

文章编号:1001-5078(2024)09-01392-10

· 激光应用技术 ·

面向隧道变形检测研究的数字孪生方法

苏哲¹, 罗哉¹, 杨力², 江文松¹, 刘慧平³

(1. 中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 中国计量大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310018;
3. 诺基亚通信系统技术(北京)有限公司, 浙江 杭州 310051)

摘要:针对隧道变形慢、难以获得有效实验检测数据导致隧道变形检测技术研究受限的问题,本文提出一种面向隧道变形检测研究的数字孪生方法,建立高保真隧道孪生模型;通过有限元模拟隧道的变形情况,输出隧道孪生模型的变形真值;搭建虚拟仿真平台,实现在虚拟环境中对隧道模型的三维激光扫描,以获得大样本检测数据,辅助训练变形检测方法;变形检测采用 Geotransformer 神经网络实现隧道点云配准,通过拟合隧道中轴线获取隧道断面点云,实现隧道变形分析。实验结果表明,该方法有效克服隧道变形检测技术研究受实验场地限制等问题,隧道模型表面重建平均误差为 0.00253 mm,最大误差为 1.1325 mm,与有限元方法输出变形真值对比,变形检测平均误差小于 0.34 cm,验证该变形检测方法具备较高的准确性,基本满足工程需求。

关键词:测量;数字孪生;隧道变形检测;表面重建;有限元;激光点云

中图分类号:P232;TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.09.009

A digital twin approach for tunnel deformation detection

SU Zhe¹, LUO Zai¹, YANG Li², JIANG Wen-song¹, LIU Hui-ping³

(1. College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
3. Nokia Communication Systems Technology (Beijing) Co., LTD, Hangzhou 310051, China)

Abstract: To solve the problem of slow tunnel deformation and difficulty in obtaining effective experimental detection data leading to limited research on tunnel deformation detection technology, a digital twin method for tunnel deformation detection is proposed, and a high-fidelity tunnel twin model is established in this paper. The deformation of tunnel is simulated by finite element method, and the true value of tunnel twin model is obtained. A virtual simulation platform is built to realize the three-dimensional laser scanning of tunnel models in a virtual environment to obtain large sample detection data and assist in training deformation detection methods. In deformation detection, Geotransformer neural network is used to realize tunnel point cloud registration, and tunnel section point cloud is obtained by fitting tunnel central axis to realize tunnel deformation analysis. Experimental results show that the proposed method can effectively overcome the problem of tunnel deformation detection technology research limited by experimental sites. The average error of tunnel model surface reconstruction is 0.00253 mm and the maximum error is 1.1325 mm. Compared with the true value of deformation output by finite element method, the average error of deformation detection is less

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2022YFF0705704);国家市场监督管理总局技术保障专项项目(No. 2023YJ10)资助。

作者简介:苏哲(1999-),男,硕士,主要从事定位导航与建图、激光点云处理方面的研究。E-mail:1030272735@qq.com

通讯作者:罗哉(1979-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事定位导航与建图、视觉与激光测量、汽车零部件智能检测方法及装备的研究。E-mail:luozai@cjl.u.edu.cn

收稿日期:2023-11-16

than 0.34 cm. It is verified that the deformation detection method has high accuracy and basically meets the engineering requirements.

Keywords: measurement; digital twin; tunnel deformation detection; surface reconstruction; finite element; laser point cloud

1 引言

随着公路负荷量的激增和隧道运营时间的延长,如何快速地对既有隧道进行有效检测来保障运营安全愈发重要^[1]。由于隧道本身不易变形,隧道变形检测技术的发展受实验场地等因素制约,而利用数字孪生模拟隧道高保真模型在多场景下的变形情况,提高变形检测精度及泛化能力,节省人力物力。

传统隧道变形检测通常采用水准仪、收敛计等设备,工作效率低且检测覆盖性差,对操作人员技术要求较高^[2]。而三维激光扫描技术能够高密度、高分辨率、非接触地获取对象表面海量点云数据,在隧道安全检测领域成为研究的热点。Dela-loye 等^[3]研究了基于椭圆拟合的三维激光扫描隧道收敛变形的测量技术;Yasuda 等^[4]基于激光扫描技术,采用椭圆傅立叶分析估算圆形隧道的变形;Lukas 等^[5]利用三维激光扫描技术结合激光 SLAM 对地下隧道进行结构安全分析;Wang 等^[6]基于三维激光扫描技术对隧道连续断面提取进行变形分析;卢小平等^[7]利用中轴线提取隧道断面进行隧道变形分析;张慧等^[8]利用全局拼接及中轴线姿态对隧道进行变形分析;吴昌睿等^[9]通过圆柱拟合与空间投影对隧道横向变形进行检测;刘新根等^[10-11]基于三维扫描技术研制隧道结构变形检测车对隧道进行变形检测;张立朔等^[12]针对圆隧道提出基于残差 1 范最小的椭圆拟合与自适应阈值剔除粗差,断面采用分段圆弧进行变形分析。上述方法基于实际隧道开展研究,且对象均为圆隧道,无法对矩形隧道进行变形检测,且研究持续时间长,耗费大量人力物力。

数字孪生是充分利用物理模型等数据,集成多学科仿真过程,将数字孪生理念应用于工程实践能有效开展技术研究并提高研究方法的精度。田阔等^[13]基于数字孪生方法,利用数值模拟获得大样本仿真数据,完成结构静力试验监测方法的预训练,可准确监测结构的应力场变化,具有更高的全局和局部精度;李冬雪等^[14]通过数值模

