**引文格式**:毛庆洲,徐浩轩,朱璟,等.利用高密度点云现场检测在建隧道超欠挖[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(3):562-570.DOI:10.13203/j.whugis20220601

**Citation**:MAO Qingzhou,XU Haoxuan,ZHU Jing,et al.Immediate Detection of Over-Under Break of Tunnel Under Construction Using High-Density Point Cloud[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(3):562-570.DOI:10.13203/j.whugis20220601

# 利用高密度点云现场检测在建隧道超欠挖

毛庆洲[1,2,3] 徐浩轩[1] 朱 璟[1] 熊勇钢[4] 王长海[5]
李夏亮[4] 朱旭波[4]

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079
2 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079
3 时空数据智能获取技术与应用教育部工程研究中心,湖北 武汉,430079
4 武汉汉宁轨道交通技术有限公司,湖北 武汉,430010
5 广西交通设计集团有限公司,广西 南宁,530029

**摘 要**:使用高密度三维激光扫描点云进行隧道超欠挖检测,数据量大,计算效率低;要实现即时快速地在线解算,提高检测效率,需要解决隧道中线快速提取、点云下采样和超欠挖快速计算等问题。提出了一种在设计文件监督下的隧道平面外包矩形中线提取算法,能够快速有效构建隧道中线;探究了下采样参数设置的最优方式,提高断面提取和超欠挖计算效率;提出了基于内轮廓的反距离加权超欠挖检测方法,提高超欠挖检测的精度和鲁棒性。实验结果表明,所提的超欠挖检测方式能够实现在线解算、报表生成、模型构建,总长度为40 m的三站测量数据配准拼接,计算耗时247.14 s,超欠挖计算结果与全站仪实测值的相对中误差为0.96 mm,在满足即时快速检测的同时兼顾了高精度。

**关键词**:三维激光扫描;超欠挖检测;隧道中线提取;点云下采样

**中图分类号**:P258 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-09-19

**DOI**:10.13203/j.whugis20220601 **文章编号**:1671-8860(2025)03-0562-09

# Immediate Detection of Over-Under Break of Tunnel Under Construction Using High-Density Point Cloud

*MAO Qingzhou*[1,2,3] *XU Haoxuan*[1] *ZHU Jing*[1] *XIONG Yonggang*[4] *WANG Changhai*[5]
*LI Xialiang*[4] *ZHU Xubo*[4]

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China
3 Engineering Research Center of Intelligent Acquisition Technology and Application of Spatiotemporal Data of the Ministry of Education, Wuhan 430079, China
4 Wuhan HiRail Transportation Technology Co. Ltd, Wuhan 430010, China
5 Guangxi Communications Design Group Co. Ltd, Nanning 530029, China

**Abstract**: **Objectives**: High density 3D laser scanning point cloud contains massive data, leading to low efficiency in detection of tunnel over-under break. In order to get the results while measuring, it is necessary to solve problems including fast extraction of tunnel centerline, point cloud data down-sampling and efficient over-under break calculation. **Methods**: First, we propose a centerline extraction algorithm based on the outer rectangle of tunnel plane and the design file, which can construct the centerline quickly and effectively. Then, we explore the efficiency improvement of section extraction and over-under break calculation by setting the optimal down-sampling parameter. Finally, we propose an over-under break calculation algorithm based on inner contour using inverse distance weighted method. **Results**: Experiment shows that the proposed algorithm can realize online calculation, generate reports and construct 3D over-under break

**基金项目**:国家自然科学基金(U1934215,41971413)。

**第一作者**:毛庆洲,博士,教授,主要从事高精度激光雷达装置及应用研究。qzhmao@whu.edu.cn

model. It takes 247.14 s to get over-under break calculation results using the georeferenced point cloud data of 3 measurement stations. Compared with the measured values by total station, the mean square error of the over-under break results of a 40 m section is only 0.96 mm. **Conclusions**: The proposed algorithm can detect the over-under break in tunnel constructing and meet the requirements of high-precision and immediateness, which could be used during construction of the tunnel project.

**Key words**: 3D laser scanning; over-under break detection; tunnel centerline extraction; point cloud data down-sampling

公路、铁路隧道施工多采用矿山法、明挖法或暗挖法。在施工过程中需要对其超欠挖情况进行快速、准确地检测与评估，对控制施工成本、分析围岩稳定性、确保施工安全具有重要意义。传统检测方法使用全站仪、断面仪等设备对断面进行逐点测量，无法对全断面进行检测，效率较低。三维激光扫描技术具备高穿透性、高密度、高精度等特点，将其应用于隧道超欠挖检测，能够快速获取施工区域隧道绝对点云，实现目标断面提取、超欠挖检测、超欠挖方量计算等目标。

使用激光点云进行隧道超欠挖检测的一般思路是获取隧道中线[1-6]、点云滤波[7]、截面提取及超欠挖计算。文献[8-9]将地面三维激光扫描技术应用于隧道全断面变形测量，给出测站间距和扫描分辨率的最佳取值；文献[10]基于非均匀有理B样条(non-uniform rational B-splines, NURBS)曲面理论，对配准、去噪、精简后的点云建立三维模型，将多期测量结果叠加分析，得到隧道变化情况；文献[11]通过对两期地铁隧道点云连续断面提取与分析，获得不同时期的隧道变形量；文献[12]通过单调链凸包算法提取隧道轮廓线，剔除噪声后进行超欠挖计算；文献[13]使用统计滤波去噪、主成分分析法提取隧道轴线的方式进行断面提取与超欠挖检测；文献[14]将三维点云展平，通过图像分析判断超欠挖；文献[15]通过多视影像获得三维点云，进而计算超欠挖；文献[16-17]则通过双三次B样条拟合隧道曲面，对模型进行格网分析，从而求取超欠挖结果；文献[18]使用NURBS曲面对隧道建模，并与设计曲面进行布尔运算，判断超欠挖。

