick powder can optimize the pore structure of the mortar, improve the compactness and durability of the specimen.

Key words: waste brick powder; mortar; water absorption; mechanical properties; thermal weight loss

(上接第 142 页)

Research on Calculation Method for Test Pit Volume in Rockfill Dams Based on 3D Point Cloud Segmentation and Registration

LI Song-bin[1], SUN Xiao[1], ZHU Chang-jiang[2], TIAN Zheng-hong[1]

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Sinohydro Seventh Engineering Bureau Co., Ltd., Chengdu 610213, China)

Abstract: The compaction density testing of rockfill dams is a crucial task to ensure construction quality during dam construction. Since the next construction step cannot proceed during testing, improving the efficiency of compaction density testing is essential to prevent delays in the construction schedule. Addressing the issues with the water displacement method for volume measurement, which is complex, time-consuming, and has questionable precision, this paper proposes a method that uses 3D laser scanning combined with neural networks to automatically obtain the volume of test pits. Circular rings from the compaction detection protocol are used as the training set, leveraging the geometric relationship between the rings and the test pits to extract the test pit point cloud based on the projection method. An optimized point cloud registration algorithm then stitches the top of the test pit with the inner wall to obtain a complete three-dimensional model of the pit. Finally, based on an improved slicing method, the volume of the test pit point cloud is calculated. Validation shows that with a relatively small training set, the automatic calculation of test pit volume can be achieved with an error margin within 5%. A single worker can process a new test pit in 10 minutes, significantly improving detection efficiency.

Key words: rockfill dam; irrigation method; 3D laser scanning; volume measurement

中国知网 https://www.cnki.net