拟获取不同工况下变压器损耗图谱,建立变压器数字孪生模型,从而实现变压器低碳优化方法的研究与验证;梁宏涛等^[15]以数字孪生为基础,建立风力发电机仿真数学模型,模拟多种情况导致风机故障的状况数据,辅助训练故障检测算法,提高检测算法的泛化能力;张超等^[16]融合数字孪生技术和混合试验技术,通过有限元方法模拟施工现场获得大量训练样本,完成近接工程建设荷载的数字孪生模型训练,能有效还原结构间的动态相互作用与既有地下结构损伤演化机制。上述研究均面临在现实中难以获得有效的实验检测数据,基于数字孪生理念,建立研究对象的数字孪生模型,获取大样本的仿真数据,实现对研究方法的训练,使方法获得更高的精度,这也为隧道变形检测方法研究提供新的思路。

针对隧道变形检测技术研究存在的问题,并结合数字孪生理念的应用现状,本文提出一种面向隧道变形检测研究的数字孪生方法,利用激光扫描逆向建立隧道孪生模型,结合有限元和数值模拟,分析不同场景下隧道变形情况,获取变形参考真值,针对隧道变形检测技术研究需求,搭建虚拟仿真环境,对变形前后的隧道模型进行激光扫描,建立变形检测实验样本集,实现对隧道变形检测方法的辅助训练,提高检测方法的精度及泛化能力。

2 隧道变形检测数字孪生框架

针对隧道变形缓慢,难以开展检测方法研究与验证等问题,基于数字孪生理念,搭建面向隧道变形检测研究的数字孪生框架。隧道数字孪生体通过数字化建模建立与隧道结构尺寸相对应的虚拟模型,首先在几何层面上对外观、尺寸等基本信息进行建模,主要应用三维激光扫描获取隧道内点云数据,将点云通过算法转化为网格和几何实体,逆向建立隧道几何模型。物理层面主要针对隧道各结构的材料参数、损伤特性、荷载作用等方面进行建模,主要应用 Abaqus 有限元软件建立物理模型,运用数值模拟方法分析隧道在不同场景下的变形情况,输出变形参考真值及变形后的隧道模型。基于 ROS/Gazebo

建立并集成了隧道模型、无人车和传感器模型的虚拟仿真环境,实现在虚拟世界中对隧道模型的三维激光扫描,为变形检测技术开发提供检测数据,建立变形检测实验样本集,实现对隧道变形检测方法的辅助训练,提高方法的精度和泛化能力,通过对比变形参考真值和变形检测实验数据,检验隧道变形检测方法的可行性。隧道变形检测技术研究的数字孪生框架如图1所示。

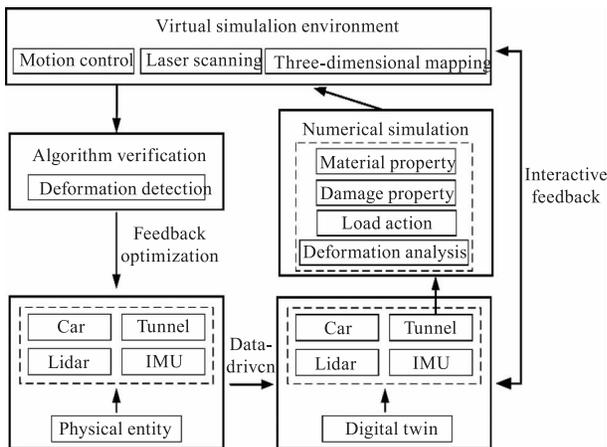


图1 隧道变形检测研究数字孪生框架

Fig. 1 Research on digital twin frame of tunnel deformation detection

3 隧道孪生模型

隧道孪生模型的建立是研究变形检测技术的第一步,为实现孪生模型对物理实体的真实映射,主要从几何方面、物理方面建立隧道孪生模型。几何方面通过三维激光扫描获得隧道内部点云,通过表面重建算法将点云转换成几何实体,从而实现隧道几何模型的建立。物理方面通过有限元软件建立隧道物理模型,输入隧道结构受力分析所需要的参数,例如材料特性、荷载作用、损伤特性等,有限元方法能对隧道变形进行合理分析,从而为变形检测技术研究提供准确的参考数据。

3.1 基于多半径滚球法的表面重建算法

传统滚球算法对不均匀点云数据重建会使得重建的网格模型产生“空洞”。本文提出多半径滚球法进行表面重建,在保证重建精度的同时减少网格模型“空洞”数量,多半径滚球法原理如图2所示,具体过程如下:

(1)种子三角形选取。随机选择一个单点,然后选取该点邻域内的两点构成一个三角形,原理如图2(a)所示,该三角形需满足:种子三角形三边边长尽量一致;种子三角形半径 R 的外接球中不包括任何点。

(2)三角网格拓展。该步骤通过半径为 R 的滚球沿着边界边进行滚动,直到接触到新点,将边界边与新点构成拓展三角形,对所有边均执行拓展操作,生成被测物体三角网格模型,原理如图2(b)所示。

(3)从图2(c)可以看出,通常一条边连接两个三角面片,即为内边,若某条边仅连接一个三角面片,则称为边界边,而网格“空洞”由边界边构成。在三角网格扩展阶段先通过较小半径的滚球滚动找点进行三角网格拓展,根据边界边特征提取“空洞”边界,通过点云分割获取边界点云,分割原理如图2(d)所示,针对边界点云,通过更大半径的滚球滚动找点,使得“空洞”内由新内边构成新的三角网格,原理如图2(e)所示,不断重复该步骤,直至“空洞”数量小于阈值,完成表面重建。