上述方法或要求已知设计中线，或规定隧道必须是指定形状，与公路、铁路隧道建设实际不符，且没有考虑站式扫描点云不均匀带来的计算效率和效果差异，对海量三维点云进行建模、影像处理等手段效率较低，不适合现场工作。本文提出了一种基于三维激光扫描点云的隧道超欠挖高精度即时快速检测算法，通过基于外包矩形和设计文件的中线快速提取、基于中线微元垂线簇的断面提取、点云下采样参数优化、点云投影和投影面滤波对数据进行预处理，采用基于内轮廓的反距离加权方法计算超欠挖结果。算法流程如图1所示。

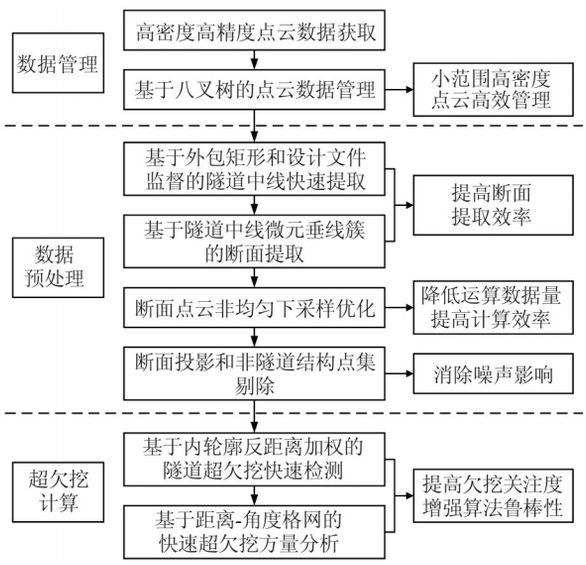



图1　本文算法流程

Fig. 1　Flowchart for the Proposed Algorithm

## 1　隧道断面提取算法

### 1.1　基于外包矩形和设计文件监督的隧道中线快速提取

隧道断面提取的前提是中线已知，由于爆破、沉降等原因，在初支、二衬阶段，设计中线与实际中线存在一定误差，导致实际断面与设计断面匹配错误。当隧道处于弯曲处，对中线进行插值加密也会导致设计中线与实际中线不符，如图2(a)中$C_D$与$C_R$所示。隧道点云在$XOY$平面投影的最大、最小坐标分别为($X_{max}$, $Y_{max}$)、($X_{min}$, $Y_{min}$)，确定的包围矩形如图2(a)蓝色矩形所示。

本文通过提取点云在$XOY$平面的外包矩形判别隧道轴向，结合拱顶计算中线点，并联合设计中线加密隧道中线，在保持高效的同时获得了较好的效果，具体过程如下：在待检测隧道区段放置至少3个靶球，使用全站仪测量隧道逐桩控

制点坐标，通过后方交会原理获取靶球十字丝中心坐标；使用三维激光扫描仪获取区段点云，从中提取球型靶标并拟合其中心；获取至少3对靶球中心坐标，通过站间坐标转换得到绝对点云。绝对点云获取原理如图3所示。

现场工作时，对单站点云或若干站拼接后的点云进行处理，其范围往往较小，不存在大角度转弯，则外包矩形存在一条对角线贯穿隧道。如图2(a)所示，根据几何关系，求$CE$与$DF$、$BG$与$DH$的距离之和，计算式分别为：

$$\begin{cases} C'D = 2R\cdot\cos(\alpha-\beta) \approx CE + DF \\ B'D = L_T\cdot\cos(\pi/2-\alpha-\beta) = BG + DH \end{cases} \tag{1}$$

式中，$R$为隧道半径；$L_T$为隧道长度；$\alpha$是隧道壁与包围盒$X$轴的夹角；$\beta$是设计中线与包围盒$X$轴的夹角，二者的几何关系为：

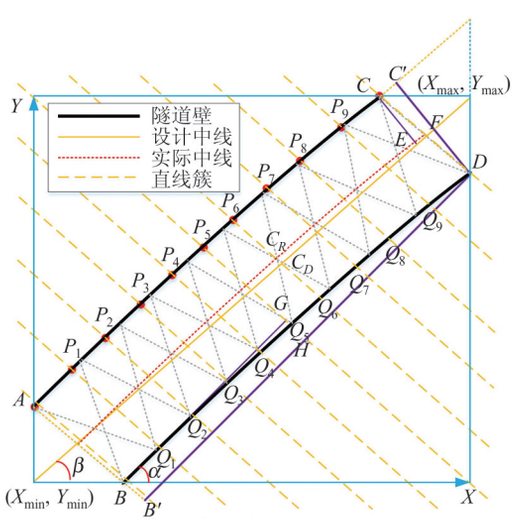
$$\tan\beta = \frac{2R\sin\alpha + L_T\cos\alpha}{2R\cos\alpha + L_T\sin\alpha} \tag{2}$$

如图2(b)和2(c)所示，当隧道与$X$轴夹角接近45°时，$C'D$、$B'D$分别对应隧道最大直径、隧道长度；当隧道向坐标轴旋转时，后者大于前者，且二者之差逐渐缩小；当隧道与坐标轴平行时，二者相等，根据距离可判断$B'D$为隧道的近似轴向。

