

基于三维激光扫描技术的地铁隧道椭圆度快速检测方法*

袁 辉

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//工程师)

摘 要 在地铁隧道变形监测中,利用三维激光扫描技术可以简单、快速、实时地获取高精度的点云数据,用于隧道工程结构分析。针对海量的隧道点云数据,提出了隧道椭圆度检测的高精度、高性能解决方案。首先将隧道点云数据导入数据库中存储管理并建立索引;然后通过并行计算,快速地对断面点云进行自动化去噪、断面椭圆拟合与参数提取等处理。试验结果表明,该检测方案在具有高精度的同时也具有很高的计算性能,适用于海量隧道点云的处理分析。

关键词 地铁隧道;断面结构;海量点云;椭圆拟合

中图分类号 U456.3⁺¹

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.07.043

Rapid Detection Method of Subway Tunnel Ellipticity Based on 3D Laser Scanning Technology

YUAN Hui

Abstract In deformation monitoring of subway tunnels, 3D laser scanning technology could obtain the high-precision point cloud data in a simple, fast and real-time way, and use the data for tunnel engineering structure analysis. A solution with high-precision and high computational performance is proposed for tunnel ellipticity detection according to the massive point cloud data. Firstly, the tunnel point cloud data is imported into the database for storage management and index construction; then, through parallel computation, rapid process actions including automatic denoising, ellipse fitting and parameter extraction for section point cloud is conducted. Experiment results show that the proposed detection solution has the advantages of high-precision and high computational performance for the analysis of massive tunnel point cloud.

Key words subway tunnel; section structure; massive point cloud data; ellipse fitting

Author's address China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

隧道工程受周边环境限制,以及不良地质条件、施工技术、地铁列车运行震动等影响存在大量的安全风险,在地铁施工和运营维护过程中,隧道工程结构的变形检测是一项极其重要的工作^[1]。常规的隧道变形监测方法有精密水准测量、全站仪测量、测量机器人测量等,但这些监测方法速度慢、人力要求高、费时费力,同时测点也很离散和稀疏,不能反映隧道断面的整体形变情况^[2]。三维激光扫描技术是一种非接触、快速度、高精度和高密度测量数据获取技术,是隧道工程结构检测的一种发展趋势^[3-6]。文献[4]提出了基于点云数据的圆形隧道的中心提取、环片划分、点云去噪、断面建模等处理方法;文献[7]实现了从隧道点云中自动提取中线并拟合断面椭圆,文献[8-11]对断面点云自动化去噪和椭圆拟合进行了算法改进与研究。以上方法主要侧重于对断面椭圆拟合精度的提升,而没有对海量的隧道点云如何进行高效组织管理与计算进行讨论。

本文针对海量的隧道点云数据,提出了隧道椭圆度检测的高精度、高性能解决方案。首先将隧道点云导入数据库中存储管理并建立索引;然后通过并行计算,快速地对提取的断面点云进行自动化去噪、断面椭圆拟合与参数提取等处理。该方案适用于海量隧道点云的结构检测分析应用。

1 地铁隧道断面结构检测技术流程

对于采用盾构法施工的圆形地铁隧道,其断面在设计施工时为圆形,但在外力作用后会变形为离心率很小的椭圆^[2,12],因此本文中将隧道断面拟合为椭圆。本文提出的基于三维激光扫描技术的地铁隧道椭圆度检测技术的流程如图1所示。其中:

* 中铁第四勘察设计院集团有限公司科研课题(2020D086;2019D082;2019K095)

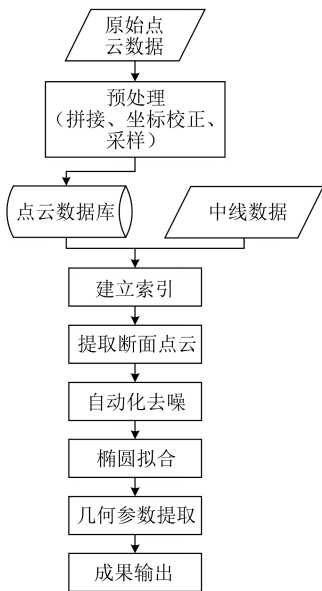


图 1 地铁隧道断面结构检测技术流程图

- 1) 预处理。对采集的原始点云数据进行预处理,包括数据拼接、坐标校正、重采样等处理。预处理通常在三维激光扫描仪配套的处理软件中完成。
- 2) 数据入库。根据线路中线数据计算预处理完成点云数据各点的里程值,并将其导入服务器的数据库中存储,建立点云数据的里程索引结构。
- 3) 断面几何参数提取。客户机从服务器中提取断面点云数据,进行自动化去噪、椭圆拟合、几何参数提取等处理,最后输出成果。