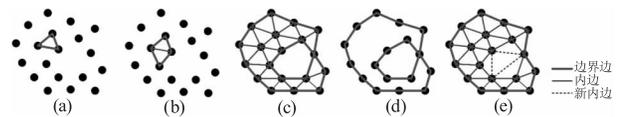


图2 多半径滚球法原理图

Fig. 2 Multi-radius rolling ball method schematic diagram

3.2 有限元分析

有限单元法将岩土介质和衬砌结构离散为仅在节点相连的诸单元,荷载作用于节点,利用插值函数考虑连续条件,由矩阵力法或矩阵位移法方程组统一求解岩土介质和衬砌结构的应力场和位移场。隧道变形一般由可变荷载导致,例如车辆荷载、列车荷载、施工荷载等,可变荷载导致地层产生附加应力,从而引起公路隧道产生沉降变形。为简化计算,计算模型做以下假定:

(1)假定土体为均匀、连续、各向同性、理想弹塑性,暂不做分层考虑,隧道变形已稳定。

(2)假定隧道与周围土体保持接触,隧道衬砌结构与土体始终是协调变形的,不考虑土体脱开、土体蠕变、排水固结的问题。

采用两段分析法求解既有隧道变形,首先求出作用在既有隧道上的附加应力。地表堆载假定为均匀矩形荷载,长为 L ,宽为 B 。基于 Boussinesq 基本解,对地表均布矩形荷载积分可得地面堆载作用在浅埋公路隧道位置处竖向附加应力 $q(x)$ 为:

$$\begin{cases} q(x) = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{3pz_0^3}{2\pi R^5} d\xi d\eta \\ R = \sqrt{(X-\xi)^2 + (Y-\eta)^2 + z_0^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P 为地面均布荷载; z_0 为隧道轴线埋置深度; R 为控制隧道与荷载中心相对位置的参数, X 、 Y 分别为全局坐标系 $\xi - \eta$ 下横、纵坐标。

取隧道一微元体受力分析, 根据材料力学理论, 可得微元体竖向受力平衡方程和弯矩平衡方程:

$$\begin{cases} q(x)Ddx - P_kDdx + dQ = 0 \\ Qdx + q(x)D \frac{(dx)^2}{2} - P_kD \frac{(dx)^2}{2} = dM \\ P_k = kw \end{cases} \quad (2)$$

式中, $q(x)$ 为荷载作用在隧道上的附加应力; Q 为剪应力; D 为既有隧道直径; M 为弯矩; P_k 为地基反力; k 为隧道所在地层基床反力系数; w 为隧道竖向位移。

4 变形检测方法

针对隧道因外力发生形变导致断面产生位移, 结合三维激光扫描技术, 本文提出一种新型的隧道全局变形检测方法, 总体流程如图 3 所示。该方法通过三维激光雷达获取隧道全局点云数据, 通过激光 SLAM 建立全局点云地图, 采用点云去噪、点云滤波、点云下采样对原始点云地图进行预处理, 针对隧道环境, 采用改进的 Geotransformer 神经网络来实现隧道点云配准。利用随机采样一致性算法拟合中轴线, 提取隧道断面, 根据点云沿标准断面法向的偏差值得到变形量, 从而实现隧道变形检测。



图 3 隧道变形检测流程图

Fig. 3 Flow chart of tunnel deformation detection

4.1 点云配准

点云配准的目的是为了将两次扫描中隧道相同位置的点云进行对齐, 从而区分出隧道的变形区域以及未变形区域, 方便最终进行点云对比及变形分析。由于隧道内部存在较多退化环境, 且变形会导致两次扫描的点云重叠度降低, 使得传统的基于特征点的配准方法难以适用, 而基于深度学习的点云配准方法能够有效解决此问题, 对低重叠度的点云也能实现较好的匹配效果, 本文采用改进的 Geotransformer 网络来实现隧道点云配准, 网络整体结构如图 4 所示。

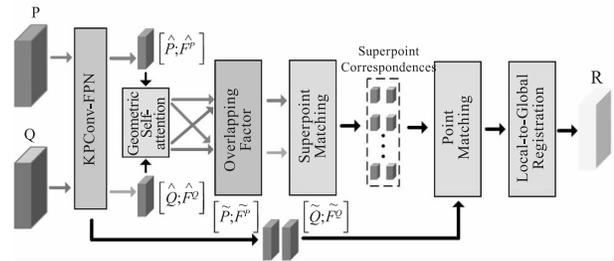


图 4 点云配准网络结构图

Fig. 4 Point cloud registration network structure diagram

Geotransformer 网络主要由三个模块组成: 超点采样与特征提取、超点匹配、点匹配与局部到全局配准。首先输入变形前的源点云 P 与变形后的目标点云 Q , 采用核点卷积及特征金字塔 (KPCConv-FPN) 对输入点云进行多级下采样并提取逐点特征, 第一级与最后一级下采样点对应密集点和超点, 密集点和超点及相关特征表示为 $[\tilde{P}; \tilde{F}^P]$ 、 $[\tilde{Q}; \tilde{F}^Q]$ 、 $[\hat{P}; \hat{F}^P]$ 、 $[\hat{Q}; \hat{F}^Q]$ 。超点匹配模块主要由几何自注意模块和重叠注意模块组成, 几何自注意模块学习超点之间的特征空间和几何空间中的全局相关性, 给特征注入全局信息; 而重叠注意模块利用超点在同一场景不同点云中的距离和角度一致的关系, 用交叉注意机制交互源点云和目标点云的超点特征并计算超点的重叠因子, 从而评估超点位于重叠区域的可能性, 然后通过高斯相关和双重规范化实现超点匹配。点匹配则根据超点的对应关系, 实现超点附近区域密集点的匹配, 然后通过超点附近的点对关系和加权奇异值分解得到每一个超点匹配的转换矩阵, 选出全局中点对最多的转换矩阵, 输出配准成功的点云 R 。利用均方根误差评价点云配准效果, 其定义为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_r)^2}{n}} \quad (3)$$