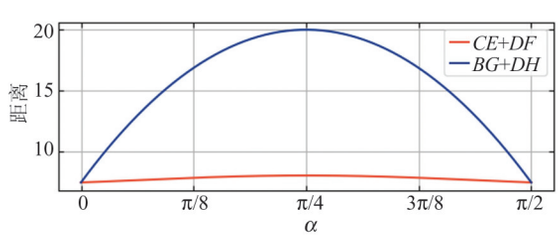
按照工程要求，设置合理的距离初值，在$CD$方向生成一组相互平行的直线簇，与隧道边界交点为$P_i$、$Q_i$；由于从任意角度截取隧道断面时，拱顶点与中线点在$XOY$平面重合，因此可以取该截面内的拱顶点集，计算拱顶中点坐标作为该区段的初始中线点。没有设计文件参考时，将该点作为截面的计算中点；有设计文件参考时，在对应里程处的插值点坐标为$\left(X_i^{\text{design}}, Y_i^{\text{design}}, Z_i^{\text{design}}\right)$，则新的中线点计算式为：

$$\begin{cases} X_i^{\text{center}} = w_i\left(X_i^P + X_i^Q\right)/2 + (1-w_i)X_i^{\text{design}} \\ Y_i^{\text{center}} = w_i\left(Y_i^P + Y_i^Q\right)/2 + (1-w_i)Y_i^{\text{design}} \\ Z_i^{\text{center}} = Z_i^{\text{design}} \end{cases} \tag{3}$$

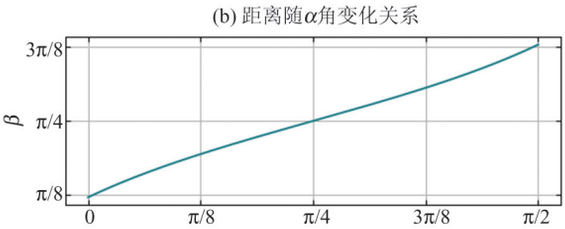
式中，$w_i$是用于计算中线点的边界点权重，隧道曲率越大，该权重越大。




(a) 隧道中线与直线簇




(b) 距离随$\alpha$角变化关系




(c) $\beta$角随$\alpha$角变化关系

图2　中线快速提取示意图

Fig. 2　Diagram of Extraction of Centerline

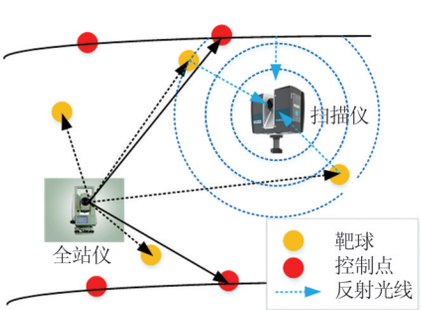



图3　绝对点云获取原理

Fig. 3　Diagram of Point Cloud Acquisition in Geodetic Coordinate

### 1.2　基于隧道中线微元垂线簇的断面提取

初步获取隧道中线后，可以采用插值进一步加密中线，以提高断面截取的效率。设加密后中线点集为$\{CP_i\}$，对于任意两个相邻中点$CP_i$、$CP_{i+1}$，它们连接形成的直线段是隧道轴线微元，与该线段相交且垂直的直线斜率相同，计算式为：

$$k_{i,i+1} = -\frac{X_{CP_{i+1}} - X_{CP_i}}{Y_{CP_{i+1}} - Y_{CP_i}} \tag{4}$$

任意里程处断面截取如图4所示，要获取某个里程点$CP_{\text{center}}$处、长度为$d$范围内的投影截面，

可以计算前后各 $d/2$ 处的中线点 $CP_{\text{start}}$ 和 $CP_{\text{end}}$。在斜率 $k_{i,i+1}$ 下，对应的截距 $b_{\text{start}}$ 和 $b_{\text{end}}$ 限制了截面的里程范围。对于任意实际测量点，落在该目标截面的条件计算式为：

$$\begin{cases} d_{\text{start}} + d_{\text{end}} = d \\ \min\{b_{\text{start}}, b_{\text{end}}\} \leqslant b \leqslant \max\{b_{\text{start}}, b_{\text{end}}\} \end{cases} \tag{5}$$

式中，$d_{\text{start}}$ 和 $d_{\text{end}}$ 分别是实际测量点到起止里程处隧道中线微元垂线的距离；$b$ 是将该点坐标代入解析式得到的截距。

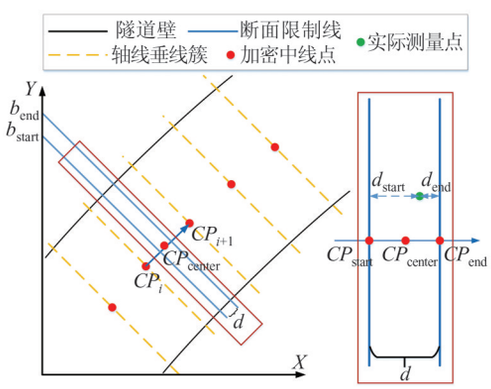



图 4　任意里程处断面截取

Fig. 4　Diagram for Section Interception at Any Mileage

### 1.3　断面点云非均匀下采样优化

使用地面三维激光扫描仪对隧道进行测量，能够获取超高密度的点云数据，但原始点云数据量过大，直接计算效率低，需要对其进行下采样。由于测站到各点的距离不同，隧道点云本身存在非均匀问题，下采样过度会导致两端点云过于稀疏，下采样不足则导致中间处计算效率低下。

扫描角度影响测点距离的原理如图 5 所示。在理想情况下，测站设置在隧道中心线上，当扫描仪转动相同的角度时，隧道远端点间距 $L$ 大于垂直处点间距 $a$。当远端光线与垂直光线的夹角为 $\theta$ 时，远端区域和垂直区域的点云密度关系计算式为：

$$\rho_L = \frac{L}{a}\rho_a = \frac{\tan(\theta + 2\varphi) - \tan\theta}{2\tan\varphi}\rho_a \tag{6}$$