2 地铁隧道断面结构检测实施方案

2.1 海量隧道点云的高效存储组织管理

地铁隧道断面通常按里程划分,进行隧道断面结构检测首先要从隧道点云中提取对应里程上的点云数据。地铁隧道点云数据通常以文本格式存储,例如.las、.xyz 格式,这种文本存储方式的访问速度慢、查询效率低。为了从海量点云中快速查询指定位置的点数据,通常建立 3 维 KD-Tree^[13] 或者八叉树 Octree^[14] 等索引结构,然而这些索引是以三维的 (x,y,z) 点进行检索,不适合以里程为索引的线状交通应用,并且索引计算耗时多、存储空间大。

线性参考系统 (Linear Referencing System, LRS),是一种利用沿着可测量的线要素的相对方位来存储地理位置的方法,例如地铁线路按距离起点的里程定位。本文基于 LRS,根据线路中线计算点云中每个点的里程值 M,同时将点的 (x,y,z) 坐标存储到数据库中,并针对里程值 M 字段建立索引结

构。通过数据库存储管理,再加之有索引结构,因而数据的访问速度快、查询效率高,同时也能进行多用户高效并发读写,适合多客户机进行并行计算。

受到点云密度的影响,隧道断面的点云通常需要截取一定的厚度,以保证有足够数量的点用于后续处理。对于数据库中的海量点云数据,可以简单快速地查询到断面对应里程上的点云数据。例如,查询里程值为 M' 处、厚度为 δ 的点云数据只需通过以下 SQL 语句:

```
select [x], [y], [z]
from [TableName]
where [M] >= M' - δ/2 and [M] <= M' + δ/2
```

(1)

相比以文本格式存储的点云数据,通过 SQL 语句查询的数据库存储方式无需计算点到断面平面的距离进行逐点筛选,实现快捷方便,断面点云获取效率高。按给定里程提取隧道断面点云的提取结果如图 2 所示。

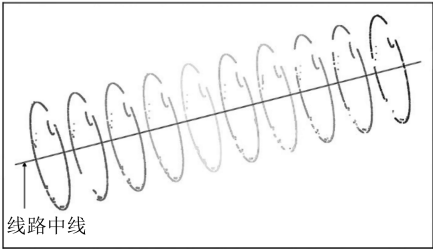


图 2 隧道断面点云提取结果

在各断面平面上建立局部平面坐标系,通过坐标转换将三维断面点云转换到二维平面上,具体坐标变换方法参考文献[1]。断面局部平面坐标系下断面点云如图 3 所示,其中线路中线点为断面局部平面坐标系的原点。

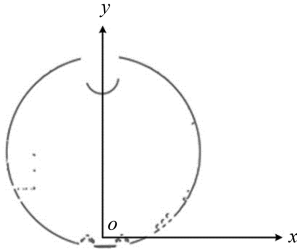


图 3 断面点云平面显示

2.2 隧道断面点云的自动化去噪与椭圆拟合

在二维平面空间中椭圆的拟合参数有 5 个,分别为中心坐标 (x_c, y_c)、长半轴 a、短半轴 b 和旋转角度 α (见图 4)。本文对平面离散点拟合椭圆采用

正交最小二乘算法。其算法实现参见文献[15]。

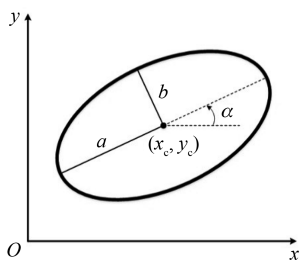


图4 椭圆拟合参数

对图3中断面点云直接用正交最小二乘算法拟合椭圆结果如图5所示。从图5可见,由于受到非隧道轮廓的噪声点云影响,直接拟合的结果与实际隧道轮廓有很大偏差,因此隧道点云拟合前必须进行去噪处理,否则无法得到正确结果。