式中, n 为对应点对的数量, x_i 为配准后对应点之间的欧氏距离, x_r 为对应之间的欧氏距离的真值。绝对理想状态下, 完全配准后对应点之间的距离为 0, 因此对应点之间欧式距离的真值为 0。

4.2 中轴线提取

隧道中轴线包含的三维信息是确定隧道走势和整体变形趋势的重要表现数据, 本文采用随机采样一致性算法 (Random Sample Consensus, RANSAC) 拟合中轴线。RANSAC 算法能从一组包含“局外点”的观测数据中, 通过迭代计算的方法来估计最

符合该数据的数学模型,并计算出该数学模型的最佳参数,可以通过该数学模型对点云进行去噪和分割等处理。中轴线提取具体步骤如下:

(1)将配准过程中得到的隧道路面平面方程,通过罗德里格斯旋转公式使路面垂直于 z 轴;

(2)调整隧道点云坐标系,使隧道走向大致沿 y 轴方向,然后将点云投影至 xoy 面;

(3)从 $y_i = y_{\min}$ 开始,沿 y 轴方向设置适当步长 Δy ,在 $(y_i, y_i + \Delta y)$ 范围内投影,投影点云 x 坐标的最大值 x_{\max} 、最小值 x_{\min} ;

(4)计算最值平均值 $x_i = (x_{\max} + x_{\min})/2$ 作为中轴点的 x 坐标,则 y_i 对应的中轴点坐标为 (x_i, y_i) ;

(5)对剩余点云依次进行步骤(3)、(4),输出剩下的中轴点,再通过 RANSAC 算法拟合中轴线,输出中轴线方程。

4.3 点云对比

沿中轴线法向进行点云切片,设置合适的断面厚度与断面间隔,通过依次计算目标断面上各点到标准断面的距离,作为每一个点相对于标准断面的偏差值。设目标断面上任意一点 $P(x_0, y_0, z_0)$,搜索标准断面点云中离 P 点距离最短的数个点,设为 $\{k_1, k_2, \dots, k_n\}$,通过 RANSAC 算法拟合参考平面,设参考平面方程为 $ax + by + cz + d = 0$,可得 P 点的偏差值即为参考平面到 P 点的法向距离 d_i :

$$d_i = \frac{|ax_0 + by_0 + cz_0 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (4)$$

根据偏差值计算隧道变形值,隧道的变形可以从不同的尺度和变形特征进行分析,如断面法向变形、椭圆度、轴线变形等变形分析指标。根据隧道的受力特点,衬砌垂直和水平两个方向是两个特殊的受力方向,因此隧道在垂直和水平方向上的偏差值可以反映隧道结构变形状态。

5 实验分析

5.1 数据采集及建立模型

为验证本文方法可行性,采集某段隧道数据,开展算法分析,实验设备为汽车搭载 Velodyne VLP-16 激光雷达和 IMU 传感器,获得隧道内部完整点云数据,基于激光 SLAM 的 LIO-SAM 算法构建隧道点云地图,为加速计算,截取其中一段隧道进行实验,为提高隧道表面重建质量,对隧道原始点云数据进行

预处理,去除噪声及隧道附加设备,并对隧道点云进行下采样,方便下一步对隧道进行表面重建。图 5 (a)为隧道原始点云,图 5(b)为预处理结果。

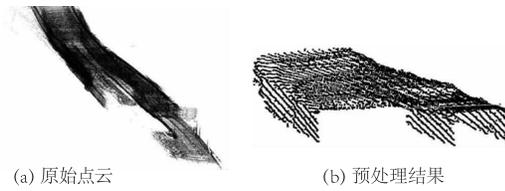


图 5 隧道点云预处理实验结果

Fig. 5 Experimental results of tunnel point cloud pretreatment

在预处理方面,从表 1 可以看出,隧道原始点云经过预处理后点云数减少了大约 91.1%,能够较好地去除离群点,在对点云进行精简的同时能够较好地保留隧道内部细节,在不改变目标物体外在形状的同时,对目标物体进行近似体素栅格法下采样,提高三维几何模型构建速度及精度。

表 1 点云预处理统计表

Tab. 1 Statistical table of point cloud preprocessing

Initial points	51141
Point cloud segmentation	15809
Percentage of point cloud segmentation/%	30.91
Remove outliers	12282
Percentage of outliers/%	24.01
Pointcloud subsampling	18498
Percentage of subsampling/%	36.17
Final points	4552

针对点云网格化采用多半径滚球法,由于泊松重建对于非封闭点云的重建效果不佳,会产生多余面片,而移动立方体法在点云边缘部分会额外产生大量面片,降低重建质量,为直观体现方法的性能,与贪婪投影三角化法及传统滚球法进行对比,通过图 6 可以直观看出,贪婪投影三角化法与传统滚球法均会产生点云“空洞”问题,而本文方法点云网格化效果更好,能有效解决不均匀点云重建“空洞”问题,提高隧道表面重建质量。同时基于 Cloudcompare 软件,对方法进行定量的误差对比,评估指标以预处理后的隧道点云为基础,计算其任一点到重建模型最邻近面片距离的平均误差和最大误差。从表 2 可看出,由于贪婪投影三角化法对重建点云质量要求较高,且不能在三角化的同时对曲面进行平滑