式中，$\varphi$ 是扫描仪的测角分辨率；$R$ 是扫描仪到隧道的垂直距离；$\rho_L$ 和 $\rho_a$ 分别是远端区域和垂直区域的点密度。

为满足后续计算需要，设每米断面内的点数为 $N_{Pt}$，最小点数为 $N_{Pt}^{\min}$，推荐点数为 $N_{Pt}^{\text{opt}}$。在边缘区域，对于长度为 $d$ 的断面，其包含的点数为：

$$N_{Pt}^{d} = 2\pi R d \rho_L \tag{7}$$

分断面下采样的步骤为：当断面内点数小于 $dN_{Pt}^{\min}$ 时，建议不取该断面计算；当断面内点数小于 $dN_{Pt}^{\text{opt}}$ 且大于 $dN_{Pt}^{\min}$ 时，不进行下采样；否则，下采样至 $dN_{Pt}^{\text{opt}}$ 点。$N_{Pt}^{\min}$ 和 $N_{Pt}^{\text{opt}}$ 均由后续实验给出。

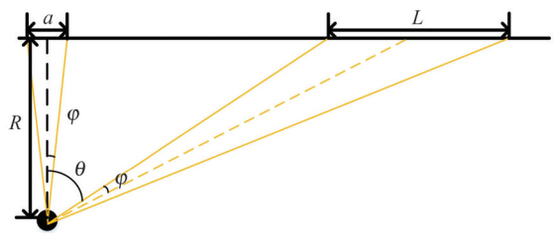



图 5　扫描角度影响测点距离

Fig. 5　Relationship Between Scanning Angle and Ranging

### 1.4　截面点云快速投影

要进一步进行超欠挖检测，需要将符合要求的空间点云投影到隧道轴向垂线所在的平面 $X'OY'$，断面投影过程如图 6 所示。以该目标里程的中线点为原点，分别计算点到轴线的距离和 $Z$ 方向的距离，可以避免复杂坐标转换，直接得到投影截面结果，将断面截取从秒级[19]提示至亚毫秒级，计算式为：

$$\begin{cases} x'_{i,j} = \dfrac{\sqrt{\left(-1/k_{i,i+1}\right)X'_j - Y'_j + b_{i,i+1}}}{\left|1 + \left(-1/k_{i,i+1}\right)^2\right|} \\ y'_{i,j} = Z'_j - Z_{CP_{\text{center}}} \end{cases} \tag{8}$$

式中，$b_{i,i+1}$ 是中线点所在直线的截距；$CP_{\text{center}}$ 是该里程处的中线点；$j$ 是落在该截面内的实际测量点的点号；$(X'_j, Y'_j, Z'_j)$ 是对应点号的实际测量点坐标。

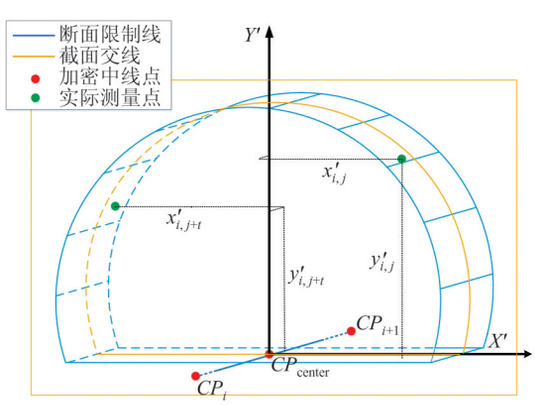



图 6　任意里程处断面投影

Fig. 6　Section Projection at Any Mileage

### 1.5　断面非隧道壁结构噪声剔除

传统基于圆柱或椭圆柱拟合[20-22]的隧道点云滤波方法以设计断面为依据，剔除拟合后不满足距离条件的点。但在隧道建设过程中，尤其是开挖、初支阶段，隧道壁本身存在很大变化，这类方法容易将超欠挖部分当作噪声剔除。本文利

用截面点云连续性,在设计断面辅助下对非隧道壁结构噪声进行剔除,能够尽可能地还原真实情况。

断面噪声剔除原理如图7所示。以原点为极点,建立用于滤波的极坐标系。将设计断面与当前断面在该坐标系下显示,任给定一个角度$\gamma$,在其$\partial$邻域内均有对应的设计点集与实测点集。正常情况下,设计点与实测点到极点的距离应较为接近,且作为隧道壁的实测点,应当具备连续性。

首先,分别计算同一角度下设计点和实测点到极点的距离,比较二者距离,筛选出距离差大于阈值$\varepsilon$的点,剔除测量过程中的非隧道壁结构(图7中①区域)。然后,使用局部随机采样一致性(random sample consensus, RANSAC)圆拟合方法,对该范围的实测点和设计点进行拟合,对比二者的半径,若计算半径差小于阈值$\varepsilon$,则说明该段点云与设计断面一致,可以进一步缩小该段的阈值$\varepsilon$以剔除离群点(图7中②区域);若计算半径差大于阈值,则说明该段出现了较大的误差,需要经统计滤波去除离群点后,保留其用于超欠挖计算(图7中③区域)。