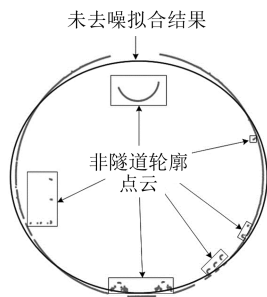


图5 断面点云直接拟合椭圆结果

为了对断面上的点云进行自动化去噪并拟合,本文采用RANSAC(RANdom Sample Consensus)算法^[16],即随机抽样一致性算法。该算法是根据一组包含异常数据的样本数据集,计算出数据的数学模型参数,得到有效样本数据的算法。

基于RANSAC算法的隧道断面椭圆拟合的输入参数有断面平面点云 P 、拟合椭圆的距离阈值 ω 、拟合椭圆的点数比例 λ 、迭代次数 k ,拟合结果椭圆为 E_{best} ,参与拟合椭圆 E_{best} 的点数量为 n_{best} ,详细的椭圆拟合过程如下:

步骤1:从断面平面点云 P 中随机选取5个点,计算当前椭圆 E_c 。

步骤2:计算点云集合 P 中各点 $p_i \in P$ 到椭圆 E_c 的距离 d_i ,选取距离在阈值 ω 范围内的点集合 $P_\omega = \{p_i | p_i \in P \wedge d_i \leq \omega\}$ 。

步骤3:如果 $|P_\omega| < \lambda |P|$,转到步骤5,其中 $|P|$ 是点云 P 中点的个数, $|P_\omega|$ 是点云集合 P_ω 中点的个数;如果 $|P_\omega| \geq \lambda |P|$,对 P_ω 中的点采用正交最小二乘算法拟合椭圆 E_{better} 。

步骤4:如果 $|P_\omega| > n_{best}$, $E_{best} = E_{better}$, $n_{best} =$

$|P_\omega|$ 。

步骤5:如果达到迭代次数 k ,输出结果椭圆 E_{best} 并停止;否则重复步骤1~5。

基于RANSAC算法对图3中断面点云拟合椭圆结果如图6所示。与图5对比可以看出,基于RANSAC算法可以有效过滤非断面轮廓点云,具有很好的拟合效果。基于拟合的断面椭圆,根据需求计算长轴、短轴、中心坐标、椭圆度、水平轴、竖直轴等几何参数信息,用于断面结构形变分析。

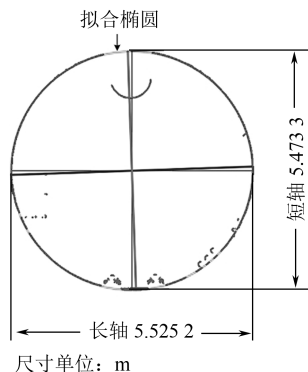


图6 断面椭圆拟合结果

2.3 高性能并行处理实施方案

由于隧道点云数据量大,如何进行数据的快速处理也成为一个问题。本文针对海量的隧道点云数据,设计了高性能计算处理方案:首先,本文将海量点云数据部署到服务器上的数据库中,数据库支持多用户并发访问,客户机通过网络访问服务器上点云数据进行断面结构检测分析,可以有效地进行并行处理计算;其次,每台客户机通常具有多核CPU(中央处理器),设计并行处理算法充分利用客户机上的CPU计算资源,进一步提高并行处理能力。

本文提出的海量隧道点云高性能计算方案具有以下优点:

1) 并行计算能力强。利用多客户机并行处理,同时每台客户机使用多核CPU再进一步并行计算,处理效率高。

2) 数据冗余小,访问效率高。隧道点云数据只需要部署到服务器上的数据库中,客户机无需再安装数据库环境;另一方面,通过数据库管理点云数据并建立索引,可以高效率地进行多用户并发访问。

3) 可扩展性强。可以根据点云数据处理需求增减客户机的数量以及客户机使用的CPU数量,扩展方便。

3 地铁隧道断面结构检测方案试验验证

为了验证本文提出的地铁隧道断面结构检测方案的有效性,开发了隧道断面结构检测原型软件,该软件界面如图 7 所示。原型软件在客户机上运行,包括服务器设置、数据输入、拟合参数设置、结果输出 4 个部分:服务器配置为 4 核 Intel Core i7 3.4 GHz CPU,8 GB 内存,Windows 7 (64 位)操作



图 7 隧道椭圆度检测原型系统界面

系统,数据库平台为 SQL Server 2012。客户机有 4 台,配置皆为 4 核 Intel Core i7 3.4 GHz CPU,8 GB 内存,Windows 7 (64 位)操作系统。本文的计算性能试验中,运行时间均为运行 5 次的平均时间。