和孔洞修复,所以平均误差高于传统滚球法 73 % , 本文方法表面重建平均误差较传统滚球法降低 15.1 % ,重建模型更加接近真实隧道。

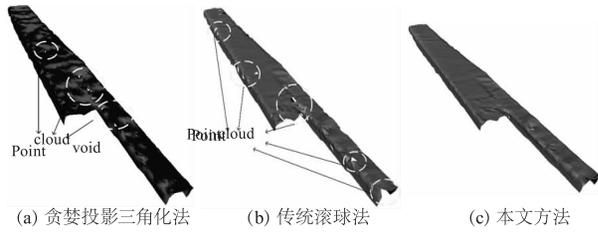


图 6 重建效果

Fig. 6 Reconstruction effects

表 2 重建精度对比

Tab. 2 Comparison of reconstruction accuracy

Method	Maximum errors/mm	Average errors/mm
Greedy projection triangulation	1.1205	0.00517
Ball pivoting	1.13058	0.00298
Ourmethod	1.13058	0.00253

5.2 有限元仿真

本文基于有限元软件 Abaqus,建立隧道三维有限元物理模型,模拟公路隧道运营过程中的受力及变形情况,为变形检测提供充足的数据依据。为减小计算量,取隧道模型其中一段进行有限元分析,建立隧道埋深为 5 m 的三维模型,模型的长、宽、高分别为 40 m、10 m、30 m,隧道结构包含 C30 混凝土喷层、C25 混凝土衬砌两部分,厚度分别为 0.3 m 和 0.1 m,模型上方为城市公路,厚度为 1 m,公路结构包括面层和基层,面层由 AC-13、AC-20、AC-25 材料构成,厚度为 20 cm,基层由水稳碎石构成,厚度为 80 cm;为保证模型侧边不发生法向位移,模型底部不产生任何位移,对模型侧面施加法向约束,对模型底部采用固定约束;隧道喷层和衬砌采用弹性材料,土体采用基于莫尔 - 库仑 (Mohr-Coulomb) 屈服准则的理想弹塑性材料;模型单元类型为八结点线性六面体单元 (C3D8R)。隧道有限元模型如图 7 所示,各结构材料参数如表 3 所示。

有限元分析过程如下,首先建立土体 - 隧道模型,为模拟土体与隧道的相互作用,采取的接触方式为面面接触,其中法向接触属性为硬接触;切向接触属性为摩擦接触,摩擦系数为 0.12。土体网格尺寸为 1 m,喷层和衬砌的网格尺寸均为 1 m。编写 dload 子程序模拟一辆或两辆 50 吨重载

货车从模型上方路面行驶,分析对隧道变形的影响,输出隧道变形数据。隧道各横断面顶部垂直沉降曲线如图 8 所示,图中各曲线分别代表隧道对应的横断面,图 8 (a) 为 scene1 即单独一辆 50 吨重载货车从路面靠右位置行驶至隧道上方,图 8 (b) 为 scene2 即两辆 50 吨重载货车并行行驶至隧道上方。

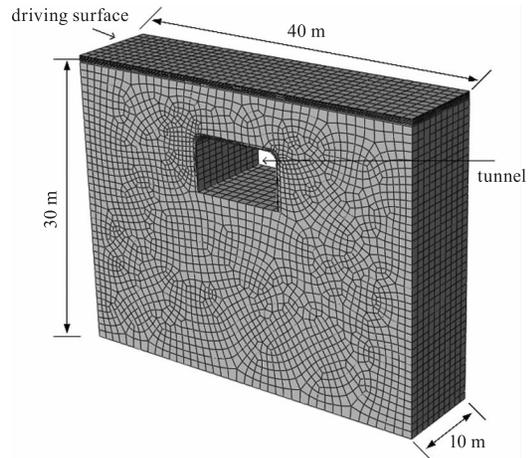


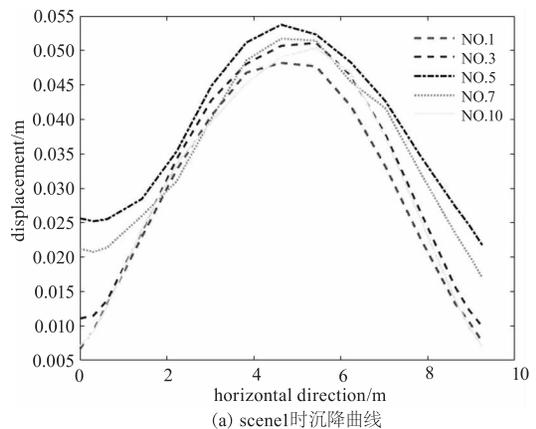
图 7 隧道有限元模型

Fig. 7 Tunnel finite element model

表 3 隧道结构主要参数

Tab. 3 Main parameters of tunnel structure

Structure	Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Elastic Modulus E / MPa	Poisson ratio μ
Soil	2500	5	0.3
C30	2400	28000	0.167
C25	2400	30000	0.167
AC - 13	2300	1350	0.25
AC - 20	2450	1200	0.25
AC - 25	2600	1000	0.25
Water stabilized macadam	2077	2100	0.25