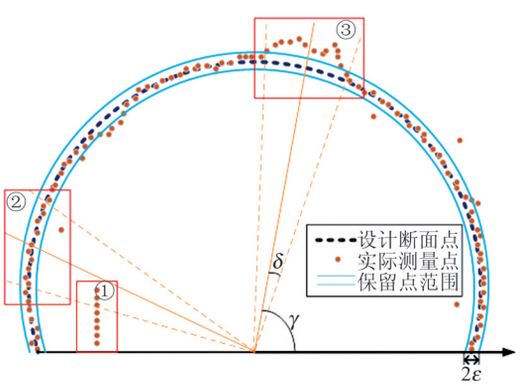



图7 断面噪声剔除示意图

Fig. 7 Diagram of Section Noise Elimination

## 2 超欠挖检测算法

### 2.1 隧道超欠挖检测

依据设计断面与实测断面之间的关系可以计算超欠挖结果[23]。在实际施工过程中,对隧道工程建设影响最大的是欠挖现象,因此本文基于点到极点的距离赋权,获得用于计算的断面点。

在断面的任一角度范围内,计算滤波后的实测断面点到极点的距离,减去最小距离后计算反距离权值,计算式为:

$$p_i=(d_i-d_{\min})^{-m}\Big/\sum_{i=1}^{n}(d_i-d_{\min})^{-m} \tag{9}$$

式中,$i$是该角度范围内对应点下标;$p_i$为反距离权值,$\sum_{i=1}^{n}p_i=1$;$m$是指数值;$n$是对应点个数;$d_{\min}$是最小距离;$d_i$是实测距离。此处超欠挖值的计算式为:

$$D=\sum_{i=1}^{n}p_id_i-d_{\text{design}} \tag{10}$$

式中,$d_{\text{design}}$是设计断面对应角度点到极点的距离。

按一定里程间隔$I$连续取断面、每个断面划分为$\Lambda$个扇形,,则超欠挖方量计算式为:

$$V=\sum_{t=1}^{M}\sum_{s=1}^{\Lambda}\left(\sum_{i=1}^{n}(p_id_i-d_{\text{design}})\cdot I\right) \tag{11}$$

其中,$M$是$\Delta$长度下、以$I$为间隔截取的截面个数,$M=\Delta/I$。$I$和$\Lambda$的取值越小,计算精度越高、速度越慢。

### 2.2 超欠挖结果可视化模型生成

通过超欠挖结果点云构建不规则三角网(triangulated irregular network, TIN),进行三维模型生成与可视化,能够直观地反映超欠挖结果。参与计算的点云包含位置信息和超欠挖信息$(X_i, Y_i, Z_i, D_i)$,构成超欠挖结果点云。通过位置信息构建不规则三角网,生成三维模型;使用超欠挖结果信息生成色带,对相应位置进行渲染,能够得到表征隧道超欠挖结果的三维模型。

## 3 实验与分析

### 3.1 实验数据

本文以广西壮族自治区南湛高速某条正在建设的隧道为实验场景,获取了该隧道左洞的三维点云数据。测量现场如图8所示,其中图8(a)为初支阶段,图8(b)为二衬阶段,图8(b)按里程由小到大为正方向,隧道右侧存在一条输气管道,左侧存在过爆导致的超挖。由于仍处于施工状态,存在大量非隧道壁点云、噪声点。

使用Faro公司生产的某激光扫描仪进行扫描,其扫描参数如表1所示,每站扫描范围12~15 m,共计扫描12站,获得点云数据5.75 GB。设置间隔初值为2 m获取隧道中线点,将计算得到的中线和中线微元垂线簇可视化。图9为扫描得到的40 m里程范围内3站扫描数据配准拼接得到的结果。根据中线划分断面点云,不同截面被赋予不同颜色,黑色框即为§1.1中的外包矩形,红色虚线为过中线点的中线微元垂线簇。

由扫描仪参数和§1.3分析可知,隧道点云中间区域每米理论上能测得458.37万点,密度远

大于计算超欠挖的最低要求。进行超欠挖计算时,一般设置断面长度为 0.05 m,对 $N_{Pt}$ 取不同值时,断面点云结果如图 10 所示。分析提取到 20 个断面,对截取断面内实际平均点数、每 1°平均点数、隧道壁连续情况进行统计,对应分析见表 2。



(a) 初支测量现场　　(b) 二衬测量现场

图 8　数据采集现场

Fig. 8　Photos of Data Acquisition

**表 1　扫描仪主要参数**

Table 1　Main Parameters of Scanner

| 技术指标 | 参数 |
|---|---|
| 数据获取速度/($10^4$点·$s^{-1}$) | 97.6 |
| 扫描距离/m | 0.6～350 |
| 测距精度/mm | ±1 |
| 视场 | 300°×360° |
| 测角精度/(°) | 0.015 |

为保证超欠挖计算的准确性,需要断面内点云投影后的隧道壁结构尽量完整,综合隧道壁结构连续性、点云完整性结果,当 $N_{Pt}\geqslant 25\,000$ 时,下采样后的点云能够用于后续计算,但仍存在部分区域不完整;当 $N_{Pt}\geqslant 40\,000$ 时,下采样结果基本一致,得到的点云能够保证超欠挖计算顺利进行。因此,建议取 $N_{Pt}^{\min}=25\,000$,$N_{Pt}^{\mathrm{opt}}=40\,000$。