3.1 精度分析

为了评价本文提出的基于点云数据的隧道断面拟合算法的拟合精度,与全站仪测量的处理结果进行对比,评价指标有以下 2 个:

1) 平均绝对误差 ε_{MAE} :

$$\varepsilon_{\text{MAE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y'_i| \tag{2}$$

式中:

- y_i ——本文拟合结果;
- y'_i ——全站仪数据处理结果;
- n ——断面数量。

2) 均方根误差 $\varepsilon_{\text{RMSE}}$,是计算值与真实值偏差的平方与观测次数比值的平方根:

$$\varepsilon_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \tag{3}$$

试验隧道为武汉地铁 8 号线宏图大道站—塔子湖站区间,点云数据由徕卡 P50 三维激光扫描仪采集,经预处理重采样后点云密度为 2 cm。对比结果

为徕卡 TS50 全站仪采集数据处理结果,断面总数 107 个。在本文拟合算法中点云截取厚度 $\delta=2\text{ cm}$,迭代次数 $k=1\ 000$ 次,拟合椭圆的距离阈值 $\omega=2\text{ cm}$,拟合椭圆的点数比例 $\lambda=0.4$,拟合椭圆的长轴和短轴的精度结果如表 1 所示。

表 1 椭圆拟合精度评价

| 精度指标 | $\varepsilon_{\text{MAE}}/\text{mm}$ | $\varepsilon_{\text{RMSE}}/\text{mm}$ |
|------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 长轴精度 | 0.54 | 0.86 |
| 短轴精度 | 1.39 | 1.96 |

从表 1 可以看出,拟合的断面椭圆的长轴和短轴的平均绝对误差值较小,均方根误差值也较小,因此,基于点云的隧道结构工程检测方法能够满足实际生产的精度需求。

3.2 性能分析

为了评价本文提出的用数据库存储隧道点云数据的存储查询性能,同文本.xyz 格式存储的点云数据进行对比。试验隧道为武汉地铁 5 号线新生路站—三角路站区间,点云数据由徕卡 P50 三维激光扫描仪采集,采集的隧道长度为 510 m,点云预处理后重采样密度为 3 cm,点数 3 140 万个,断面截取间隔为 1 m,截取厚度 $\delta=2\text{ cm}$,断面点云的存储查询性能结果如表 2 所示。

表 2 存储查询性能分析

| 存储方式 | 格式 | 存储空间/GB | 索引空间/GB | 平均查询时间/s |
|------|-----------------|---------|---------|----------|
| 文本 | .xyz | 1.13 | | 23.82 |
| 数据库 | SQL Server 2012 | 1.21 | 0.65 | 0.01 |

从表 2 可以看出,包含 3 140 万个点的隧道点云数据采用.xyz 文本格式存储需要 1.13 GB 的存储空间,在 SQL Server 2012 数据库中存储同样的点云数据需要 1.21 GB 的存储空间,同时也还需要 0.65 GB 的索引空间,比文本格式存储要多 64.4% 的存储空间。但是,基于文本存储方式的断面点云平均查询时间为 23.82 s,而基于 SQL Server 2012 的断面点云平均查询时间仅需 0.01 s,查询效率提升极大。如果点云数据量继续增大,文本存储方式的查询时间将随着数据量的增加也显著增加,而基于数据库存储方式的查询时间则增加很少,二者查询效率差异进一步加大。因此,本文提出的基于数据库存储隧道点云数据尽管增加了数据存储空间,但是极大地提高了数据查询效率。

在数据库存储隧道点云的基础上,对本文提出的高性能计算方案进行试验分析。试验隧道为穗

莞深城际铁路深圳机场北站—深圳机场站区间,长度 3.26 km。点云数据由徕卡 P40、P50 三维激光扫描仪共同采集,经预处理重采样后点云密度为 5 cm,点云 1 亿个,断面截取间隔为 1.6 m,断面总数为 2 037 个。在本文的拟合算法中,断面点云截取厚度 $\delta=3$ cm,迭代次数 $k=1\ 000$ 次,拟合椭圆的距离阈值 $\omega=2$ cm,拟合椭圆的点数比例 $\lambda=0.4$,隧道断面结构检测的计算性能如表 3 所示。

表 3 隧道断面结构检测计算性能

| 客户机数量/台 | 客户机 CPU 使用数量/个 | CPU 总数/个 | 计算时间/min |
|---------|----------------|----------|----------|
| 1 | 1 | 1 | 125.25 |
| 1 | 2 | 2 | 63.72 |
| 1 | 4 | 4 | 32.54 |
| 2 | 4 | 8 | 17.26 |
| 4 | 4 | 16 | 9.03 |