(a) scene1时沉降曲线

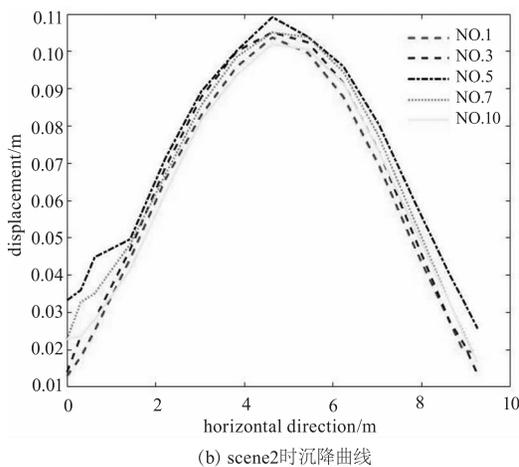


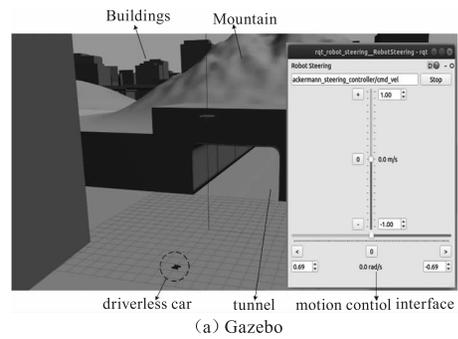
图 8 隧道各横断面垂直沉降曲线

Fig. 8 Vertical settlement curve of tunnel cross section

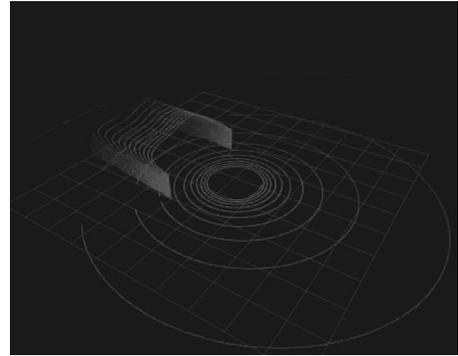
由于重载货车对隧道顶部的压力要远大于两侧所受到的压力,隧道竖直方向上的形变程度大于水平方向的形变程度,所以主要针对隧道垂直沉降进行分析,从图 8(a)可以看出,scene1 情况下隧道中间及靠右部分的垂直沉降较其他部分更大,左右的沉降区分较为明显,各横断面垂直沉降类似于正态分布,隧道中间部分顶部垂直沉降最大,最大超过 5 cm,然后沿径向方向逐渐减小,最小约 0.6 cm;而从图 8(b)可以发现,scene2 情况下隧道各位置的沉降幅度较为接近,且各横断面垂直沉降依旧类似于正态分布,最大沉降接近 11 cm,最小约 1.5 cm。

5.3 虚拟仿真环境搭建及数据采集

搭建虚拟仿真环境采用 Linux 操作系统 Ubuntu18.04 机器人操作系统 (Ros Melodic) 和仿真平台 Gazebo 9,显卡为 GeForce GTX 3090,显存 16 G。通过 Soilworks 建模和编写 urdf 文件完成无人车及传感器模型建立,利用 Google 地图及 CityEngine 软件对隧道周边环境建立模型,将上述模型及有限元分析后的隧道模型均导入到虚拟仿真环境中。仿真系统提供人机交互接口,通过运动控制界面控制无人车的移动和转向,在 Gazebo 和 Rviz 实时观察无人车的运动,然后通过激光 SLAM 对采集到的点云数据进行地图构建,完整重建出隧道模型内部环境的三维点云地图。图 9 中,图 9(a)为 Gazebo 下控制无人车采集隧道模型内部点云数据,图 9(b)为 Rviz 显示三维激光雷达实时扫描效果。



(a) Gazebo



(b) Rviz

图 9 虚拟仿真环境

Fig. 9 Virtual simulation environment

5.4 变形检测分析

将隧道原始点云经过预处理后,构建变形检测数据集,根据 Geotransformer 网络使用数据集案例和自建隧道数据集,划分训练数据与测试数据之比为 4:1,将数据转换成 ModelNet40 标准数据集,对网络进行有效训练。以倒角距离 (Chamfer Distance, CD) 作为训练评价指标,倒角距离表示两组点云之间的平均最近平方距离,值越低则配准效果越好。最终得到的倒角距离为 0.0091 m,相比于 DCP-v2、RPM-Net 等方法效果更好。为进一步验证本文方法的配准效果,分别采用 GICP、Point-to-plane ICP、ICP、NDT 进行对比,图 10(a) 为配准前的效果,图 10(b) ~ (f) 分别为 GICP、Point-to-plane ICP、ICP、NDT、本文方法的配准效果,从图 10(b) ~ (d) 可以直观看出 GICP 和 Point-to-plane ICP、ICP 陷入局部最优解,正视图中未产生变形的地面点云不完全重叠,侧视图中两幅点云出现错位,由于待配准点云初始位置较好,并且由于隧道环境特征退化,只考虑点与点之间距离关系的 ICP 反而配准效果更好,从图 10(e)、图 10(f) 可以看出 NDT 与本文方法均能较好区分出隧道点云重叠与非重叠部分,较为直观的观察出隧道发生变形的部分。

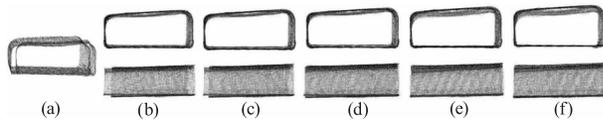


图 10 点云配准效果图

Fig. 10 Point cloud registration effect

利用配准后点云的均方根误差及配准时间对配准结果进行定量分析,从表 4 可知,GICP 与 Point-to-plane ICP 的配准时间低于 ICP,但均方根误差均高于 ICP,而 ICP 是根据点与点之间的距离关系进行配准,且配准时间与其迭代次数有关,所以配准时间远高于其他方法,由于 NDT 是根据概率密度函数实现配准,对于不完全重叠的点云配准效果更好,所以均方根误差均要低于 ICP 类的方法,但配准时间较高,而本文方法的均方根误差约为 NDT 的 30%,而配准时间更是远低于其余四种方法,无论从精度还是效率都表现出更好的效果。