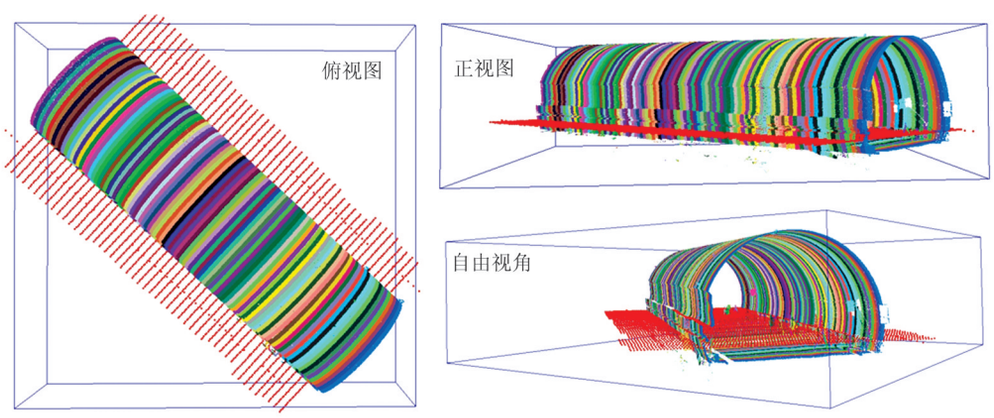



图 9　截面点云、外包矩形和中线微元垂线簇

Fig. 9　Section Point Clouds, Wrapped Rectangle and Axis Perpendicular Cluster

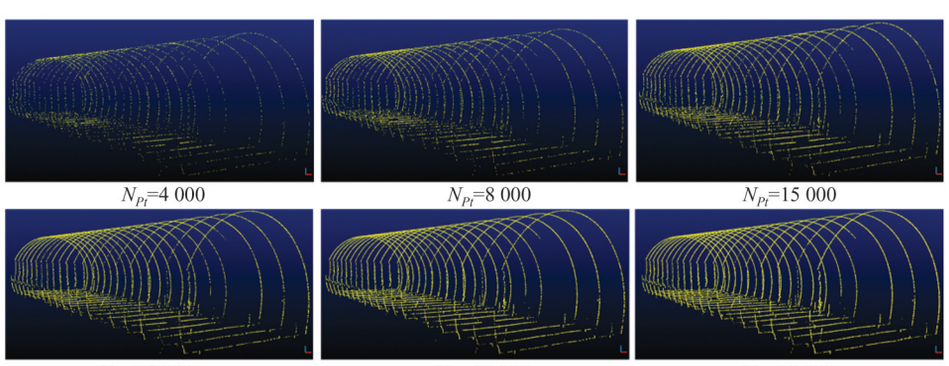



图 10　每米不同点数对应的断面截取效果

Fig. 10　Section Interception Effect Corresponding to Different Points Per Meter

**表2 每米不同点数对应的断面截取结果定量分析**

Table 2 Analysis of Section Interception Results Corresponding to Different Points Per Meter

| 每米点数 | 截面内实际平均点数 | 每1°平均点数 | 隧道壁结构不连续平均次数 | 隧道壁结构完整性 | 是否能用于超欠挖计算 |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 000 | 191.95 | 0.53 | ＞15 | 不完整 | 否 |
| 8 000 | 388.61 | 1.08 | ＞15 | 不完整 | 否 |
| 15 000 | 739.83 | 2.06 | 7.27 | 较完整 | 是,但不建议 |
| 25 000 | 1 226.90 | 3.41 | 3.54 | 较完整 | 是,一般建议 |
| 40 000 | 1 946.58 | 5.41 | 1.98 | 完整 | 是,建议取值 |
| 60 000 | 2 923.03 | 8.12 | 1.35 | 完整 | 是,密度偏大 |

### 3.2 隧道断面超欠挖结果

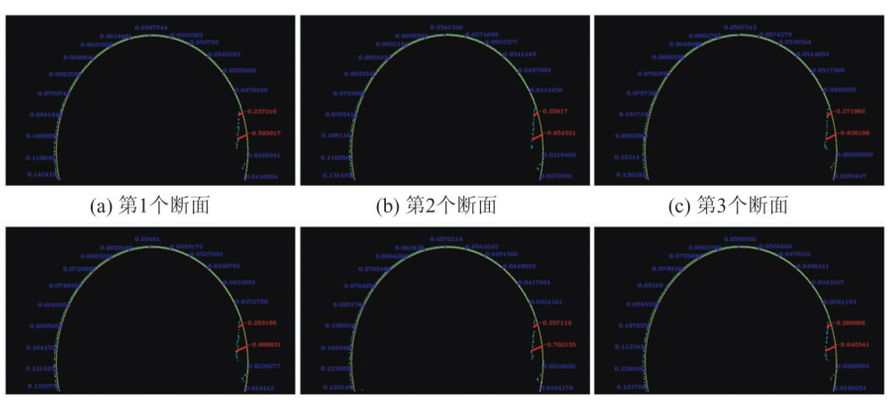
根据施工要求,对隧道点云按里程增大方向,每隔1 m截取断面,断面厚度为0.05 m,共得到39个符合要求的断面。实验区间数据详情、配准用时、断面提取用时和超欠挖计算用时见表3。

图11是不同里程处连续6个断面的超欠挖计算结果,其中右侧是隧道内输气管道。在第3个断面,即图11(c)里程处,使用全站仪测量该断面的超欠挖值,逐点测量和本文算法结果对比见表4,该断面的观测值中误差为0.69 mm。

**表3 数据详情及处理时间**

Table 3 Data Details and Processing Time

| 评价指标 | 参数结果 |
|---|---|
| 点云数目 | 92 803 943 |
| 配准耗时/s | 27.83 |
| 格式转换耗时/s | 178.51 |
| 断面提取耗时/s | 39.27 |
| 超欠挖计算耗时/s | 1.53 |



(a) 第1个断面 (b) 第2个断面 (c) 第3个断面

(d) 第4个断面 (e) 第5个断面 (f) 第6个断面

图11 不同断面的超欠挖结果

Fig. 11 Result of Over-Under Break at Different Sections

**表4 第3个断面的超欠挖结果对比**

Table 4 Comparison Results at the Third Section

| 角度/(°) | 计算值/mm | 实测值/mm | 相对误差/mm |
|---|---|---|---|
| 45 | 44.75 | 43.97 | 0.78 |
| 60 | 51.41 | 51.68 | −0.27 |
| 90 | 56.75 | 56.23 | 0.52 |
| 120 | 66.66 | 67.73 | −1.07 |
| 135 | 74.47 | 75.10 | −0.63 |