从表 3 可以看出,在使用 1 台客户机,客户机使用 1 个 CPU 进行处理时,处理时间为 125.25 min;将这 1 台客户机的 CPU 使用数量增加到 2 个时,处理时间降低到 63.72 min,计算时间减少 49.13%;进一步地将该台客户机的 4 个 CPU 全部使用,处理时间降到 32.54 min,计算时间进一步减少 48.93%,因此,利用客户机的多核 CPU 进行并行处理可以有效地提升计算性能。将客户机的数量增加到 2 台,每台客户机使用 4 个 CPU 进行处理,计算时间降低到 17.26 min;将 4 台客户机全部使用,每台客户机的 4 个 CPU 也全部使用,处理时间仅需 9.03 min,具有很高的计算性能。如果继续增加客户机的数量能够进一步降低数据处理时间。因此,本文提出的基于点云数据的隧道椭圆度检测处理方案能够高性能地处理海量的隧道点云数据。

4 结语

本文提出了基于隧道点云数据的隧道椭圆度分析的高精度、高性能解决方案。首先,将隧道点云导入数据库中存储管理并建立索引,实现了海量隧道点云的高效存储组织管理;其次,实现了基于 RANSAC 算法的断面点云自动化去噪并对隧道断面自动化拟合与参数提取;最后,实现了隧道椭圆度检测高性能并行处理实施方案,利用多台客户机及客户机的多核 CPU 进行高性能处理计算。验证了本文提出的隧道断面结构检测处理方案的有效性。试验结果表明,本文提出的方法具有高精度的

同时也具有很高的计算性能,适用于海量隧道点云的处理分析。在本文提出的隧道点云处理框架下,下一步可以进行限界分析、错台检测等应用分析,进一步发掘三维激光扫描数据的应用潜力。

参考文献

[1] 徐进军,王振华,李潇.地铁隧道点云断面拟合中的问题讨论[J].工程勘察,2019(1): 46.

[2] 黄帆,李维涛,侯阳飞,等.激光点云的隧道数据处理及形变分析[J].测绘科学,2019(5): 132.

[3] 尤相骏,成俊.一种真圆型隧道激光扫描断面变形检测新方法的研究[J].隧道建设,2017(7): 794.

[4] XIE X Y,ZHAO M R,HE J M,et al. Automatic and Visual Processing Method of Non-Contact Monitoring for Circular Storm-water Sewage Tunnels Based on LiDAR Data[J].Energies,2019(9): 1599.

[5] SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ A,RIVEIRO B,SOILÁN M,et al. Automated detection and decomposition of railway tunnels from mobile laser scanning datasets[J].Automation in Construction,2018,96: 171.

[6] LI J,WAN Y C,GAO X J.A new approach for subway tunnel deformation monitoring:high-resolution terrestrial laser scanning[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, XXXIX-B5: 223.

[7] ARASTOUNIA M.Automated as-built model generation of subway tunnels from mobile LiDAR data[J]. Sensors, 2016(9): 1486.

[8] 杜黎明,钟若飞,孙海丽,等.移动激光扫描技术下的隧道横断面提取及变形分析[J].测绘通报,2018(6): 61.

[9] 李维涛,黄帆,侯阳飞,等.三维激光扫描数据隧道断面椭圆拟合的数学模型探讨[J].工程勘察,2018(1): 61.

[10] 陈潇,王鑫森,俞雪薇.基于椭圆柱模型的隧道断面拟合算法研究[J].城市勘测,2018(5): 90.

[11] 托雷.基于三维激光扫描数据的地铁隧道变形监测[D].北京:中国地质大学,2012.

[12] 吴廷,侯阳飞,鲍金.基于三维激光点云的隧道中轴线及断面连续提取[J].测绘与空间地理信息,2018(11): 85.

[13] BROWN R A.Building a Balanced k-d Tree in $O(kn \log n)$ Time[J]. Journal of Computer Graphics Techniques, 2015(1): 50.

[14] MEAGHER D.Geometric modeling using octree encoding[J]. Computer Graphics and Image Processing,1982(2): 129.

[15] AHN S J, RAUH W, WARNECKE H J. Least-squares orthogonal distances fitting of circle, sphere, ellipse, hyperbola, and parabola[J].Pattern Recognition,2001(12): 2283.

(收稿日期:2019-06-24)