根据隧道中轴线共提取 10 个断面,本文认为有限元方法输出变形量为变形真值,从虚拟仿真环境中获得的扫描数据作为检测值,有限元模型的网格宽度为 1 m,而设定切片厚度 30 cm,切片间隔 70 cm,故能保证每个横断面检测值都能与有限元模型对应位置输出变形真值进行对比分析,检验变形检测方法的可行性及精度。图 11 为隧道横断面提取效果。

表 4 配准算法对比

Tab. 4 Comparison of registration algorithms

Method	RMSE/m	Registration time/s
GICP	0.0724523	38.53
Point-to-plane ICP	0.0663015	23.29
ICP	0.0540097	90.67
NDT	0.0439395	47.57
Our method	0.0150634	2.44

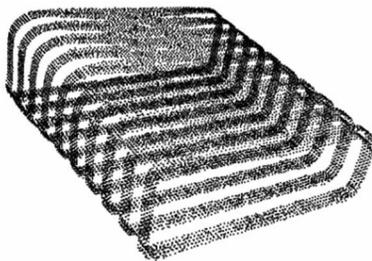
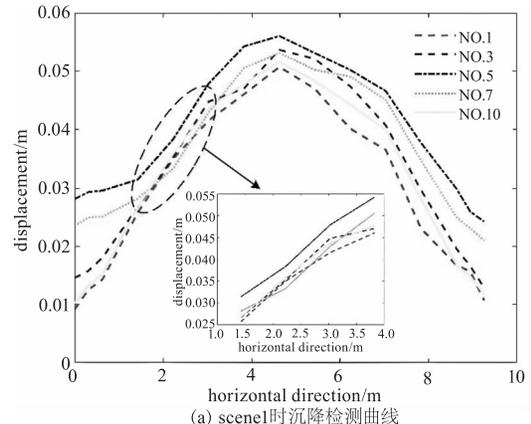


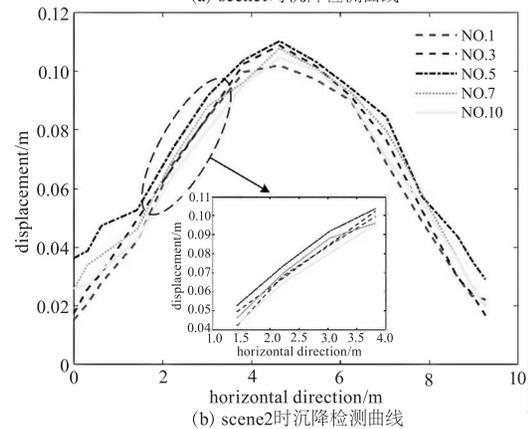
图 11 隧道横断面

Fig. 11 Tunnel cross section

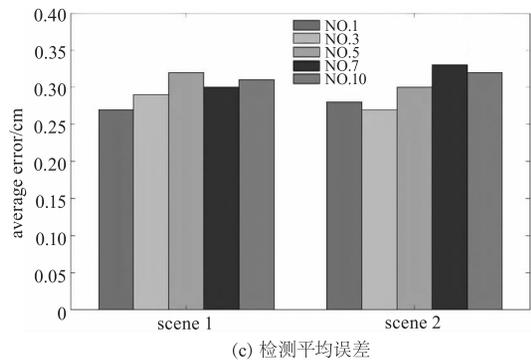
由有限元分析输出结果可知,该隧道模型变形主要为顶部垂直沉降,故主要计算目标横断面顶部点云至参考断面偏差值,作为变形量输出。隧道变形检测数据如下图所示,图 12(a)为 scene1 情况下隧道垂直沉降检测曲线,图 12(b)为 scene2 情况下隧道垂直沉降检测曲线,图 12(c)为检测平均误差。从图 12 可以直观看出,垂直沉降检测曲线同样类似于正态分布,与有限元分析输出的沉降曲线较为相似。



(a) scene1时沉降检测曲线



(b) scene2时沉降检测曲线



(c) 检测平均误差

图 12 隧道各横断面沉降检测效果

Fig. 12 Detection effect of settlement of tunnel cross section

对比分析图 8 和图 12 可知,变形检测平均误差小于 0.34 cm,误差在 0.25 cm、0.3 cm 以下占比约为 62%、81%,结合《城市轨道交通工程监测技术规范》,根据规范中 III 级变形检测误差需小于

± 6 mm,本文方法的检测精度基本满足工程要求,证明本文提出的变形检测方法能较好地检测出隧道变形,基本反映隧道真实的变形情况。

6 结 论

针对隧道变形检测技术研究受实验场地限制等问题进行研究,提出基于数字孪生建立高保真的隧道孪生模型,采用有限元方法模拟多场景下的隧道变形,为变形检测方法的验证提供变形真值,搭建虚拟仿真平台,实现在虚拟环境中对隧道孪生模型进行三维激光扫描,为变形检测方法的训练提供训练数据,本文取得主要成果如下:

(1)改进点云网格化方法,相比传统滚球法,表面重建平均误差降低 15.1%,能较好解决点云网格化出现的“空洞”问题,但依然有密度较小的局部点云会产生空洞,还需再改进。

(2)针对隧道环境,提出了基于深度学习的 Geotransformer 神经网络实现隧道点云配准,相比传统方法,平均误差降低 66%,提高配准效率,在隧道环境中均优于其他对比方法。