使用相同设备连续测量上述6个断面的相同角度处超欠挖值,得到的实测结果中误差分别为0.83 mm、0.88 mm、0.69 mm、1.27 mm、0.96 mm、1.10 mm。在该里程范围内,本文所提超欠挖检测算法计算结果与实测值中误差为0.96 mm。

图12为最后生成的超欠挖结果三维模型。获取原始数据后,经过数据预处理、中线生成、断面截取与投影、超欠挖计算得到最终结果,耗时247.14 s,小于传统方法测量用时,且超欠挖计算结果与实测一致,证明本文算法能够实现在线解算,为施工人员提供即时、直观的超欠挖检测结果。

## 4 结 语

针对高密度三维激光扫描技术运用于隧道超欠挖检测,存在数据量大、计算效率低的问题,本文提出了一种现场解算超欠挖结果的算法。利用隧道设计文件先验信息,结合激光扫描仪获取的隧道点云及其包围盒,在顾及设计中线的前提下精确提取实际隧道中线,基于提取到的中线微元垂线簇获取隧道的连续断面;考虑三维激光扫描仪测量原理,对用于隧道超欠挖计算的激光

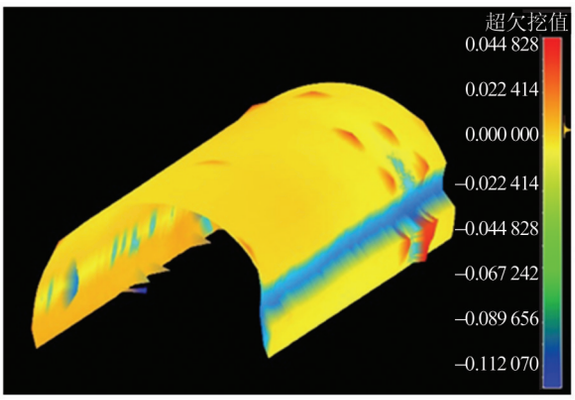



图 12　超欠挖三维模型

Fig. 12　3D Model of Over-Under Break

点云最优密度进行探究,实现下采样参数的优化,兼顾效率与精度;将隧道断面内点云投影至平面,通过局部拟合和相邻点连续性判别,剔除非隧道壁结构点;考虑到欠挖对隧道开挖的影响更大,采用基于内轮廓的反距离加权方法计算超欠挖结果。

实验结果表明,本文方法在总长度为 40 m 的在建隧道中,数据配准拼接、计算耗时 247.14 s,超欠挖计算结果与全站仪实测值的相对中误差为 0.96 mm,满足测量精度要求。相比于传统测量方法,能够实现高密度、全断面、精细化的隧道超欠挖检测。本文方法计算复杂度较低,单断面超欠挖结果计算精度高、速度快,但超欠挖体积计算精度取决于截面间距,今后应从高效、高精度三维建模角度探究更优的超欠挖体积计算方法。

## 参　考　文　献

[1] 陈林, 葛坤龙, 王涛. 基于盾构隧道环缝点云的中轴线提取方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 73-78.
CHEN Lin, GE Kunlong, WANG Tao. Central Axis Extraction Method of Shield Tunnel Based on Ring Seam Point Cloud[J]. *Journal of Hohai University* (*Natural Sciences*), 2020, 48(1): 73-78.

[2] 程云建, 仇文革, 雷劲. 基于三维点云的隧道全局中线提取方法及应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(9): 146-150.
CHENG Yunjian, QIU Wenge, LEI Jin. Application of Method for Global Extraction of Tunnel Centerlines Based on 3D Point Clouds[J]. *Journal of Hunan University* (*Natural Sciences*), 2017, 44(9): 146-150.

[3] 程效军, 贾东峰, 刘燕萍, 等. 基于中轴线的隧道点云去噪算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(8): 1239-1245.
CHENG Xiaojun, JIA Dongfeng, LIU Yanping, et al. Tunnel Point Cloud Denoising Algorithm Based on Centerline [J]. *Journal of Tongji University* (*Natural Science*), 2015, 43(8): 1239-1245.

[4] 徐飞, 田茂义, 俞家勇, 等. 基于隧道水平中线的全局断面提取及形变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2296-2307.
XU Fei, TIAN Maoyi, YU Jiayong, et al. Global Cross Section Extraction and Deformation Analysis of Tunnels Based on Their Horizontal Centerlines [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(11): 2296-2307.

[5] 李双. 基于三维激光扫描技术的隧道连续断面提取及变形分析[D]. 西安: 长安大学, 2015.
LI Shuang. Extraction and Deformation Analysis of Tunnel Continuous Section Based on Three-Dimensional Laser Scanning Technology [D]. Xi' an: Chang'an University, 2015.

[6] HAN S, CHO H, KIM S, et al. Automated and Efficient Method for Extraction of Tunnel Cross Sections Using Terrestrial Laser Scanned Data [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2013, 27(3): 274-281.

[7] 王涛, 田林亚, 侯建梅, 等. 点云格网化滤波方法及其在隧道变形监测中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 451-457.
WANG Tao, TIAN Linya, HOU Jianmei, et al. Method of the Point Clouds Filtering by Grid Handling and Its Application in the Deformation Monitoring of Tunnel[J]. *Journal of Hohai University* (*Natural Sciences*), 2018, 46(5): 451-457.