(3)改进变形检测算法,通过中轴线获得横断面进行变形分析,计算目标断面上各点到标准断面的距离作为变形值,有效地检测出隧道变形,平均误差小于 0.34 cm,误差在 0.25 cm、0.3 cm 以下占比约为 62%、81%,虽基本满足工程要求,但最大误差接近 0.45 cm,并且本文方法主要针对隧道顶部的垂直沉降问题进行检测,还需提高检测方法精度和泛化能力。

参考文献:

- [1] Chen Xin, Jiang Ruiling. Application of 3D laser scanning technology in deformation monitoring of active freeway tunnels[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013, (35): 113 - 114, 118. (in Chinese)
陈欣,江瑞龄. 三维激光扫描技术在高速公路现役隧道变形监测上的应用[J]. 科技创新导报, 2013, (35): 113 - 114, 118.
- [2] Luo Yanbin, Chen Jianxun, Zhai Yuhui. Comparison of total station RDM method and 3D method to measure tunnel deformation accuracy[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(3): 56 - 64. (in Chinese)
罗彦斌,陈建勋,翟宇辉. 全站仪 RDM 法与 3D 量测法量测隧道变形精度对比[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(3): 56 - 64.
- [3] Delaloye D, Diederichs M S, Walton G, et al. Sensitivity testing of the newly developed elliptical fitting method for the measurement of convergence in tunnels and shafts [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48 (2): 651 - 667.
- [4] Yasuda N, Cui Y. Deformation estimation of a circular tunnel from a point cloud using elliptic Fourier analysis [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 7: 125.
- [5] Lukas Fahle, Elizabeth A Holley, Gabriel Walton, et al. Analysis of slam based lidar data quality metrics for geotechnical underground monitoring [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2022, 39(5): 1939 - 1960.
- [6] Sitnik R, Puech W, Wang W, et al. Continuous section extraction and over-underbreak detection of tunnel based on 3D laser technology and image analysis [C]//IAF 50th International Astronautical Congress, Nether Landes, Amsterdam, 1994.
- [7] Li Chen, Lu Xiaoping, Zhu Ningning, et al. Continuous extraction and deformation analysis of tunnel section based on laser point cloud [J]. Journal of Surveying and Mapping, 2015, 44(9): 1056 - 1062. (in Chinese)
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.
- [8] Zhang Hui, Li Kai. Application of 3D laser scanning technology in highway tunnel construction monitoring [J]. Highway Engineering, 2018, 43(4): 230 - 234, 268. (in Chinese)
张慧,李凯. 三维激光扫描技术在公路隧道施工监测中的应用研究[J]. 公路工程, 2018, 43(4): 230 - 234, 268.
- [9] Wu Cangrui, Huang Hongwei, Shao Hua. Detection method and application of laser scanning for transverse deformation of subway tunnel [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(3): 863 - 872, 881. (in Chinese)
吴昌睿,黄宏伟,邵华. 地铁隧道横向变形的激光扫描检测方法及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 863 - 872, 881.
- [10] Liu Xingen, Chen Yingying, Liu Xuezheng. Rapid detection of section deformation of shield tunnel by laser scanning [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 107 - 116. (in Chinese)
刘新根,陈莹莹,刘学增. 激光扫描盾构隧道断面变形快速检测[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 107 - 116.
- [11] Liu Xingen, Xu Minjuan, Xing Zixin. Rapid detection of subway tunnel convergence and deformation based on laser scanning [J]. Urban Rail Transit Research, 2022, 25

- (9):63-68. (in Chinese)
- 刘新根,许敏娟,邢智馨. 基于激光扫描的地铁隧道收敛变形快速检测技术[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(9):63-68.
- [12] Zhang Lisuo, Cheng Xiaojun. Tunnel deformation analysis method based on laser point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers,2018,45(4):225-230. (in Chinese)
- 张立朔,程效军. 基于激光点云的隧道形变分析方法[J]. 中国激光,2018,45(4):225-230.
- [13] Tian Kuo, Sun Zhiyong, Li Zengcong. High-precision digital twin method for structural static test monitoring[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2024,7:1-13. (in Chinese)
- 田阔,孙志勇,李增聪. 面向结构静力试验监测的高精度数字孪生方法[J]. 航空学报,2024,7:1-13.
- [14] Li Dongxue, Liu Yan, Shen BoY, et al. Research on carbon footprint analysis and low carbon optimization method simulation of power transformers based on digital twin technology[J/OL]. Journal of System Simulation: 1-12 [2024-08-01] <http://doi.org/10.6182/j.issn1004731x.joss.23-0605>. (in Chinese)
- 李冬雪,刘岩,沈博垚,等. 基于数字孪生技术的电力变压器碳足迹分析及低碳优化方法仿真研究[J/OL]. 系统仿真学报:1-12 [2024-08-01] <http://doi.org/10.6182/j.issn1004731x.joss.23-0605>.
- [15] Liang Hogntao, Kong Lingcao, Liu Guozhu, et al. ASL-CatBoost method for wind turbine fault detection based on digital twin[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(4):873-887. (in Chinese)
- 梁宏涛,孔翎超,刘国柱,等. 融合数字孪生的风电机组故障检测 ASL-CatBoost 方法[J]. 系统仿真学报, 2024,36(4):873-887.
- [16] Zhang Chao, Liu Zhengan, Lang Zhixiong, et al. Digital twin test method for adjacent engineering construction loads[J]. Journal of Civil Engineering, 2022, 55(7):121-128. (in Chinese)
- 张超,刘拯安,郎志雄,等. 近接工程建设荷载的数字孪生试验方法[J]. 土木工程学报, 2022,55(7):121-128.