[8] 谢雄耀, 卢晓智, 田海洋, 等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2214-2224.
XIE Xiongyao, LU Xiaozhi, TIAN Haiyang, et al. Development of a Modeling Method for Monitoring Tunnel Deformation Based on Terrestrial 3D Laser Scanning [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(11): 2214-2224.

[9] XIE X Y, LU X Z. Development of a 3D Modeling Algorithm for Tunnel Deformation Monitoring Based on Terrestrial Laser Scanning [J]. *Underground Space*, 2017, 2(1): 16-29.

[10] 史玉峰,张俊,张迎亚. 基于地面三维激光扫描技术的隧道安全监测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013,43(S2):246-249.
SHI Yufeng, ZHANG Jun, ZHANG Yingya. Tunnel Safety Monitoring Based on Terrestrial Laser Scanning Technology[J]. *Journal of Southeast University* : *Natural Science Edition*, 2013, 43(S2):

246-249..

[11] 李理,卢小平,朱宁宁,等. 基于激光点云的隧道断面连续提取与形变分析方法[J]. 测绘学报,2015,44(9):1056-1062.
LI Cheng, LU Xiaoping, ZHU Ningning, et al. Continuously Extracting Section and Deformation Analysis for Subway Tunnel Based on LiDAR Points [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(9): 1056-1062.

[12] 许磊,王长进. 基于激光点云的隧道超欠挖检测方法研究[J]. 铁道工程学报,2016,33(12):77-81.
XU Lei, WANG Changjin. Research on the Detection Method of Tunnel Under-over Break Using Point Cloud [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2016, 33(12): 77-81.

[13] 李徐然,施富强,廖学燕. 基于激光点云的隧道超欠挖自动计算方法研究[J]. 工程爆破,2017,23(6):17-21.
LI Xuran, SHI Fuqiang, LIAO Xueyan. Research on Automatic Calculation Method of Tunnel Over-Under Excavation Based on Point Clouds[J]. *Engineering Blasting*, 2017, 23(6): 17-21.

[14] 葛超,郑顺义,桂力,等. 激光点云和图像处理技术在隧道超欠挖检测中的应用研究[J]. 测绘地理信息,2020,45(1):101-106.
GE Chao, ZHENG Shunyi, GUI Li, et al. Research on the Application of Laser Point Cloud and Image Processing Technology in Overbreak and Underbreak Detection of Tunnel[J]. *Journal of Geomatics*, 2020, 45(1): 101-106.

[15] 阳军生,张宇,祝志恒,等. 基于图像三维重建的隧道超欠挖检测方法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(3):714-723.
YANG Junsheng, ZHANG Yu, ZHU Zhiheng, et al. Study on Tunnel Under-over Break Detection Method Based on Three-Dimensional Image Reconstruction Technology[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(3): 714-723.

[16] 张豪,谢明君,韦征,等. 基于隧道点云数据的超欠挖检测应用研究[J]. 浙江工业大学学报,2021,49(5):539-545.
ZHANG Hao, XIE Mingjun, WEI Zheng, et al. Research on Application of Overbreak-Underbreak Detection Based on Tunnel Point Cloud Data[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2021, 49(5): 539-545.

[17] 韦征,周臻,俞旻韬,等. 基于三维激光扫描点云整体分析的铁路隧道超欠挖检测方法[J]. 铁道学报,2023,45(1):135-140.
WEI Zheng, ZHOU Zhen, YU Mintao, et al. Research on Detection Method for Tunnel Underbreak and Overbreak Based on 3D Laser Scanning Point Cloud Integral Analysis[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(1): 135-140.

[18] 李海波,杨兴国,赵伟,等. 基于三维激光扫描的隧洞开挖衬砌质量检测技术及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(S1):3456-3463.
LI Haibo, YANG Xingguo, ZHAO Wei, et al. Measurement Technology and Its Application for Tunnel Excavation and Lining Quality Based on 3D Laser Scanning[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(S1): 3456-3463.

[19] 托雷,康志忠,谢远成,等. 利用三维点云数据的地铁隧道断面连续截取方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2013,38(2):171-175.
TUO Lei, KANG Zhizhong, XIE Yuancheng, et al. Continuously Vertical Section Abstraction for Deformation Monitoring of Subway Tunnel Based on Terrestrial Point Clouds[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(2): 171-175.

[20] 卢小平,朱宁宁,禄丰年. 基于椭圆柱面模型的隧道点云滤波方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2016,41(11):1476-1482.
LU Xiaoping, ZHU Ningning, LU Fengnian. An Elliptic Cylindrical Model for Tunnel Filtering[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(11): 1476-1482.

[21] JIANG Q, SHI Y G, YAN F, et al. Reconstitution Method for Tunnel Spatiotemporal Deformation Based on 3D Laser Scanning Technology and Corresponding Instability Warning [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 125: 105391.

[22] 荆海峰,李广云,王力,等. 基于圆柱多段拟合的隧道中轴线提取方法研究[J]. 大地测量与地球动力学,2018,38(2):211-215.
JING Haifeng, LI Guangyun, WANG Li, et al. Research on Extracting Central Axis of Tunnel Based on Multi-Segment Cylinder Fitting[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(2): 211-215.

[23] 李瑶,禚一,吴勇生,等. 基于三维激光扫描技术的超欠挖算法在隧道开挖中的应用[J]. 铁道标准设计,2021,65(10):200-204.
LI Yao, ZHUO Yi, WU Yongsheng, et al. Application of Over-Under-Cut Algorithm in Tunnel Excavation Based on 3D Laser Scanning Technology [J]. *Railway Standard Design*, 2021, 65(10): 200-204.